



JOSÉ EDUARDO SILVA GOMES

**DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO PORTÁTIL
PARA ANÁLISE DE SEMENTES UTILIZANDO A TÉCNICA
DO *BIOSPECKLE* LASER**

LAVRAS – MG

2021

JOSÉ EDUARDO SILVA GOMES

**DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO PORTÁTIL PARA ANÁLISE DE
SEMENTES UTILIZANDO A TÉCNICA DO *BIOSPECKLE* LASER**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Instrumentação, para a obtenção do título de Doutor.

Prof. DSc. Roberto Alves Braga Jr
Orientador

Prof. DSc. Henrique Leandro Silveira
Coorientador

LAVRAS – MG

2021

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

Gomes, José Eduardo Silva

Desenvolvimento de um equipamento portátil para análise de sementes utilizando a técnica do *biospeckle* laser / José Eduardo Silva Gomes. – Lavras : UFLA, 2021.

116 p. : il.

Tese(doutorado)–Universidade Federal de Lavras, 2021.

Orientador: Prof. DSc. Roberto Alves Braga Jr.

Bibliografia.

1. *Speckle* laser dinâmico. 2. Material biológico. 3. Fonte de alimentação. 4. Vibrações mecânicas. 5. Portabilidade. I. Braga Jr, Roberto Alves. II. Silveira, Henrique Leandro. III. Título.

JOSÉ EDUARDO SILVA GOMES

**DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO PORTÁTIL PARA ANÁLISE DE
SEMENTES UTILIZANDO A TÉCNICA DO *BIOSPECKLE* LASER**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Instrumentação, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 08 de Dezembro de 2021.

Prof. DSc. Roberto Alves Braga Jr	UFLA
Prof. DSc. Henrique Leandro Silveira	UFLA
Prof. DSc. Carlos Alberto Carvalho Castro	CEFET-MG
Prof. DSc. Paulo Henrique Cruz Pereira	CEFET-MG
Prof. DSc. Wanderley Xavier Pereira	CEFET-MG

Prof. DSc. Roberto Alves Braga Jr
Orientador

Prof. DSc. Henrique Leandro Silveira
Co-Orientador

**LAVRAS – MG
2021**

Dedico este trabalho ao meu saudoso pai, Rui, e à minha querida mãe, Maria Aparecida, que sempre me apoiaram e aconselharam. Aos meus filhos Paula, Júlia e Rui, pelo carinho e paciência que tiveram durante minhas ausências ao longo deste período.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela saúde e perseverança que me foi conferida para a conclusão desta etapa da minha vida.

Também gostaria de agradecer a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho e colaboraram na conclusão do curso de Doutorado em Engenharia Agrícola. Abaixo cito aqueles que se destacaram como grandes colaboradores e a quem serei eternamente grato.

Aos meus filhos Paula, Júlia e Rui pela compreensão e pelo carinho, minha família, em especial meus pais, Maria Aparecida e Rui (*in memoriam*) pelos conselhos e estímulo.

À Universidade Federal de Lavras e aos professores, pela oportunidade, estrutura disponibilizada e por compartilharem o conhecimento com dedicação e paciência. Ao CEFET-MG campus Varginha, pelo apoio e incentivo necessários para realização do doutorado.

Aos amigos do CEDIA, Alcebíades, Alessandro, Ana, Bianca, Diego Catalano, Dione, Elisângela, Ellen, Fernando, Gabriel, Professor Giovanni, Henrique, Igor, Roberto Azevedo, Rodrigo, Sr. Sérgio, Thiago Mohamed e Thiago Paiva, pelo compartilhamento de conhecimentos, apoio e os momentos de descontração. Agradeço especialmente ao Daniel, com quem trabalhei mais proximamente e que muito me ajudou na realização dos experimentos e discussão dos resultados. A Helem da secretaria da pós.

Ao Laboratório de Mecânica Aplicada (LMA), por disponibilizar suas instalações e equipamentos para a realização dos ensaios experimentais de análise modal. Ao Matheus e Vinícius, sempre muito solícitos e dispostos a ajudar.

Aos membros das bancas de qualificação e defesa deste trabalho, professores Carlos Alberto Carvalho Castro (CEFET-MG), Paulo Henrique Cruz Pereira (CEFET-MG) e Giovanni Francisco Rabelo (UFLA/DEG), pela disponibilidade, sugestões e críticas, as quais enriqueceram significativamente este trabalho.

Ao meu coorientador professor Henrique Leandro Silveira pelo apoio, orientações e disponibilidade.

Sou particularmente grato ao meu orientador, Professor Roberto Alves Braga Jr pelo incentivo, dedicação e paciência ao me guiar no desenvolvimento deste trabalho. Também agradeço pelos seus ensinamentos, pela competência e disponibilidade na orientação, além da forma amistosa com que conduz os trabalhos no CEDIA.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

"Aprender é a única coisa que a mente nunca se cansa, nunca tem medo e nunca se arrepende."

Leonardo da Vinci

RESUMO

Na agricultura moderna, a alta competitividade do mercado exige um maior controle da qualidade das sementes e, para atender esta demanda, várias tecnologias têm sido desenvolvidas visando determinar o vigor e a viabilidade das sementes. Neste contexto, a técnica do Biospeckle Laser, baseada no uso do laser e da óptica, apresenta-se como uma alternativa com grande potencial, pois permite análises não-destrutivas, a eliminação da subjetividade e a redução de tempo e custos. As análises Biospeckle Laser (BSL) são realizadas por meio de um arranjo experimental composto por um emissor laser, dispositivos ópticos, uma câmera de vídeo e um computador que processa as análises utilizando tratamentos estatísticos e matemáticos. Devido às dimensões físicas desses equipamentos e acessórios, as montagens experimentais tradicionais ocupam um espaço em laboratório da ordem de 0,25 m² a 2 m². Além disso, esta é uma técnica muito sensível a interferências externas como vibrações e outras formas de iluminação. Estas características fazem com que as análises BSL estejam limitadas aos laboratórios e têm dificultado o seu uso de forma intensiva. Comercialmente ainda não existem ferramentas que façam a análise de sementes empregando a técnica do *biospeckle* e, sendo assim, esta tecnologia ainda não está disponível nos locais de produção e nos laboratórios de análise de sementes. Partindo dessa constatação, o objetivo desse estudo foi investigar a viabilidade da construção de um equipamento compacto, portátil e dedicado às análises da qualidade e vigor das sementes utilizando a técnica do *biospeckle* laser. Assim sendo, os experimentos realizados demonstraram que fatores como a estabilidade da fonte de alimentação do laser, a iluminação externa e as vibrações mecânicas interferem nas análises BSL. Em conclusão, o protótipo desenvolvido apresentou características técnicas e soluções que viabilizaram a execução dessas análises fora dos laboratórios de pesquisa das universidades, além de apontar perspectivas para trabalhos futuros.

Palavras-chave: *Speckle* laser dinâmico. Material biológico. Fonte de alimentação. Vibrações mecânicas. Portabilidade.

ABSTRACT

In modern agriculture, the high competitiveness of the market requires greater control of seed quality and, to meet this demand, several technologies have been developed in order to determine the vigor and viability of seeds. In this context, the Biospeckle Laser technique, based on the use of laser and optics, presents itself as an alternative with great potential, as it allows non-destructive analyses, the elimination of subjectivity and the reduction of time and costs. Biospeckle Laser (BSL) analyses are performed using an experimental arrangement consisting of a laser emitter, optical devices, a video camera and a computer that processes the analyses using statistical and mathematical treatments. Due to the physical dimensions of these equipment and accessories, traditional setups occupy a space of the order of 0.25 m² a 2 m². In addition, this is a technique that is very sensitive to external interferences such as vibrations and other forms of lighting. These characteristics make that BSL analyses are limited to laboratories and have hindered their intensive use. Commercially, there are still no tools to perform seed analysis using the biospeckle technique and, therefore, this technology is not yet available at production sites and in seed analysis laboratories. Based on this observation, this study was carried out in order to investigate the feasibility of building a compact and portable equipment dedicated to the analysis of seed quality and vigor using the biospeckle laser technique. Thus, the experiments performed demonstrated that factors such as the stability of the laser power supply, external lighting and mechanical vibrations interfere in BSL analyses. In conclusion, the developed prototype presented technical features and solutions that made it possible to carry out these analyses outside the research labs at universities, in addition to pointing out perspectives for future works.

Keywords: Dynamic speckle laser. Biological material. Power supply. Mechanical vibrations. Portability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Padrão <i>speckle</i>	18
Figura 2.2 – Métodos gráficos.	20
Figura 2.3 – <i>Setup</i> permanente no CEDIA (Centro de Desenvolvimento de Instrumentação Aplicada à Agropecuária) – UFLA.	21
Figura 2.4 – Configuração experimental montada na Universidade Estadual de Mato Grosso – Campus Universitário de Barra do Bugres.	21
Figura 2.5 – Mesa inercial e câmara de isolamento luminoso no CEDIA – UFLA.	22
Figura 2.6 – Equipamento para análise de secagem de tinta Horus.	23
Figura 2.7 – Equipamento para análise de fluxo sanguíneo MoorFLPI-2.	23
Figura 2.8 – Analisador de sementes GroundEye Série L.	24
Figura 2.9 – Analisador de sementes MQ-ONE XL.	24
Figura 2.10 – Exemplo de estrutura de placa flexível em ressonância. Em azul: resposta no domínio do tempo; Em vermelho: função resposta em frequência.	28
Figura 2.11 – FRF e modos de vibração.	28
Figura 2.12 – Transmissibilidade (T_r) pela razão de frequências (r).	30
Figura 3.1 – Configuração experimental com o laser ligado à fonte original.	34
Figura 3.2 – Configuração experimental com o laser ligado à bateria e conversor DC-DC.	35
Figura 3.3 – Montagem do <i>setup</i> para a avaliação da fonte original do laser.	35
Figura 3.4 – Bateria recarregável e regulador/limitador de tensão e corrente.	36
Figura 3.5 – Área de interesse para análise de dados; nas regiões amarelas os dados não foram utilizados.	36
Figura 3.6 – Configuração experimental para análise de secagem de tinta.	39
Figura 3.7 – <i>Setup</i> para análises <i>speckle</i> laser dinâmico e gravimétricas de secagem de tinta.	41
Figura 3.8 – Montagem do <i>setup</i> miniaturizado no chassi.	42
Figura 3.9 – Luxímetro Digital Politerm, modelo POL-10.	43
Figura 3.10 – Gabinete com o chassi do <i>setup</i>	44
Figura 3.11 – Acelerômetro piezoelétrico PCB, modelo 352C33.	47
Figura 3.12 – Célula de carga Omega, modelo LCM201-200N.	47
Figura 3.13 – Analisador de sinais dinâmicos SRS, modelo SR785.	47
Figura 3.14 – Excitador eletromecânico portátil TMS, modelo SmartShaker K2007E01.	47

