



DANIEL BERNARDES DE CASTRO

**INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DOS EFEITOS DA
VIBRAÇÃO MECÂNICA NA TÉCNICA *BIOSPECKLE* LASER
PARA APLICAÇÃO EM EQUIPAMENTOS PORTÁTEIS**

LAVRAS – MG

2020

DANIEL BERNARDES DE CASTRO

**INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DOS EFEITOS DA VIBRAÇÃO MECÂNICA NA
TÉCNICA *BIOSPECKLE* LASER PARA APLICAÇÃO EM EQUIPAMENTOS
PORTÁTEIS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas e Automação, área de concentração em Automação e Instrumentação de Sistemas, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. DSc. Roberto Alves Braga Jr.

Orientador

Prof. DSc. Henrique Leandro Silveira

Coorientador

LAVRAS – MG

2020

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio autor(a).**

Bernardes de Castro, Daniel

Investigação experimental dos efeitos da vibração mecânica na técnica *biospeckle* laser para aplicação em equipamentos portáteis / Daniel Bernardes de Castro. – Lavras : UFLA, 2020.

74 p. : il.

Dissertação (mestrado acadêmico)–Universidade Federal de Lavras, 2020.

Orientador: Prof. DSc. Roberto Alves Braga Jr..

Bibliografia.

1. Dynamic speckle. 2. Portabilidade. 3. Vibração. I. Alves Braga Jr., Roberto II. Leandro Silveira, Henrique. III. Título.

DANIEL BERNARDES DE CASTRO

**INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DOS EFEITOS DA VIBRAÇÃO MECÂNICA NA
TÉCNICA *BIOSPECKLE* LASER PARA APLICAÇÃO EM EQUIPAMENTOS
PORTÁTEIS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas e Automação, área de concentração em Automação e Instrumentação de Sistemas, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 10 de Julho de 2020.

Prof. DSc. Roberto Alves Braga Jr.	UFLA
Prof. DSc. Henrique Leandro Silveira	UFLA
Prof. DSc. Carlos Alberto Carvalho Castro	CEFET-MG
Prof. DSc. Carlos Antônio Rufino	CEFET-MG
Dsc. Ellem Waleska Nascimento da Fonseca Contado	UFLA

Prof. DSc. Roberto Alves Braga Jr.
Orientador

Prof. DSc. Henrique Leandro Silveira
Coorientador

**LAVRAS – MG
2020**

À minha mãe, ao meu pai e ao meu irmão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à UFLA pela infraestrutura, oportunidade e pelas aulas gratuitas de yoga, capoeira, violão e inglês. Ao orientador Roberto Braga e ao coorientador Henrique Silveira pela atenção, orientação e disponibilidade. Ao pós-doutorando Fernando Pujaco, que me ajudou com os problemas de programação e software. Ao meu pai, mãe e irmão. Ao meu companheiro de pesquisa José Eduardo pelas discussões produtivas. Aos membros da banca que disponibilizaram seu tempo para ler e avaliar este trabalho. Ao Pré-Uni pela oportunidade de exercer a docência. Ao pessoal da república: Mateus, Dione, Rufino, Victor, Bill Santos e Álvaro. À diarista Deusa. Aos meus amigos de rolé musical, Matheus e André. Ao Scarano, ao Ernani. Aos professores Fábio Lúcio e Belisario. À Fernanda, da secretaria da pós, e ao coordenador, Professor Danton, por todo suporte. Ao pessoal do Laboratório de Mecânica Aplicada (LMA) pela simpatia, camaradagem e assistência: Vinícius, Basílio, Lucas, Yuri, Cozol, Daud e Godonhoto. Ao pessoal do CEDIA pela companhia e conversas polêmicas e interessantes após o almoço: Giovanni, Bianca, Ellem, Elisângela, Henrique, Alcebíades, Gabriel, Thiago, Roberto, Sérgio e Marcos. Aos colegas da Pós. Às faxineiras, cozinheiras, jardineiros, técnicos e demais funcionários. Às amizades feitas em Lavras e aos bons momentos vividos nesta cidade bacana. Muito obrigado! O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

*Sou de Formiga, terra do Padre Fábio de Melo.
(Daniel Bernardes de Castro)*

RESUMO

O *speckle* laser dinâmico (SLD) e o *biospeckle* laser (BSL) são técnicas desenvolvidas com base no processamento dos padrões de interferência óptica formados quando uma luz laser incide sobre uma superfície dinâmica, como uma secagem de tinta, ou biológica, como sementes, folhas ou frutas. Essas técnicas não destrutivas e não invasivas de processamento de imagens são utilizadas para quantificar o nível de atividade em amostras biológicas ou não biológicas. Diversos trabalhos já foram desenvolvidos em diferentes áreas, que vão desde a Agricultura até a Medicina, sendo observado, nos últimos anos, um aumento no número de aplicações e publicações sobre a utilização da técnica. Apesar dos resultados expressivos, tais trabalhos, em geral, são desenvolvidos em ambiente laboratorial. A aplicação *in loco* faz-se necessária para o avanço da técnica no âmbito comercial, dado que nem sempre é viável deslocar amostras biológicas até um laboratório para serem analisadas. No entanto, existem limitações para a utilização da técnica no campo. Obter uma configuração experimental integrada e compacta, uma estabilidade do laser e da fonte de alimentação, e também prevenir a interferência de ruídos externos, como luminosidade e principalmente vibração, são desafios que a técnica precisa enfrentar com relação à portabilidade. Poucos estudos foram realizados nesse sentido. Estudos mostram que a técnica BSL é sensível a vibrações externas, e visando compreender o grau de sensibilidade a essas interferências bem como propor formas de atenuá-las, neste trabalho foi desenvolvido um protótipo portátil para análises SLD e o mesmo foi submetido a diversos testes de vibração, tais como análise modal experimental e transmissibilidade. Testes SLD foram realizados paralelamente. Foram obtidas as frequências naturais do protótipo e como a técnica óptica se comporta quando excitada nessas e nas demais frequências, numa faixa de 0 a 1000 Hz. Foi descoberto que o BSL é mais sensível às baixas frequências, próximas a 5 Hz. Nos testes de transmissibilidade, onde foram analisadas a transmissibilidade de vibração de 11 isoladores de vibração, foi constatado que o isolador de menor rigidez foi o que apresentou as melhores características de isolamento de vibração para os fins propostos, tornando possível a portabilidade do protótipo a partir do isolamento das vibrações mecânicas externas ordinárias.

Palavras-chave: *Dynamic speckle*. Portabilidade. Vibração. Análise modal. Transmissibilidade.

ABSTRACT

The dynamic laser speckle (DLS) and biospeckle laser (BSL) are techniques developed based on the processing of optical interference patterns formed when a laser light strikes a dynamic surface, such as a paint drying, or biological, like seeds, leaves or fruits. These non-destructive and non-invasive image processing techniques are used to quantify the activity level of biological or non-biological samples. Several studies were already developed in different areas, from Agriculture to Medicine. It has been observed in recent years an increase in the number of applications and publications about the use of the technique. Despite the expressive results, such studies, in general, are developed in a laboratory environment. The on-site application is necessary for the advancement of the technique in the commercial scope, since it is not always feasible to move biological samples to a laboratory to be analyzed. However, there are limitations in the use of the technique in the field. Obtaining an integrated and compact experimental configuration, a laser and power supply stability, and also prevents external noise interference, such as luminosity and vibration mainly, are challenges that the technique needs to face regarding the portability. Few studies have been carried out in this sense. Studies show that the BSL technique is sensitive to external vibrations, and aiming to understand the level of these interferences as well as to propose ways to mitigate them, in this work it was developed a portable prototype for SLD analysis. This equipment was subjected to various vibration tests, such as experimental modal analysis and transmissibility. SLD tests were performed in parallel. The prototype's natural frequencies were obtained. It was evaluated how the optical technique behaves when excited at these and other frequencies, in a range from 0 to 1000 Hz. It was discovered that BSL is more sensitive to low frequencies, close to 5 Hz. In the transmissibility tests, where the vibration transmissibility of 11 vibration isolators was analyzed, it was found that the isolator with the lower stiffness presented the best characteristics of vibration isolation for the proposed purposes, making possible the portability of the prototype from the isolation of ordinary external mechanical vibrations.

Keywords: Dynamic speckle. Portability. Vibration. Modal analysis. Transmissibility.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Ilustração de um padrão <i>speckle</i> obtido após a iluminação de uma superfície por um laser.	13
Figura 2.2 – Esquema da construção do THSP e COM.	14
Figura 2.3 – THSPs e matrizes de coocorrência de folhas de seringueira.	16
Figura 2.4 – Exemplo de configuração experimental laboratorial (a), mesa anti-vibração e câmara de isolamento luminoso (b).	17
Figura 2.5 – Equipamentos comerciais de análise SLD.	18
Figura 2.6 – Sistema mecânico com N graus de liberdade.	22
Figura 2.7 – Visão geral esquemática da função resposta em frequência.	24
Figura 2.8 – Modelo excitação-resposta e FRF de uma placa simples.	24
Figura 2.9 – Variação de T_d com r	26
Figura 3.1 – Configuração experimental compacta.	29
Figura 3.2 – Protótipo.	30
Figura 3.3 – Configuração experimental dos testes de secagem de tinta para validação.	31
Figura 3.4 – Posições dos acelerômetros no protótipo.	33
Figura 3.5 – Teste modal experimental - Orientação dos eixos.	34
Figura 3.6 – Configuração experimental para a análise modal.	34
Figura 3.7 – Isoladores utilizados.	39
Figura 3.8 – Configuração experimental - Teste de transmissibilidade e SLD.	41
Figura 3.9 – Configuração experimental do teste de transmissibilidade com o protótipo suspenso pelo cavalete.	41
Figura 4.1 – Massa de tinta de esmalte x tempo.	44
Figura 4.2 – Massa de esmalte x tempo (média dos valores normalizados das 4 réplicas).	45
Figura 4.3 – FRFs por eixo (0 a 1000 Hz).	46
Figura 4.4 – FRFs por eixo (0 a 200 Hz).	47
Figura 4.5 – Médias das amplitudes por eixo.	49
Figura 4.6 – AVD x Frequência.	51
Figura 4.7 – AVD x Ruído branco.	52
Figura 4.8 – Transmissibilidades.	53
Figura 4.9 – Transmissibilidades - Espumas.	54
Figura 4.10 – Transmissibilidades - Borracha, vibra-stop e molas.	54

Figura 4.11 – Transmissibilidades - Plástico bolha e cavaletes.	55
Figura 4.12 – AVD x Frequência - Amplitude.	59
Figura 4.13 – AVD x Frequência - Amplitude.	60
Figura 4.14 – AVD x Frequência - Amplitude.	61
Figura 4.15 – AVD x Ruído branco.	61
Figura 4.16 – Resposta temporal de vibração no laboratório CEDIA e LMA (aceleração (m/s ²) x tempo (s)).	62
Figura 4.17 – Resposta temporal de vibração nas Posições 1 e 2 e nas três amplitudes avaliadas (aceleração (m/s ²) x tempo (s)).	63
Figura 1 – Saída gráfica fornecida pelo SR785 - Sinal do AC5 sendo excitado em var- redura <i>chirp</i> de 0 a 200 Hz.	71
Figura 2 – Coerências- Eixos X, Y e Z.	72
Figura 3 – Padrão <i>speckle</i> na excitação em 210 Hz no eixo X (a), Y (b) e Z (c)*.	73
Figura 4 – Padrão <i>speckle</i> regular.	73
Figura 5 – Coerências - Transmissibilidades.	73
Figura 6 – Transmissibilidades PLABOL, ESPPRE e ESPBRA.	74
Figura 7 – Transmissibilidades MOLAGD, CAVNYL e CAVELA.	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Faixas de frequência e quantidade de varreduras.	36
Tabela 3.2 – Discretização por faixa de frequência.	37
Tabela 3.3 – Isoladores utilizados.	40
Tabela 3.4 – Condições experimentais	42
Tabela 4.1 – AVD de referência.	45
Tabela 4.2 – Frequências naturais extraídas.	48
Tabela 4.3 – Ressonância e magnitude.	56
Tabela 4.4 – Valores de AVD por frequência e amplitude.	58
Tabela 4.5 – RMS - Excitações em ruído branco.	63

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Objetivos	12
1.1.1	Objetivo geral	12
1.1.2	Objetivos específicos	12
1.2	Contribuições originais	12
2	REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1	<i>Speckle</i> laser dinâmico	13
2.2	Portabilidade da técnica SLD	17
2.3	Vibração, análise modal e transmissibilidade	20
3	MATERIAL E MÉTODOS	28
3.1	Desenvolvimento do protótipo	29
3.2	Validação do protótipo	30
3.3	Valor AVD de referência em superfície inerte	31
3.4	Obtenção das frequências naturais do protótipo	32
3.5	Análise <i>speckle</i> laser dinâmico por frequência e <i>software</i> utilizados	36
3.6	Avaliação da vibração em condições reais e transmissibilidade	38
3.7	Magnitude das vibrações em um ambiente de trabalho	43
4	RESULTADOS	44
4.1	Validação do protótipo por meio da análise de secagem de tinta	44
4.2	Valor AVD de referência em superfície inerte	45
4.3	Frequências naturais do protótipo	45
4.4	AVD x Frequência	50
4.5	Resultados de transmissibilidade	52
4.6	Resultados AVD x Frequência com os isoladores de vibração	56
4.7	Comparações em magnitude das vibrações excitadas com as vibrações em um ambiente de trabalho	62
5	CONCLUSÃO	65
5.1	Trabalhos futuros	65
	REFERÊNCIAS	67
	ANEXO A – Figuras complementares	71

1 INTRODUÇÃO

O *biospeckle* laser (BSL) é um fenômeno de interferometria óptica que foi adaptado como uma ferramenta sensível para detecção de mudanças em superfícies biológicas. Por ser uma técnica não destrutiva, não invasiva e de baixo custo, tornou-se muito vantajosa para estudos em diversas áreas do conhecimento, como na biologia, agronomia e biomedicina.

Nos últimos anos, o número de artigos publicados relacionados à técnica *biospeckle* laser ou *speckle* laser dinâmico (SLD) foi crescente. Atualmente, a maioria dos artigos abordam algum tipo de aplicação da técnica, o que indica uma tendência de estabilização no número de trabalhos voltados à melhoria da mesma. Apesar de ainda não existir um padrão específico de análise para as diversas possibilidades de medições, pode-se dizer que o *biospeckle* laser encontra-se relativamente bem desenvolvido com relação às metodologias e análises experimentais adotadas na técnica.

Já os trabalhos voltados às aplicações do *biospeckle* laser podem enfrentar desafios, uma vez que a maioria das análises se limitam aos laboratórios de óptica. No que concerne a análises em superfícies biológicas, como sementes, frutas, folhas, raízes, esperma animal e parasitas, nem sempre é possível ou viável deslocar a amostra até um laboratório para ser analisada, o que de algum modo dificulta o avanço da técnica no âmbito comercial.

Vários trabalhos promissores foram publicados na área de agronomia e todos eles foram realizados em laboratórios com ambiente controlado, o que evidencia a dificuldade da execução de análises em campo e justifica a escassez de trabalhos que visam a portabilidade da técnica.

Com os métodos já bem desenvolvidos na atualidade, a adoção da técnica BSL não se torna complexa, necessitando-se basicamente, de uma câmera, um computador, um laser e programas computacionais. Todavia, para aplicação em campo, existem desafios de *software* e, principalmente, de *hardware*. Em relação ao *software*, faz-se necessário uma padronização dos algoritmos e programas para realização da análise e tratamento das imagens. Quanto ao *hardware*, entre outros fatores, é necessário um laser que tenha boa estabilidade e que seja compacto; a câmera deve ser ajustável, pequena e possuir bons parâmetros de zoom, foco e velocidade de captura; e o sistema deve ser robusto com relação a ruídos externos, como a vibração.

Na literatura científica, não foram encontrados trabalhos realizados a fim de avaliar e atenuar a perturbação da vibração externa no *biospeckle* laser. Devido à necessidade de expansão da técnica para além dos laboratórios de óptica, neste trabalho propõe-se avaliar um

dos principais fatores que podem comprometer a confiabilidade e dificultar a portabilidade da técnica: a interferência da vibração mecânica.

Para quantificar essa vibração, foi desenvolvido um equipamento BSL portátil, no qual foram investigados, por meio de análise modal experimental, as frequências e magnitudes de vibração que podem interferir na técnica. Ensaios de transmissibilidade de vibração também foram realizadas para avaliar a eficiência da atenuação de vibração promovida por 11 diferentes isoladores de vibração.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar de forma qualitativa e quantitativa a influência da vibração mecânica na técnica *biospeckle* laser para fins de portabilidade.

1.1.2 Objetivos específicos

- (a) Propor uma bancada experimental compacta portátil de um equipamento que realiza análises *speckle* laser dinâmico;
- (b) Quantificar por análise modal experimental os níveis de vibração que interferem na análise *speckle* laser em um equipamento portátil;
- (c) Propor redução da vibração avaliando a transmissibilidade e utilizando sistemas de isolamento mecânico.

1.2 Contribuições originais

Como contribuição original, este trabalho quantifica e avalia experimentalmente a influência da vibração mecânica na técnica *biospeckle* laser.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

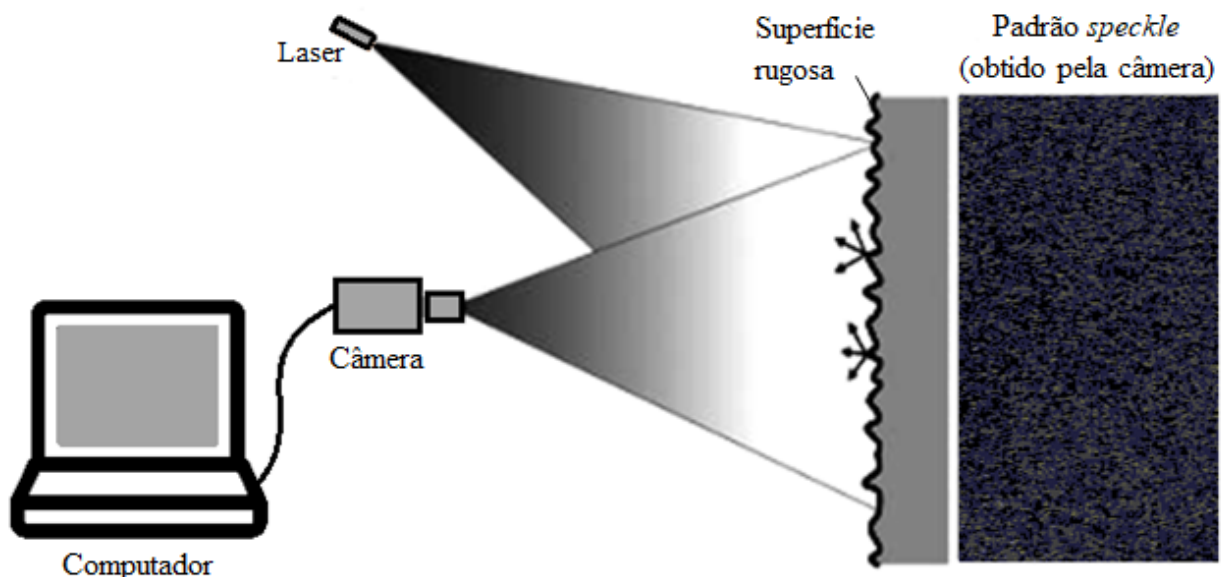
2.1 *Speckle* laser dinâmico

O *speckle* laser é um padrão de interferência óptica que ocorre quando um material é iluminado por um laser (RABAL; BRAGA, 2008). Quando aplicado a superfícies dinâmicas, como, por exemplo, uma secagem de tinta, observa-se uma contínua formação de novos e diferentes padrões de interferência óptica, e esse padrão aleatório e dinâmico de interferência denomina-se *speckle* laser dinâmico ou *biospeckle* laser, se a superfície em questão for de origem biológica, como em plantas e bactérias (RABAL; BRAGA, 2008; ZDUNEK et al., 2014).

Essa variação do padrão de interferência óptica no tempo, pode ser comparada a um fervilhamento em uma superfície granular, onde os grãos claros correspondem às interferências construtivas e os escuros, às destrutivas (SILVA, 2007). Esse fervilhamento que antes era tratado apenas como ruído, carrega informações sobre a dinâmica superfície iluminada (FRACAROLLI, 2011). Numa tinta fresca, o fervilhamento deste padrão, que também pode ser associado à atividade, é maior que numa tinta seca, por exemplo.

A Figura 2.1 ilustra a formação de um padrão de *speckle* quando uma superfície é iluminada por um laser.

Figura 2.1 – Ilustração de um padrão *speckle* obtido após a iluminação de uma superfície por um laser.



Fonte: Do autor (2019).

Portanto, trata-se de uma técnica não destrutiva que vem sendo utilizada em processos industriais, na agropecuária, na medicina e em outras áreas como ferramenta para quantificar

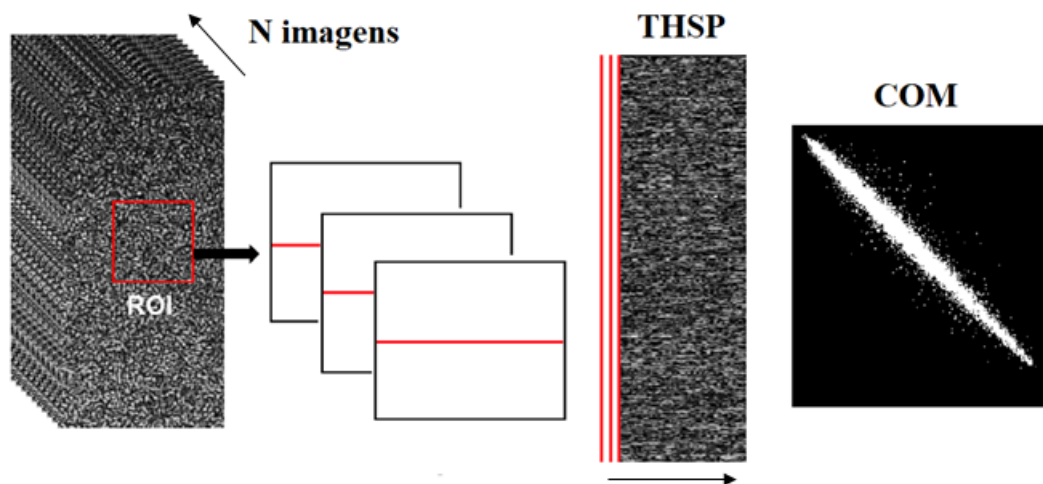
e monitorar atividade (RIBEIRO, 2014). Diversos trabalhos com resultados significativos já foram publicados envolvendo análises de sementes (BRAGA et al., 2001) e frutos (ANSARI; NIRALA, 2013; BLOTTA; BALLARIN; RABAL, 2009), fluxo de sangue (AIZU; ASAKURA, 1991), atividades de parasitas (POMARICO et al., 2005), motilidade de sêmen bovino (CARVALHO et al., 2009) etc.

As análises computacionais dos padrões *speckle* podem ser realizadas basicamente de duas formas: pelo método gráfico e/ou pelo método numérico, por meio de processamento de imagens e abordagens estatísticas. O método gráfico resume-se no processamento de imagens digitais que fornecem mapas da variabilidade das atividades biológicas, enquanto a análise numérica tem como objetivo fornecer valores quantitativos que representam a atividade na amostra (MOREIRA; CARDOSO; BRAGA, 2014; BRAGA; RIVERA; MOREIRA, 2016; MINZ; NIRALA, 2014).

Um dos principais métodos de análise do *biospeckle* laser, quando se deseja quantificar a intensidade das mudanças que ocorrem num padrão de *speckle* no tempo, é por meio da história desse padrão no tempo, ou do inglês, *Time History Speckle Pattern* (THSP).

O THSP, proposto por Oulamara, Tribillon e Duvernoy (1989) e apreciado por Xu, Jonathan e Khorana (1995), consiste numa figura bidimensional que codifica informações espaciais e temporais do *speckle*. É obtido por meio da seleção de uma linha no pacote de imagens coletado (na mesma posição e em instantes consecutivos) e em seguida, pela organização vertical (ou horizontal) e sucessiva dessas linhas, conforme Figura 2.2.

Figura 2.2 – Esquema da construção do THSP e COM.



Fonte: Adaptado de Perez et al. (2018).

O THSP por si só, confrontando-se uma amostra ativa com outra menos ativa, já fornece uma boa informação visual do nível da atividade. Todavia, se os níveis de atividade de amostras em comparação são próximos, são necessários resultados numéricos para quantificá-los com maior precisão (BRAGA; RIVERA; MOREIRA, 2016).

Para obter os resultados numéricos, vários métodos utilizam como base as imagens do THSP. Tal como o método da autocorrelação (XU; JOENATHAN; KHORANA, 1995), o momento de inércia (MI) (ARIZAGA; TRIVI; RABAL, 1999), e o valor absoluto das diferenças, do inglês, *Absolute Value of the Differences* (AVD) (BRAGA et al., 2011), que é o método utilizado neste trabalho.

Para calcular o AVD, é necessário obter a matriz de coocorrência (COM), desenvolvida por Arizaga, Trivi e Rabal (1999), que expressa a dispersão dos pixels consecutivos no THSP, de acordo com a Equação 2.1.

$$COM = [N_{ij}] \quad (2.1)$$

N_{ij} equivale ao número de vezes que o valor de intensidade i é seguido pelo valor de intensidade j , no sentido da evolução temporal, que pode ser no sentido da linha ou da coluna, em concordância com o THSP.

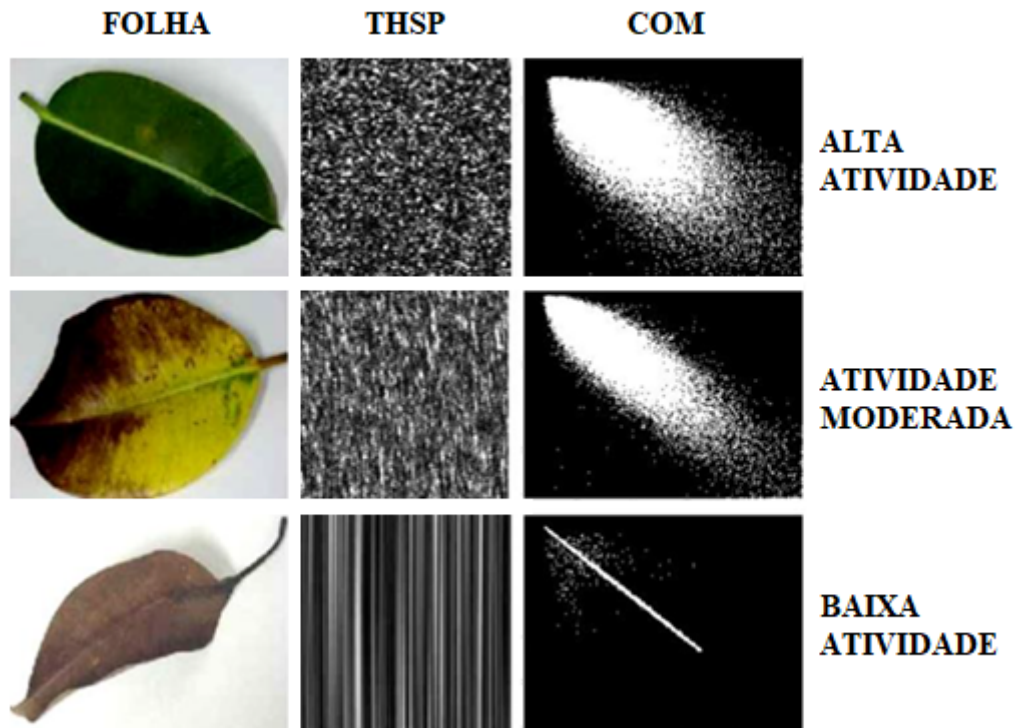
Quando a amostra analisada não demonstra atividade, seu THSP terá linhas (ou colunas) bem definidas, não apresentando variações de intensidade nestes pixels ao longo do tempo. Assim, a diagonal principal da COM será fina e pouco dispersa, contendo os valores não nulos de ocorrências. Quando a superfície é mais ativa, os pontos ficam mais dispersos ao redor da diagonal principal, conforme Figura 2.3. Todavia, pode-se observar que mesmo na folha sem vida, há uma pequena dispersão no canto superior esquerdo da diagonal principal, indicando presença de ruído no sistema.

A partir da matriz de coocorrência, o AVD, que é um valor numérico adimensional, é calculado por meio da Equação 2.2. Representa a medida da dispersão da luz na superfície da amostra e pode ser relacionado ao nível de atividade.

$$AVD = \sum_{ij} COM_{ij} |i - j| \quad (2.2)$$

Ao utilizar o método numérico AVD para detectar atividade em uma superfície inerte ou para mapear a atividade que ocorre numa secagem de tinta, observa-se que, tanto na superfície

Figura 2.3 – THSPs e matrizes de coocorrência de folhas de seringueira.

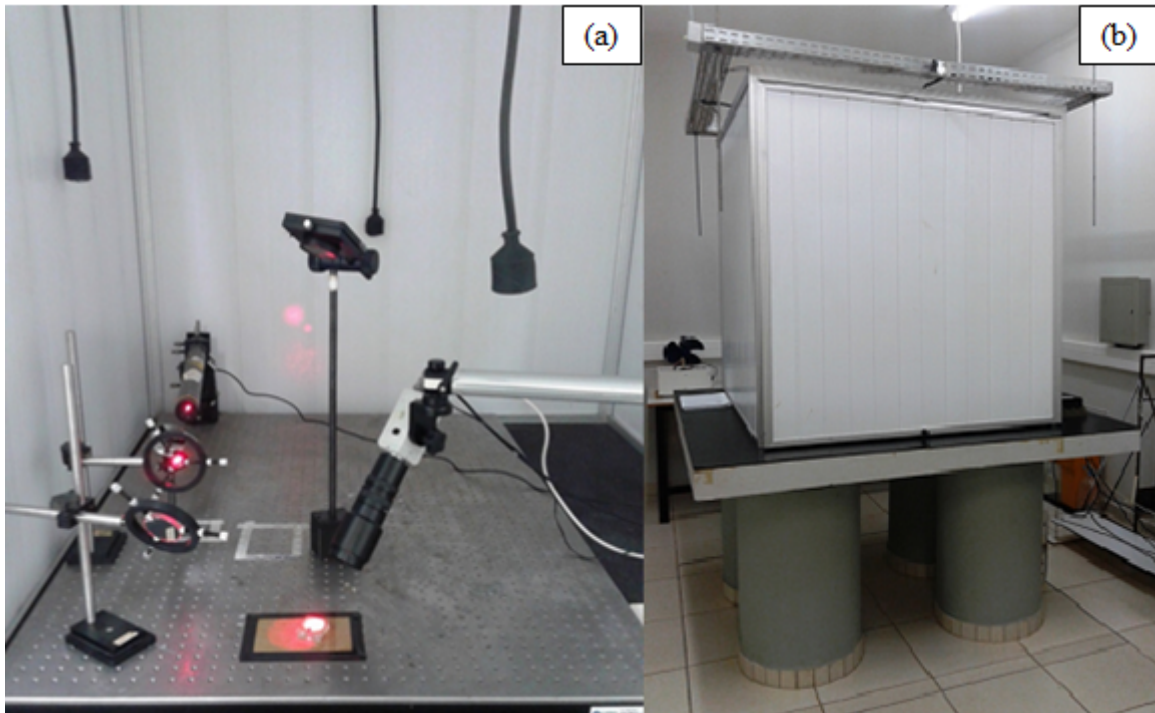


Fonte: Silva (2007).

inerte quanto na superfície com tinta seca, a técnica ainda continua indicando certa atividade (PEREZ et al., 2018). Esta atividade representa o ruído global no sistema detectado pelo método. Contém componentes do ruído intrínseco aos equipamentos e componentes externos, como a vibração.

As aplicações da técnica cresceram consideravelmente na última década e, entre as amostras mais estudadas, destacam-se frutas, como a maçã, por exemplo, fluxo de sangue em tecido humano e sementes (ZDUNEK et al., 2007; AIZU; ASAKURA, 1991; BRAGA et al., 2001). Apesar deste crescimento, a técnica ainda segue muito limitada às bancadas de laboratório com *setups* específicos e variados (FIGURA 2.4a), necessitando um controle da vibração e luz externa (FIGURA 2.4b). Tal limitação dificulta um avanço do *biospeckle* laser no que diz respeito à mobilidade e às medições em campo. Portanto, trabalhos visando a portabilidade da técnica justificam ser realizados.

Figura 2.4 – Exemplo de configuração experimental laboratorial (a), mesa anti-vibração e câmara de isolamento luminoso (b).



Fonte: Do autor (2019).

2.2 Portabilidade da técnica SLD

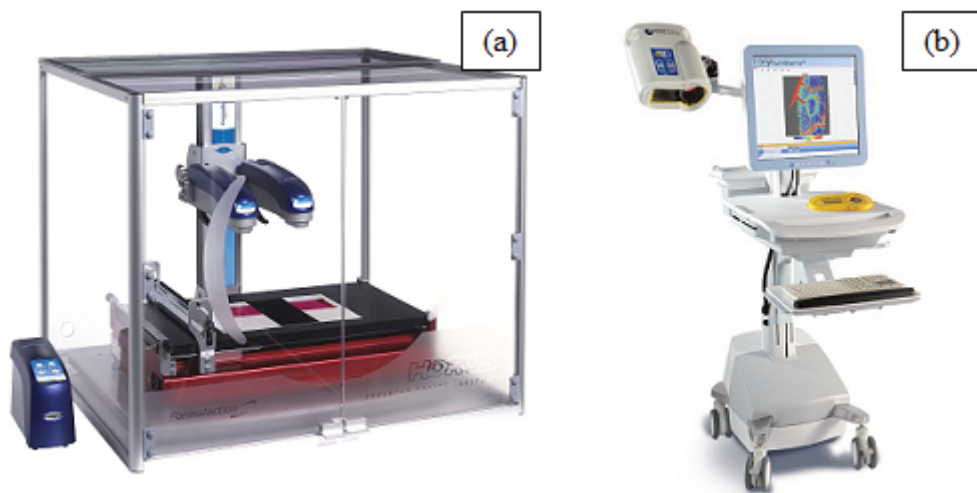
A significativa evolução da eletrônica proporciona também o desenvolvimento de computadores, sensores e componentes cada vez mais robustos, acessíveis e portáteis, ou seja, pequenos e fáceis de transportar. Assim sendo, diversas e variadas técnicas que antes eram limitadas apenas aos laboratórios passaram a despontar em equipamentos móveis e de relativo baixo custo, como por exemplo, medidor de clorofila, analisador de óleo lubrificante, medidor de vibração, medidor de rugosidade, medidor de dureza, analisador de hemoglobina, dentre outros.

Vários equipamentos de bancada estão hoje disponíveis em versões mais compactas, viabilizando a portabilidade e/ou economizando espaço. Tornando possível o transporte dos mesmos até áreas mais remotas, possibilitando que o equipamento vá até a amostra a ser analisada. Podem ser mais baratos e mais simples de usar que os instrumentos de bancada convencionais. Todavia, ao reduzir o tamanho de um equipamento, pode ocorrer também uma redução na sensibilidade do mesmo, dependendo do limite de detecção a ser avaliado (MCMAHON, 2008).

São poucos e recentes os trabalhos que propõem a portabilidade do *biospeckle* laser na literatura científica. Isso ocorre pelo fato de que a técnica é relativamente nova se comparada a outros métodos ópticos, como, por exemplo, a shearografia (técnica padronizada onde já existem inúmeros equipamentos comerciais). Além disso, trata-se de uma técnica muito sensível a ruídos externos, como a vibração.

Equipamentos de análise *speckle* laser dinâmico (SLD) são raros no mercado e bem específicos, como o Horus (FIGURA 2.5a), que faz análise de secagem de tinta, e o MoorFLPI-2 (FIGURA 2.5b), que analisa fluxo sanguíneo.

Figura 2.5 – Equipamentos comerciais de análise SLD.



Fonte: (a) Horus (2018) e (b) MoorFLPI-2 (2018).

Botega (2009) apresentou em seu trabalho uma proposta de protótipo para análise *biospeckle* laser visando detecção de teor de água em folhas de café. O equipamento mostrou-se eficaz para medir atividade biológica na folha, com potencial para ser utilizado em condições de campo como uma ferramenta muito interessante para detecção de déficit hídrico nos cafeeiros. Dando sequência a este trabalho, Araújo (2018) também desenvolveu um protótipo portátil para quantificar o teor de água em folhas de citros por meio do *biospeckle* laser. Concluiu-se que é viável levar a técnica para campo, sendo possível medir a atividade de água na folha.

Tang et al. (2010) desenvolveram um equipamento portátil utilizando o *speckle* laser para monitoramento de fluxo sanguíneo *in vivo*. O dispositivo pode ser adaptado a uma vasta variedade de aplicações em áreas como laboratórios de pesquisa, salas de operações, ambulâncias, e até em locais de desastre, devido às suas características de portabilidade e peso reduzido. O desafio enfrentado foi relacionado ao tempo de processamento para medições em alta resolução.

Visando simplificar a configuração experimental e reduzir custos dos equipamentos envolvidos na técnica SLD, Chaves (2011) evidenciou em seu trabalho a viabilidade da utilização de webcams e câmera microscópica em substituição às câmeras CCDs (*charged coupled device*), usualmente mais caras e maiores.

Dispondo do poder de processamento e resolução de câmera dos smartphones da época, Catalano (2017) desenvolveu um aplicativo para celular que realiza capturas e processamento de padrões *speckle*. Os experimentos que foram realizados demonstraram que a aplicação da técnica por meio do uso de smartphone pode ser alcançada com qualidade. Todavia, a capacidade de processamento do celular utilizado nas análises limitou a realização de processamentos baseados em métodos computacionalmente mais exigentes.

Já Perez et al. (2018) trouxeram, com êxito, uma proposta de equipamento portátil que visou, entre outros aspectos, avaliar características de secagem de substâncias protetivas utilizadas em tratamentos de conservação de pinturas de obras de arte. Portabilidade que se justifica porque fica muito oneroso deslocar uma grande obra de arte em processo de restauração para análise em laboratório. Equipamento se mostrou mais sensível às variações na superfície pintada que a técnica padrão-ouro que avalia a secagem utilizando balança de precisão.

Nos trabalhos supracitados, pode-se vislumbrar que o desenvolvimento de protótipos portáteis, apesar de ainda incipientes, apresentam potencial de aplicação em grande escala. Todavia, mesmo com os resultados significativos já obtidos, existem análises e testes que necessitam ser realizados para que a portabilidade da técnica deixe de ser apenas um potencial e passe a ser uma realidade.

No primeiro de seus dois trabalhos, cujo objetivo era avaliar a qualidade de maçãs durante vida útil, Zdunek et al. (2007) utilizou um *setup* laboratorial tradicional, montado em uma mesa especial para diminuir a influência de vibrações (assim como foi feito em Zdunek et al. (2008)). Na possibilidade de aplicação da técnica em um futuro monitoramento on-line, o autor concluiu que o problema mais importante a ser resolvido é prevenir que o sistema vibre.

Tang et al. (2010), citado anteriormente, apresentou em seu trabalho que o nível de ruído no sistema portátil para análise de fluxo sanguíneo foi cerca de 10% maior que no sistema tradicional que utiliza um computador. O autor atribuiu essa diferença principalmente às câmeras utilizadas no sistema portátil (8 bits) e no tradicional (12 bits). Porém, o fator vibração também pode ter interferido significativamente neste aumento do nível de ruído.

Assim sendo, pode-se inferir que existe uma carência de investigação nos trabalhos que envolvam o desenvolvimento de protótipos portáteis para análise *biospeckle* laser com relação às interferências externas. Tal como foi avaliado o efeito da temperatura na técnica e a estabilidade do laser (KURENDA; ADAMIAK; ZDUNEK, 2012; ARAUJO, 2019), trabalhos precisam ser realizados para avaliar o quanto a vibração interfere na sensibilidade do *speckle* laser dinâmico, e assim contribuir para o avanço da técnica. Uma das formas de quantificar tal vibração é por meio da análise modal experimental.

2.3 Vibração, análise modal e transmissibilidade

A vibração é um fenômeno inerente ao nosso dia-dia, embora muitos a avaliam como um fenômeno desagradável e indesejável, ouvimos porque nossos tímpanos vibram e falamos porque nossa laringe vibra (RAO, 2010).

A teoria da vibração trata do estudo dos movimentos oscilatórios de corpos e das forças associadas a eles. Segundo Rao (2010), vibração ou oscilação é qualquer movimento que se repete depois de um intervalo de tempo. Inman (2007), de forma semelhante, descreve que vibração é o estudo do movimento repetitivo de objetos em relação a um referencial estacionário ou em equilíbrio. A magnitude da vibração é determinada pela amplitude do movimento e a frequência é definida pela taxa de repetição desse movimento (GRIFFIN, 1996).

Nas últimas décadas, o desenvolvimento tecnológico fez com que aumentasse a necessidade por análises dinâmicas confiáveis (MAIA et al., 1997), e com o passar do tempo, estudos foram realizados visando compreender a vibração envolvida nos fenômenos naturais e físicos, sendo atualmente muito utilizados em aplicações de engenharia, projetos de máquinas, fundações, estruturas, motores, turbinas e sistemas de controle (RAO, 2010).

Em equipamentos eletrônicos sensíveis e instrumentos de medição, como uma balança de precisão ou um instrumento óptico, por exemplo, é imprescindível que haja um controle adequado da vibração para que os resultados das medições não sofram influências de ruídos externos.

Técnicas de interferometria *speckle*, como a shearografia digital e a interferometria digital do padrão de *speckle*, que são métodos ópticos utilizados para realizar medições de deformações em corpos, sofrem de vários efeitos inconvenientes que podem gerar altos níveis de ruído e erros nas medições experimentais. Grande parte desse ruído é originário de perturbações externas, como a vibração (LOPES et al., 2017).

A vibração em painéis de instrumentos pode causar mau funcionamento ou dificuldade na leitura dos medidores (RAO, 2010). Componentes eletrônicos utilizados em automóveis, aeronaves, máquinas, etc. também podem falhar devido a vibração (INMAN, 2007).

Problemas relacionados à vibração continuam sendo um risco e fator limitante para uma grande variedade de projetos de engenharia. É essencial ter conhecimento das características dinâmicas presentes desde a rotação das pás de uma turbina até a suspensão de uma ponte (EWINS, 2000). Nesse contexto, uma das principais finalidades em se estudar a vibração é reduzi-la ou atenuá-la mediante projeto adequado de máquinas e de seus suportes, antecipando e trazendo-a para um nível controlado e satisfatório.

Uma das formas mais utilizadas para quantificar tais níveis de vibração é por meio da análise modal, que, segundo Ewins (2000), consiste no processo envolvido em testar componentes ou estruturas com o objetivo de obter uma descrição matemática de seu comportamento dinâmico. Para Maia et al. (1997), a análise modal é uma ferramenta de análise de vibração que fornece um entendimento das características estruturais, condições operacionais e critérios de performance, permitindo um projeto otimizado dos comportamentos dinâmicos. De forma mais contemporânea, Avitabile (2018) retrata análise modal como sendo o processo através do qual descreve-se uma estrutura em termos de suas características dinâmicas, que são: frequência natural, amortecimento e modo de vibrar.

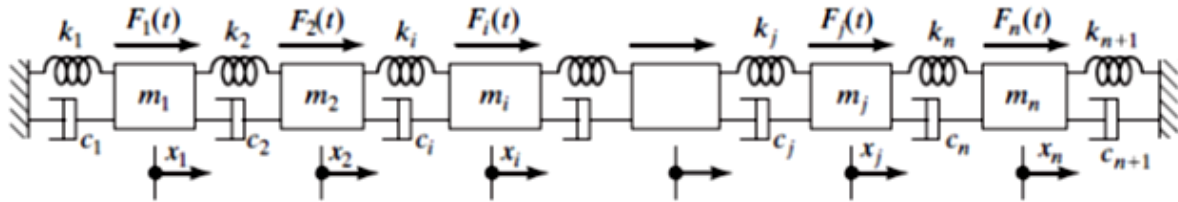
Compreender estas propriedades e como a estrutura irá vibrar quando excitada contribui para que o engenheiro projete melhores estruturas e componentes. A análise modal é, portanto, utilizada em projetos de diversos tipos de estruturas, dentre elas, estruturas automotivas, aeronaves, espaçonaves, computadores, raquetes de tênis, tacos de golfe etc. (AVITABILE, 2018).

Em estruturas automobilísticas e aeroespaciais, por exemplo, a análise modal pode ser utilizada para identificar em quais frequências a estrutura pode entrar em ressonância. Sabendo quais são estas frequências, que podem gerar de desgastes excessivos até falhas catastróficas, o engenheiro projetista pode então modificar parâmetros estruturais, como por exemplo a massa e a rigidez do sistema, evitando assim a ressonância. Neste trabalho a AME (análise modal experimental) é utilizada de forma semelhante, para identificar quais são as frequências onde o protótipo entra em ressonância e sua influência na análise SLD.

O estudo experimental de estruturas dinâmicas tem fornecido uma contribuição significativa para os esforços em compreender e controlar os diversos fenômenos de vibração encontrados na prática (EWINS, 2000). Todo sistema mecânico pode ser representado por meio

de suas propriedades de massa, rigidez e amortecimento, responsáveis pela inércia, forças elásticas e dissipativas, respectivamente. A Figura 2.6 ilustra um sistema mecânico massa-mola-amortecedor com N graus de liberdade e com forças $F(t)$ atuando sobre as massas.

Figura 2.6 – Sistema mecânico com N graus de liberdade.



Fonte: Adaptado de Rao (2010).

O comportamento deste sistema no espaço pode ser descrito conforme sua equação geral de movimento, em forma matricial, de ordem N , representando um conjunto de N equações diferenciais de segunda ordem (EQUAÇÃO 2.3).

$$[M] \ddot{\vec{x}} + [C] \dot{\vec{x}} + [K] \vec{x} = \vec{F} \quad (2.3)$$

Onde $[M]$, $[C]$ e $[K]$ são as matrizes de massa, amortecimento e rigidez, e $\ddot{\vec{x}}$, $\dot{\vec{x}}$, \vec{x} e \vec{F} , são os vetores aceleração, velocidade, deslocamento e força.

Embora a Equação 2.3, descreva o comportamento do sistema no espaço, por meio das propriedades espaciais $[M]$, $[C]$ e $[K]$, é por meio do modelo modal que o sistema pode ser descrito em termos de suas características dinâmicas, que são as frequências naturais (ω_n) e as formas modais (Ψ).

Para sistemas não amortecidos, o modelo modal, obtido por meio da solução homogênea da equação diferencial (2.3), sem o componente amortecimento, pode ser expresso na forma de duas matrizes (EQUAÇÃO 2.4 e 2.5) (MAIA et al., 1997). Para sistemas amortecidos, a solução é obtida por meio da formulação de espaço-estados.

$$[\omega_r^2] = \begin{bmatrix} \omega_1^2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \omega_2^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \omega_N^2 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$[\Psi] = [\{\Psi_1\} \{\Psi_2\} \cdots \{\Psi_N\}] \quad (2.5)$$

A função resposta em frequência (FRF), também chamada de receptância ($\alpha_{jk}(\omega)$), é obtida a partir da análise de resposta forçada do sistema, por meio das matrizes espectral e modal (EQUAÇÃO 2.6).

$$\alpha_{jk}(\omega) = \frac{\bar{X}_j}{\bar{F}_k} = \sum_{r=1}^N \left(\frac{\phi_{jr}\phi_{kr}}{i\omega - s_r} + \frac{\phi_{jr}^*\phi_{kr}^*}{i\omega - s_r^*} \right) \quad (2.6)$$

Onde ϕ corresponde ao autovetor, $\phi_{jr}\phi_{kr}$ são resíduos para o modo r , e os autovalores s_r são os polos (que ocorrem em pares conjugados complexos) descritos conforme Equação 2.7. Os símbolos ω_r e ξ_r são as frequências naturais e fatores de amortecimento do sistema para cada modo r .

$$s_r = -\omega_r\xi_r + i\omega_r\sqrt{1 - \xi_r^2} \quad (2.7)$$

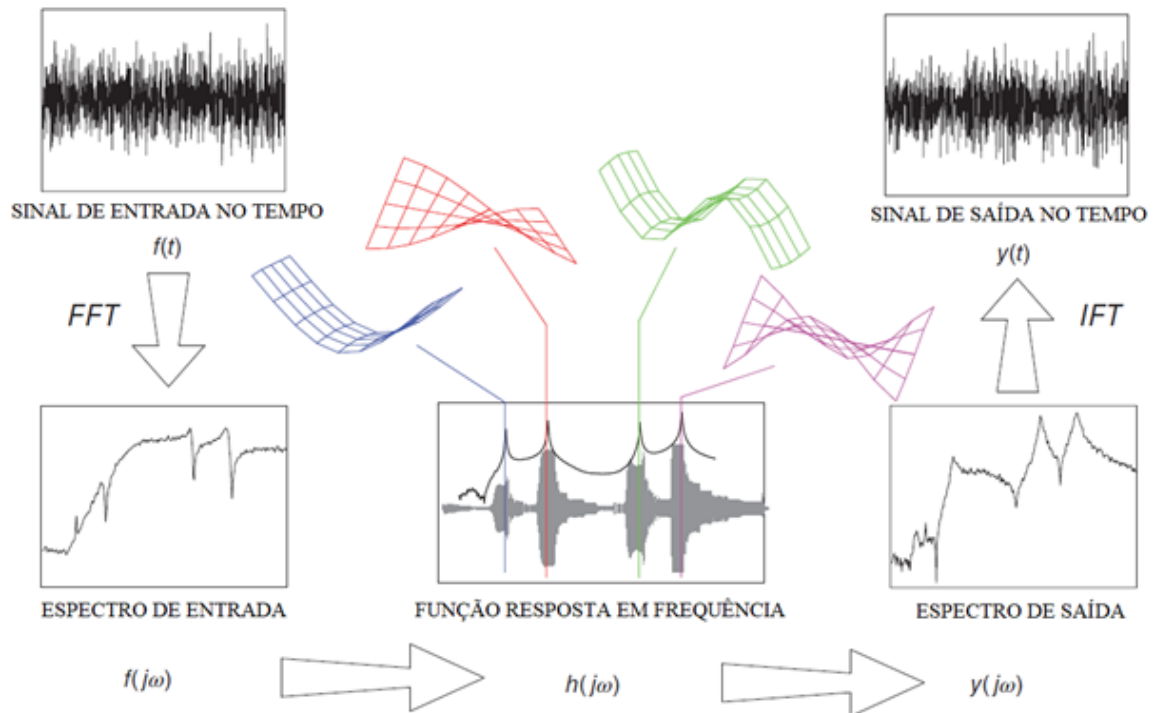
O termo $\alpha_{jk}(\omega)$ é a receptância definida como a resposta do deslocamento na coordenada j , devido a uma força de excitação na coordenada k , com todas as outras forças sendo nulas. Ela contém toda informação das características dinâmicas do sistema. Em outras palavras, cada elemento α_{jk} corresponde a uma FRF individual e descreve a relação entre a resposta em uma coordenada particular j e uma única força de excitação aplicada na coordenada k (MAIA et al., 1997). Assim como o modelo espacial e o modelo modal supracitados, a receptância representa uma outra forma de modelagem do sistema, denominada modelo de resposta.