Figura 3.15 – Diagrama para a análise FRF.	48
Figura 3.16 – Disposição dos acelerômetros.	49
Figura 3.17 – FRF e coerência para uma varredura (<i>chirp</i>) de 0 a 100 Hz.	51
Figura 3.18 – Configuração experimental para a análise FRF.	52
Figura 3.19 – Diagrama para a análise de transmissibilidade.	54
Figura 3.20 – Isoladores de vibração avaliados.	55
Figura 3.21 – Diagrama para aquisição de vibrações em duas posições diferentes na mesa.	58
Figura 3.22 – Filtro variável de densidade neutra.	59
Figura 3.23 – Componentes do Sistema.	60
Figura 3.24 – Ambiente Integrado de Desenvolvimento do Arduino.	61
Figura 4.1 – Desvios padrão relativos com o laser conectado à fonte de alimentação original.	64
Figura 4.2 – Desvios padrão relativos com o laser conectado à bateria e ao regulador de tensão.	65
Figura 4.3 – Teste de normalidade dos dados.	67
Figura 4.4 – Resultado do teste entre as variâncias da fonte de alimentação e do regulador.	67
Figura 4.5 – Resultado do teste entre as variâncias na saída do fotodetector, com a rede elétrica e com a bateria alimentando.	68
Figura 4.6 – Resultado do teste de equivalência entre a fonte de alimentação e o regulador.	68
Figura 4.7 – Gráfico da distribuição dos dados da fonte de alimentação e do regulador.	69
Figura 4.8 – Resultado do teste de equivalência entre a saída do fotodetector com a rede elétrica e com a bateria alimentando.	69
Figura 4.9 – Gráfico da distribuição dos dados da saída do fotodetector com a rede elétrica e com a bateria alimentando.	70
Figura 4.10 – A análise de secagem da tinta com o laser conectado à fonte de alimentação original.	71
Figura 4.11 – A análise de secagem da tinta com o laser conectado ao sistema com bateria.	71
Figura 4.12 – Valores de AVD com o laser conectado à fonte de alimentação original vs. valores de AVD do sistema com bateria e a linha de regressão linear.	72
Figura 4.13 – Curvas de secagem dos índices AVD e das massas ao longo do tempo, no <i>setup</i> miniaturizado laboratorial.	74
Figura 4.14 – Visão frontal da configuração experimental miniaturizada.	75

Figura 4.15 – Visão superior da configuração experimental miniaturizada.	75
Figura 4.16 – Curva de secagem dos índices AVD ao longo do tempo, no <i>setup</i> montado no chassi.	76
Figura 4.17 – Valores de AVD com o <i>setup</i> miniaturizado laboratorial vs. valores de AVD do <i>setup</i> montado no chassi.	77
Figura 4.18 – Índices AVD medidos em uma superfície inerte.	78
Figura 4.19 – Análise de uma imagem da superfície inerte, com o <i>setup</i> dentro da câmara de proteção.	79
Figura 4.20 – Análise de uma imagem da superfície inerte, com o <i>setup</i> dentro do gabinete do protótipo.	80
Figura 4.21 – Análise de uma imagem da superfície inerte, com incidência de 500 lux de iluminância.	80
Figura 4.22 – Índices AVD medidos durante a secagem da tinta.	81
Figura 4.23 – Valores de AVD com o <i>setup</i> miniaturizado no interior da câmara de proteção vs. valores de AVD com o <i>setup</i> dentro do gabinete do protótipo.	82
Figura 4.24 – FRFs dos 5 acelerômetros considerando a excitação no eixo X.	83
Figura 4.25 – FRFs dos 5 acelerômetros considerando a excitação no eixo Y.	84
Figura 4.26 – FRFs dos 5 acelerômetros considerando a excitação no eixo Z.	85
Figura 4.27 – AVDs com excitação no eixo X.	87
Figura 4.28 – AVDs com excitação no eixo Y.	88
Figura 4.29 – AVDs com excitação no eixo Z.	88
Figura 4.30 – Transmissibilidades.	90
Figura 4.31 – Coerências dos testes de transmissibilidade.	90
Figura 4.32 – Transmissibilidade das espumas.	91
Figura 4.33 – Transmissibilidade da borracha, do vibra-stop e das molas.	92
Figura 4.34 – Transmissibilidade do plástico bolha e suspenso em cavaletes.	93
Figura 4.35 – Variação do índice AVD para o protótipo sem amortecimento.	96
Figura 4.36 – Variação do índice AVD para o protótipo isolado por espumas.	96
Figura 4.37 – Variação do índice AVD para o protótipo isolado pela borracha, o vibra-stop e as molas.	97
Figura 4.38 – Variação do índice AVD para o protótipo isolado pela plástico bolha e suspenso em cavalete.	98

Figura 4.39 – Variação do índice AVD para o protótipo excitado por ruído branco.	99
Figura 4.40 – Registro do sinal temporal das vibrações no laboratório CEDIA.	100
Figura 4.41 – Registro do sinal temporal das vibrações no laboratório LMA.	100
Figura 4.42 – Posição 1: resposta temporal das acelerações nas três amplitudes de excitação.101	
Figura 4.43 – Posição 2: resposta temporal das acelerações nas três amplitudes de excitação.101	
Figura 4.44 – Circuitos eletrônicos de controle.	103
Figura 4.45 – Fixação e acoplamento do motor de passo ao filtro neutro.	104
Figura 4.46 – Análises Gráficas utilizando o método AVD.	105
Figura 4.47 – Estruturas das sementes de soja e de feijão.	105
Figura 4.48 – Seleção da região para as análises numéricas das sementes de soja.	106
Figura 4.49 – Seleção da região para as análises numéricas das sementes de feijão.	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Coordenadas de fixação dos acelerômetros.	49
Tabela 3.2 – Coordenadas de fixação do <i>shaker</i> e a célula de carga.	50
Tabela 3.3 – Discretização das varreduras de frequência (<i>chirp</i>).	52
Tabela 3.4 – Faixas de frequência e discretização.	53
Tabela 3.5 – Características dos isoladores de vibração.	56
Tabela 3.6 – Condições experimentais.	57
Tabela 4.1 – Valores médios e desvios padrão das tensões na rede elétrica, na saída da fonte de alimentação e na saída do fotodetector, com o laser conectado à fonte de alimentação original, em volts (V).	63
Tabela 4.2 – Desvios padrão relativos médios da tensão da rede elétrica, na saída da fonte de alimentação e na saída do fotodetector, com o laser conectado à fonte de alimentação original.	64
Tabela 4.3 – Valores médios e desvios padrão das tensões na bateria, na saída do regulador e na saída do fotodetector, com o laser conectado à bateria, em volts (V).	65
Tabela 4.4 – Desvios padrão relativos médios da tensão na bateria, na saída do regulador e na saída do fotodetector, com o laser conectado à bateria.	66
Tabela 4.5 – Frequências naturais do protótipo com excitação no eixo X.	84
Tabela 4.6 – Frequências naturais do protótipo com excitação no eixo Y.	84
Tabela 4.7 – Frequências naturais do protótipo com excitação no eixo Z.	85
Tabela 4.8 – Agrupamento das frequências naturais identificadas no eixos X, Y e Z de excitação.	86
Tabela 4.9 – Frequências naturais do protótipo.	86
Tabela 4.10 – Frequências de ressonância e amplitudes.	94
Tabela 4.11 – Índices AVD para os isoladores de vibração.	95
Tabela 4.12 – Valores eficazes (RMS) das acelerações nas posições 1 e 2 (em m/s^2).	101
Tabela 4.13 – Índices AVD das sementes de soja.	106
Tabela 4.14 – Índices AVD das sementes de feijão.	107

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos	15
1.1.1	Objetivo Geral	15
1.1.2	Objetivos Específicos	15
1.2	Contribuições Originais da Tese	16
1.3	Organização da Tese	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	Análises Biospeckle Laser (BSL)	18
2.2	<i>Driver</i> do Laser	25
2.3	Vibrações Mecânicas	26
2.4	Análise de Sementes	30
3	MATERIAL E MÉTODOS	32
3.1	Avaliação da estabilidade da fonte de tensão original e desenvolvimento de um sistema de alimentação portátil para o laser	32
3.1.1	Análises de níveis de tensão	34
3.1.2	Análises de secagem de tinta	38
3.2	Miniaturização das configurações experimentais	40
3.3	Avaliação de interferências externas	42
3.3.1	Interferência da iluminação externa	42
3.3.2	Interferência das vibrações mecânicas	45
3.4	Motorização do filtro neutro	59
3.5	Validação do protótipo	61
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
4.1	Avaliação da estabilidade da fonte de tensão original e desenvolvimento de um sistema de alimentação portátil para o laser	63
4.1.1	Análises de níveis de tensão	63
4.1.2	Análises de secagem de tinta	70
4.2	Miniaturização das configurações experimentais	73
4.3	Avaliação de interferências externas	77
4.3.1	Interferência da iluminação externa	77
4.3.2	Interferência das vibrações mecânicas	83

4.3.2.1	Determinação das frequências naturais do protótipo	83
4.3.2.2	Análises AVD com excitação mecânica	86
4.3.2.3	Análises de transmissibilidade	89
4.3.2.4	Avaliação da influência dos isoladores nas análises <i>speckle</i> laser	94
4.3.2.5	Comparação entre as magnitudes das excitações aplicadas via <i>shaker</i> e as vibrações de um ambiente de trabalho	99
4.4	Motorização do filtro neutro	102
4.5	Validação do protótipo	104
5	CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	108
5.1	Conclusão	108
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	108
	REFERÊNCIAS	110

1 INTRODUÇÃO

A técnica do *biospeckle* ou *speckle* laser dinâmico tem sido amplamente empregada para determinar e avaliar a atividade em material biológico, como por exemplo, o fluxo sanguíneo e parasitos, ou mesmo não-biológico, como na secagem de tinta e no processo de corrosão. Nas ciências agrárias esta técnica já foi aplicada na realização de vários trabalhos que avaliaram sementes, folhas, solos, sêmen animal, dentre outros.