A medida mais importante na análise modal experimental é a FRF, que é fundamentalmente a razão da resposta de saída do sistema com a resposta de entrada (excitação), obtida por meio de um equipamento que executa a transformada rápida de Fourier (FFT) (AVITABILE, 2018). Ela contém as informações das frequências naturais, amortecimento e modos de vibrar (FIGURA 2.7).

A FRF é obtida experimentalmente mediante processamento do sinal obtido do sistema forçado por um excitador, como martelo de impacto ou *shaker*. Esta excitação gera uma vibração cuja resposta é captada por um transdutor (acelerômetro), que converte o movimento físico do sistema em sinal elétrico, que é amplificado no equipamento que faz o processamento e análise. É analisando os sinais elétricos que a natureza da vibração pode ser compreendida.

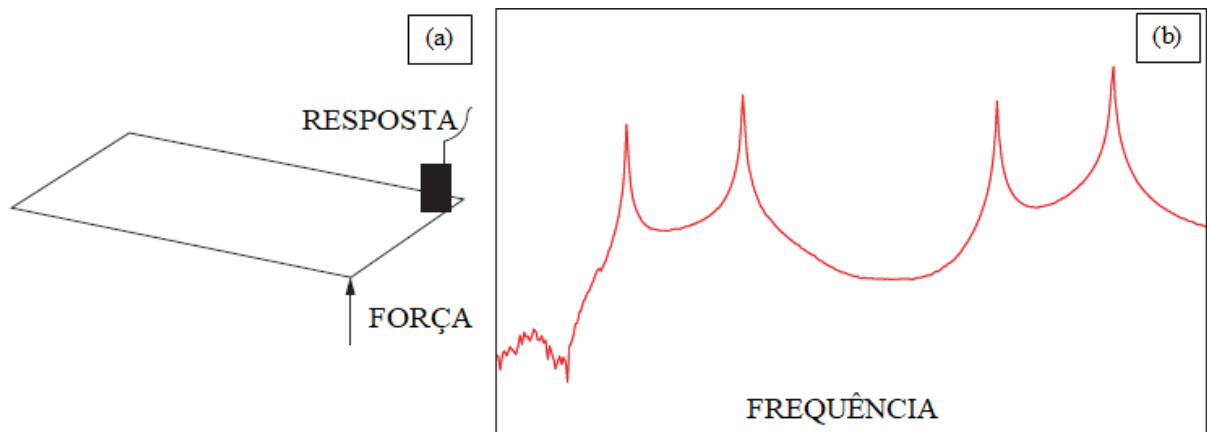
A Figura 2.8 ilustra (a) o modelo excitação-resposta e (b) a FRF de uma placa simples.

Figura 2.7 – Visão geral esquemática da função resposta em frequência.



Fonte: Avitabile (2018).

Figura 2.8 – Modelo excitação-resposta e FRF de uma placa simples.



Fonte: Adaptado de Avitabile (2018).

Os picos observados na FRF representam as frequências naturais do sistema, que também podem ser identificadas, de forma menos precisa, observando as ampliações que ocorrem no sinal da resposta no tempo.

No momento em que a varredura em frequências promovida pelo *shaker* é realizada, de uma baixa à uma alta frequência, mesmo aplicando uma força de excitação constante, haverá aumentos e diminuições na amplitude em diferentes pontos. A resposta amplifica quando a força

excitadora se aproxima das frequências naturais do sistema, e alcança seu máximo, em sistemas pouco amortecidos, quando a força de excitação atinge a frequência natural. Em sistemas muito amortecidos, o deslocamento máximo ocorre ligeiramente a esquerda da frequência natural.

Quando excitadas em suas frequências naturais, as estruturas vibram em padrões de deslocamento específicos, chamados formas modais ou naturais, conforme pode-se observar na ilustração da Figura 2.7. Formas modais (modos de vibração), e frequências naturais ocorrem em todo tipo de estrutura, e é a massa e a rigidez do sistema que as definem (AVITABILE, 2018).

Na ressonância, que ocorre quando a excitação externa coincide com a frequência natural da estrutura ou máquina, o sistema pode apresentar altos níveis de vibração, que se não avaliados, podem gerar deflexões excessivas e falhas (RAO, 2010; CRYSTAL INSTRUMENTS, 2017). A não ser que seja desejável projetar algum tipo específico de máquina vibratória, evitar a ressonância é essencial para o projeto, dado as consequências nocivas deste fenômeno (MAIA et al., 1997).

Portanto, conhecer as frequências naturais de uma estrutura ou equipamento é essencial para avaliar quais efeitos excitações nestas mesmas frequências podem causar na estrutura e funcionamento do aparelho.

Considerando que a transmissão de vibração através de uma estrutura pode ser amplificada, ou seja, a amplitude da resposta à uma excitação pode ser maior que a amplitude da excitação, faz-se necessário investigar dispositivos de amortecimento (isoladores de vibração) que possam atenuar ou eliminar esse efeito, para isso, testes de transmissibilidade de vibração se fazem necessários.

Isoladores de vibração têm a função de reduzir a transmissão de energia de um corpo para outro. Uma das formas de reduzir esta transmissão é utilizando materiais com características definidas (k e c) que possam absorver a energia transmitida entre a fonte vibrante e a estrutura a ser isolada (GHELLER, 2013).

A transmissibilidade (T_d) determina o comportamento da isolamento de um sistema, e pode ser apresentada em função dos seguintes parâmetros: força, deslocamento, velocidade ou aceleração. É a razão entre a magnitude da vibração de um ponto a outro, ou seja, é um valor que indica os níveis de vibração relativos entre dois pontos, e é muito utilizada na prática de engenharia de vibração (EWINS, 2000).

De forma teórica, para sistemas de um grau de liberdade, a transmissibilidade de deslocamento pode ser dada pela Equação 2.8 (RAO, 2010; INMAN, 2007).

$$\frac{X}{Y} = T_d = \sqrt{\frac{1 + (2\zeta r)^2}{(1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad (2.8)$$

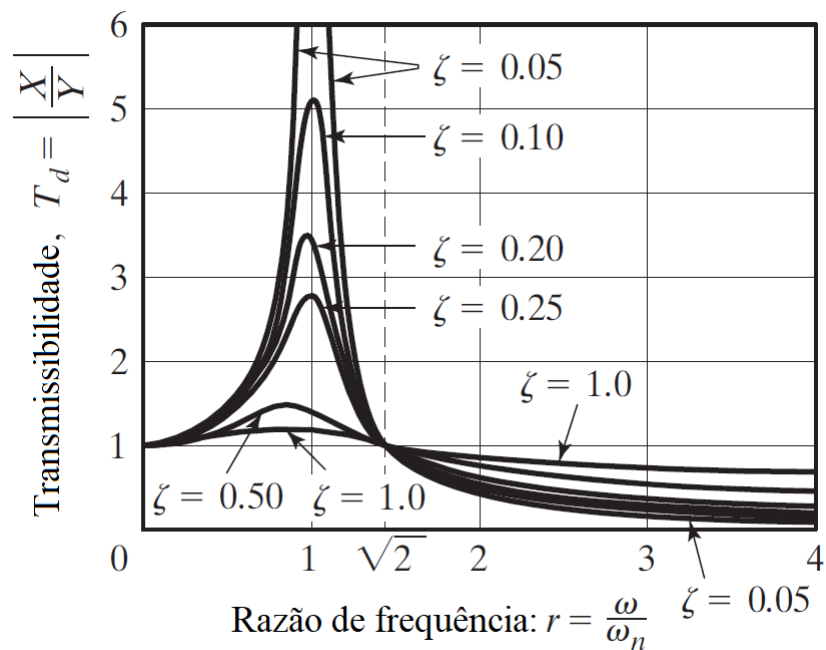
onde,

$$r = \frac{\omega}{\omega_n} \quad \zeta = \frac{c}{2m\omega_n} \quad (2.9)$$

X representa a amplitude da resposta e Y a amplitude da excitação, r é a razão de frequência, ω_n é a frequência natural não amortecida, ζ é o fator de amortecimento e c é a constante de amortecimento.

A representação gráfica da Equação 2.8 pode ser vista na Figura 2.9.

Figura 2.9 – Variação de T_d com r .



Fonte: Rao (2010).

Pode-se observar pela Figura 2.9 que para sistemas não amortecidos, $\zeta = 0$, a transmissibilidade T_d tende ao infinito na ressonância, onde $r=1$ ($\omega = \omega_n$). Em $r = \sqrt{2}$, para todos valores de ζ , a transmissibilidade $T_d=1$. Para $r < \sqrt{2}$, quanto menor o valor de ζ maior o valor de T_d ; para $r > \sqrt{2}$, quanto menor o valor de ζ menor o valor de T_d . Em tese, portanto, quando se deseja atenuar vibrações em um sistema que trabalha em frequências maiores que sua frequência natural, é mais interessante utilizar dispositivos com um menor fator de amortecimento, e em

um isolador de vibrações, é desejável a menor frequência natural possível, deslocando o pico à esquerda e expandindo, assim, a região de atenuação à direita.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Neste trabalho, os testes que foram realizados visaram quantificar a interferência do ruído externo no SLD em diferentes condições de excitação e isolamento, avaliando assim a viabilidade da portabilidade da técnica. São eles: análise modal experimental, *speckle* laser dinâmico e transmissibilidade.

Para a realização dos experimentos, que foram realizados no Laboratório de Mecânica Aplicada (LMA) no Departamento de Engenharia (DEG) e no Centro de Desenvolvimento à Instrumentação Aplicada à Agropecuária (CEDIA) da Universidade Federal de Lavras, foram utilizados:

- (a) uma balança de precisão Marte modelo BL-320H, sensibilidade de 0,001 g;
- (b) uma câmera Microscópica Digital Dino-Lite AM3013;
- (c) um laser Coherent SNF 635 nm;
- (d) um computador;
- (e) 6 acelerômetros PCB Piezotronics, modelo 352C33;
- (f) um analisador de sinais dinâmicos de 2 canais Stanford Research Systems (SRS), modelo SR785;
- (g) um excitador eletrodinâmico portátil com amplificador de potência integrado (*shaker*) The Modal Shop, modelo K2007E01, nível de ganho 24 dB;
- (h) uma célula de carga LCM201-200N;
- (i) uma fonte de alimentação dupla DC regulada - Minipa, modelo MPL-3305M;
- (j) uma placa para aquisição de dados National Instruments cDAQ-9174 (chassi);
- (k) um módulo de aquisição National Instruments NI 9234;
- (l) suportes de metal e linhas de nylon;
- (m) dispositivos isoladores de vibração.

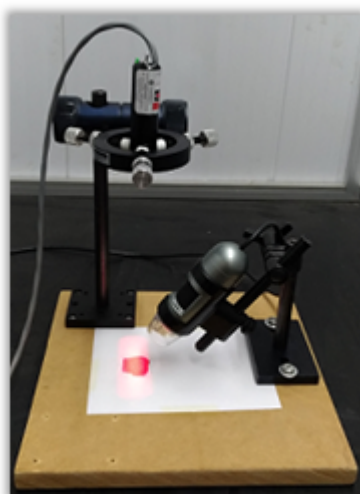
Em suma, câmera, laser e PC, juntamente com os *softwares* SpeckleTool e Octave formam a configuração para realização das análises *biospeckle* laser ou *speckle* laser dinâmico. *Shaker*, acelerômetros, célula de carga, fonte e analisador dinâmico, formam a configuração para realização da análise modal experimental. A transmissibilidade foi obtida utilizando o

shaker, 2 acelerômetros e analisador dinâmico. Placa de aquisição de dados, PC e módulo NI 9234, juntamente com o *software* LabView, formam a configuração para coleta de dados de vibração.

3.1 Desenvolvimento do protótipo

Para que fosse possível a realização dos testes propostos neste trabalho, foi desenvolvido um equipamento protótipo compacto e portátil para realização dos testes *speckle* laser dinâmico. Este equipamento contém a câmera e o laser fixados em uma base de madeira MDF cru, de dimensões 22,8 x 21,5 cm e altura 1,5 cm, por meio de hastes de metal características à experimentos ópticos, conforme Figura 3.1. A madeira foi escolhida como base por ser um material fácil de ser trabalhado e fixado na caixa. Para melhorar a rigidez do sistema, posteriormente, duas hastes de metal foram fixadas ao conjunto, como pode ser visto na Figura 3.4 mais a frente.

Figura 3.1 – Configuração experimental compacta.



Fonte: Do autor (2019).

Devido à interferência da luz externa na técnica, a base de madeira com os dispositivos parafusados foi enclausurada em uma caixa também de madeira, com base de dimensões de 41 x 23,8 cm e altura 29,5 cm, de forma a anular qualquer tipo de interferência que a luz externa possa causar nas medições, conforme Figura 3.2. A massa total do equipamento é de 5,3 kg.

Para uma melhor resolução dos pacotes de imagens processados, é interessante que a câmera, que possui características de microscópio, esteja o mais próximo possível da amostra, mas sem interferir na iluminação do laser. Ao definir a distância do laser à superfície amostrada,

Figura 3.2 – Protótipo.



Fonte: Do autor (2020).

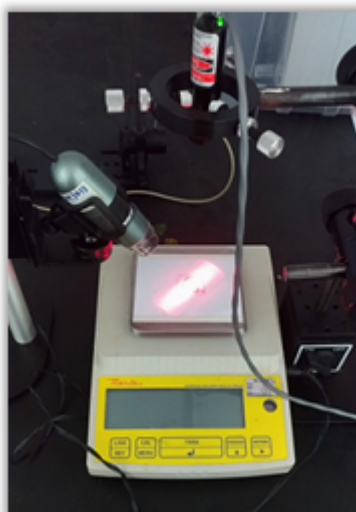
optou-se por deixá-lo a uma distância de 7,5 cm. Distância definida experimentalmente, onde a abertura máxima do feixe de laser consegue iluminar toda a região amostrada ($\approx 500 \text{ mm}^2$) sem necessidade de uma lente expansora. Para obtenção de uma saturação satisfatória de imagem, também foi utilizado uma lente filtro entre o laser e a amostra, para atenuar a intensidade do mesmo.

3.2 Validação do protótipo

Uma das formas de validação da técnica SLD mais utilizadas é por meio da análise de secagem de tinta, pois, além de ser uma técnica replicada várias vezes na literatura científica para validação de configurações experimentais e métodos de análise, pode-se também realizar o acompanhamento da secagem via balança de precisão, e assim comparar os resultados, garantindo confiabilidade (JUNIOR et al., 2007; FEDERICO et al., 2006; CHAVES, 2011; MOREIRA, 2013; PRA; PASSONI; RABAL, 2009; ZHONG et al., 2013).

Deste modo, antes da montagem final do protótipo, testes com secagem de tinta, Figura 3.3, foram realizados para calibração e validação da configuração experimental proposta na Figura 3.1, que foi montada visando a forma mais compacta possível. Nestes testes, realizados sobre uma mesa anti-vibração e em uma câmara de isolamento luminoso, foram mantidas as mesmas distâncias, angulações e foco do conjunto câmera-laser e superfície amostrada definidas anteriormente.

Figura 3.3 – Configuração experimental dos testes de secagem de tinta para validação.



Fonte: Do autor (2019).

A tinta utilizada foi um esmalte de unha, vermelho convencional de secagem rápida, que foi aplicado de forma homogênea em uma lâmina vítrea de massa conhecida. Essa lâmina com a tinta foi pesada, e as capturas das imagens para análise do *speckle* laser dinâmico foram executadas 20 vezes, de 2 em 2 minutos, a partir do instante em que a primeira pesagem foi efetuada, ou seja, logo após a aplicação da tinta na lâmina. A pesagem do conjunto lâmina+tinta também foi realizada 20 vezes, de 2 em 2 minutos, tempo suficiente para a tinta secar. Para cada captura, foram tiradas 128 fotos a 15 fps (*frames* por segundo) e foram realizadas 4 réplicas.

3.3 Valor AVD de referência em superfície inerte

Uma vez calibrado e validado, o dispositivo foi fixado dentro da caixa de madeira, de modo a facilitar o transporte, proteger da interferência da luminosidade externa e tornar possível os decorrentes testes de vibração, modal e transmissibilidade.

Para fins de posterior comparação e para confirmar a confiabilidade dos testes e do protótipo, análises SLD foram realizadas com o protótipo nas condições ideais de laboratório, de forma a obter um valor de referência de AVD em uma superfície inerte, em situações onde não há interferência de vibrações externas.

Os testes foram realizados no laboratório 1 do CEDIA sob uma mesa anti-vibração, dentro de uma câmara de isolamento luminoso, idêntica a da Figura 2.4b, em 4 condições distintas, todas elas com a tampa da caixa do protótipo fechada:

1. luz do laboratório acesa e porta da câmara aberta (tarde);
2. luz do laboratório acesa e porta da câmara fechada (tarde);
3. luz do laboratório apagada e porta da câmara fechada (tarde);
4. luz do laboratório apagada e porta da câmara fechada (noite).

Os testes de 1 a 3 foram realizados no período da tarde e o teste 4 foi realizado à noite.

Para cada condição foram realizadas 20 capturas de 128 imagens da amostra, a uma velocidade de 15 fps.

3.4 Obtenção das frequências naturais do protótipo

O primeiro teste de vibração realizado foi a análise modal experimental, para obter as frequências naturais do protótipo por meio da função resposta em frequência (FRF), que é uma medição que envolve dois canais e que relaciona o espectro do canal 2 (saída) com o canal 1 (entrada). Ela mensura a resposta do sistema testado e sua qualidade depende do tipo de média utilizada nas amostragens. Neste trabalho foi aplicada a média vetorial, utilizada para reduzir o nível de ruído do espectro, além de melhorar a precisão e a repetibilidade do experimento.

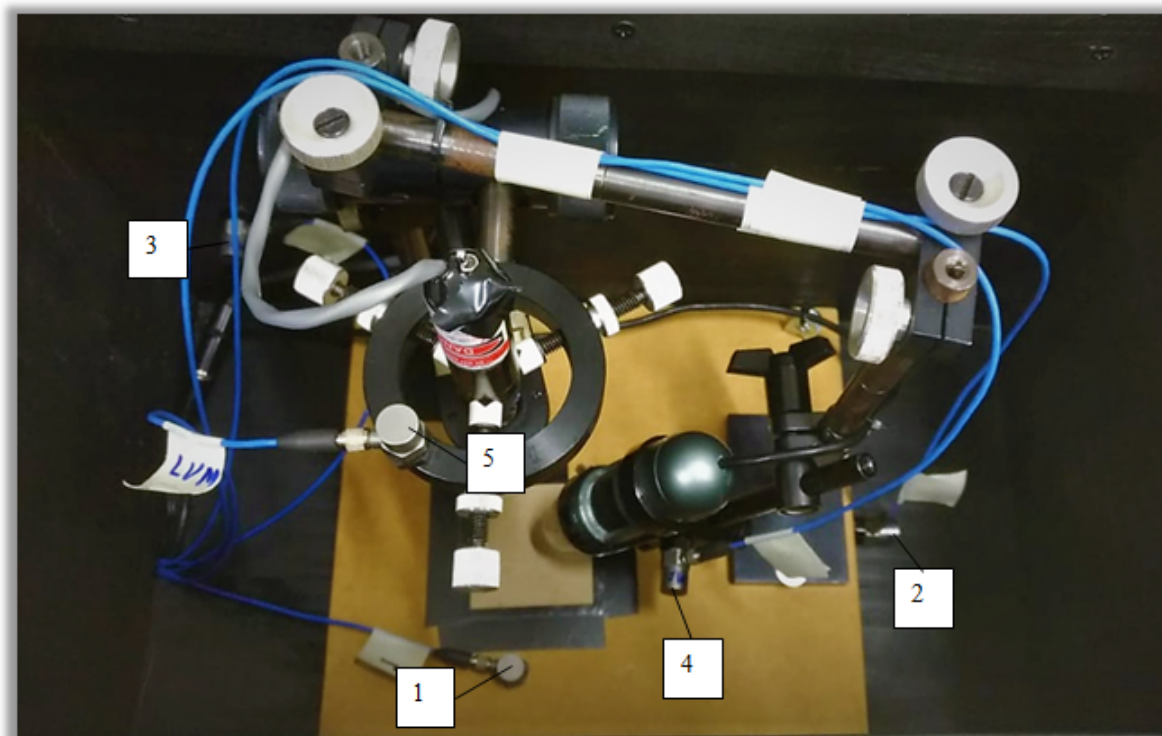
Como a estrutura é complexa e composta por vários componentes, visando uma melhor caracterização do sistema, cinco acelerômetros foram fixados dentro da caixa, conforme Figura 3.4, para mensurar os níveis de vibração em cada posição:

- (a) acelerômetro 1 (AC1) - fixado ao lado da amostra, no mesmo plano (eixo z);
- (b) acelerômetro 2 (AC2) - fixado na lateral da base de madeira (eixo x);
- (c) acelerômetro 3 (AC3) - fixado na parede da caixa (eixo y);
- (d) acelerômetro 4 (AC4) - fixado no suporte da câmera;
- (e) acelerômetro 5 (AC5) - fixado no suporte do laser.

Os acelerômetros de 1 a 3 foram posicionados para capturar as vibrações nos 3 eixos (x, y e z) e os acelerômetros 4 e 5, foram fixados na câmera e no laser, principais componentes da análise *biospeckle* laser.

As condições de montagem da estrutura para realização do teste modal podem ser classificadas de três maneiras: livre-livre, completamente fixa e montado na instalação real (AVI-TABILE, 2018). Neste experimento foi utilizada a condição livre-livre pois, com este tipo de

Figura 3.4 – Posições dos acelerômetros no protótipo.



Fonte: Do autor (2019).

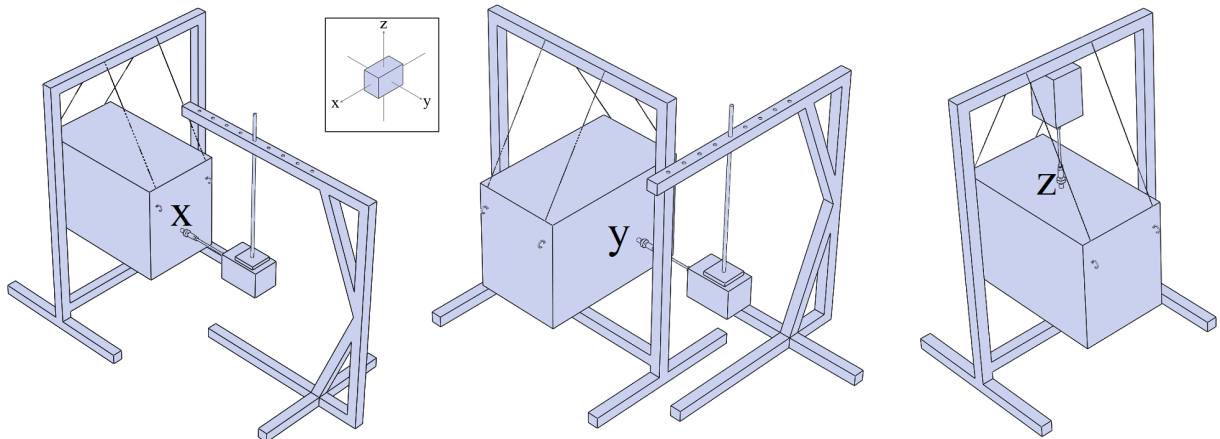
montagem, pode-se simular qualquer outra condição e, se comparado com as outras, apresenta menor interferência externa nos resultados.

A caixa foi suspensa em um suporte de metal por dois fios de nylon 0,5 mm por meio de quatro ganchos fixados nas laterais da mesma, simulando assim a condição livre. Uma vez suspensa, a caixa foi nivelada com um nível de bolha, e o *shaker*, também suspenso por um suporte, foi fixado em três posições diferentes da caixa, no eixo x, y e z, de modo a obter-se as respostas às excitações nesses três eixos (FIGURA 3.5).

Para desacoplar lateralmente o *shaker* da estrutura testada, foi utilizado um dispositivo de conexão denominado *stinger*. Uma haste de composição polimérica projetada de tal forma que apresenta uma relativa flexibilidade rotacional e lateral, mas é rígida na direção axial. Isso reduz uma possível interferência da fixação da mesma com a estrutura, dado que a estrutura excitada pode se movimentar em diferentes direções e a excitação deve ser numa só direção. O alinhamento do *shaker* e *stinger* com a estrutura é muito importante e deve ser feito com cuidado para não distorcer valores mensurados.

Na extremidade do *stinger* foi fixada a célula de carga (também conhecido como transdutor de força), que irá mensurar a força que a fonte de excitação (*shaker*) aplica na caixa.

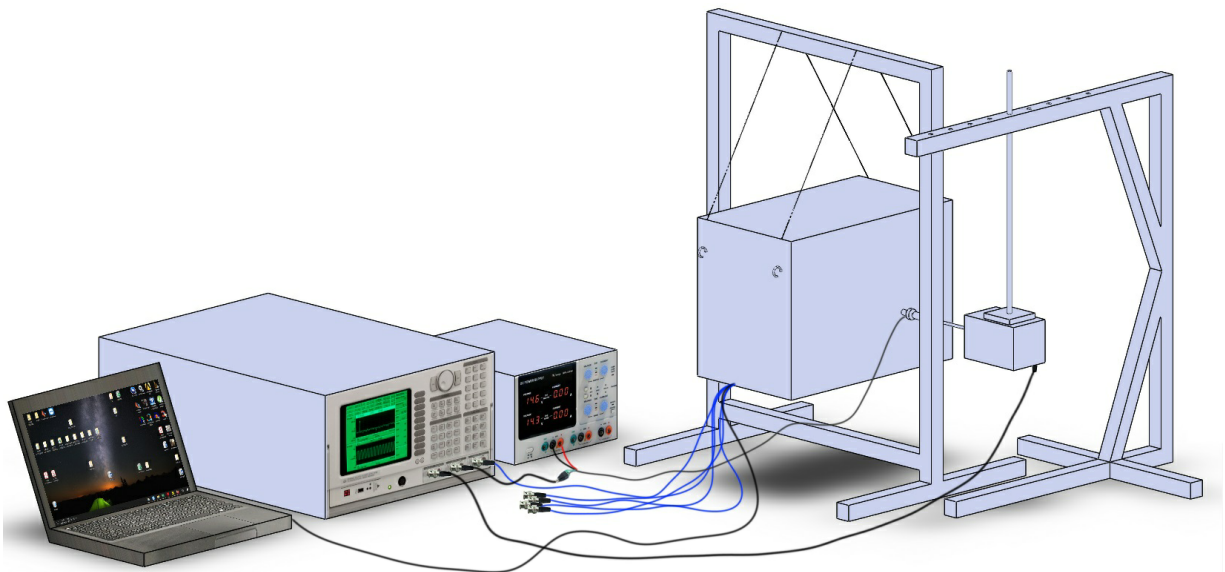
Figura 3.5 – Teste modal experimental - Orientação dos eixos.



Fonte: Do autor (2020).

Segundo Porcu et al. (2019), forças com baixo nível de energia já são suficientes para estimular as respostas na ressonância. A célula de carga foi alimentada pela fonte Minipa - MPL-3305M e conectada ao analisador de sinais no canal 1, representando o sinal de entrada. A configuração experimental simplificada pode ser observada na Figura 3.6. Computador, analisador de sinais, fonte, *shaker* e laser (que está dentro da caixa) foram alimentados pela rede elétrica de 127 V. Os dados obtidos pelo analisador SR785 foram posteriormente transferidos para o computador por meio de um pen drive.

Figura 3.6 – Configuração experimental para a análise modal.



Fonte: Do autor (2019).

Com o *setup* alinhado e ajustado, a configuração escolhida para a excitação do shaker foi *chirp* com *burst* de 80% e amplitude de 40 mV, para os três eixos. O sinal de excitação é gerado pelo próprio analisador dinâmico SR785 que permite medir a resposta de dispositivos eletrônicos, mecânicos e acústicos sem a necessidade de um gerador externo. É uma vantagem no que concerne a sincronização, se comparado com uma fonte externa.

A excitação *chirp*, assim como a randômica com *burst*, é uma das mais utilizadas no teste modal e oferece uma varredura senoidal de mesma amplitude em cada faixa do espectro selecionado. Pode-se optar por fazer a varredura de 0 a 50 Hz, de 0 a 1000 Hz, ou de 100 a 200 Hz, por exemplo. Na prática, a excitação provoca por meio do *shaker* frequências que vão do grave (baixas frequências) ao agudo (altas frequências), em um curto intervalo. Cada varredura ocorre dentro de um intervalo de amostragem do analisador FFT (SR785). Essa forma de excitação é útil para medir as respostas das frequências rapidamente, sem ter que fazer várias medições discretas usando apenas uma única onda senoidal. A FRF e a coerência resultantes obtidas são uma das melhores para sistemas lineares e a técnica também é utilizada para identificação de características não lineares do sistema (AVITABILE, 2018).

O *burst* de 80% significa que a entrada se mantém por 80% do tempo do sinal em cada amostragem. Os 20% do tempo restante o *shaker* fica parado, sendo um tempo adequado para a saída se estabilizar antes do final do intervalo amostral. Com isso o analisador consegue identificar melhor os sinais de entrada e saída.

O *chirp* também não requer a aplicação de janelamento e é intrinsecamente livre do fenômeno de *leakage*, que pode ocorrer em excitações randômicas sem *burst*, por exemplo, onde nem sempre a condição básica de periodicidade para o processo da transformada de Fourier (FFT) é satisfeita com êxito.

Para cada eixo, foram obtidas uma FRF para cada acelerômetro, totalizando 15 FRFs (3 eixos e 5 acelerômetros). Em cada varredura nas faixas de frequência selecionadas o analisador de sinais (SR785) amostra 800 pontos, ou seja, se configurado uma varredura *chirp* de 0 a 800 Hz, por exemplo, temos 800 linhas de dados discretos (amplitudes) para cada frequência inteira de 0 a 800. Neste trabalho, visando obter uma melhor discretização dos dados, optou-se por realizar 4 varreduras para cada FRF.

Foi observado em testes preliminares que o SLD sofria maiores perturbações quando excitado em frequências mais baixas, até 200 Hz, aproximadamente. Como a frequência de

captura da câmera é de 15 fps, ou 15 Hz, visando uma observação mais apurada do fenômeno, optou-se por uma maior discretização amostral nesta faixa de frequência, conforme Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Faixas de frequência e quantidade de varreduras.

FAIXA DE FREQUÊNCIA EXCITADA PARA CADA ACELERÔMETRO (Hz) (eixos x, y e z)	QUANTIDADE DE VARREDURAS (MÉDIAS)
0 - 25	20
0 - 200	20
200 - 600	20
600 - 1000	20

Fonte: Do autor (2020).

A coluna quantidade de varreduras representa a quantidade de pulsos *chirp*, nas respectivas faixas de frequência excitadas, que foram executados. A FRF resultante é representada pelas médias desses 20 pulsos.

A função coerência foi utilizada, em paralelo com a FRF, como uma ferramenta para avaliar a qualidade dos dados. Ela aponta a correlação normalizada entre a força medida na entrada (célula de carga) e o sinal de resposta da saída (acelerômetro), para cada frequência, sendo na prática maior que 0 e menor que 1, quando expressada em sua forma real. Num sistema ideal, sem ruído e linear, a função coerência terá, para todas as frequências, o valor máximo de 1. Algumas possíveis causas de valores inferiores são: sinal de saída não está linearmente relacionado com o sinal de entrada, ação de ruídos/distúrbios e mudança rápida na magnitude do sinal de entrada ou saída (GRIFFIN, 1996).

Como a excitação *chirp* faz a varredura da baixa até a alta frequência para cada intervalo amostral, a resposta no tempo irá apresentar uma amplificação quando a varredura passar pelas frequências naturais. Sendo assim, os picos das FRFs representam regiões de ressonância, onde estão presentes as frequências naturais do protótipo.

3.5 Análise *speckle* laser dinâmico por frequência e *software* utilizados

Uma vez obtidas as frequências naturais do protótipo, com o mesmo ainda suspenso na condição livre-livre, Figura 3.6, foi feita uma nova varredura em frequência para cada eixo (x, y e z), desta vez pontualmente e simultaneamente com as análises *speckle* laser dinâmico, para que assim fosse possível analisar o comportamento do SLD (por meio do AVD) nas frequências de 0 a 1000 Hz.

Para cada excitação pontual em frequência, foram realizadas simultaneamente 3 capturas de 128 imagens a 15 fps, optando por uma varredura com as seguintes discretizações: de 0 a 30 Hz de 1 em 1 Hertz, de 30 a 50 Hz de 2 em 2 Hertz, de 50 a 100 Hz de 5 em 5 Hertz, de 100 a 500 Hz de 10 em 10 Hertz e de 500 a 1000 Hz, varreduras de 25 em 25 Hertz, conforme Tabela 3.2. Ao todo, 999 capturas foram realizadas, sendo 333 por eixo.

Tabela 3.2 – Discretização por faixa de frequência.

DISCRETIZAÇÃO (Hz)	FAIXA DE FREQUÊNCIA (Hz)
1	0 - 30
2	30 - 50
5	50 - 100
10	100 - 500
25	500 - 1000

Fonte: Do autor (2020).

As excitações, promovidas pelo *shaker*, foram frequências senoidais pontuais excitadas a uma amplitude de 80 mVpk. Optou-se por uma melhor discretização a baixas frequências porque o SLD se mostrou mais sensível à elas.

Com o protótipo ainda suspenso, visando investigar o comportamento do AVD sob excitações em ruído branco (com frequências aleatórias na faixa de 0 a 1000 Hz), a caixa foi excitada no eixo Y em três diferentes amplitudes: 20, 40 e 80 mV. Para cada amplitude excitada foram capturadas 4 pacotes de 128 imagens a 15 fps, para cálculo do AVD.

Neste trabalho, para realização de todas as coletas das imagens, foi utilizado o *software* SpeckleTool versão 1.2.3, que captura imagens em 8 bits, em escala de cinza, nas dimensões 640 x 480 pixels. A câmera se comunicou com o computador por meio de um cabo USB que passa por um pequeno e selado orifício ao fundo da caixa, juntamente com os cabos dos acelerômetros e da alimentação do laser. Para o processamento das imagens foi utilizado o *software* GNU Octave versão 4.4.0, e para gerar os sinais de vibração foi utilizado o analisador dinâmico de sinais SR785.

A fim de investigar a interferência da vibração na técnica *speckle* laser dinâmico ou *biospeckle*, foi utilizado o método numérico da diferença de valores absolutos (AVD), equação 2.2, que é um número adimensional que quantifica o nível global de atividade da amostra, e foi obtido por meio do processamento das imagens no *software* Octave (BRAGA; RIVERA; MOREIRA, 2016).

3.6 Avaliação da vibração em condições reais e transmissibilidade

Visando compreender o comportamento da técnica SLD e como ela se relaciona com a frequência de excitação, os testes anteriores (SEÇÃO 3.4 e 3.5) foram realizados em condições ideais, ou seja, com a caixa suspensa na condição livre-livre. Todavia, faz-se necessário avaliar o comportamento do SLD em condições reais de uso para um dispositivo portátil.

Com este intuito, novos testes foram realizados com o protótipo em cima de uma mesa de madeira (160 x 68,5 x 76,5 cm) com o *shaker* excitando a mesma a uma distância de 30 cm do protótipo. A configuração experimental é semelhante a da Figura 3.8, porém sem o isolador mecânico (em laranja) embaixo do protótipo.

Uma vez que o comportamento do AVD, em relação a frequência, foi amplamente explorado na Seção 3.5 e de forma a otimizar e tornar exequível a realização dos novos testes, foram definidas estrategicamente 8 frequências pontuais para excitação, de forma a abranger toda a faixa de frequência de 0 a 1000 Hz. São elas: 5, 15, 25, 42, 60, 112, 470 e 800 Hz.

As frequências 5, 15 e 25 Hz caracterizam excitações em baixa frequência e na faixa de frequência de captura da câmera, região onde o SLD se mostrou mais sensível. As frequências 42, 60 e 112 Hz caracterizam excitações em média frequência, sendo regiões onde ocorreram ressonâncias segundo FRFs calculadas previamente. As frequências de 470 e 800 Hz representam as excitações em alta frequência, região onde o SLD se mostrou menos sensível.

Dado que as vibrações na natureza podem se apresentar como uma soma de frequências aleatórias, também foram aplicadas, por meio do *shaker*, excitações do tipo ruído branco, um sinal em frequências aleatórias que fornece igual densidade de ruído (V/\sqrt{Hz}) com densidade espectral de potência (*PSD*) constante para todos intervalos de frequência escolhidos. Também, visando investigar a influência da amplitude de excitação nos resultados, todas as excitações foram realizadas em três diferentes amplitudes: 40, 70 e 100 mVpk. O *pk* na unidade caracteriza que a amplitude da fonte (*shaker*) em milivolts (mV) é representada pela voltagem de pico, ou seja, pelo máximo valor instantâneo da função a partir do nível de zero volt (STANFORD RESEARCH SYSTEMS, 2017).

Uma das formas de avaliar a performance de isolamento de um sistema é por meio da transmissibilidade de vibração, que pode ser interpretada como o nível de vibração transmitido de uma estrutura para outra (GHELLER, 2013).

Testes de transmissibilidade foram realizados utilizando dois acelerômetros. Um de entrada, localizado junto ao ponto de fixação do *shaker* na mesa, e um de saída, que é o acelerô-

metro 1, posicionado na direção do eixo z, ao lado da superfície amostrada pelo SLD, dentro da caixa, que se manteve posicionada a 30 cm de distância do *shaker*.

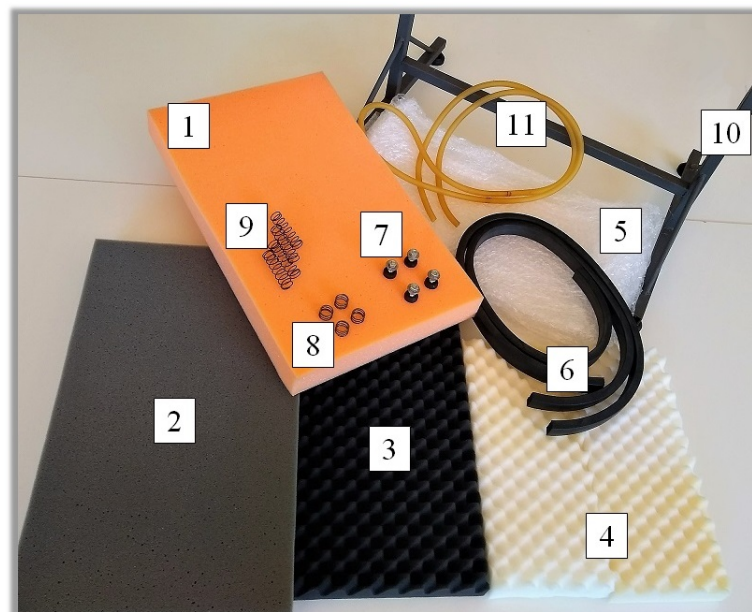
Neste trabalho, as curvas de transmissibilidades foram obtidas por meio do analisador dinâmico de sinais SR785 de forma análoga à FRF, ou seja, relacionando o sinal de aceleração da saída com o sinal de aceleração da entrada, ambos obtidos simultaneamente por dois acelerômetros PCB-352C33 (EQUAÇÃO 3.1). A excitação que foi promovida pelo *shaker* foi a do tipo *chirp*, na faixa de 0 a 200 Hz. Não foi necessário varreduras em intervalos mais extensos devido à evidente queda na transmissibilidade para altas frequências, que foi comprovada por testes preliminares e pode ser observada na Figura 2.9.

$$T_d(\omega) = \frac{|\ddot{X}|}{|\ddot{Y}|} \quad (3.1)$$

Se $T_d > 1$, há uma amplificação do sinal, ou seja, a resposta foi maior que a entrada. Se $T_d < 1$, ocorre a atenuação da vibração, a magnitude do sinal de saída, medido pelo acelerômetro 1, é menor que a magnitude do sinal de entrada (BALBINOT, 2001; BECKER, 2006).

Neste trabalho foram investigados 11 tipos de isoladores mecânicos que podem ser vistos na Figura 3.7. Com as curvas de transmissibilidade, pôde-se identificar quais destes dispositivos são mais eficientes em atenuar a vibração mecânica externa nas condições estudadas.

Figura 3.7 – Isoladores utilizados.



Fonte: Do autor (2020).

A Tabela 3.3 descreve os isoladores bem como suas especificações. No item 6, borracha preta, foi utilizado duas tiras dessa borracha nas extremidades ao longo da maior dimensão da base da caixa (41 cm). Para o amortecedor (vibra-stop) e as molas (ambas da marca BOSCH), itens 7, 8 e 9, foram utilizadas 4 unidades dos mesmos, dispostos nas extremidades da base da caixa. Com relação aos itens 10 e 11, a caixa-protótipo ficou suspensa em cima da mesa por meio do cavalete conforme pode ser visto na Figura 3.9. Para as espumas e plástico bolha, os mesmos foram dispostos de forma simétrica sob a caixa, conforme ilustrado na Figura 3.8.

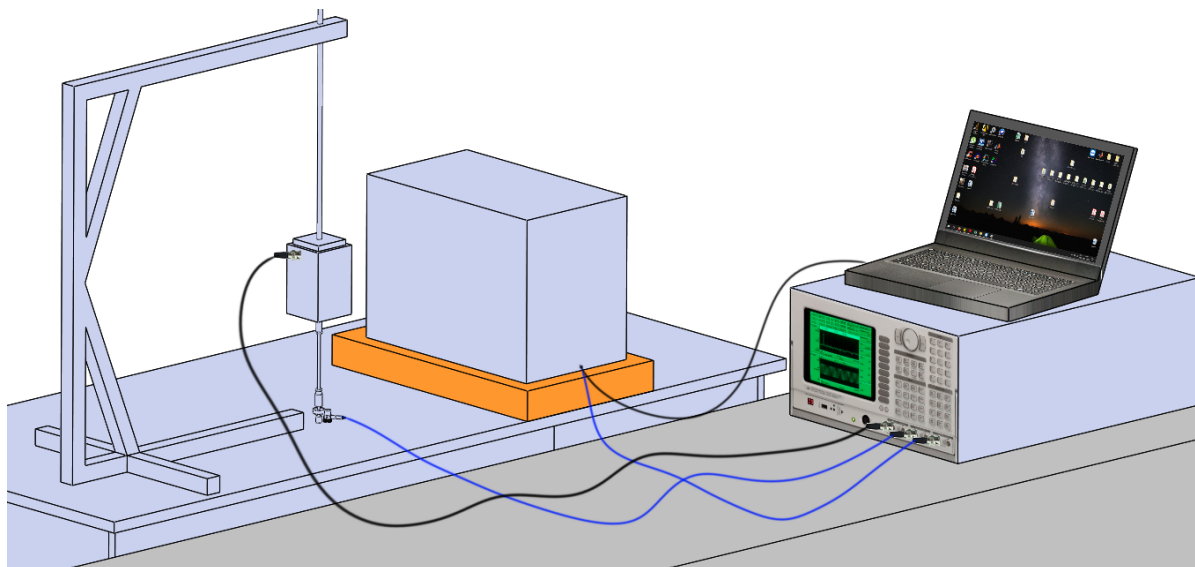
Tabela 3.3 – Isoladores utilizados.

ITEM	NOME	CÓDIGO	ESPECIFICAÇÕES GERAIS
1	Espuma laranja	ESPLAR	Dimensões 502 x 302 x 50 mm, densidade de 0,0226 g/cm ³
2	Espuma cinza	ESPCIN	Dimensões 502 x 302 x 50 mm, densidade de 0,0184 g/cm ³
3	Esp. preta alveolar	ESPPRE	Dimensões 421 x 232 x 45 mm, massa de 65,75 g
4	Esp. branca alveolar	ESPBRA	Dimensões 351 x 310 x 45 mm, massa de 57,73 g
5	Plástico bolha	PLABOL	Diâmetro da bolha 10 mm, massa de 84,67 g
6	Borracha preta	BORPRE	Seção de dimensões 25 x 12 mm, densidade 0,4889 g/cm ³
7	Amortecedor	VIBSTO	Amortecedor Vibra-stop VS.01, diâmetro 20 mm, capacidade 10 kg
8	Mola pequena	MOLAPQ	Espessura 1,8 mm, diâmetro externo 18,6 mm, n ^o espiras 2,5, massa 2,53 g, ref. 2604617006720
9	Mola grande	MOLAGD	Espessura 1,7 mm, diâmetro externo 17,5 mm, n ^o espiras 7, massa 5,21 g, ref. 1604616018
10	Cx. suspensa nylon	CAVNYL	Caixa suspensa por 2 fios de nylon (0,5 mm, 32 kg) no cavalete
11	Cx. suspensa elástico	CAVELA	Caixa suspensa por um tubo elástico ref. 202 (diam. externo 10 mm e diam. interno 5 mm)

Fonte: Do autor (2020).

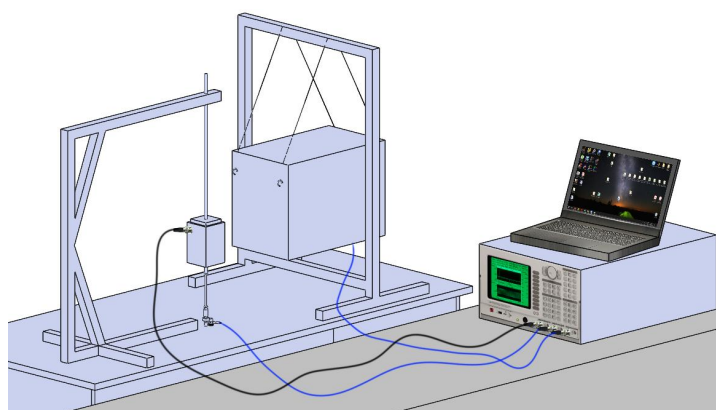
Tendo em vista que um dos objetivos desse trabalho é a redução da interferência da vibração externa na técnica *biospeckle* laser propondo a utilização de um isolador mecânico, testes SLD também foram executados e analisados junto às curvas de transmissibilidade para cada isolador.

Figura 3.8 – Configuração experimental - Teste de transmissibilidade e SLD.



Fonte: Do autor (2020).

Figura 3.9 – Configuração experimental do teste de transmissibilidade com o protótipo suspenso pelo cavalete.



Fonte: Do autor (2020).

O procedimento experimental seguiu o mesmo protocolo do teste realizado com o protótipo sobre a mesa sem os isoladores de vibração, conforme Tabela 3.4. As excitações foram promovidas pelo *shaker* na mesa no sentido vertical nas frequências de 5, 15, 25, 42, 60, 112, 470, 800 Hz e ruído branco, em três diferentes níveis de intensidade (amplitude): 40, 70 e 100 mVpk. Para cada uma dessas condições combinadas, enquanto a mesa era excitada em determinada frequência e amplitude, foram realizadas 4 capturas de 128 imagens a uma velocidade de 15 fps, para cálculo do AVD. O AVD final foi calculado por meio da média dos 4 valores obtidos nessas 4 capturas. A sigla SEMAMO (sem amortecimento) refere-se ao protótipo sobre a mesa sem nenhum isolador de vibração.

Tabela 3.4 – Condições experimentais

CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS	FATORES EXPERIMENTAIS	
	Freq. excitada	Amplitude
SEMAMO		
ESPLAR		
ESPCIN	5	
ESPPRE	15	
ESPBRA	25	40
PLABOL	42	
BORPRE	60	70
VIBSTO	112	
MOLAPQ	470	100
MOLAGD	800	
CAVNYL	Ruído br.	
CAVELA		

Fonte: Do autor (2020).

A configuração experimental utilizada para os testes pode ser vista na Figura 3.8. O elemento em laranja, onde a caixa se encontra sobre, representa os 11 isoladores utilizados neste trabalho.

3.7 Magnitude das vibrações em um ambiente de trabalho

As excitações promovidas por meio do *shaker* são excitações forçadas. Para fins de investigação, faz-se necessário comparar a magnitude dessas vibrações com a magnitude das vibrações presentes em um local de trabalho comum, como num laboratório. Neste trabalho foram avaliadas as vibrações em dois diferentes locais: o CEDIA e o LMA.

Para isto, foi utilizado o método RMS (do inglês *Root mean square*), uma medida estatística que quantifica a magnitude da vibração e é dado pela Equação 3.2 abaixo. Método também utilizado como parâmetro nos trabalhos de Balbinot (2001), Becker (2006), Margarido (2013), Brito e Oliveira (2017).

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (3.2)$$

Onde n representa a quantidade de linhas obtidas conforme discretização de aquisição do sinal de vibração e x representa os valores de aceleração (em m/s^2) obtidos pelo acelerômetro.

Para fins comparativos, a magnitude da vibração presente no ambiente de trabalho (CEDIA e LMA) foi comparada com a magnitude de excitação em ruído branco, com frequências aleatórias na faixa de 0 a 200 Hz.

As excitações em ruído branco foram realizadas em três diferentes amplitudes, 40, 70 e 100 mV e o acelerômetro foi posicionado em duas posições diferentes na mesa: junto ao *shaker* (Posição 1) e a 30 cm do mesmo (Posição 2). Em cada condição de excitação as vibrações foram aquisitadas por um período de aproximadamente 10 min.

Em ambos laboratórios, os sinais de vibração foram medidos utilizando o mesmo modelo de acelerômetro utilizado nos testes anteriores. Para a aquisição dos sinais foi utilizado o sistema de aquisição da National Instruments e um computador com o *software* Labview; o processamento dos sinais foi feito em MATLAB. A taxa de aquisição utilizada foi de 1652 Hz.

Para aquisição das vibrações no ambiente de trabalho, o acelerômetro foi posicionado no centro de uma mesa convencional de madeira e o sinal foi medido por cerca de 2 horas. Em ambos laboratórios haviam fluxo normal de pessoas, com portas e janelas abrindo e fechando, cadeiras arrastando, pessoas se locomovendo próximas à mesa e veículos transitando na rua. Apenas foi solicitado que os usuários do laboratório não tocassem na mesa onde acontecia o experimento para não comprometer os resultados.