As análises Biospeckle Laser (BSL) são realizadas por meio de um arranjo experimental composto por um emissor laser que ilumina o objeto de estudo, dispositivos ópticos, uma câmera de vídeo que captura as imagens e um computador que armazena estas imagens e processa as análises utilizando tratamentos estatísticos e matemáticos. Devido às dimensões físicas desses equipamentos e acessórios, as montagens experimentais tradicionais ocupam um espaço da ordem de 0,25 m² a 2 m². Além disso, esta é uma técnica muito sensível a interferências externas como vibrações e outras fontes de iluminação, o que demanda a utilização de mesas inerciais e câmaras de isolamento luminoso. Estas características fazem com que as análises BSL estejam limitadas aos laboratórios ópticos e têm dificultado o seu uso de forma mais intensiva.

Sendo assim, esta tecnologia ainda não está disponível nos locais de produção e nos laboratórios de análises. Na literatura científica, são poucos os trabalhos que abordam a portabilidade de sistema de análises BSL e também não são encontrados muitos equipamentos comerciais que realizam este tipo de análise. Alguns equipamentos disponíveis no mercado são específicos para a avaliação de secagem de tinta ou fluxo sanguíneo. Entretanto, comercialmente ainda não existem dispositivos portáteis que façam a análise de material agropecuário empregando a técnica do *biospeckle*, como é o caso de análise de sementes.

A semente é o insumo mais importante da agricultura, assim sendo, sementes de qualidade permitem maior velocidade de emergência e de desenvolvimento das plantas, o que eleva a produtividade e reduz os custos de produção. Neste contexto, a alta competitividade do mercado exige um maior controle da qualidade das sementes e, para atender esta demanda, foram desenvolvidas várias tecnologias visando determinar o vigor e a viabilidade das sementes. Atualmente os testes mais utilizados na análise das sementes são o do Tetrazólio (TZ) e de Condutividade Elétrica, entretanto, a técnica do Biospeckle Laser, baseada no uso do laser e da óptica, apresenta-se como uma alternativa com grande potencial, pois permite análises não-destrutivas, a eliminação da subjetividade e a redução de tempo e custos.

Diante do exposto, este trabalho tem como hipótese que, utilizando a técnica do *biospeckle* laser, pode ser construído um equipamento compacto, portátil e dedicado às análises da viabilidade e vigor em diferentes tipos de sementes com confiabilidade e produtividade.

Para esse fim, foi projetado e construído um protótipo de analisador de sementes e, para tanto, foram realizados os seguintes procedimentos: avaliado a estabilidade da fonte de tensão do laser, desenvolvido um sistema de alimentação com bateria recarregável, analisado as configurações experimentais utilizadas nos laboratórios ópticos, construído um *setup* miniaturizado, pesquisado acerca das interferências externas que afetam o resultado das análises, elaborados dispositivos para minimizar estas perturbações, motorizado o filtro óptico de ajuste da intensidade do laser e, finalmente, com todos os equipamentos instalados em um gabinete foi testado e validado o protótipo do analisador.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Projetar, desenvolver, construir e validar um equipamento portátil e dedicado à análise de sementes utilizando a técnica do *biospeckle* laser, identificando os fatores limitantes no seu funcionamento.

1.1.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar a estabilidade da fonte de tensão original do laser para possibilitar o desenvolvimento de um sistema com bateria recarregável;
- Estudar as configurações experimentais utilizadas nos laboratórios ópticos visando a miniaturização das dimensões do equipamento;
- Investigar as interferências externas que podem afetar o resultado das análises, como vibrações e a iluminação do ambiente;
- Motorizar o filtro neutro que ajusta a intensidade com que o laser incide na semente que está sendo iluminada;
- Construir o protótipo em um gabinete no qual serão instalados todos os dispositivos para, por fim, aferir o seu funcionamento realizando análises de sementes.

1.2 Contribuições Originais da Tese

As contribuições mais relevantes desenvolvidas nessa tese, não antes reportadas na literatura, são:

- Análise da estabilidade da intensidade de iluminação do laser em função da variação na fonte de alimentação;
- Montagem de uma configuração experimental para análises BSL na menor dimensão, em que o arranjo se mantenha funcional;
- Avaliação e mensuração da interferência da incidência de iluminação externa (natural e/ou artificial) nas análises BSL;
- Avaliação e quantificação da interferência das vibrações mecânicas nas análises BSL, bem como o desenvolvimento de um sistema de isolamento mecânico;
- Desenvolvimento de um dispositivo eletrônico que motoriza o ajuste do filtro neutro;
- Concepção, projeto e construção do protótipo de um analisador de sementes empregando a técnica BSL.

1.3 Organização da Tese

Este trabalho é composto por seis capítulos, incluindo esta introdução.

No Capítulo 2, o referencial teórico apresenta os principais conceitos e definições que embasam o trabalho, o qual foi subdividido nos seguintes tópicos: Análises Biospeckle Laser (BSL); *Driver* do Laser; Vibrações Mecânicas e Análise de Sementes.

Em seguida, o Capítulo 3 descreve todos os materiais e procedimentos metodológicos adotados no desenvolvimento do projeto. Este capítulo foi dividido em cinco subseções: Avaliação da estabilidade da fonte de tensão original e desenvolvimento de um sistema de alimentação portátil para o laser; Miniaturização das configurações experimentais; Avaliação de interferências externas (iluminação e vibrações mecânicas); Motorização do filtro neutro e validação do protótipo.

O Capítulo 4, denominado Resultados e Discussão, apresenta os resultados experimentais obtidos e discorre sobre a análise e interpretação dos dados. Este capítulo possui os mesmos tópicos do capítulo anterior.

As conclusões referentes ao trabalho desenvolvido, bem como as perspectivas de trabalhos futuros, são descritas no Capítulo 5.

Por fim, no último capítulo são citadas as referências bibliográficas consultadas.

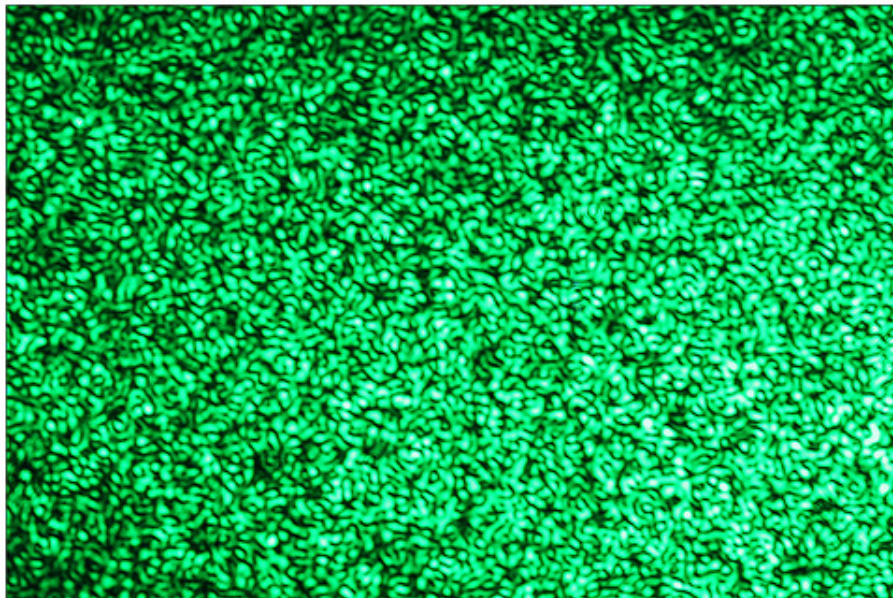
2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção, será apresentado o estado da arte dos temas envolvidos no desenvolvimento do projeto. Visando um melhor entendimento, optou-se em dividi-la nas seguintes subseções: Análises Biospeckle Laser (BSL); *Driver* do Laser; Vibrações Mecânicas e Análises de Sementes.

2.1 Análises Biospeckle Laser (BSL)

A luz de um laser é monocromática, altamente direcional e coerente. Vidal e Silva (2008) observam que, quando um feixe laser atinge uma superfície, opticamente rugosa e que possui algum tipo de atividade, ocorre um fenômeno conhecido como *speckle* ou granulado. Inicialmente esse granulado foi interpretado como um ruído óptico indesejável, porém estudos mais aprofundados constataram que o granulado luminoso é portador de informações sobre a superfície do objeto iluminado (FRACAROLLI, 2011; RODRIGUES et al., 2007). O agrupamento desses *speckles* é conhecido como “*speckle pattern*”, ou padrão de *speckle* (FIGURA 2.1).

Figura 2.1 – Padrão *speckle*.



Fonte: ARS Technical (2018).

De acordo com a atividade do material iluminado, o padrão *speckle* é alterado e o efeito visual, capturado pela câmera, é um fervilhamento no qual ocorrem mudanças no tamanho e na intensidade luminosa dos grãos. Esse fenômeno é conhecido como *speckle* laser dinâmico ou

biospeckle laser e tem sido amplamente empregado como técnica para determinar e avaliar a atividade em material biológico ou mesmo não-biológico. Salienta-se que o termo “*biospeckle*” é empregado por vários autores quando o material analisado é de origem orgânica. Conforme afirmou Viana (2017), “ao que parece, a primeira utilização desse termo foi em Asakura (1988), quando o autor apresentou uma metodologia para análise de fluxo sanguíneo”.

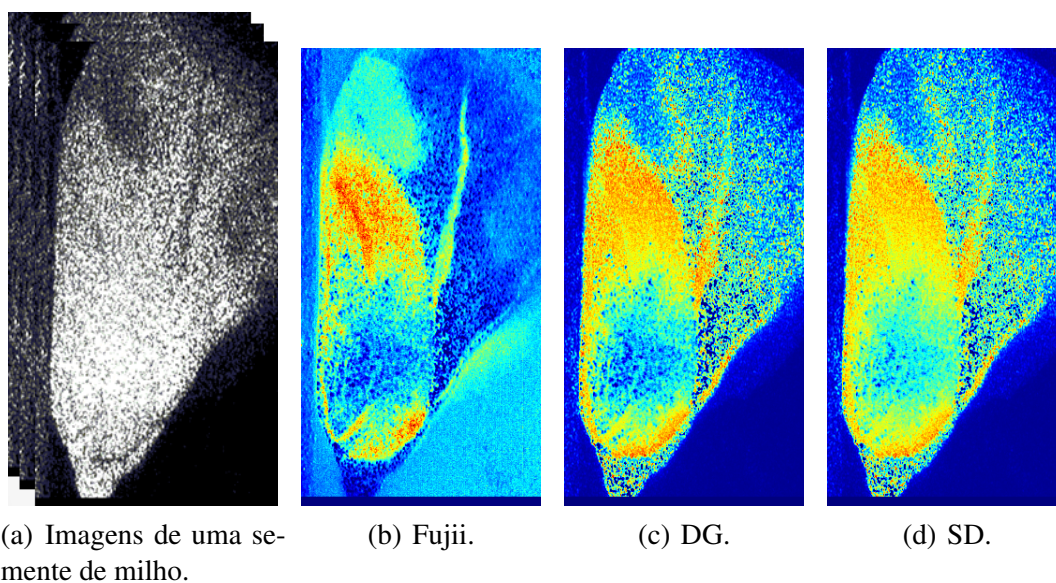
Nesse sentido, Braga Jr (2014) e Kurenda et al. (2013) ressaltam que nas ciências agrárias esta técnica já foi aplicada na realização de vários trabalhos que avaliaram sementes, folhas, solos, sêmen animal, dentre outros.