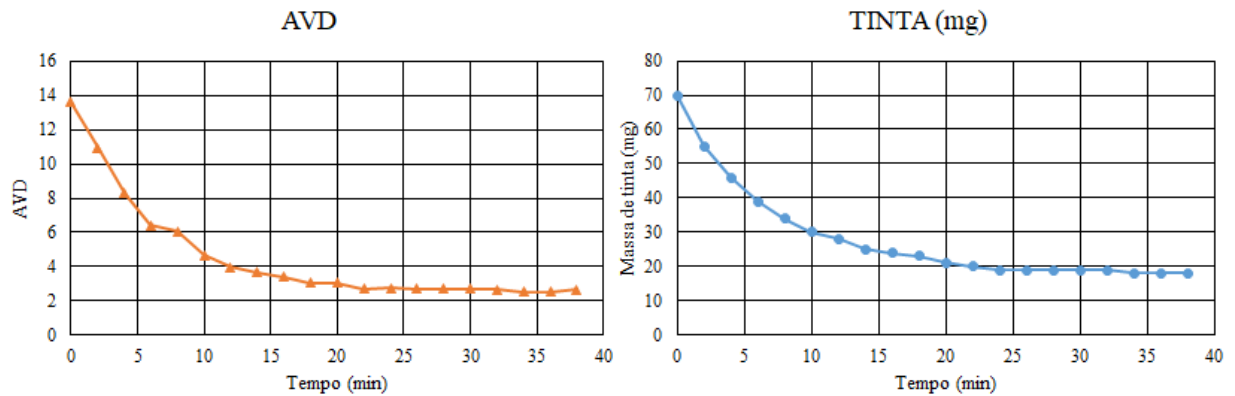
4 RESULTADOS

Nesta seção foram apresentados e discutidos os resultados do estudo com base nas metodologias propostas na Seção 3.

4.1 Validação do protótipo por meio da análise de secagem de tinta

Para validar se a configuração experimental proposta na Seção 3.1 estava apta a obter resultados SLD confiáveis e replicáveis, foram realizados testes de secagem de tinta e os resultados foram comparados com os resultados obtidos por uma balança de precisão. A Figura 4.1 abaixo apresenta os resultados de uma das 4 réplicas.

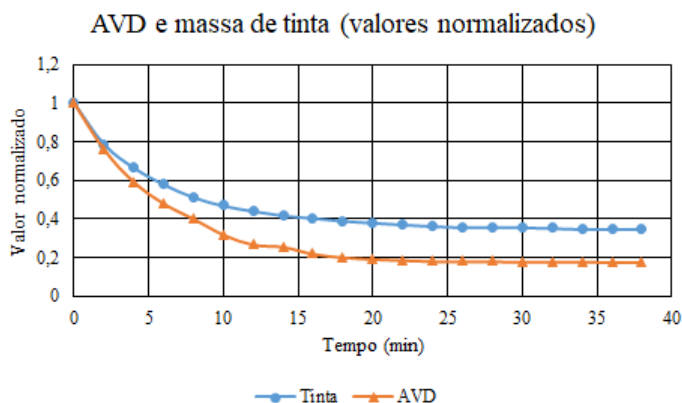
Figura 4.1 – Massa de tinta de esmalte x tempo.



Fonte: Do autor (2019).

Pode-se perceber que a curva obtida pela balança de precisão e a curva obtida pelo SLD são concordantes. Ao normalizar os valores, observa-se que ambos índices se estabilizaram a partir dos 20 minutos, indicando que a tinta secou e que o índice AVD conseguiu realizar com êxito a leitura da atividade das amostras de tinta, validando assim a configuração experimental proposta para o protótipo. A Figura 4.2 exibe os resultados das médias normalizadas das 4 réplicas.

Figura 4.2 – Massa de esmalte x tempo (média dos valores normalizados das 4 réplicas).



Fonte: Do autor (2019).

4.2 Valor AVD de referência em superfície inerte

Os valores de AVD obtidos em condições de laboratório, conforme metodologia descrita na Seção 3.3, são mostrados na Tabela 4.1 abaixo.

Tabela 4.1 – AVD de referência.

CONDIÇÃO	AVD (MÉDIA)
1	2,9952
2	3,1829
3	3,0312
4	3,0480

Fonte: Do autor (2020).

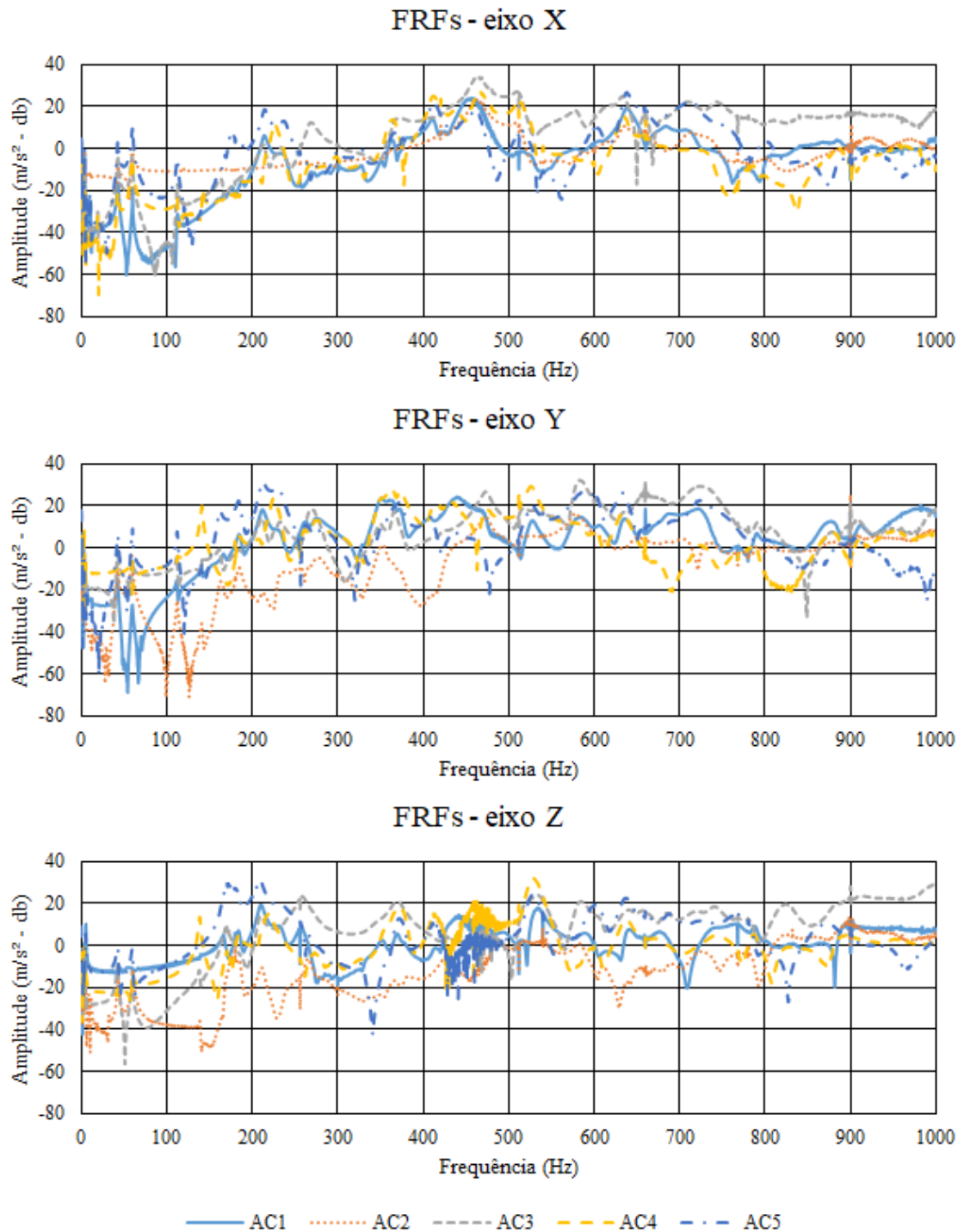
Para a configuração miniaturizada definida e a amostra inerte observada, o índice AVD se mostrou estável para as 4 condições avaliadas, apresentando um valor médio de 3,0643.

Esse teste também comprovou que a caixa de madeira que abarca os dispositivos essenciais ao protótipo consegue isolá-los eficientemente de interferências oriundas da luminosidade externa, pois os valores obtidos para a condição 1 (luz do laboratório acesa e porta da câmara aberta) foram análogos aos valores das demais condições, onde a porta da câmara permaneceu fechada.

4.3 Frequências naturais do protótipo

As curvas FRFs obtidas para os respectivos eixos podem ser vistas na Figura 4.3.

Figura 4.3 – FRFs por eixo (0 a 1000 Hz).

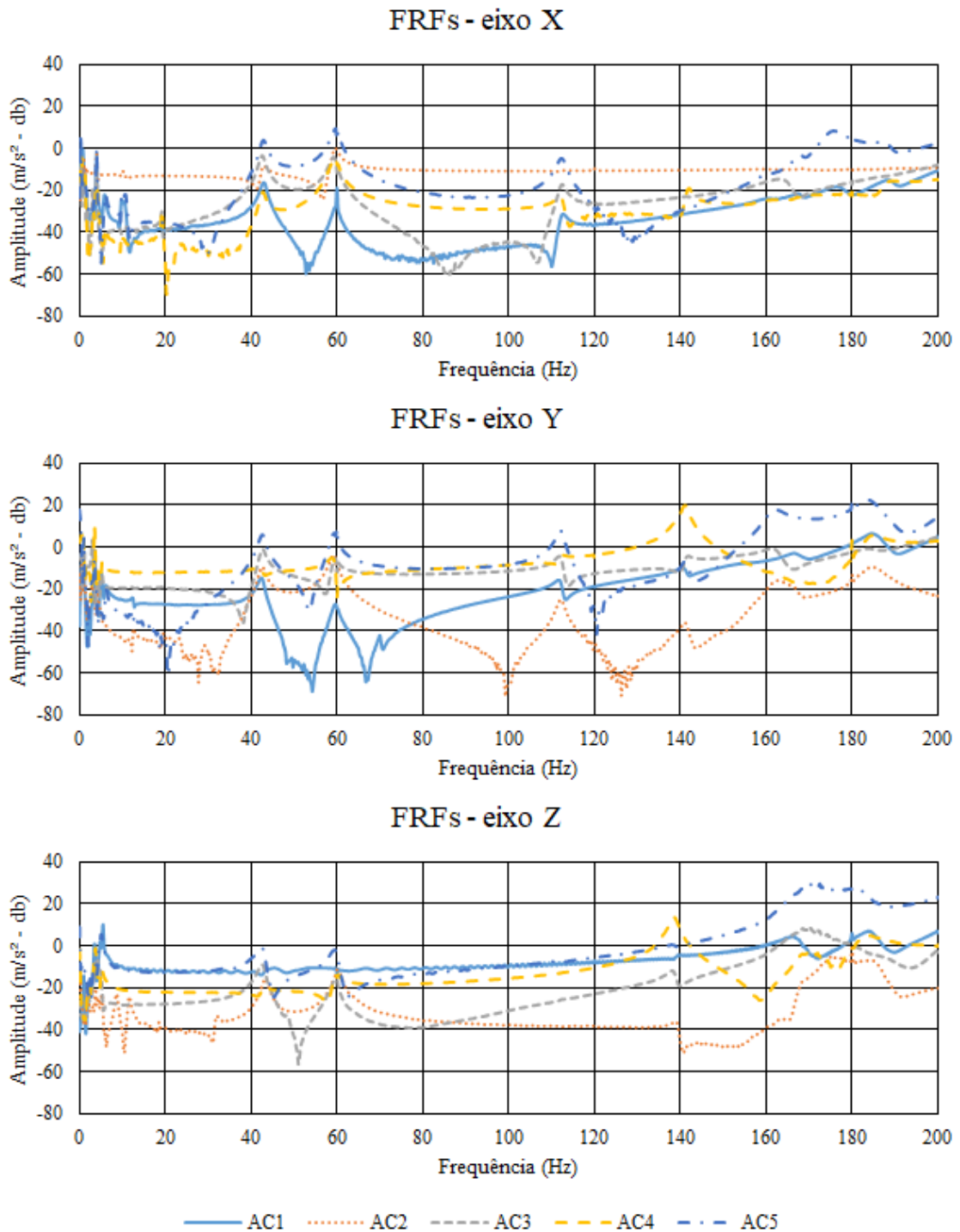


Fonte: Do autor (2020).

A ocorrência de picos mais visíveis entre os 5 acelerômetros pode ser melhor observada em frequências até aproximadamente 350 Hz, após isso, cada acelerômetro assume um comportamento relativamente mais independente aos demais.

Para melhor visualização das frequências naturais excitadas em cada eixo, a Figura 4.4 exibe os mesmos gráficos da Figura 4.3 porém numa janela de 0 a 200 Hz.

Figura 4.4 – FRFs por eixo (0 a 200 Hz).



Fonte: Do autor (2020).

Nela pode-se observar com maior clareza a ocorrência de picos concomitantes não só entre os cinco acelerômetros em determinado eixo, mas também picos entre os eixos. As frequências em que ocorrem estes picos representam as frequências naturais do protótipo.

Como a estrutura do protótipo é complexa, composta por vários elementos de sustentação, fixação e dispositivos fabricados de materiais distintos, Figura 3.4, para excitações em frequências mais elevadas, onde geralmente os modos de vibrar são mais complexos, a primeira vista ocorre uma dissipação da energia de excitação por toda estrutura do protótipo, somados a uma parcela de ruído e não linearidade, por isso a dificuldade em encontrar picos mais salientes nas frequências mais altas.

A Tabela 4.2 exibe as frequências naturais observadas nos três eixos. Os valores até 3 Hz não foram considerados na análise devido limitações experimentais e de sensibilidade dos equipamentos. A primeira frequência natural de cada eixo (4, 3,5 e 3,7 Hz) é de corpo rígido, decorrente da montagem livre-livre, e as demais, de corpo flexível.

Tabela 4.2 – Frequências naturais extraídas.

	EIXO X	EIXO Y	EIXO Z
FREQUÊNCIA NATURAL EXTRAÍDA (Hz)	4	3,5	3,7
	6	5,2	5,2
	9,75	12,5	42
	19,25	42	60
	42	60	139
	60	112	175
	112	142	210
	215	186	265
	365	214	370
	412	350	415
	470	471	530
	510	529	638
	640	580	
	710	635	
		725	
	790		
	880		

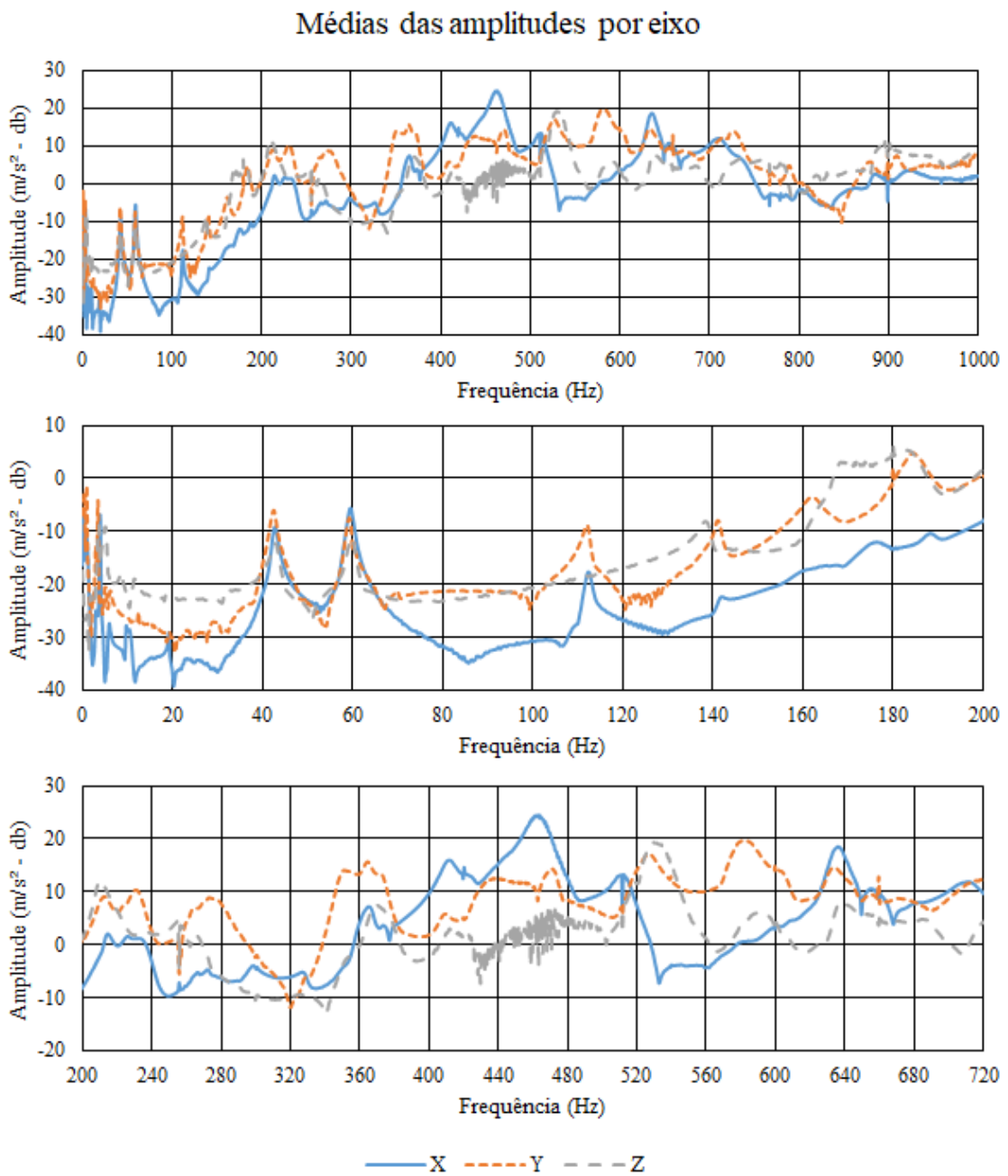
Fonte: Do autor (2020).

Como pode ser observado nas Figuras 4.3 e 4.4, algumas frequências naturais apresentaram picos mais nítidos que outras; 42 Hz e 60 Hz, por exemplo, aparecem nos 3 eixos para os 5 acelerômetros. Outras, também nos 3 eixos, x, y e z, respectivamente, aparecem muito

próximas: 4, 3,5 e 3,7; 6, 5,2 e 5,2; 215, 214 e 210; 365, 350 e 370; 510, 529 e 530; 640, 635 e 638 Hz.

A Figura 4.5 representa a média dos valores de amplitude obtidos nas FRFs dos 5 acelerômetros, para cada eixo. Nela é possível observar de forma mais clara as frequências naturais que são predominantes nos 3 eixos.

Figura 4.5 – Médias das amplitudes por eixo.



Fonte: Do autor (2020).

A saída gráfica que o analisador dinâmico SR785 fornece, bem como demais configurações selecionadas, podem ser vistas na Figura 1 no Anexo A. As curvas de coerência obtidas nos testes, expressas em magnitude logarítmica, podem ser observadas na Figura 2, também no Anexo A e estão dentro do esperado.

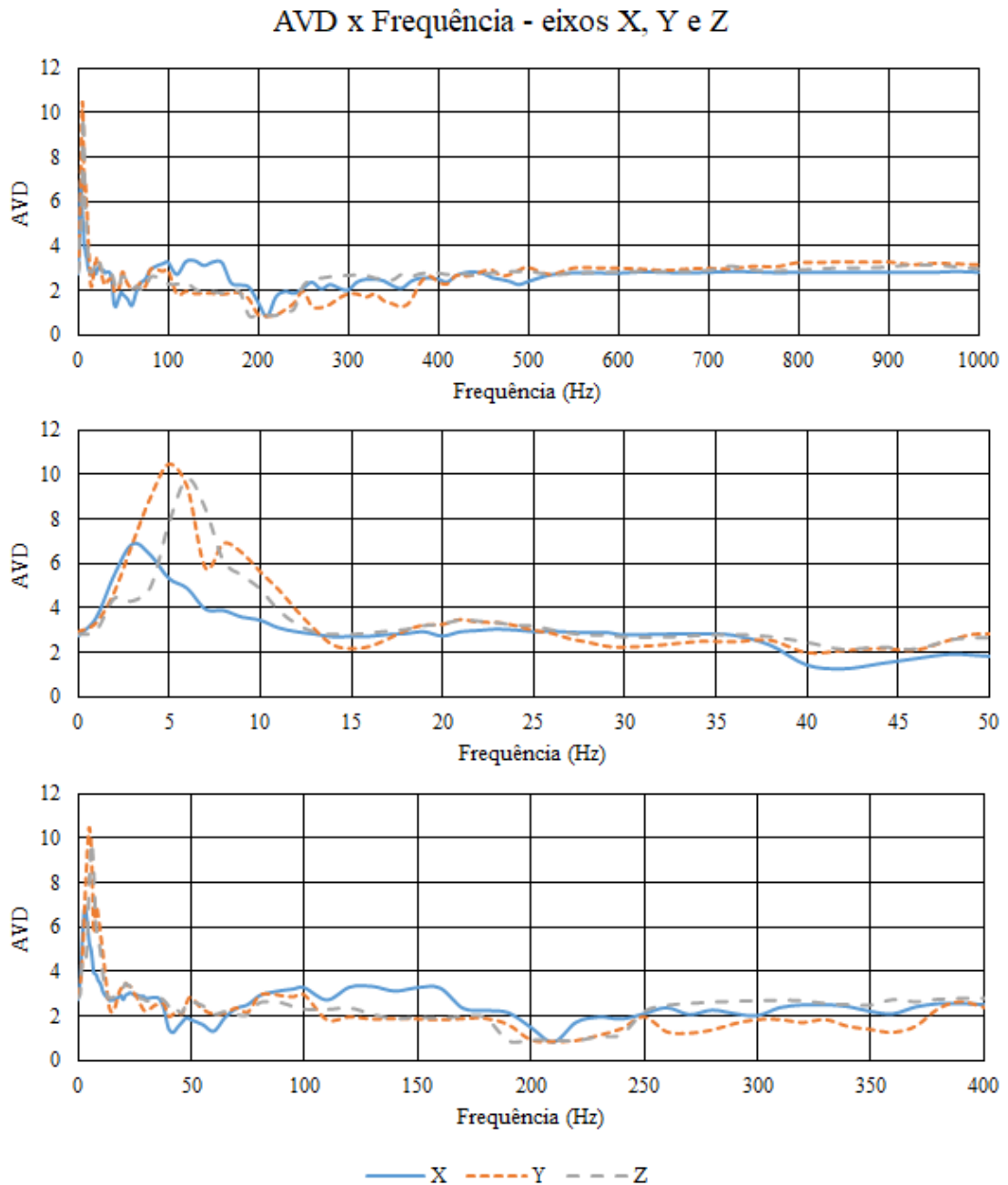
4.4 AVD x Frequência

Foram gerados gráficos que representam o comportamento do AVD quando o protótipo suspenso é excitado diretamente nas frequências pontuais de 0 a 1000 Hz, nos três eixos. Para uma melhor visualização e apresentação destes mesmos dados, eles foram exibidos em mais dois intervalos, de baixas e médias frequências: 0 a 50 e 0 a 400 Hz (FIGURA 4.6).

Observando a Figura 4.6, pode-se verificar que a técnica SLD se mostrou mais sensível às excitações em baixas frequências do que às de alta, apresentando valores de máximo em excitações próximas a 5 Hz. Houve uma queda mais acentuada no índice AVD, nos 3 eixos, em excitações próximas a 210 Hz, sinalizando uma resposta do sistema à região de ressonância próxima a essa frequência, como pode ser observado nas Figuras 4.3 e 4.5. Essa queda no AVD pode estar relacionada, dentre outros fatores, à capacidade da câmera. Como sua velocidade de captura é de 15 fps (15 Hz), e a ressonância na faixa de 210 Hz promove uma elevada excitação do conjunto (assim como nas ressonâncias em 42 e 60 Hz), a câmera não foi capaz de capturar o fenômeno com velocidade suficiente, e a imagem do padrão *speckle* resultante ficou borrada, pouco nítida. Assim sendo, os grãos no padrão ficaram pouco definidos e o AVD diminuiu. Imagens desse padrão na excitação em 210 Hz no eixo X, Y e Z podem ser vistas na Figura 3 no Anexo A. Para as demais faixas de frequência, houve pouca variação, principalmente em frequências acima de 400 Hz. Tais resultados atestam a influência da vibração no AVD, demandando o uso de isolador de vibração para mitigar este efeito.

Como a velocidade de captura da câmera é de 15 fps, infere-se que este é o principal motivo para a evidente maior sensibilidade do índice às baixas frequências, fenômeno que seria observado mesmo que não houvessem frequências naturais nesta faixa. Nas outras frequências naturais mais notáveis como 42, 60 e 112 Hz por exemplo, a variação no AVD observada é um pouco menor, ainda que notável. Para as frequências naturais que ocorreram em valores acima de 250 Hz, a influência da ressonância no SLD se mostrou cada vez menor. Motivo que pode ser devido ao fato da carcaça e estrutura do protótipo absorver/filtrar tais vibrações, além de ser uma frequência bem acima da taxa de captura da câmera.

Figura 4.6 – AVD x Frequência.



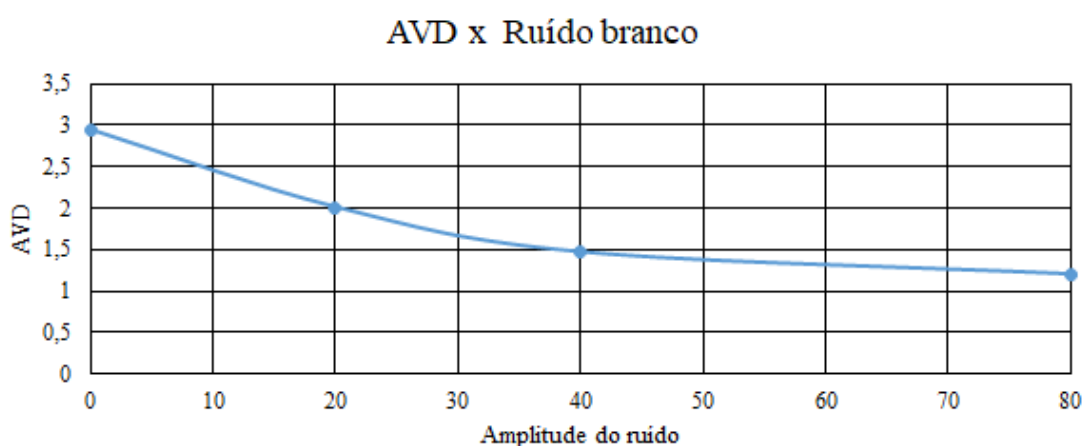
Fonte: Do autor (2020).