Existem vários métodos de análise *biospeckle*, entre eles podem-se destacar os métodos numéricos e os gráficos. Braga Jr, Rivera e Moreira (2016) definem que os métodos numéricos são adotados quando se deseja quantificar o nível de mudanças em um padrão *speckle* no tempo, que também é conhecido como nível de atividade. As técnicas mais utilizadas nas análises numéricas são o Momento de Inércia (MI), proposto por Arizaga, Trivi e Rabal (1999), Cardoso, Braga Jr e Rabal (2012) e Cardoso e Braga Jr (2014); a Autocorrelação apresentada por Xu, Joenathan e Khorana (1995) e Zdunek et al. (2014) e a Diferença dos Valores Absolutos (AVD) em Braga Jr et al. (2011).

Os métodos gráficos de análise empregam técnicas de processamento de imagens que possibilitam visualizar as áreas de maior atividade no material analisado. Para Braga Jr, Rivera e Moreira (2016) o principal resultado da análise gráfica é a criação de um mapa de atividades e ela é adotada em amostras heterogêneas onde se deseja identificar áreas com atividade. Os principais métodos que apresentam resultados visuais são Fujii, definida por Fujii e Asakura (1975) e Fujii et al. (1987), das Diferenças Generalizadas (DG), em Arizaga et al. (2002) e do Desvio Padrão, ou Standard Deviation (SD), em Blotta et al. (2011) e Braga Jr (2000).

As figuras a seguir exemplificam as imagens geradas por três métodos gráficos, para tal foi utilizado um pacote de imagens *biospeckle* de uma semente de milho (FIGURA 2.2(a)), as quais foram extraídas do arquivo BSLdataMaizeSeed.zip disponível na *website* oficial da biblioteca BSLTL (2019). A partir dessas imagens foram obtidos os mapas de atividades utilizando os métodos gráficos Fujii (FIGURA 2.2(b)), das Diferenças Generalizadas (DG) (FIGURA 2.2(c)) e Desvio Padrão (SD) (FIGURA 2.2(d)). Conforme Braga Jr, Rivera e Moreira (2016), nos mapas as pseudo-cores representam o nível de atividade, a cor azul indica baixa atividade biológica e a vermelha indica alta atividade.

Figura 2.2 – Métodos gráficos.

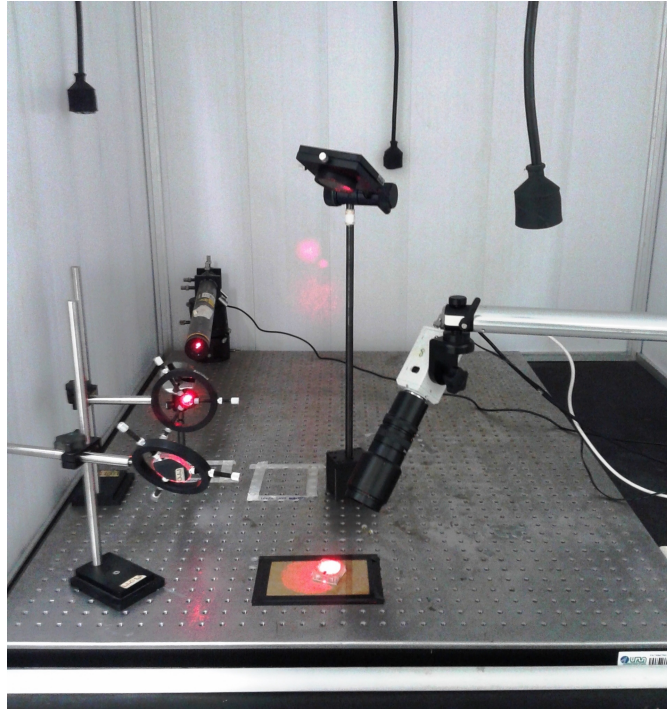


Fonte: Do autor (2019).

Os trabalhos de Godinho et al. (2012) e Rabal e Braga Jr (2008) especificam que as análises Biospeckle Laser (BSL) são realizadas por meio de um arranjo experimental composto por um laser, dispositivos ópticos, uma câmera de vídeo, um computador e *softwares* de processamento de imagens e de tratamentos estatísticos e matemáticos. Não foi encontrado na literatura nenhum trabalho que especificasse o espaço ocupado pela configuração experimental utilizada, assim sendo, pode-se apenas estimar acerca dessas dimensões por meio de fotos e as especificações dos equipamentos e acessórios empregados, como pode ser observado nas Figuras 2.3 e 2.4. Para exemplificar, pode-se citar o *setup* montado em um laboratório do CEDIA/UFLA para análise de sementes, mostrado na Figura 2.3, e que foi utilizado no trabalho de Azevedo (2018). Ele foi medido e ocupa uma área de 0,70 metros de largura por 1,20 metros de profundidade, com uma altura de 0,60 metros.

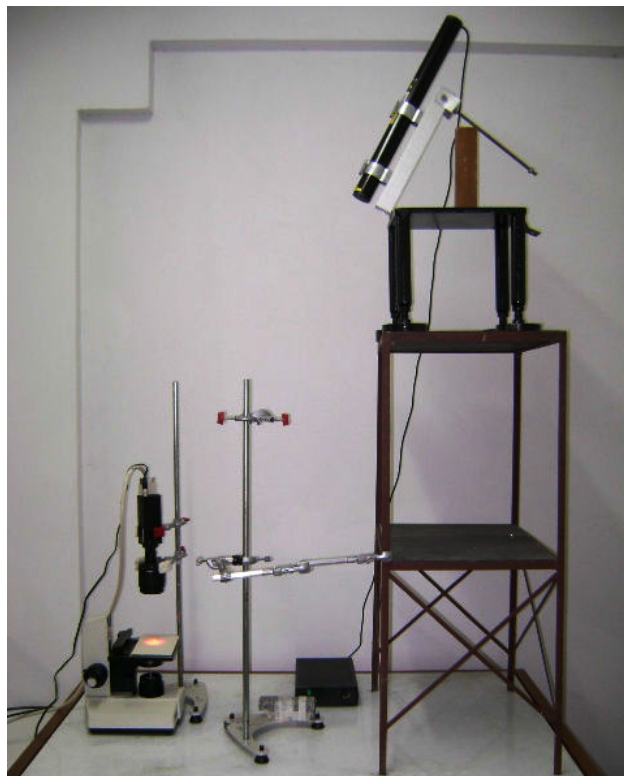
Os *setups* que utilizam lasers Hélio-Neônio (He-Ne) ocupam uma área maior, pois eles são maiores e consomem mais energia que os lasers baseados em semicondutores, como o de diodo. Braga Jr (2014) comenta em seu estudo que nas configurações experimentais os lasers e as câmeras são os componentes que mais sofreram avanços tecnológicos, sendo que, nos laboratórios os lasers de He-Ne eram os mais utilizados e atualmente estão sendo substituídos pelos de diodo.

Figura 2.3 – *Setup* permanente no CEDIA (Centro de Desenvolvimento de Instrumentação Aplicada à Agropecuária) – UFLA.



Fonte: Do autor (2019).

Figura 2.4 – Configuração experimental montada na Universidade Estadual de Mato Grosso – Campus Universitário de Barra do Bugres.



Fonte: Vidal e Silva (2008).

Além disso, conforme descrito por Chaves (2011) e Zdunek et al. (2008), esta é uma técnica muito sensível a interferências externas como vibrações e outras fontes de iluminação, o que demanda a utilização de mesas com sistema anti-vibração e câmaras de isolamento luminoso, conforme a Figura 2.5. Nesse contexto, Pérez et al. (2018) acrescentam que estas características fazem com que as análises BSL estejam limitadas aos laboratórios ópticos e têm dificultado o seu uso de forma mais intensiva.

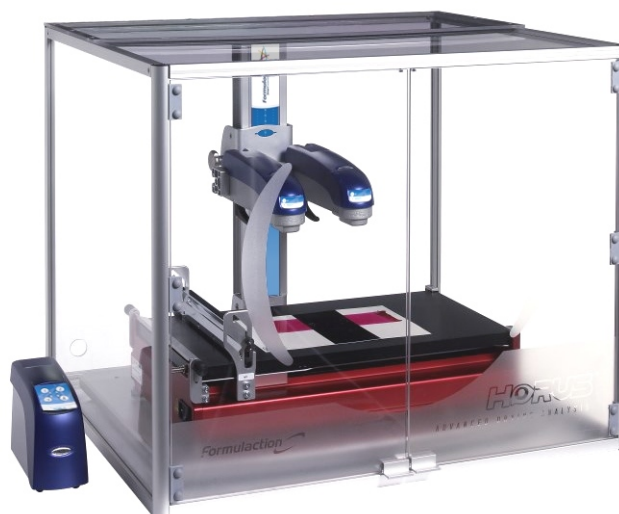
Figura 2.5 – Mesa inercial e câmara de isolamento luminoso no CEDIA – UFLA.



Fonte: Do autor (2019).

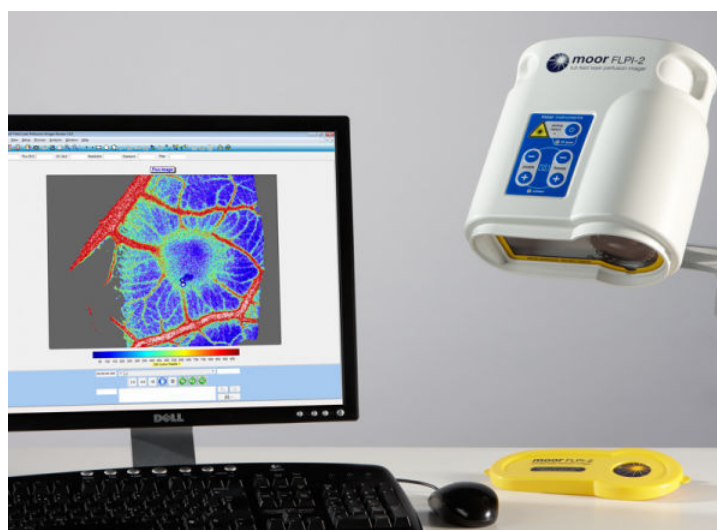
Na literatura científica são poucos os trabalhos que abordam a portabilidade de sistema de análises BSL e também não são encontrados muitos equipamentos comerciais que realizam esse tipo de análise. Alguns equipamentos disponíveis no mercado são específicos para a avaliação de secagem de tinta (FIGURA 2.6) ou fluxo sanguíneo (FIGURA 2.7) (BRUNEL et al., 2007; CHAVES, 2011; KHALIL, 2017; MOOR INSTRUMENTS, 2018; PÉREZ et al., 2018).

Figura 2.6 – Equipamento para análise de secagem de tinta Horus.



Fonte: Formulation Scientific Analysis (2018).

Figura 2.7 – Equipamento para análise de fluxo sanguíneo MoorFLPI-2.

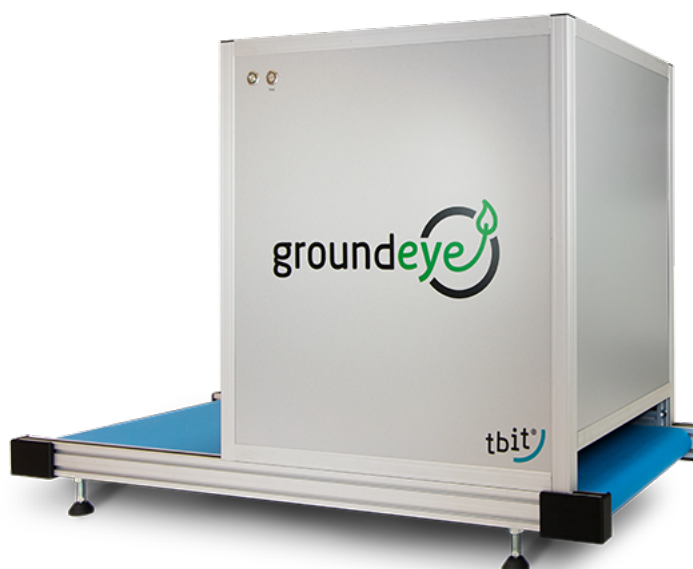


Fonte: Moor Instruments (2018).

Diversos pesquisadores como Braga Jr et al. (2001); Rodrigues et al. (2007) e Vidal e Silva (2008), destacaram as vantagens da técnica do *biospeckle* em relação aos métodos tradicionais de avaliação de sementes como, por exemplo, ser não-destrutiva e não-invasiva, redução de tempo e custos, eliminação da subjetividade e automatização do processo. Apesar disso, Braga Jr (2000) e Vidal e Silva (2008) observaram em seus trabalhos que, comercialmente ainda não existiam equipamentos que fizessem a análise de sementes empregando a técnica do *biospeckle*, situação que perdura até os dias atuais. Sendo assim, constata-se que esta tecnologia ainda não está disponível nos locais de produção e nos laboratórios de análise de sementes, apesar de estudos indicarem que o fenômeno do *biospeckle* apresenta um grande potencial para análise

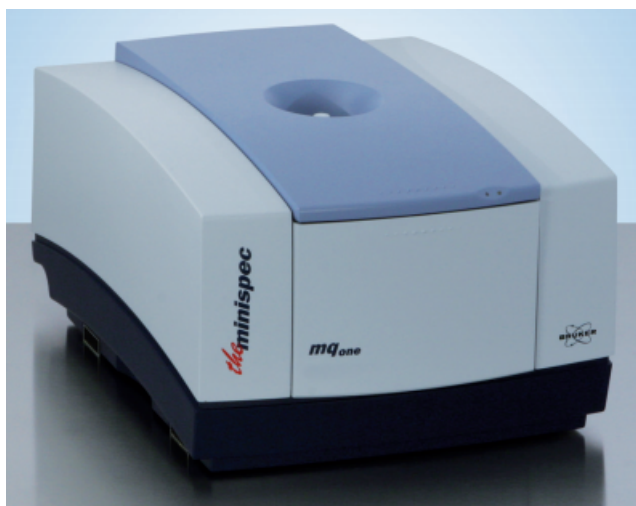
da qualidade das sementes. Nas Figuras 2.8 e 2.9 são apresentados analisadores comerciais de sementes, porém eles não utilizam a técnica do *biospeckle* laser.

Figura 2.8 – Analisador de sementes GroundEye Série L.



Fonte: TBIT (2019).

Figura 2.9 – Analisador de sementes MQ-ONE XL.



Fonte: Bruker Corporation (2018).

Atualmente, dentre as aplicações que fazem uso do fenômeno do *speckle* laser, a avaliação de secagem de tinta já está amplamente divulgada na literatura especializada. Por conseguinte, como possui metodologia e resultados consolidados, vários estudos empregaram a reprodução de experimentos com secagem de tinta para validação de configurações experimentais e métodos de análise, como pode ser visto nos trabalhos de Braga Jr et al. (2006); Federico et al. (2006); Chaves (2011); Moreira (2013); Pra, Passoli e Rabal (2009) e Zhong et al. (2013).

Hoje em dia, os sistemas computacionais estão presentes em todas as áreas do conhecimento e, desta forma, as aplicações que exploram o fenômeno do *speckle* laser também se utilizam desse recurso. Nesta perspectiva, visando facilitar a realização das análises *biospeckle* ou *speckle* laser dinâmico, pesquisas desenvolvidas no CEDIA-UFLA implementaram 3 programas computacionais: o Speckle Tool, o Speckle Quality Test (SQT) e a biblioteca BSLTL (Biospeckle Laser Tool Library). Todos eles são *softwares* livres.

Costa et al. (2017) e Godinho et al. (2012) destacam em seus trabalhos que o *software* Speckle Tool é utilizado para a aquisição das imagens do padrão *biospeckle*, ele foi implementado para proporcionar uma maneira *on-line* de ver o que está acontecendo e possui algumas funções adicionais, como a possibilidade de adquirir imagens e vídeos. Por sua vez, Moreira, Cardoso e Braga Jr (2014), afirmam que o Speckle Quality Test foi desenvolvido com o intuito de reduzir a subjetividade na avaliação do *speckle*, os parâmetros utilizados para esse teste são o contraste, a homogeneidade e a saturação. Por fim, conforme destacam Braga Jr, Rivera e Moreira (2016), o pacote BSLTL é uma biblioteca de rotinas criadas para trabalhar com a técnica do *biospeckle* laser. Ela implementa funções que realizam análises numéricas e gráficas. A biblioteca BSLTL foi escrita em uma sintaxe compatível com o OCTAVE e o MATLAB. Mais recentemente, Catalano, Rivera e Braga Jr (2019) apresentaram um aplicativo chamado Portable Speckle, o qual realiza análises *biospeckle* em equipamentos portáteis como *smartphones* e *tablets*.

2.2 *Driver* do Laser

Conforme Siegman (1986) afirma, os feixes de lasers são diferentes dos de uma lâmpada ou luz convencional pelos seguintes motivos:

- São monocromáticos, o que significa seu comprimento de onda fica bem concentrado em torno de uma frequência do espectro;
- São direcionais, ou seja, um feixe colimado que segue trajetória específica, não se espalhando pelo ambiente;
- A luz é coerente, isto é, os fótons emitidos estão em fase e sincronizados.

Os trabalhos de Gomes et al. (2018) e Siegman (1986) destacam que duas características importantes dos lasers estão relacionadas à forma de emissão da luz e à potência de saída.

Quanto à forma de emissão, os lasers podem ser classificados como de iluminação contínua, quando sua potência de saída é estável durante todo o tempo, ou pulsante, quando a potência de saída não é estável durante todo o percurso. Em relação à sua intensidade de emissão eles podem ser classificados como de baixa, média e alta potência.

Monteiro et al. (2016) afirmam que o circuito eletrônico utilizado para excitar o laser é chamado de *driver* (ou controlador), ele tem o papel de interface entre a rede elétrica e o laser propriamente dito. O *driver* completo é constituído de um Circuito Retificador e um Conversor Buck. Ele deve possuir tensão regulada, corrente constante e um nível muito baixo de ruído, bem como proteger contra variações apresentadas pela fonte de alimentação e eventos nocivos a saúde humana (BRAGA, 2018; INAZAWA; GUIMARÃES, 2016).

Neste contexto, Oliveira (2014) explica que um Circuito Retificador ou Conversor CA-CC (Corrente Alternada-Corrente Contínua) é aquele que converte o sinal alternado da rede elétrica em um sinal contínuo. Por outro lado, o conversor Buck, ou Step-down, é um circuito regulador chaveado abaixador de tensão. Ahmed (2000) complementa que ele é um conversor CC-CC que produz uma tensão de saída menor ou igual à tensão de entrada. Na alimentação do laser ele tem as funções de ajustar e regular a tensão, limitar a corrente e evitar danos ao dispositivo.

Em aplicações portáteis, o laser deve ser alimentado por uma bateria recarregável que fornece o sinal de corrente contínua (CC) em substituição ao retificador de corrente alternada (CA). Esta bateria também deve ser conectada a um conversor Buck para os ajustes acurados de nível de tensão e limite de corrente. Além disso, como descrevem Pereira et al. (2011), um regulador chaveado Buck possui a vantagem de ser mais eficiente na conversão do que um regulador linear. Uma característica importante dos circuitos chaveadores é que possuem alta eficiência energética, assim sendo, poucas perdas de energia se refletem em economia de recursos, algo desejado em qualquer dispositivo atual. Esta maior eficiência do conversor Buck resulta em maior autonomia para o equipamento alimentado por bateria.

Para que o laser tenha intensidade e potência de iluminação estável é imprescindível que ele tenha uma fonte de alimentação de qualidade.

2.3 Vibrações Mecânicas

Um corpo é dito em vibração, quando ele descreve um movimento ou oscilação mecânica em relação à posição de equilíbrio estabelecida, conforme definem National Instruments

(2019) e Savionek (2010). Ademais, Becker (2006) apud Kaderli e Gomes (2011) afirma que “a vibração está presente em qualquer sistema mecânico que se mova, diferindo de um sistema para outro apenas em nível e conteúdo espectral”.

Conforme relatam em seus estudos Griffin e Erdreich (1991) e Silva (2013), a magnitude, a frequência, a duração e a direção são os principais componentes que definem a vibração. Ela pode ser expressa por meio de deslocamento (m), velocidade (m/s) ou aceleração (m/s^2), porém a forma mais comum de se quantificar a vibração é por meio da aceleração.