Tais resultados sugerem que, ao projetar um isolador de vibração para um dispositivo portátil capaz de realizar análises *biospeckle* laser, as faixas de frequências a serem isoladas devem ser as mais baixas, uma vez que as altas frequências são mais fáceis de serem filtradas e as capturas de imagens para análises SLD geralmente são realizadas a uma velocidade de 10 a 15 fps.

Com a caixa ainda suspensa, para fins investigativos, também foi realizado um teste semelhante promovendo no eixo Y excitações em forma de ruído branco - frequências aleatórias

na faixa de 0 à 1000 Hz - em três diferentes amplitudes: 20, 40 e 80 mV. O resultado indicou uma tendência de estabilização no valor do AVD mesmo com o aumento da amplitude de excitação (FIGURA 4.7). O valor do AVD diminuiu devido ao fato do ruído ser composto por frequências aleatórias na faixa de 0 a 1000 Hz. Com o aumento da amplitude de excitação, a magnitude da vibração transmitida para o protótipo aumenta. Todavia, aparentemente a imagem capturada pela câmera para análise SLD perde nitidez só até certo ponto, depois deste ponto ela se mantém constante independente da amplitude aplicada.

Figura 4.7 – AVD x Ruído branco.



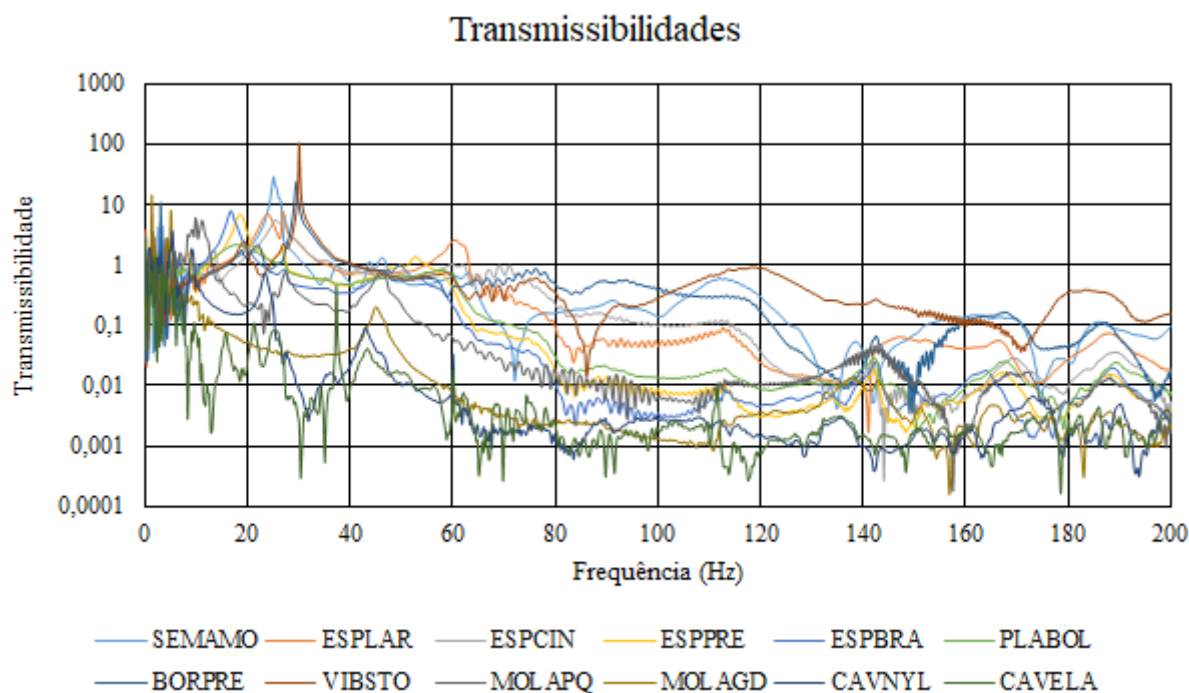
Fonte: Do autor (2020).

4.5 Resultados de transmissibilidade

Os resultados dos testes de transmissibilidade podem ser vistos em sua totalidade na Figura 4.8. Também foram incluídos, para comparação, o resultado de transmissibilidade para o protótipo sob a mesa sem nenhum dispositivo isolador de vibração, onde o código pode ser visto no gráfico como SEMAMO (sem amortecimento).

Pôde-se observar que para valores acima de 60 Hz não há amplificação do sinal de resposta, ou seja, a transmissibilidade é menor do que 1. Para a maioria dos materiais isolantes, pôde-se observar que nas frequências mais baixas, de 0 até 9 Hz aproximadamente, há um período transitório onde ocorreram oscilações aleatórias em valores de transmissibilidade no entorno de 0,1 e 1, devido a isto, não se pôde obter informações precisas nesta faixa de frequência. Região transitória que também pôde ser observada nos gráficos de coerência, expressos na forma real (FIGURA 5 - Anexo A).

Figura 4.8 – Transmissibilidades.

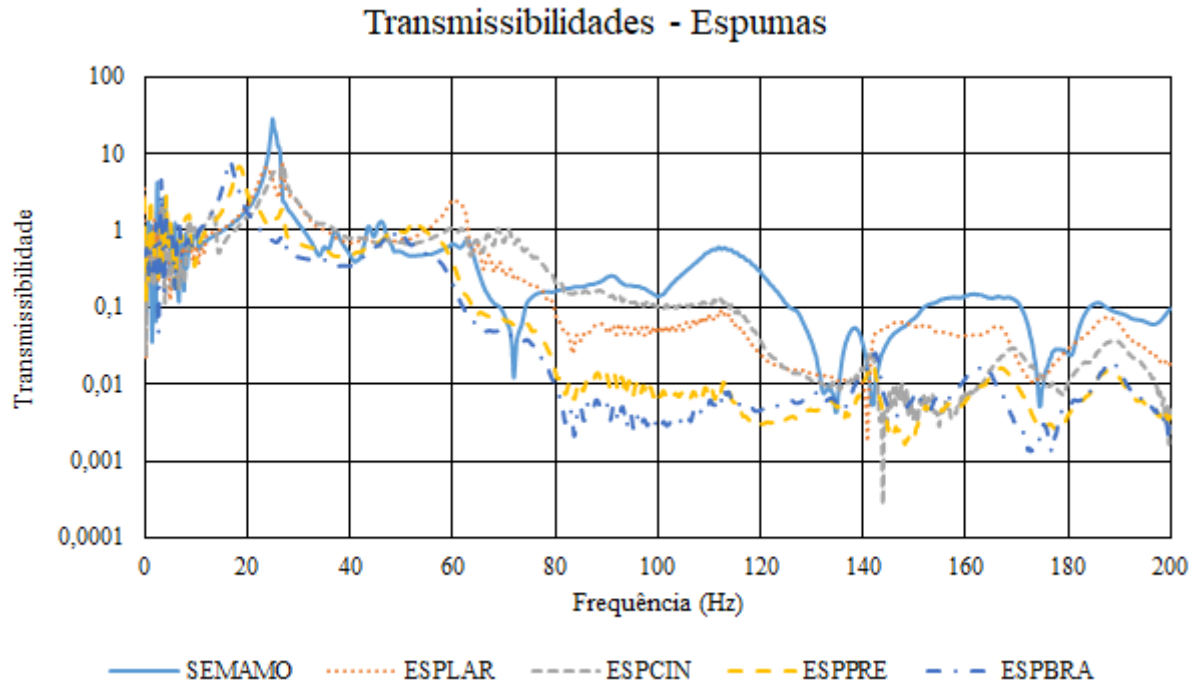


Fonte: Do autor (2020).

Para uma melhor visualização e interpretação dos resultados, os gráficos das transmissibilidades foram divididos em 3 domínios: 1) espumas; 2) borracha, vibra-stop e molas; 3) plástico bolha e cavaletes (FIGURAS 4.9, 4.10 e 4.11).

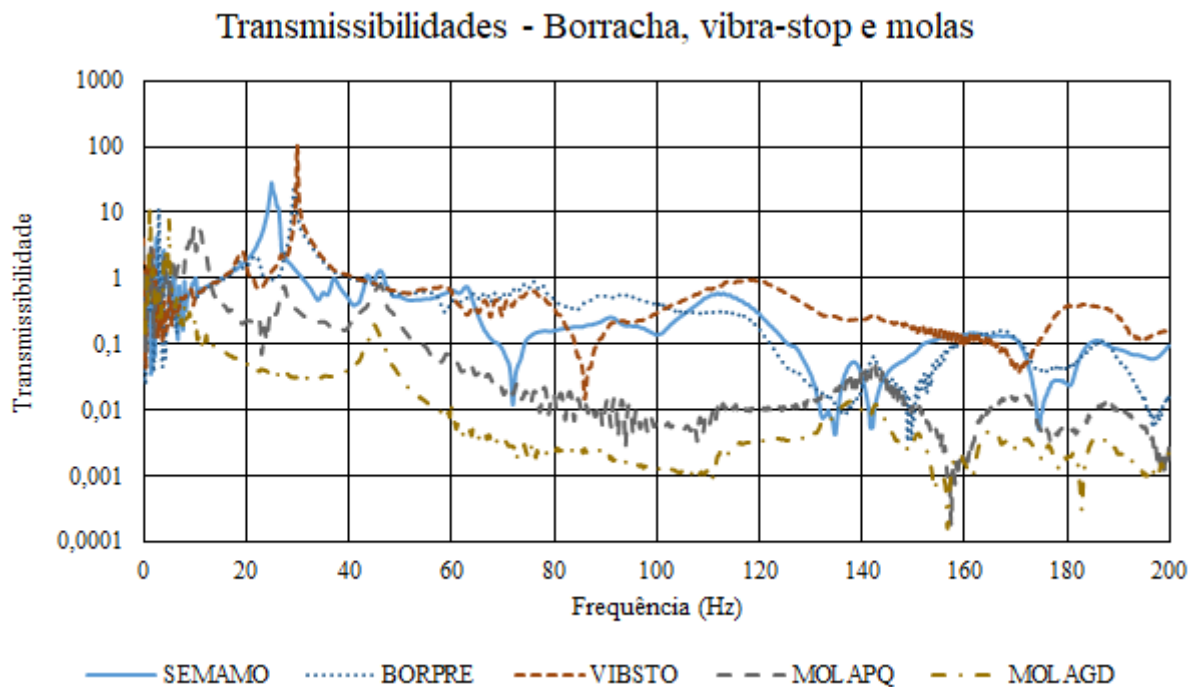
Para as espumas, Figura 4.9, pôde-se constatar que a ESPBRA (em azul escuro) foi a que apresentou melhores condições de isolamento de vibração no experimento. Com curva semelhante a ESPPRE, seu primeiro pico de ressonância ocorreu na frequência mais baixa em comparação às outras, 16,75 Hz. Sua curva também apresentou os menores valores de transmissibilidade, indicando maior eficiência no isolamento de vibrações. Seguida pela ESPPRE, que também é alveolar e possui pico de ressonância em 18,5 Hz. ESPCIN e ESPLAR tiveram um comportamento similar devido a pequena diferença de densidade entre as duas, com pico de ressonância de 26,75 Hz para ESPLAR e 27 Hz para ESPCIN, que se apresentou mais eficiente em isolar frequências maiores (a partir de 130 Hz). Para as demais frequências, ESPLAR, apesar do segundo pico de ressonância em 60 Hz, se mostrou ligeiramente mais eficiente que a ESPCIN na faixa de 65 a 130 Hz. É interessante observar que de 30 a 55 Hz, o comportamento da transmissibilidade de todas as espumas, bem como o comportamento sem isolador, foram próximos, indicando que, para essa faixa de frequência, o isolamento com espumas semelhantes às estudadas não seria a melhor escolha.

Figura 4.9 – Transmissibilidades - Espumas.



Fonte: Do autor (2020).

Figura 4.10 – Transmissibilidades - Borracha, vibra-stop e molas.

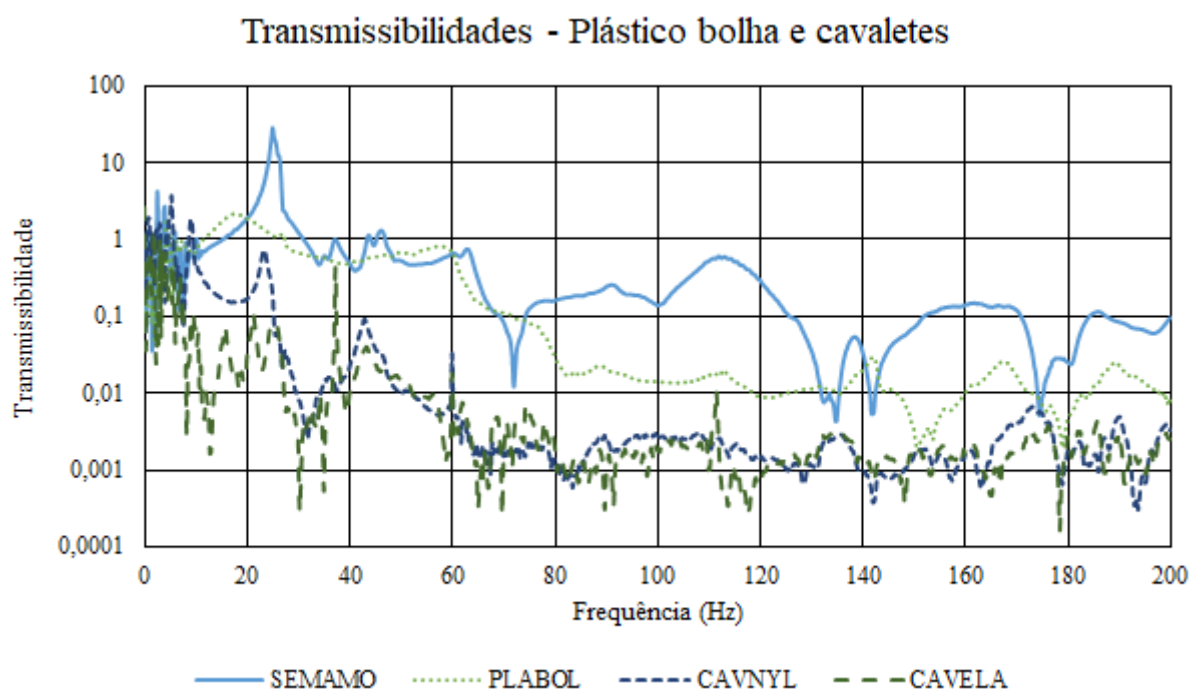


Fonte: Do autor (2020).

Com relação ao gráfico da Figura 4.10, percebeu-se uma menor eficiência de isolamento para os elementos de maior rigidez (mais duros), como a BORPRE e VIBSTO, onde o pico

de ressonância ocorreu próximo em ambas: 29,5 Hz e 30 Hz, respectivamente. A amplitude do pico do VIBSTOP foi a maior entre todos os elementos testados, indicando uma amplificação maior até mesmo que SEMAMO, nessa ressonância. BORPRE exibiu comportamento aproximado à VIBSTOP até 80 Hz, e para maiores frequências se mostrou mais eficiente no isolamento. Ambas as molas se mostraram muito superiores aos demais componentes. Com curvas também similares, a MOLAGD apresentou melhores resultados de transmissibilidade em comparação à MOLAPQ. Para frequências acima de 6 Hz, a MOLAGD não apresentou nenhuma amplificação no sinal de resposta ($T_d > 1$), e como à baixas frequências (até ≈ 9 Hz) há uma transitoriedade no sinal, aparentemente devido a faixa de resposta dos transdutores e configuração experimental, valores de transmissibilidade observados nessa faixa podem ser até menores, evidenciando o potencial de MOLAGD em relação aos outros dispositivos. O primeiro pico de ressonância apresentado em MOLAPQ foi em 9,75 Hz, e o pico em MOLAGD foi em 5 Hz (houve um pico em 1,25 Hz porém este foi descartado).

Figura 4.11 – Transmissibilidades - Plástico bolha e cavaletes.



Fonte: Do autor (2020).

Dentre a gama dos isoladores testados observados na Figura 4.11, é importante salientar que os testes realizados com a caixa suspensa pelo cavalete por meio do nylon e do tubo elástico (CAVNYL e CAVELA) são de caráter meramente experimental, simulando condições de

isolamento ideais, ou seja, sua eventual evolução para aplicação prática num dispositivo SLD portátil é mais melindrosa.

O PLABOL apresentou excelentes características de isolamento, com pico de ressonância em 17,75 Hz ocorrendo com baixa magnitude, em comparação aos outros isoladores supracitados. A partir deste pico, a transmissibilidade se manteve abaixo de 1, indicando boa eficácia de isolamento. Eficácia que seria melhor ainda se a transmissibilidade fosse menor para valores de frequência entre 20 e 60 Hz. Já os resultados de transmissibilidade para CAVNYL e CAVELA, foram os melhores, conforme esperado. CAVELA, comparando-se à CAVNYL, obteve melhores resultados à baixas frequências (até ≈ 35 Hz) devido ao tubo elástico ser menos rígido que o fio de nylon. Para altas frequências ambos dispositivos comportaram-se de forma análoga obtendo os menores níveis de atenuação dentre todos, na faixa de $T_d = 0,001$.

A Tabela 4.3 compila os valores das frequências em Hz dos primeiros picos de ressonância e a magnitude em que ocorreram. Pôde-se notar que as configurações com os isoladores com melhor capacidade de isolamento foram os que apresentaram as menores frequências de ressonância.

Tabela 4.3 – Ressonância e magnitude.

	FREQUÊNCIA (Hz)	MAGNITUDE T_d
SEMAMO	25	28,38
ESPLAR	26,75	7,36
ESPCIN	27	6,98
ESPPRE	18,5	6,91
ESPBRA	16,75	8,02
PLABOL	17,75	2,17
BORPRE	29,05	24,69
VIBSTO	30	107,67
MOLAPQ	9,75	5,81
MOLAGD	5	7,85
CAVNYL	5,25	3,78
CAVELA	2	1,23

Fonte: Do autor (2020).

4.6 Resultados AVD x Frequência com os isoladores de vibração

Uma vez estabelecidas as curvas de transmissibilidade para cada elemento isolador, pôde-se determinar qual elemento atenua de forma mais eficiente a vibração promovida pelo

shaker. Todavia, fez-se necessário investigar com que intensidade essa atenuação acontece na técnica *biospeckle* laser.

Os resultados obtidos no experimento descrito na Seção 3.6 estão expressos na Tabela 4.4. A sigla 'R. br.' na última coluna refere-se a ruído branco. Ao todo, foram obtidos 324 valores de AVD, produto de 1296 capturas de 128 imagens a 15 fps.

Para melhor interpretação dos dados, foram plotados 12 gráficos, um para cada condição experimental, conforme Figuras 4.12, 4.13 e 4.14. Nelas pôde-se observar a variação do AVD, para cada frequência excitada, nas três diferentes amplitudes estudadas.

Pôde-se observar que no domínio das espumas tem-se dois formatos diferentes, Figura 3.7, um no formato sob medida convencional (ESPLAR e ESPCIN) e outro no formato alveolar (ESPPRE e ESPBRA). As espumas com perfil alveolar, no geral, apresentaram resultados de AVD com menor variabilidade se comparada com as de perfil convencional, indicando melhor absorção da vibração. Resultado que também pôde ser observado nas curvas de transmissibilidade, Figura 4.9, onde ESPPRE e ESPBRA também obtiveram melhores resultados. Constatou-se que existe uma grande influência da frequência de 42 Hz nos isoladores de espuma. Influência que se mostrou maior que em SEMAMO, onde não há dispositivo amortecedor. Esse fato ocorreu porque além de 42 Hz ser uma frequência natural expressiva do protótipo, Figura 4.5, ela também está próxima da frequência natural da mesa, o que pôde amplificar os níveis de transmissibilidade e explicar o porquê dos valores de T_d entre 40 a 60 Hz na Figura 4.9 se mantiveram relativamente elevados. A variação dos valores de AVD para ESPCIN se mostrou menor que ESPLAR, que possui densidade 23% maior. ESPPRE e ESPBRA apresentaram comportamentos semelhantes.

Os resultados de BORPRE e VIBSTO foram inferiores à SEMAMO, indicando não serem as melhores opções para isoladores mecânicos num protótipo SLD. Apresentaram grande variabilidade, concordando com suas curvas de transmissibilidade, Figura 4.10, que exibiram respostas pouco eficientes para redução da vibração. PLABOL mostrou-se um resultado interessante, semelhante ao de ESPPRE e ESPBRA, porém, também sofreu grande influência da frequência natural de 42 Hz (a semelhança entre as curvas de transmissibilidade de ESPPRE, ESPBRA e PLABOL pode ser vista na Figura 6 no Anexo A).

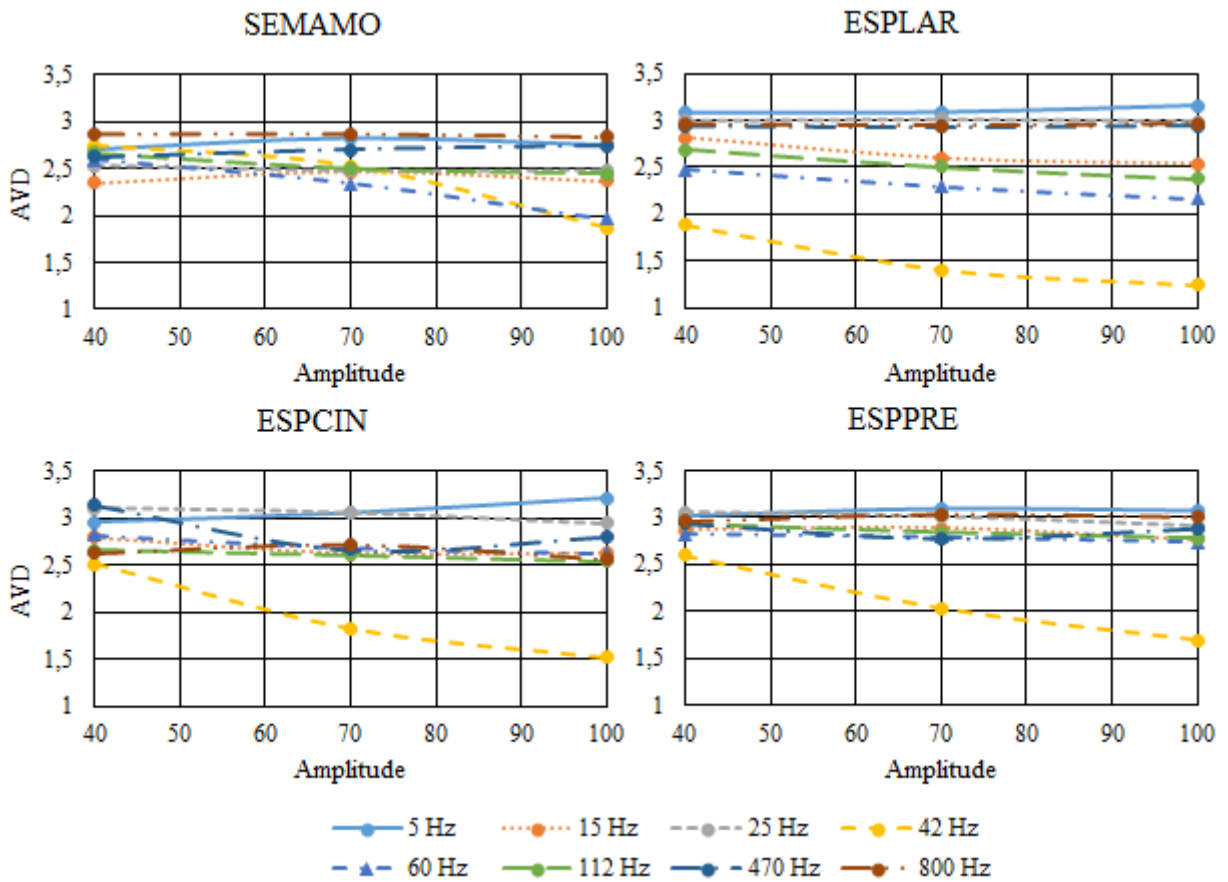
Resultados superiores e concordantes com os resultados de transmissibilidade foram os alcançados pelos isoladores da Figura 4.14. CAVNYL e CAVELA, que neste trabalho reproduziram as condições ideais de isolamento, conforme esperado, obtiveram mínimas e insignifican-

Tabela 4.4 – Valores de AVD por frequência e amplitude.