Destaca-se que, em muitas aplicações como em projetos de máquinas, fundações, estruturas, componentes, motores, turbinas e sistemas de controle o efeito da vibração pode causar desgaste dos componentes, falha por fadiga, ruídos excessivos e ressonância (RAO, 2008). Do mesmo modo, Gallais e Griffin (2006) afirmam que a exposição a altos níveis de vibração pode se apresentar como risco à saúde e segurança do ser humano. Além disso, equipamentos de precisão como os utilizados em laboratórios e centros de pesquisa requerem locais para instalação livres de interferências externas (vibrações, correntes de ar, incidência de luz solar, umidade e calor) (CARVALHO, 2013). Sendo assim, observa-se a grande importância do tratamento adequado das vibrações e, para tanto, é imprescindível identificar as características das mesmas no ambiente em que ocorrem e atuar na sua atenuação ou isolamento.

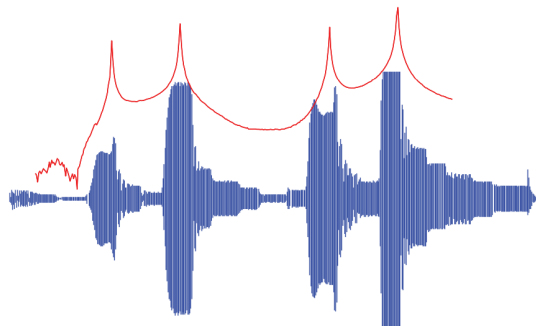
Neste sentido, Ewins (2000) relata que a análise modal é uma das formas mais utilizadas para quantificar os níveis de vibração, visto que ela possibilita a construção de um modelo matemático representativo do comportamento dinâmico do sistema em estudo (NÓBREGA; HANAI, 2005). Atualmente, destaca Avitabile (2018), a análise modal é utilizada no projeto de diversas estruturas como, por exemplo, automotivas, aeronáuticas/aeroespaciais, computacionais, esportivas, etc.

Ainda de acordo com Avitabile (2018), a análise modal experimental (AME) é uma técnica que consiste em determinar os parâmetros modais de um sistema mecânico, que são as frequências naturais, fatores de amortecimento e modos de vibração. Ele também afirma que a medida mais importante na análise modal experimental é a função resposta em frequência (FRF - Frequency Response Function), também chamada de receptância.

Descrevendo em termos matemáticos, esta função pode ser definida como sendo a relação entre a transformada de Laplace do sinal de resposta de um sistema e a transformada de Laplace de excitação (CESÁRIO, 2012; JORDAN, 2007). Por exemplo, o sinal de resposta de uma estrutura obtido no domínio do tempo, representado em azul na Figura 2.10, pode ser ade-

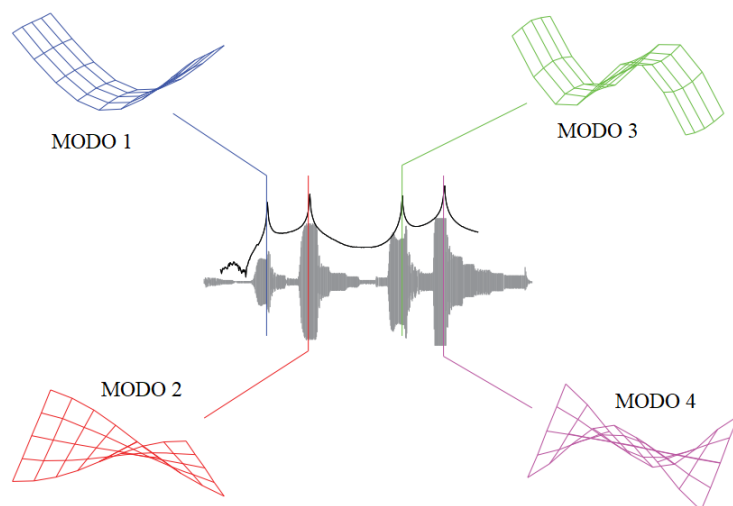
quadramente processado e convertido para o domínio da frequência e, assim, calculado a função de resposta em frequência (FRF), em vermelho. Assim sendo, cada pico de amplitude desse espectro está associado a uma frequência de ressonância e um modo de vibração do sistema (FIGURA 2.11). Nessa figura, observa-se que a primeira frequência natural produz o primeiro modo de vibração de flexão da placa indicada (modo 1, azul), a segunda frequência natural o primeiro modo de torção (modo 2, vermelho), a terceira frequência o segundo modo de flexão (modo 3, verde) e, por fim, a quarta frequência o segundo modo de torção (modo 4, magenta) (AVITABILE, 2018).

Figura 2.10 – Exemplo de estrutura de placa flexível em ressonância. Em azul: resposta no domínio do tempo; Em vermelho: função resposta em frequência.



Fonte: Adaptado de Avitabile (2018).

Figura 2.11 – FRF e modos de vibração.



Fonte: Adaptado de Avitabile (2018).

Posto isso, e tomando como base os conceitos apresentados em Rao (2008), quando a frequência de excitação externa coincide com a frequência natural da estrutura, ocorre o fenômeno da ressonância e, nesta situação, o sistema pode apresentar altos níveis de vibração que, se não amortecidos, podem causar danos e falhas nos equipamentos ou estruturas. Mediante

o exposto, deve-se prever dispositivos de amortecimento ou isoladores de vibração que devem ser acoplados entre a fonte de vibração e o receptor, que é o sistema que se deseja proteger (RUZICKA; DERBY, 1971). Os isoladores tem como finalidade atenuar os níveis de vibração ou mesmo isolar mecanicamente o equipamento da fonte excitadora, podendo ser fabricados em diversos materiais como, por exemplo, molas de metal, borrachas, espumas, plásticos, etc.

Nesse contexto, Quesada (2019) afirma que a maneira de verificar a eficiência de um isolador de vibração é por meio da função de transmissibilidade (T_r), que é definida como a razão entre a amplitude da resposta (X) pela amplitude do movimento da base (Y). Desse modo a função transmissibilidade de um sistema massa-mola-amortecedor com 1 grau de liberdade é determinada pela equação 2.1 (RAO, 2008).

$$T_r = \frac{X}{Y} = \sqrt{\frac{1 + (2.\zeta.r)^2}{(1 - r^2)^2 + (2.\zeta.r)^2}} \quad (2.1)$$

na qual ζ é o fator de amortecimento e r é a razão de frequência, dados pelas equações 2.2 e 2.3 respectivamente:

$$r = \frac{\omega}{\omega_n} \quad (2.2)$$

$$\zeta = \frac{c}{2.m.\omega_n} \quad (2.3)$$

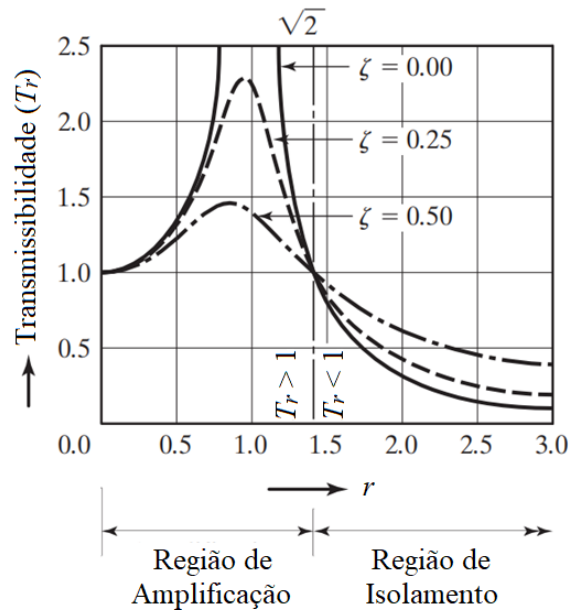
sendo ω a frequência de excitação, ω_n é a frequência natural não amortecida, c o coeficiente viscoso e m a massa.

Na Figura 2.12 são apresentadas curvas típicas da transmissibilidade (T_r) em função da razão de frequência (r), para três diferentes valores do fator de amortecimento (ζ).

A análise dessa figura permite realizar as seguintes inferências:

- Em $r = \sqrt{2}$, para todos os fatores de amortecimento (ζ) o valor da transmissibilidade (T_r) é 1, isto é, a amplitude do deslocamento transmitido é igual a amplitude do deslocamento da base;
- Para $r < \sqrt{2}$, fatores de amortecimento (ζ) maiores resultam em valores de transmissibilidade menores, ou seja, o isolador contribui para a redução da vibração;
- Para $r > \sqrt{2}$, fatores de amortecimento (ζ) maiores resultam em valores de transmissibilidade maiores, ou seja, o uso do isolador é prejudicial à redução da vibração.

Figura 2.12 – Transmissibilidade (T_r) pela razão de frequências (r).



Fonte: Adaptado de Rao (2008).

Sendo assim, a análise modal experimental auxilia na avaliação e desenvolvimento de sistemas de amortecimento, tendo em vista eliminar ou atenuar os efeitos prejudiciais que as vibrações mecânicas podem causar a equipamentos e estruturas.

2.4 Análise de Sementes

A semente é o insumo mais importante da agricultura e o estabelecimento inicial de uma lavoura depende diretamente do seu potencial fisiológico. Sementes de qualidade originam plântulas fortes e vigorosas que vão permitir maior velocidade de emergência e de desenvolvimento das plantas, o que eleva a produtividade e reduz os custos de produção. Além disso, a lavoura sofrerá menor incidência de ervas daninhas e menor necessidade de herbicidas (FRANÇA NETO; KRZYZANOWSKI; HENNING, 2010).

As Regras para Análises de Sementes – RAS (BRASIL, 2009) e os manuais de vigor da Associação Brasileira de Tecnologia de Sementes (KRZYZANOWSKI; VIEIRA; FRANÇA NETO, 1999; LIMA JR, 2011) descrevem os principais testes que avaliam a qualidade de sementes e o desempenho de plântulas. Entretanto, com a intensificação do comércio de sementes, começaram a surgir problemas relacionados à avaliação da qualidade. As adulterações para a venda eram de ocorrência bastante comum (BRIERS; RICHARDS; HE, 1999). A alta competitividade do mercado exige um maior controle da qualidade das sementes, porém, Masetto,

Faria e Queiroz (2008) ressaltam no seu trabalho que a maioria das análises é destrutiva e demandam longo tempo, o que é considerado de custo elevado na cadeia que envolve a produção e comercialização das sementes e, posteriormente, a produção de mudas.