ISOLADOR	AMP.	FREQUÊNCIA								
		5	15	25	42	60	112	470	800	R. br.
SEMAMO	40	2,71	2,35	2,53	2,74	2,59	2,66	2,63	2,87	2,80
	70	2,83	2,47	2,48	2,52	2,34	2,50	2,70	2,87	2,56
	100	2,76	2,37	2,48	1,87	1,96	2,44	2,74	2,84	2,30
ESPLAR	40	3,08	2,82	3,00	1,88	2,48	2,68	2,94	2,96	3,11
	70	3,09	2,60	3,02	1,41	2,29	2,50	2,93	2,94	3,07
	100	3,16	2,54	2,99	1,24	2,16	2,38	2,95	2,97	3,16
ESPCIN	40	2,96	2,80	3,11	2,51	2,83	2,66	3,14	2,63	2,83
	70	3,05	2,63	3,06	1,83	2,69	2,61	2,67	2,73	3,05
	100	3,21	2,63	2,95	1,52	2,63	2,55	2,81	2,57	3,05
ESPPRE	40	3,01	2,87	3,06	2,60	2,82	2,94	2,93	2,96	3,12
	70	3,09	2,89	3,01	2,03	2,79	2,84	2,77	3,02	3,15
	100	3,07	2,77	2,91	1,69	2,73	2,78	2,88	3,00	3,19
ESPBRA	40	3,16	2,84	3,19	2,69	3,15	3,04	3,02	3,22	3,06
	70	2,78	2,98	3,18	2,05	3,02	3,06	3,09	3,24	3,04
	100	2,80	2,97	3,14	1,59	3,12	3,03	2,98	3,21	2,94
PLABOL	40	2,94	3,00	3,16	2,59	2,69	2,71	2,73	3,05	3,05
	70	2,88	2,89	2,79	2,31	2,68	2,74	3,01	3,06	2,89
	100	2,87	2,78	2,82	1,93	2,69	2,75	3,09	3,11	2,92
BORPRE	40	3,01	2,69	2,71	2,45	2,00	2,24	3,01	3,01	3,01
	70	3,06	2,74	2,82	2,02	1,72	2,03	2,81	3,04	2,88
	100	3,02	2,71	2,42	1,89	1,60	2,05	2,64	3,04	2,66
VIBSTO	40	3,08	2,73	2,50	2,92	2,59	1,98	2,76	2,56	2,75
	70	3,09	2,53	2,52	2,53	2,38	1,65	2,63	2,58	2,49
	100	3,09	2,73	2,52	2,44	1,95	1,52	2,58	2,67	2,19
MOLAPQ	40	3,21	3,04	3,29	2,82	2,99	2,99	2,93	3,16	3,14
	70	3,18	3,00	3,41	2,57	2,89	2,94	3,12	3,13	3,17
	100	3,17	2,76	3,21	2,16	2,82	2,99	3,17	3,14	3,15
MOLAGD	40	3,25	3,08	3,26	3,01	2,99	3,04	2,89	2,88	2,97
	70	3,23	3,05	3,20	2,95	2,93	3,02	2,93	2,79	2,84
	100	3,11	3,06	3,20	2,69	2,92	2,90	2,92	2,78	2,75
CAVNYL	40	3,13	3,04	3,26	3,14	3,22	3,25	3,17	3,19	3,06
	70	3,13	3,07	3,24	3,04	3,23	3,22	3,17	3,15	3,04
	100	3,06	3,08	3,24	2,85	3,23	3,17	3,17	3,10	3,08
CAVELA	40	3,05	3,15	2,95	3,04	2,99	3,04	3,11	3,11	3,07
	70	3,08	3,12	2,91	3,06	3,01	3,05	3,12	3,13	3,08
	100	3,11	3,04	2,95	3,08	3,02	3,05	3,11	3,12	3,09

Fonte: Do autor (2020).

Figura 4.12 – AVD x Frequência - Amplitude.



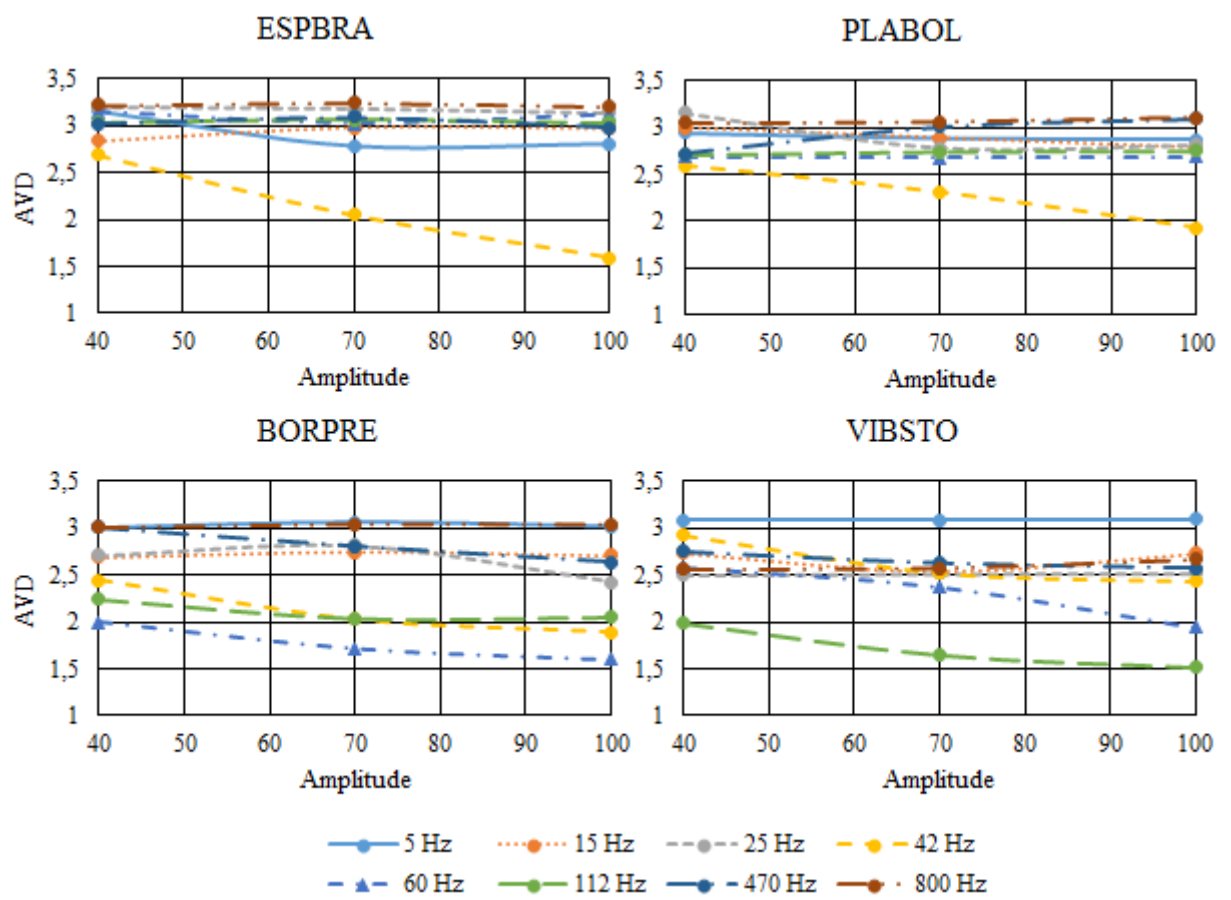
Fonte: Do autor (2020).

tes variações no índice AVD. CAVNYL exibiu uma variação ligeiramente maior que CAVELA e diferentemente dela, se mostrou ligeiramente sensível à frequência de 42 Hz quando excitado o sistema na amplitude máxima de 100 mVpk. Esses isoladores obtiveram as menores frequências naturais, conforme pode ser visto na Figura 4.11, justificando a maior e melhor faixa de atenuação.

Nos testes 'AVD x Frequência - Amplitude' o desempenho de isolamento de vibração da MOLAGD, assim como no teste de Transmissibilidade, Figura 4.10, mostrou-se superior à MOLAPQ e aos demais dispositivos isolantes, conseguindo filtrar a frequência que mais afetou o índice AVD nesses testes, a de 42 Hz. Na Figura 7 do Anexo A pôde-se observar o excelente nível de atenuação alcançado pela MOLAGD, próximo aos níveis obtidos pelos cavaletes.

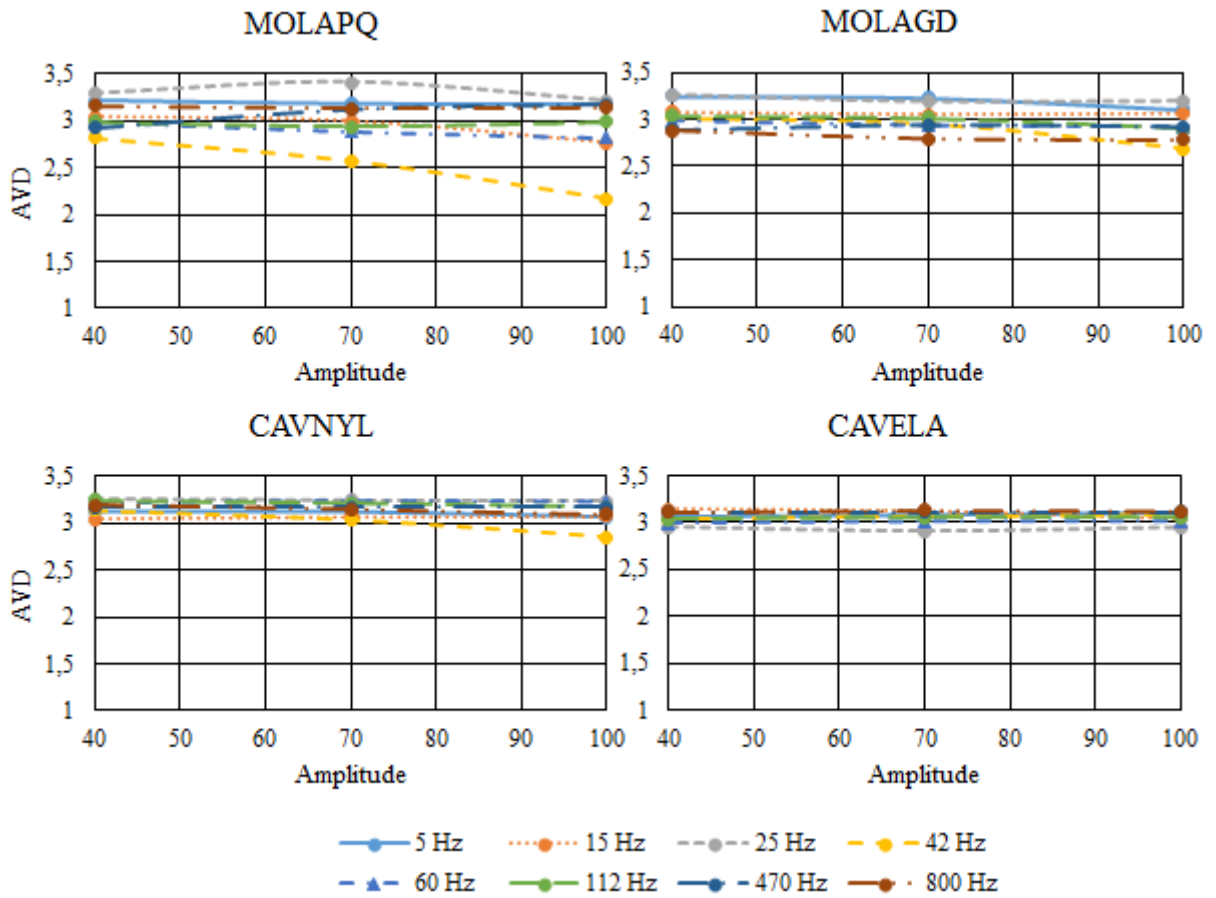
Quando excitados por ruído branco, Figura 4.15, os sistemas de forma geral demonstraram uma boa capacidade de filtragem das vibrações, com exceção de SEMAMO e VIBSTOP, que foi o elemento de amortecimento mais rígido (duro) utilizado.

Figura 4.13 – AVD x Frequência - Amplitude.



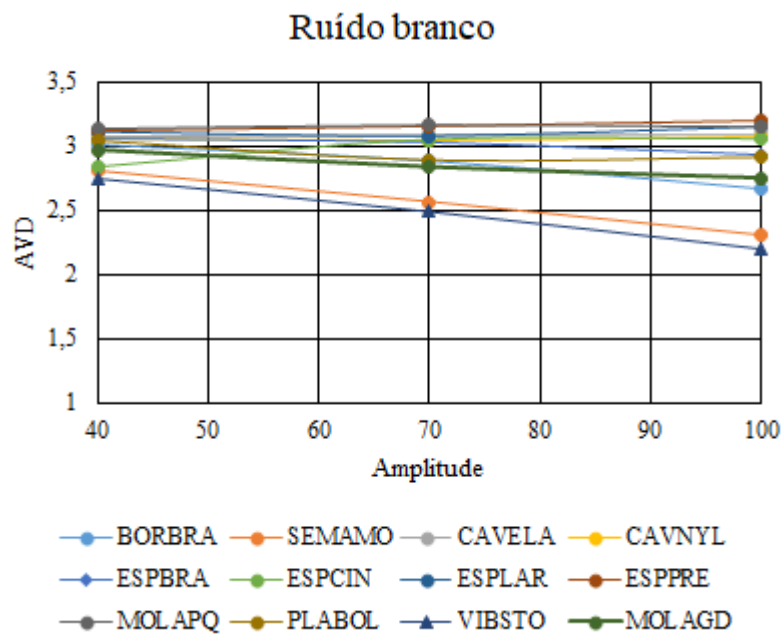
Fonte: Do autor (2020).

Figura 4.14 – AVD x Frequência - Amplitude.



Fonte: Do autor (2020).

Figura 4.15 – AVD x Ruído branco.



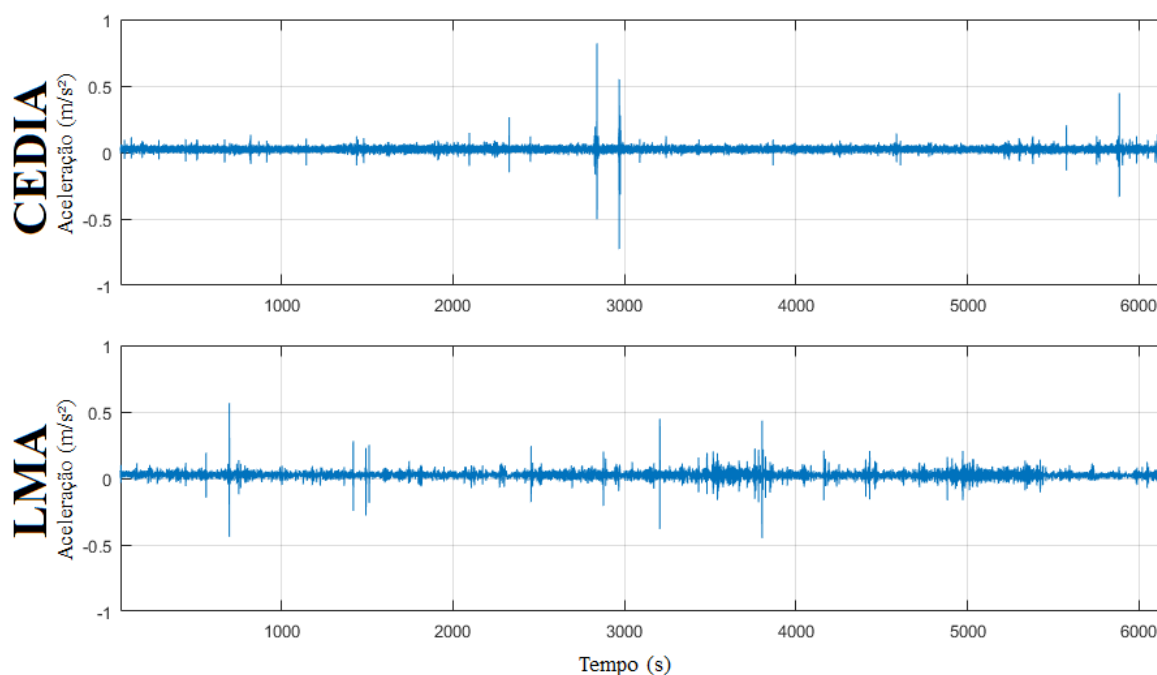
Fonte: Do autor (2020).

4.7 Comparações em magnitude das vibrações excitadas com as vibrações em um ambiente de trabalho

Os resultados dos testes da Seção 4.6 foram avaliados e obtidos por meio de excitações forçadas promovidas pelo *shaker*, todavia, a magnitude destas vibrações devem ser comparadas à magnitude das vibrações que ocorrem no dia-dia em um ambiente de trabalho.

Os níveis de vibração RMS, Equação 3.2, obtidos para ambos laboratórios foram bem próximos. Para o CEDIA foi de $0,0271 \text{ m/s}^2$ e para o LMA, foi de $0,0272 \text{ m/s}^2$. Os espectros das vibrações nos dois laboratórios podem ser vistos na Figura 4.16. Os picos que apareceram no gráfico foram supostamente ruídos corriqueiros capturados pelo acelerômetro, que podem ocorrer num laboratório: como o bater de uma porta, o arrastar de um móvel, o trânsito de pessoas, etc.

Figura 4.16 – Resposta temporal de vibração no laboratório CEDIA e LMA (aceleração (m/s^2) x tempo (s)).



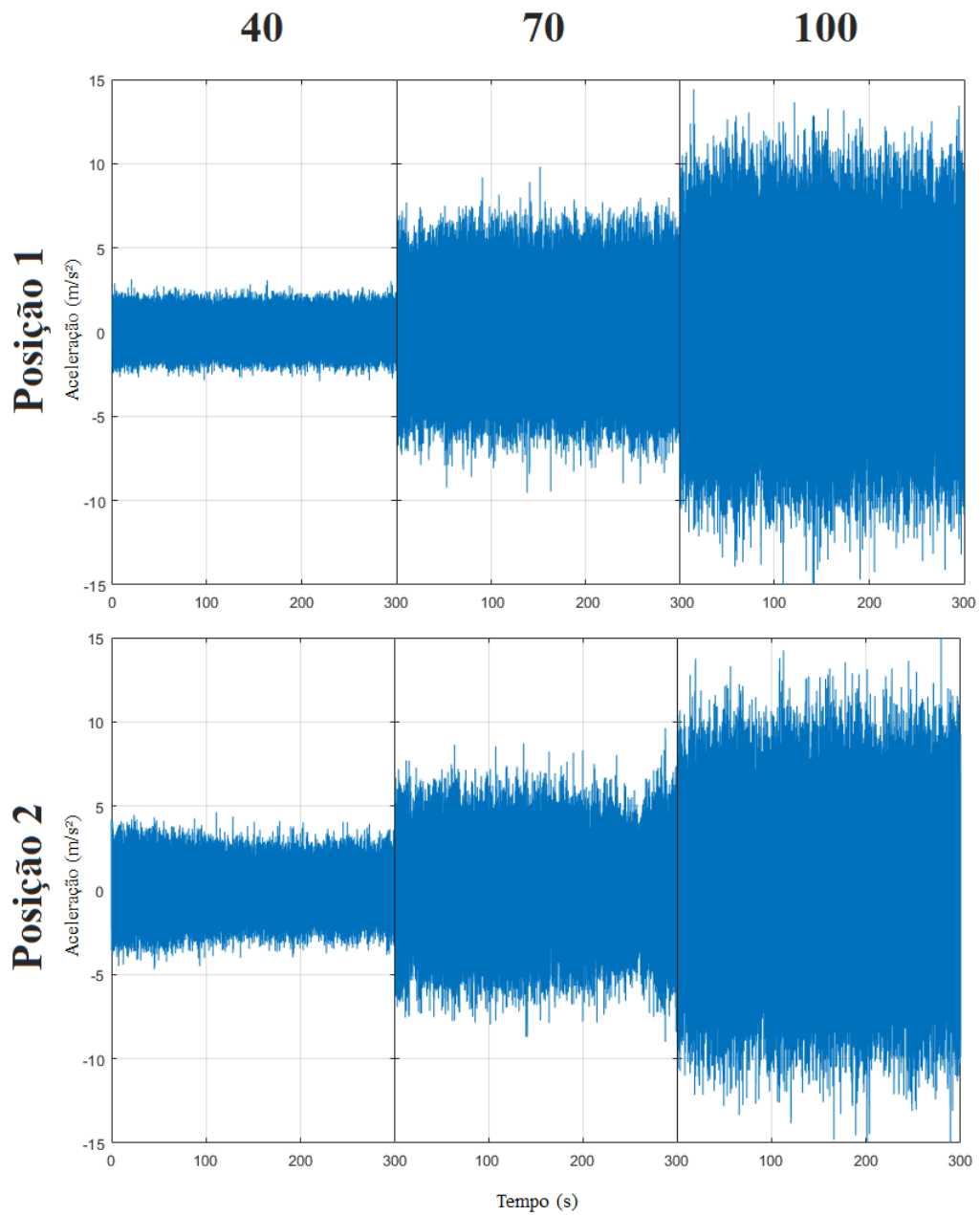
Fonte: Do autor (2020).

Para comparação, os valores de RMS (em m/s^2) oriundos das excitações em ruído branco promovidas pelo *shaker* nas amplitudes de 40, 70 e 100 mV, nas Posições 1 (acelerômetro junto ao *shaker*) e Posição 2 (acelerômetro a 30 cm do *shaker*), podem ser vistos na Tabela 4.5. Trechos dos sinais de vibração, para cada uma das 3 amplitudes, estão ilustrados na Figura 4.17.

Tabela 4.5 – RMS - Excitações em ruído branco.

POSIÇÃO	AMPLITUDE		
	40	70	100
1	0,6976	2,0743	3,3092
2	0,9172	1,8481	3,289

Fonte: Do autor (2020).

Figura 4.17 – Resposta temporal de vibração nas Posições 1 e 2 e nas três amplitudes avaliadas (aceleração (m/s^2) x tempo (s)).

Fonte: Do autor (2020).

Mesmo com a fonte vibrante (*shaker*) estando mais próxima do acelerômetro na Posição 1, o valor RMS encontrado para a Posição 2 foi maior para a excitação na amplitude de 40 mV. Para as demais amplitudes, os valores de RMS, apesar de mais próximos, foram maiores para a condição onde o *shaker* estava mais perto do acelerômetro, ou seja, na Posição 1.

Pode-se notar que a magnitude RMS para a excitação em ruído branco de mais baixa intensidade, 40 mV, é cerca de 26 vezes maior que as magnitudes detectadas nos laboratórios (CEDIA e LMA) para a Posição 1, e 34 vezes maior para a Posição 2. Tais diferenças de magnitude, Figura 4.16 e 4.17, indicam que as condições de excitação avaliadas neste trabalho foram extremas, ou seja, dificilmente irão ocorrer numa situação cotidiana. Em contrapartida, isso sugere que os isoladores de vibração testados, que apresentaram bons resultados, como MOLAGD por exemplo, tem alta capacidade de integrar um dispositivo *biospeckle* laser portátil e desempenhar a função de isolá-lo de vibrações externas.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi proposta uma configuração portátil para análises *biospeckle* laser que foi atestada por meio de testes de secagem de tinta.

Foram obtidas as frequências naturais da configuração proposta e como o índice AVD se comporta quando excitado nestas e nas demais frequências, numa faixa de 0 a 1000 Hz. Foi descoberto que o AVD é mais sensível às baixas frequências, na região em torno de 5 Hz. Para frequências maiores, o AVD se mostrou menos sensível, apresentando valores até mesmo abaixo do valor de referência, em regiões de elevada ressonância, como por exemplo próximas a 42, 60 e 210 Hz, todavia estes valores não indicam baixa atividade.

Nos testes de transmissibilidade, onde foram analisadas a transmissibilidade de vibração da mesa até o protótipo e de mais 11 dispositivos isoladores, também foi constatado que para altas frequências a filtragem das vibrações pelo sistema é maior, e a transmissibilidade menor. Resultado que foi condizente com a teoria.

Os resultados de AVD foram, no geral, concordantes com os resultados de transmissibilidade, ou seja, as configurações com os isoladores que apresentaram baixa transmissibilidade de vibração, também apresentaram menor variabilidade no índice SLD. A frequência de 42 Hz se mostrou bastante influente no índice para grande parte dos isoladores, devido ser uma das frequências de ressonância do protótipo e também estar próxima da frequência de ressonância da mesa onde estava o mesmo.

Dentre os isoladores, a mola de menor rigidez, MOLAGD, foi a que apresentou as melhores características de isolamento de vibração, resultado validado pelo AVD. Ademais, levando-se em conta a questão construtiva, a mola também apresenta a vantagem de ser facilmente instalada na base do protótipo.

5.1 Trabalhos futuros

Para trabalhos futuros sugere-se:

- (a) Estudar novas configurações de protótipo, buscando aumentar a rigidez dos dispositivos internos como suportes, câmera e laser, aumentando assim os valores das primeiras frequências naturais;
- (b) Propor um modelo teórico representativo do sistema para auxiliar no projeto otimizado da estrutura;

- (c) Otimizar o projeto especificando uma mola ideal para atenuação da vibração externa, em especial as baixas frequências;
- (d) Incluir no protótipo um mecanismo do tipo gaveta, para acesso e análise de amostras biológicas de forma prática;
- (e) Alimentar o sistema por bateria, completando assim a portabilização da técnica.

REFERÊNCIAS

- AIZU, Y.; ASAKURA, T. Bio-speckle phenomena and their application to the evaluation of blood flow. **Optics Laser Technology**, v. 23, n. 4, p. 205 – 219, 1991. ISSN 0030-3992. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0030399291900853>>.
- ANSARI, M. Z.; NIRALA, A. Assessment of bio-activity using the methods of inertia moment and absolute value of the differences. **Optik - International Journal for Light and Electron Optics**, v. 124, n. 6, p. 512 – 516, 2013. ISSN 0030-4026. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030402612000095>>.
- ARAUJO, D. W. dos R. **Estudo da estabilidade de lasers de diodo alimentados eletricamente por bateria, que possam ser incorporados a um futuro dispositivo portátil para análise de speckle laser dinâmico em campo**. 2019. 81 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas e Automação) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2019.
- ARAÚJO, R. S. A. **Validação de um protótipo portátil para quantificar o teor de água foliar por método óptico**. 2018. 38 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2018.
- ARIZAGA, R.; TRIVI, M.; RABAL, H. Speckle time evolution characterization by the co-occurrence matrix analysis. **Optics Laser Technology**, v. 31, n. 2, p. 163 – 169, 1999. ISSN 0030-3992. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S003039929900033X>>.
- AVITABILE, P. **Modal Testing: A Practitioner's Guide**. New Jersey: Wiley, 2018. ISBN 9781119222897.
- BALBINOT, A. **Caracterização dos níveis de vibração em motoristas de ônibus: um enfoque no conforto e na saúde**. 2001. 281 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.
- BECKER, T. **Desenvolvimento de uma mesa vibratória para estudos sobre vibração no corpo humano, medições em um grupo de motoristas e ajuste de um modelo biodinâmico**. 2006. 179 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.
- BLOTTA, E.; BALLARIN, V.; RABAL, H. Decomposition of biospeckle signals through granulometric size distribution. **Opt. Lett.**, OSA, v. 34, n. 8, p. 1201–1203, Apr 2009. Disponível em: <<http://ol.osa.org/abstract.cfm?URI=ol-34-8-1201>>.
- BOTEGA, J. V. L. **Viabilidade de métodos óticos para identificação de conteúdo de água de folha de cafeeiros**. 2009. 99 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.
- BRAGA, R. et al. Evaluation of activity through dynamic laser speckle using the absolute value of the differences. **Optics Communications**, v. 284, n. 2, p. 646 – 650, 2011. ISSN 0030-4018. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030401810010321>>.
- BRAGA, R. A. et al. Seeds analysis using bio-speckle. **Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering**, v. 4419, p. 34–37, 2001. Disponível em: <<https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/4419/0000/Seed-analysis-using-biospeckle/10.1117/12.437093.pdf>>.

BRAGA, R. A.; RIVERA, F. P.; MOREIRA, J. **A Practical Guide to Biospeckle Laser Analysis: Theory and Software**. Lavras: UFLA, 2016. 162 p. ISBN 9-788581-270517.

BRITO, H. M. B. F.; OLIVEIRA, J. B. de. Procedimento de medida da vibração de corpo inteiro via programação matlab de acordo com a iso 2631. **Revista InterScientia**, v. 5, n. 2, p. 136–146, 2017. Disponível em: <<https://periodicos.unipe.br/index.php/interscientia/article/view/476/461>>.

CARVALHO, P. H. et al. Motility parameters assessment of bovine frozen semen by biospeckle laser (bsl) system. **Biosystems Engineering**, v. 102, n. 1, p. 31 – 35, 2009. ISSN 1537-5110. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1537511008002973>>.

CATALANO, M. D. **Aplicação do speckle laser dinâmico em smartphones**. 2017. 59 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas de Automação) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2017.

CHAVES, M. J. **Desenvolvimento de uma metodologia para análise do biospeckle laser com portabilidade, acessibilidade e robustez**. 2011. 73 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

CRYSTAL INSTRUMENTS. **Basics of modal testing and analysis**. CI product note n. 7. Santa Clara, United States of America, 2017. Disponível em: <<https://static1.squarespace.com/static/5230e9f8e4b06ab69d1d8068/t/59618d7e1b10e378caeb5b47/1499565444797/Basics+of+Modal+Testing+and+Analysis+07.2017.pdf>>.

EWINS, D. J. **Modal testing: theory, practice, and application**. Tauton: Research Studies Press, 2000. ISBN 9780863802188.

FEDERICO, A. et al. Simulation of dynamic speckle sequences and its application to the analysis of transient processes. **Optics Communications**, v. 260, n. 2, p. 493 – 499, 2006. ISSN 0030-4018. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030401805012472>>.

FRACAROLLI, J. A. **Utilização do biospeckle laser na avaliação do potencial germinativo de sementes de ipê-roxo (Tabebuia heptaphylla) (Vellozo) Toledo**. 2011. 86 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

GHELLER, J. Avaliação do isolamento de vibração por elastômeros. **SENAI - RS**, 2013. Disponível em: <<https://www.senairs.org.br/sites/default/files/documents/avaliaco-do-isolamento-de-vibracoes-por-elastomeros.pdf>>.

GRIFFIN, M. J. **Handbook of Human Vibration**. London: Ed. [S.l.]: Elsevier Academic Press, 1996.

HORUS. **Horus Advanced Drying Analysis - Formulation Scientific Analysis**. 2018. Disponível em: <http://www.geochem-ltd.eu/sites/default/files/fajlok/Doc_horus.pdf>.

INMAN, D. J. **Engineering Vibration**. 3. ed. New Jersey: Pearson Education, 2007. ISBN 0132281732.

JUNIOR, R. A. B. et al. Reliability of biospeckle image analysis. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 45, n. 3, p. 390 – 395, 2007. ISSN 0143-8166. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143816606001655>>.

KURENDA, A.; ADAMIAK, A.; ZDUNEK, A. Temperature effect on apple biospeckle activity evaluated with different indices. **Postharvest Biology and Technology**, v. 67, p. 118 – 123, 2012. ISSN 0925-5214. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092552141200004X>>.

LOPES, H. et al. Influence of shearing amount and vibration amplitude on noise in shearography. **Procedia Structural Integrity**, v. 5, p. 1205 – 1212, 2017. ISSN 2452-3216. 2nd International Conference on Structural Integrity, ICSI 2017, 4-7 September 2017, Funchal, Madeira, Portugal. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321617301312>>.

MAIA, N. M. M. et al. **Theoretical and Experimental Modal Analysis**. Tauton: Research Studies Press, 1997. ISBN 0863802087.

MARGARIDO, D. dos R. **Metodologias para a avaliação dos níveis de vibração em estruturas do ponto de vista do conforto humano**. 2013. 110 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2013.

MCMAHON, G. **Analytical Instrumentation: A Guide to Laboratory, Portable and Miniaturized Instruments**. Wiley, 2008. ISBN 9780470518557. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=4paUE12Hw0UC>>.

MINZ, P. D.; NIRALA, A. Intensity based algorithms for biospeckle analysis. **Optik - International Journal for Light and Electron Optics**, v. 125, n. 14, p. 3633 – 3636, 2014. ISSN 0030-4026. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030402614002435>>.

MOORFLPI-2. **Laser Speckle Contrast Imager moorFLPI-2 - Moor instruments**. 2018. Disponível em: <<https://www.moor.co.uk/en-us/products/imaging/laser-speckle-contrast-imager>>.

MOREIRA, J. **Desenvolvimento de uma ferramenta computacional de livre acesso para o processamento de imagens do speckle laser dinâmico**. 2013. 153 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas e Automação) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.

MOREIRA, J.; CARDOSO, R.; BRAGA, R. Quality test protocol to dynamic laser speckle analysis. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 61, p. 8 – 13, 2014. ISSN 0143-8166. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143816614001006>>.

OULAMARA, A.; TRIBILLON, G.; DUVERNOY, J. Biological activity measurement on botanical specimen surfaces using a temporal decorrelation effect of laser speckle. **Journal of Modern Optics**, Taylor Francis, v. 36, n. 2, p. 165–179, 1989. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/09500348914550221>>.

PEREZ, A. J. et al. A portable dynamic laser speckle system for sensing long-term changes caused by treatments in painting conservation. **Sensors (Basel)**, v. 124, n. 6, 2018. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1424-8220/18/1/190/pdf>>.

POMARICO, J. et al. Speckle interferometry applied to pharmacodynamic studies: Evaluation of parasite motility. **European biophysics journal : EBJ**, v. 33, p. 694–9, 01 2005.

PORCU, M. et al. Effectiveness of the frf curvature technique for structural health monitoring. **Construction and Building Materials**, v. 226, p. 173 – 187, 2019. ISSN 0950-0618. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061819317957>>.

PRA, A. L. D.; PASSONI, L. I.; RABAL, H. Evaluation of laser dynamic speckle signals applying granular computing. **Signal Processing**, v. 89, n. 3, p. 266 – 274, 2009. ISSN 0165-1684. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165168408002727>>.

RABAL, H.; BRAGA, R. A. **Dynamic laser speckle and applications**. New York: CRC Press, 2008.

RAO, S. S. **Mechanical Vibrations**. 5. ed. New Jersey: Pearson Education, 2010. ISBN 9780132128193.

RIBEIRO, K. M. **Abordagens estatísticas na análise do speckle laser dinâmico**. 2014. 122 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.

SILVA, E. R. da. **Estudo das Propriedades do Biospeckle e suas Aplicações**. 2007. 113 p. Dissertação (Mestrado em Física) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

STANFORD RESEARCH SYSTEMS. **Operating Manual and Programming Reference**. Model SR785 - Dynamic Signal Analyser. 1290-D Reamwood Avenue Sunnyvale, CA, United States of America, 2017. Disponível em: <<https://www.thinksrs.com/downloads/pdfs/manuals/SR785m.pdf>>.

TANG, X. et al. Portable laser speckle perfusion imaging system based on digital signal processor. **Review of Scientific Instruments**, v. 81, n. 12, p. 125110, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1063/1.3505118>>.

XU, Z.; JOENATHAN, C.; KHORANA, B. M. Temporal and spatial properties of the time-varying speckles of botanical specimens. **Optical Engineering**, v. 34, n. 5, p. 1487 – 1502 – 16, 1995. Disponível em: <<https://doi.org/10.1117/12.199878>>.

ZDUNEK, A. et al. The biospeckle method for the investigation of agricultural crops: A review. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 52, p. 276 – 285, 2014. ISSN 0143-8166. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143816613002030>>.

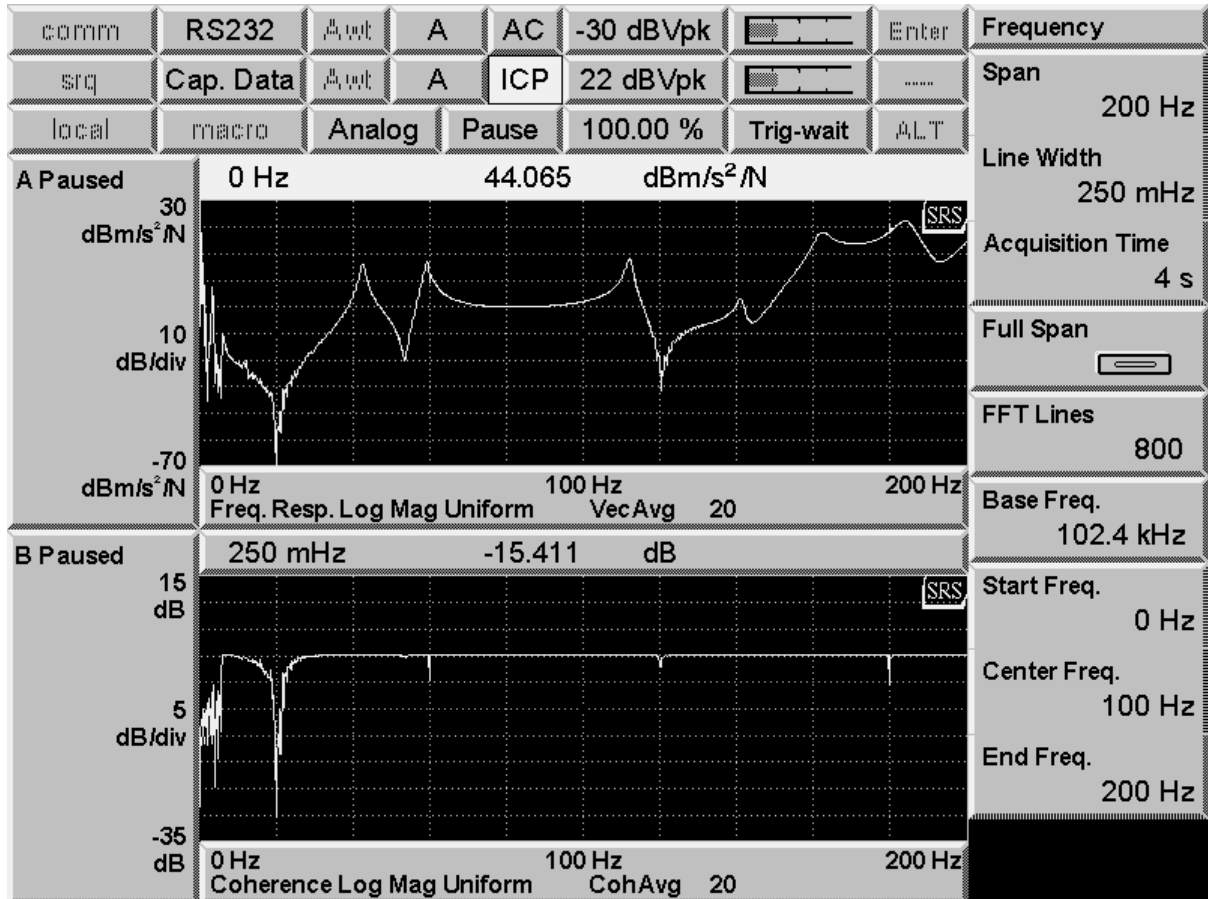
ZDUNEK, A. et al. Comparison of puncture test, acoustic emission and spatial-temporal speckle correlation technique as methods for apple quality evaluation. v. 11, p. 303 – 315, 01 2008. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.530.9281&rep=rep1&type=pdf>>.

ZDUNEK, A. et al. New nondestructive method based on spatial-temporal speckle correlation technique for evaluation of apples quality during shelf-life. **International Agrophysics**, v. 21, n. 3, p. 305 – 310, 2007. ISSN 0236-8722. Disponível em: <http://www.old.international-agrophysics.org/artykuly/international_agrophysics/IntAgr_2007_21_3_305.pdf>.

ZHONG, X. et al. Dynamic laser speckle analysis via normal vector space statistics. **Optics Communications**, v. 305, p. 27 – 35, 2013. ISSN 0030-4018. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030401813004574>>.

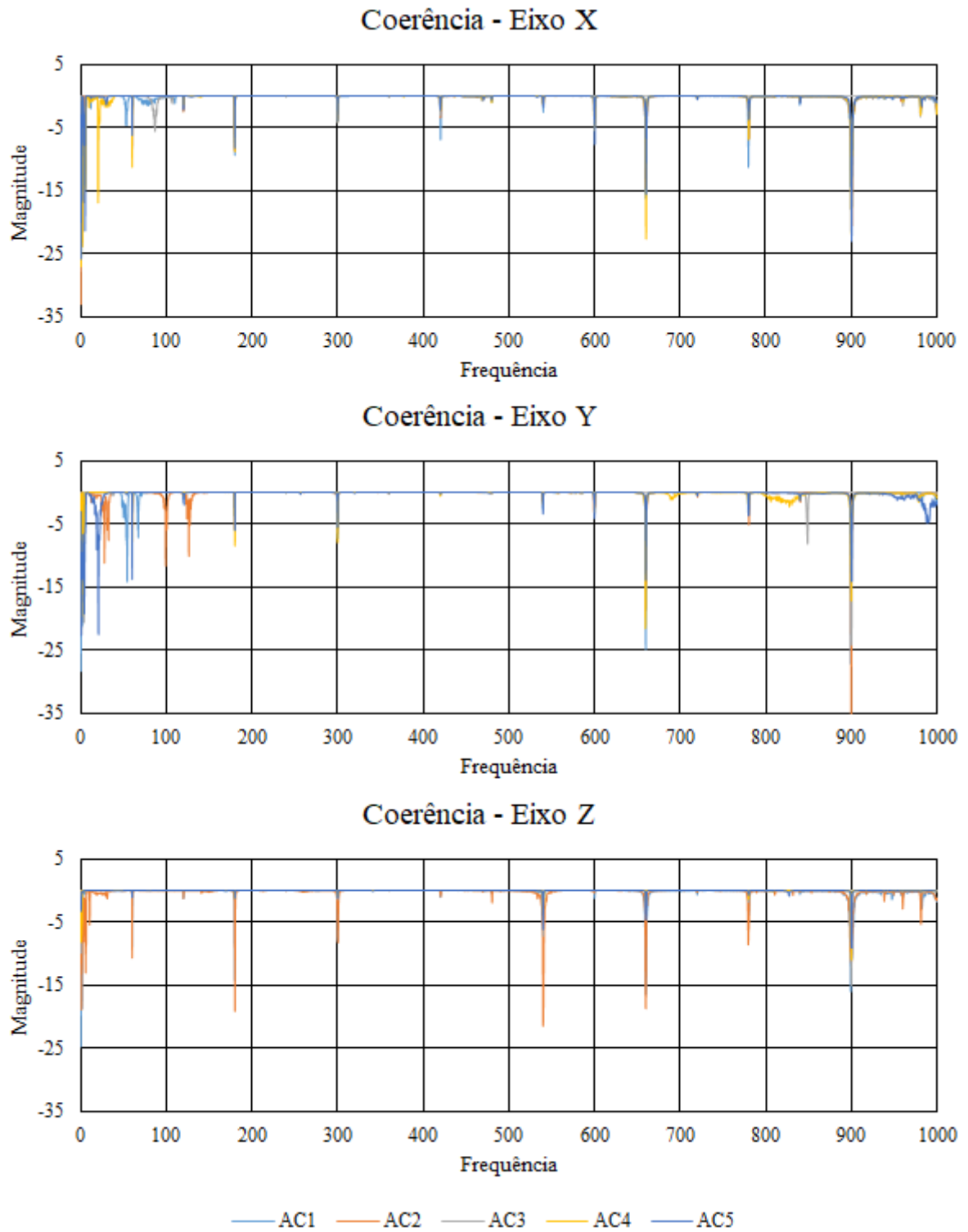
ANEXO A – Figuras complementares

Figura 1 – Saída gráfica fornecida pelo SR785 - Sinal do AC5 sendo excitado em varredura *chirp* de 0 a 200 Hz.



Fonte: Do autor (2019).

Figura 2 – Coerências- Eixos X, Y e Z.



Fonte: Do autor (2019).

Figura 3 – Padrão *speckle* na excitação em 210 Hz no eixo X (a), Y (b) e Z (c)*.



Fonte: Do autor (2020).

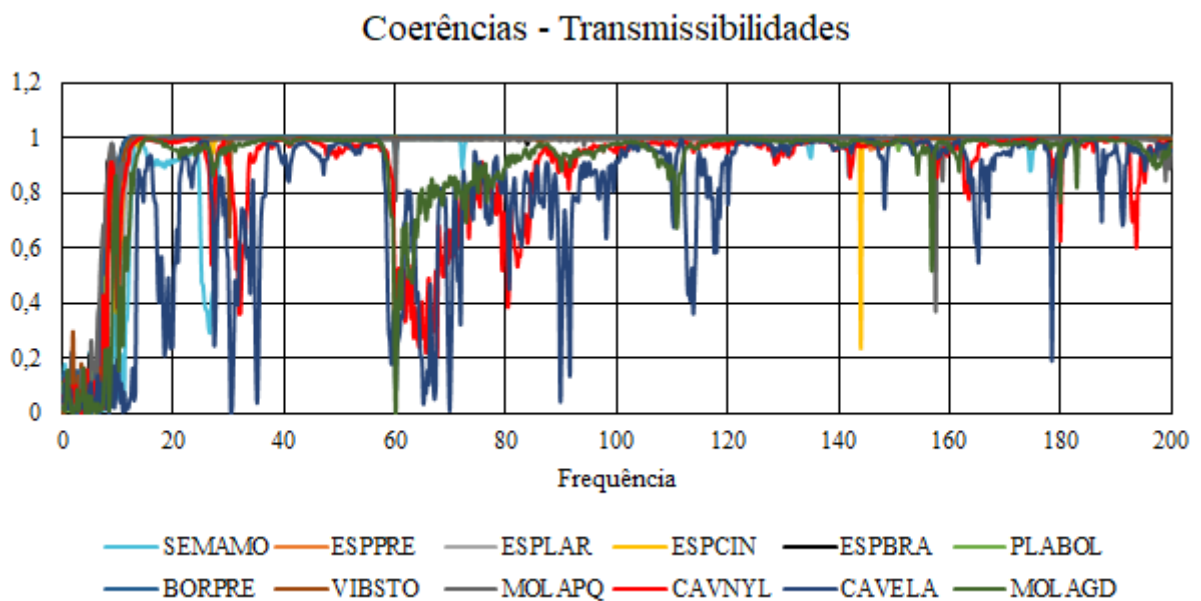
*A Figura 3 exibe o efeito de uma ressonância acentuada no padrão *speckle*. Devido a alta ressonância, a câmera não é capaz de capturar as imagens com nitidez. Para comparação, a Figura 4 abaixo exibe um padrão de *speckle* regular.

Figura 4 – Padrão *speckle* regular.



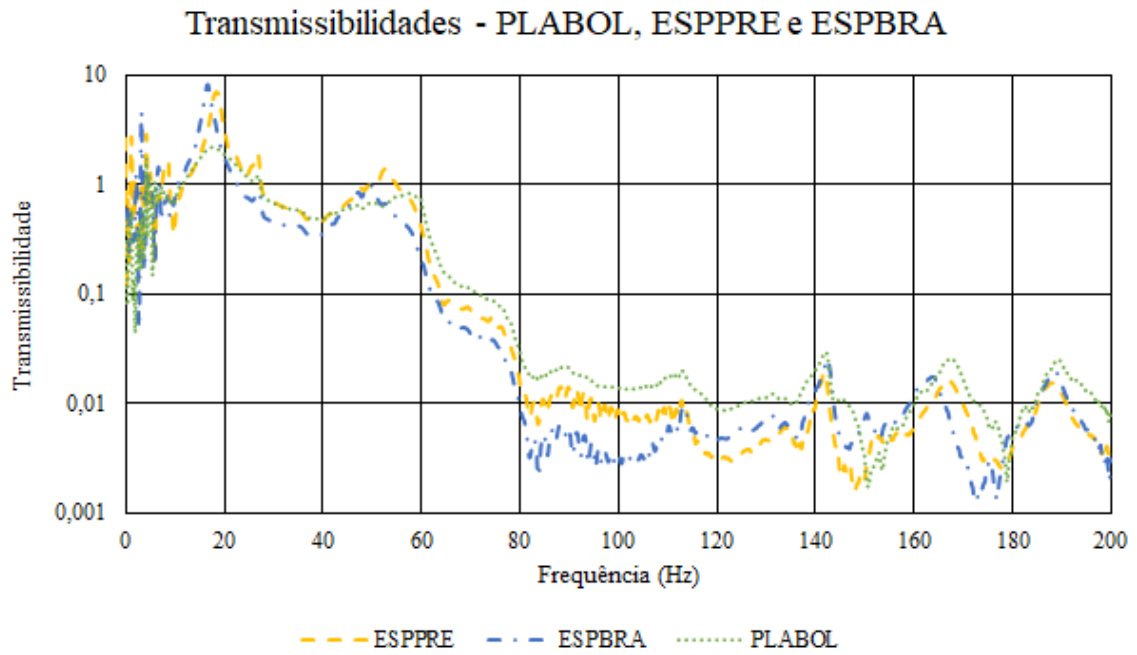
Fonte: Do autor (2020).

Figura 5 – Coerências - Transmissibilidades.



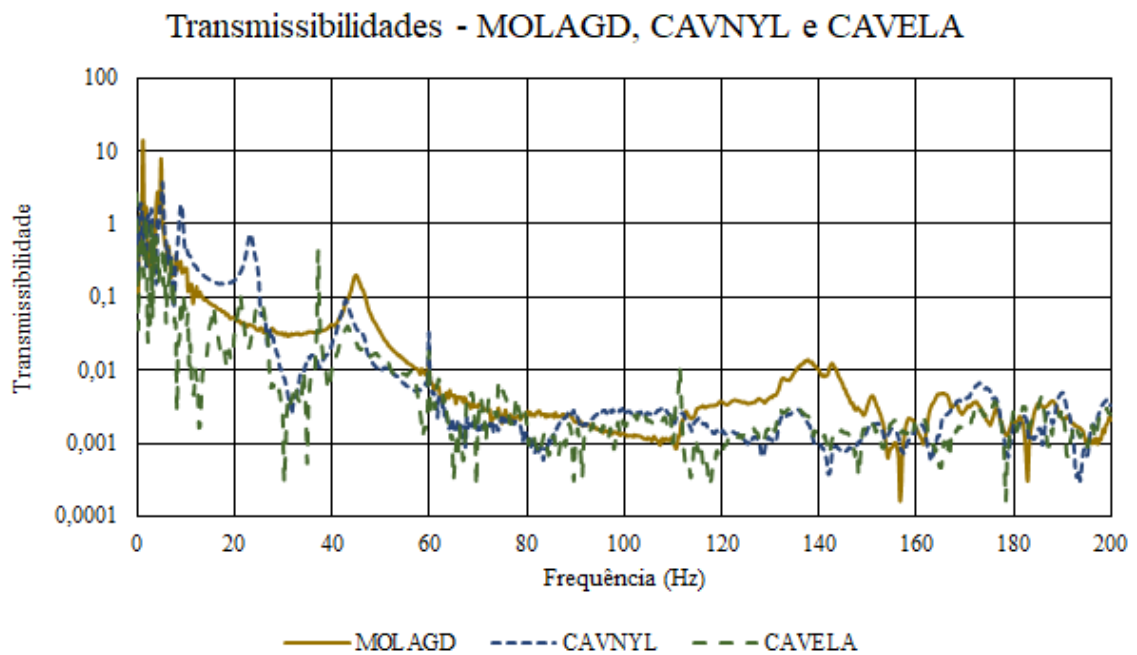
Fonte: Do autor (2020).

Figura 6 – Transmissibilidades PLABOL, ESPPRE e ESPBRA.



Fonte: Do autor (2020).

Figura 7 – Transmissibilidades MOLAGD, CAVNYL e CAVELA.



Fonte: Do autor (2020).