De acordo com a Embrapa Rondônia (2019), as análises podem ser realizadas para determinação da qualidade física, fisiológica, genética ou sanitária das sementes. Existem vários tipos de análises, entre elas pode-se destacar: determinação do grau de umidade, germinação, análise de pureza física, vigor e viabilidade, sanidade, etc.

Quanto à análise de vigor e viabilidade, Basu (1995) afirma que a “viabilidade é a propriedade da semente germinar sob condições favoráveis” e de acordo com Heydecker (1972) o “vigor é um atributo quantitativo da semente que está intimamente relacionado com a sua viabilidade, sendo que uma perda de viabilidade é usualmente precedida de uma perda do vigor”.

Os trabalhos de Barbosa (2011) e Martins (2011) ressaltam que os testes mais utilizados na análise do vigor e viabilidade das sementes são o do Tetrazólio (TZ) e de Condutividade Elétrica. Ambos são testes bioquímicos, o teste do Tetrazólio é considerado rápido, mas é destrutível e apresenta subjetividade de análise, necessitando de pessoal especializado. O teste de Condutividade Elétrica fornece resultado rápido, não-destrutível e é considerado eficiente, porém pode ser afetado pela qualidade da água, temperatura e grau de umidade.

Em contrapartida, diversos trabalhos apresentam a técnica do *biospeckle* laser, baseada no uso do laser e da óptica, como uma alternativa com grande potencial para a análise de sementes, pois permite análises não-destrutivas, a eliminação da subjetividade e a redução de tempo e custos. Como exemplo, pode-se citar as publicações de Braga Jr (2000), Rodrigues et al. (2007), Vidal e Silva (2008), Fracarolli (2011), Silva (2016), Sutton e Punja (2017), Azevedo (2018) e Singh et al. (2020) que dissertaram sobre a utilização dessa técnica para análises de sementes e apresentaram resultados consistentes. Destaca-se que essas análises foram realizadas em diferentes tipos de sementes, tais como: milho, soja, café, trigo, feijão, grão de bico, ipê-roxo, araçá-boi e outros.

Entretanto, é importante observar que os trabalhos supracitados possuem um fator em comum, todos utilizaram configurações experimentais em laboratórios de pesquisa para a realização das análises *biospeckle* laser. Desse modo, constata-se que para o avanço da técnica em âmbito comercial é necessário o desenvolvimento de equipamentos compactos, portáteis e dedicados às análises de sementes, bem como uma maior padronização das metodologias dos testes.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido no Centro de Desenvolvimento de Instrumentação Aplicada à Agropecuária (CEDIA) e no Laboratório de Mecânica Aplicada (LMA), ambos na Universidade Federal de Lavras. Visando o desenvolvimento de um equipamento portátil e dedicado às análises de sementes utilizando a técnica do *biospeckle* laser, o trabalho foi dividido em 5 etapas:

- Avaliação da estabilidade da fonte de alimentação original e desenvolvimento de um sistema portátil com bateria;
- Miniaturização das configurações experimentais;
- Avaliação de interferências externas (iluminação e vibrações mecânicas);
- Motorização do filtro neutro;
- Validação do protótipo.

3.1 Avaliação da estabilidade da fonte de tensão original e desenvolvimento de um sistema de alimentação portátil para o laser

Uma variação na fonte de alimentação provoca uma variação na estabilidade de iluminação do laser, o que na análise BLS pode ser mensurada, erroneamente, como uma atividade biológica na semente analisada. Assim sendo, o objetivo desta etapa do projeto foi avaliar a estabilidade da intensidade de iluminação de um laser de emissão contínua, em baixa potência, utilizado em análises BSL. Com o levantamento desses dados, foi projetado um sistema de alimentação para o laser utilizando uma bateria e um regulador/limitador de tensão e corrente, tendo em vista que o seu desempenho seja equivalente ao da fonte de alimentação original.

Foi avaliado um laser que já foi empregado em várias análises *biospeckle* que obtiveram resultados considerados satisfatórios. Partindo desse pressuposto, considera-se que as características do laser atendem aos requisitos necessários para a realização das análises *biospeckle* e a sua fonte de alimentação foi avaliada sob esta perspectiva.

Nesta fase do trabalho foram empregados os seguintes equipamentos:

- Laser Coherent modelo Lasiris SNF - laser semiconductor de baixa potência, comprimento de onda de 635 nm (vermelho), temperatura de operação de -10 a +48 °C, tensão de alimentação de 6,0 Vcc e potência de saída de 5,0 mW;

- Sensor Fotodetector Optron Det550 - sensor analógico, área sensível 2,8 x 2,8 mm, tensão de saída 0 a 12 V e ajuste de sensibilidade;
- Sistema de aquisição de dados (DAQ) National Instruments NI USB-6008 - 8 entradas analógicas (AI), 2 saídas analógicas (AO), 12 entradas/saídas digitais (DIO), resolução de entrada de 11 bits e taxa de amostragem máxima de 10 kS/s (amostras/segundo);
- Ambiente de desenvolvimento gráfico LabVIEW 2014;
- Conversor DC-DC, fabricante FabioConversores, DC/DC Step Down 04 - entrada CC de 6 V a 38 V, saída ajustável de 1,5 V a 36 V e corrente ajustável de 0 a 5 A;
- Bateria Estacionária UNIPOWER UP1270SEG - bateria estacionária de chumbo-ácido, tensão nominal de 12 V e capacidade nominal 7 Ah;
- Multímetro digital Agilent U1253B e cabo U1173A - precisão básica de tensão DC de 0,025%, medição de tensão AC RMS, registro de dados até 1000 pontos no DMM e no PC e *software* Agilent GUI Data Logger;
- Microscópio Digital Dino-Lite AM3013 - faixa de ampliação 10x-50x~230x, resolução de pixels 640x480, 0,3 megapixels, saída USB 2.0, sensor tipo CMOS, taxa de quadros (máx.) 30 fps e formatos de vídeo (Windows) wmv, flv, swf;
- Balança Eletrônica Shimadzu BL320H - capacidade de pesagem 320 g, legibilidade 0,001 g, repetibilidade 0,001 g, linearidade 0,003 g e faixa de temperatura 5 - 40 °C;
- Osciloscópio digital Tektronix TDS1001B - largura de banda de 40 MHz, 2 canais e taxas de amostragem de até 500 MS/s em tempo real;
- Speckle Tool - ferramenta de aquisição de imagens para trabalhar com o fenômeno *speckle* dinâmico;
- BSLTL (Biospeckle Laser Tool Library) - conjunto de rotinas OCTAVE/MATLAB para trabalhar com a técnica de *biospeckle* laser;
- GNU Octave - linguagem de programação para computação científica;
- Editor de planilhas eletrônicas Microsoft Excel 2010.

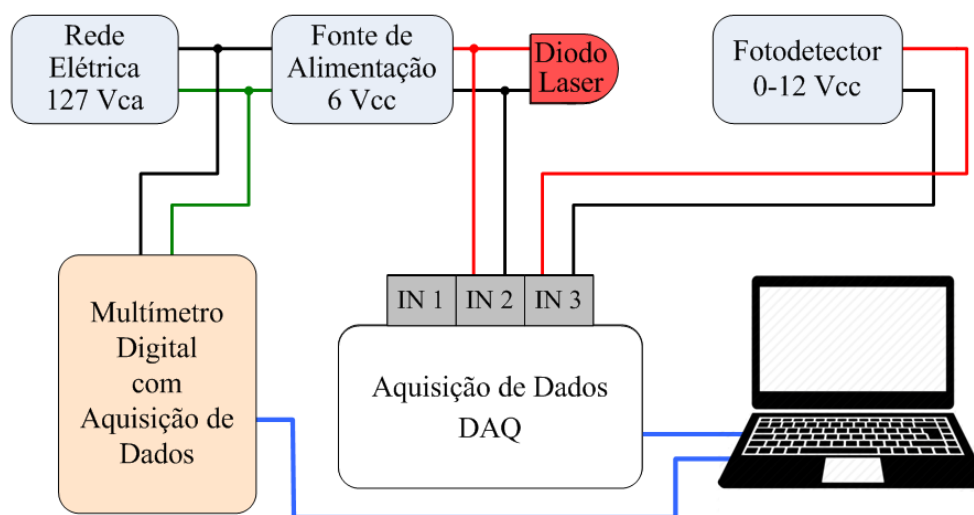
Foram realizados dois experimentos distintos: (1) análises de níveis de tensão para verificar a estabilidade da fonte de alimentação original do laser e para projetar e avaliar o sistema de energia portátil; e (2) análises *speckle* laser dinâmico de secagem de tinta para comparar os dois sistemas de alimentação e para validar o portátil.

3.1.1 Análises de níveis de tensão

Vários ensaios foram realizados para atestar a estabilidade da intensidade de iluminação de um laser utilizado em análises do *biospeckle* laser. Os dados obtidos desses ensaios foram então utilizados para projetar e testar um sistema de alimentação portátil para o laser.

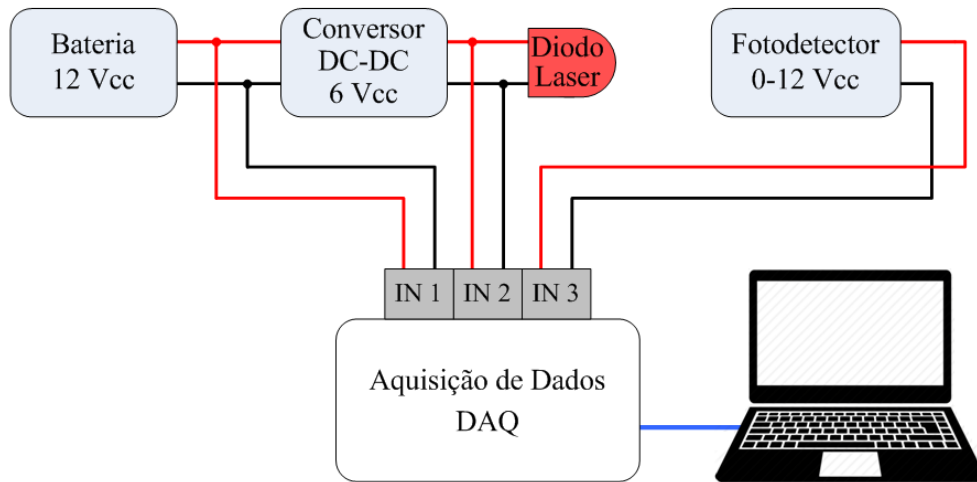
Na avaliação da fonte de alimentação original foram realizados 10 ensaios, com a aquisição de dados das tensões na Rede Elétrica (127 Vac), na saída da Fonte de Alimentação (6 Vdc) e na saída do Sensor Fotodetector (6 Vdc). Durante o teste do sistema com bateria, também foram realizados outros 10 ensaios, com a aquisição de dados das tensões na Bateria (12 Vdc), na saída do Conversor/Regulador DC-DC (6 Vdc) e na saída do Sensor Fotodetector (6 Vdc). Nas Figuras 3.1 e 3.2 são apresentados os diagramas das configurações experimentais que foram montadas para realizar os ensaios do laser ligado à fonte original e à bateria com o regulador.

Figura 3.1 – Configuração experimental com o laser ligado à fonte original.



Fonte: Do autor (2019).

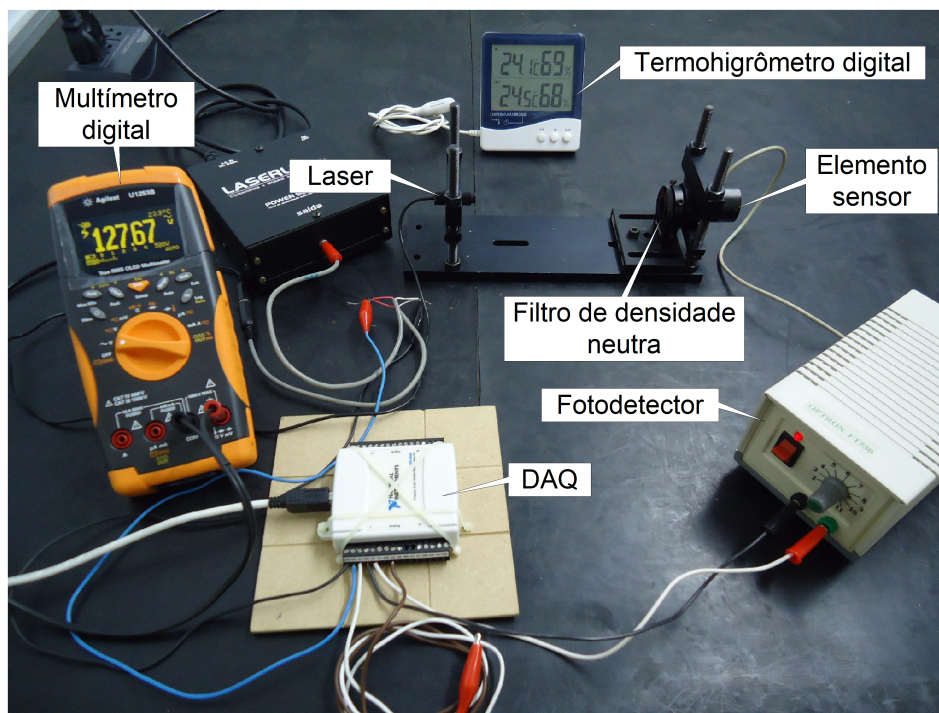
Figura 3.2 – Configuração experimental com o laser ligado à bateria e conversor DC-DC.



Fonte: Do autor (2019).

Utilizando um multímetro digital, foram medidas a tensão e a corrente de operação com o laser conectado à sua fonte de alimentação original e, com um osciloscópio, foram verificadas a forma de onda e a amplitude da tensão de *ripple* da fonte. Esses valores foram usados para ajustar a saída do conversor DC-DC no sistema com bateria, de forma a fornecer exatamente a mesma tensão e limitar a corrente ao laser. A montagem do arranjo experimental para a avaliação da fonte original do laser pode ser observada na Figura 3.3.

Figura 3.3 – Montagem do *setup* para a avaliação da fonte original do laser.

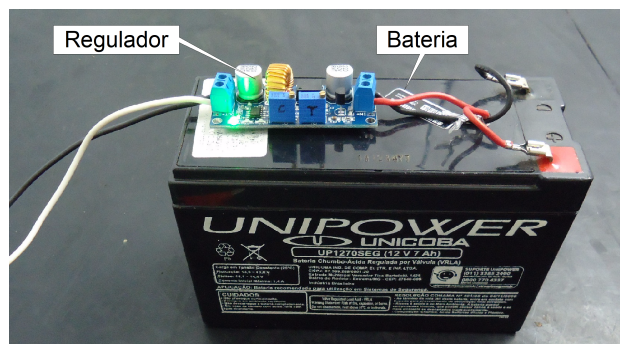


Fonte: Do autor (2019).

Na configuração experimental, o feixe do laser foi direcionado para o centro do elemento sensor do fotodetector e entre eles foi posicionado um filtro óptico de densidade neutra para atenuação da intensidade da luz, de forma que a tensão na saída do fotodetector medisse aproximadamente 6 V, que é o valor central da sua faixa de operação (de 0 a 12 V).

Para a montagem do sistema portátil de alimentação do laser, a fonte original foi substituída por uma bateria recarregável e um regulador/limitador de tensão e corrente (FIGURA 3.4).

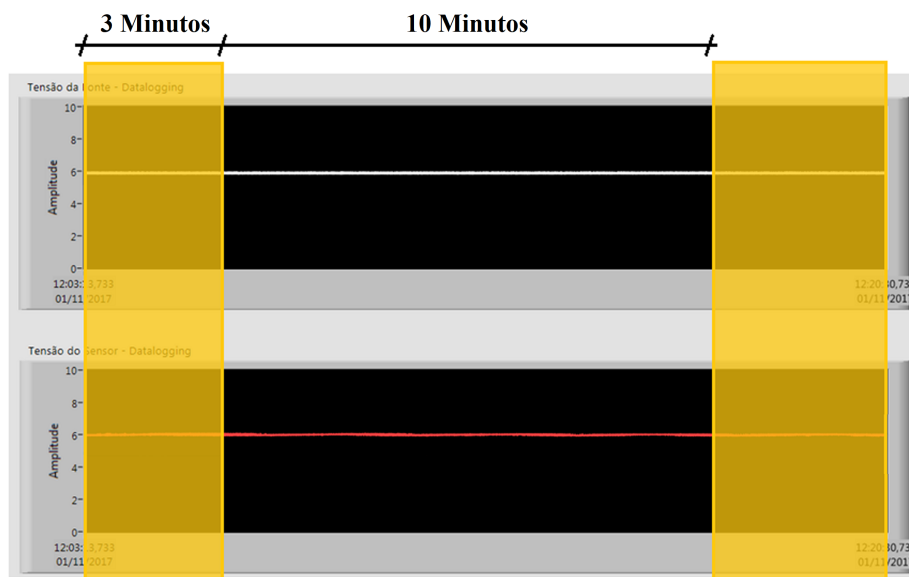
Figura 3.4 – Bateria recarregável e regulador/limitador de tensão e corrente.



Fonte: Do autor (2019).

Cada ensaio realizado consistia na aquisição de dados por aproximadamente 15 minutos, dos quais foram descartados os 3 primeiros minutos para eliminar os transitórios iniciais da energização dos equipamentos e aguardar a estabilização de temperatura do laser. Para efeito de análise foram considerados os 10 minutos subsequentes (FIGURA 3.5).

Figura 3.5 – Área de interesse para análise de dados; nas regiões amarelas os dados não foram utilizados.



Fonte: Do autor (2019).

No computador, a aquisição dos dados foi realizada por intermédio do ambiente gráfico de programação LabVIEW, no qual a taxa de amostragem por canal do sistema de aquisição de dados (DAQ) foi ajustada em 0,001s, o que permitiu uma amostragem de 600.000 observações por canal em cada ensaio de 10 minutos.

Para tratamento estatístico, os dados coletados foram carregados em planilhas no *software* Microsoft Excel. A partir destas planilhas foram extraídos os valores de tensão máximos e mínimos, e calculados os valores médios, os desvios padrão e os desvios padrão relativos (DPR) de cada ensaio, tanto para os dados com o laser ligado à fonte original quanto para os dados com o laser ligado à bateria. Por fim, foram geradas as tabelas e os gráficos para análise e comparação dos sistemas.

Adicionalmente, para a confirmação da compatibilidade entre os sistemas foram comparados os pares conforme a sua funcionalidade, ou seja, foram confrontados os dois circuitos de conversão/regulação de corrente contínua (fonte vs. regulador) e as tensões aquisitadas na saída do fotodetector, ora com o laser alimentado pela rede, ora ligado ao sistema com bateria. Destaca-se que não foram comparados os dados da rede elétrica com os da bateria, pois esses sinais possuem características bastante distintas: enquanto a primeira trata-se de um sinal de corrente alternada com amplitude de 127 Volts, a segunda é de corrente contínua a 12 Volts. Sendo assim, foi escolhido 1 dos 10 ensaios realizados com cada sistema de alimentação, o qual foi selecionado aleatoriamente, uma vez que não foi observado entre eles diferenças significativas em relação aos resultados das médias e dos desvios padrão. Dessa forma, sem um critério específico, foi escolhido o ensaio de número 5 em cada um dos sistemas.

Em seguida, para a análise estatística foi utilizado o *software* Minitab 19, no qual foi realizado o “Teste de Equivalência para 2 amostras” entre os pares funcionais. Esse teste de hipótese avalia se dois conjuntos de dados independentes possuem a média da população de teste equivalente à média da população de referência. Para tanto, deve ser definido um intervalo de equivalência, que é um intervalo de valores que especifica o limite inferior e o limite superior de equivalência (MINITAB LLC, 2020).

Destaca-se que cada amostra possui 600.000 medições de tensão, ou seja, possui um tamanho amostral grande e, por esse motivo, foi utilizado um intervalo de confiança (α) de 99% ($p < 0,01$), o que reduz o risco de se atestar a equivalência sem que ela seja verdadeira (MINITAB LLC, 2020). Também foi definido um intervalo de equivalência ou margem de tolerância (Δ) de $\pm 1\%$. Visto que, embora no manual do laser analisado não haja nenhuma

especificação sobre a estabilidade da tensão de saída da fonte de alimentação, foi observado que em outros modelos de laser do mesmo fabricante (COHERENT INC., 2011) essa variação é definida em $\pm 2\%$. Assim sendo, para maior precisão dos resultados, foi adotado um Δ inferior a este valor.

Entretanto, para processar o teste de equivalência ainda precisava-se assinalar, ou não, o parâmetro que oferece a opção de “Assumir variâncias iguais”, em função disso, antes foi necessário executar o “Teste para 2 Variâncias”. Este teste estabelece se as variâncias ou os desvios padrão de dois grupos são diferentes e, para esse fim, foi adotado o intervalo de confiança padrão de 95%. Também por padrão, esse teste apresenta os resultados para o método de Levene e o método de Bonett, que são testes não paramétricos, porém existe a opção de se aplicar o teste F, que é paramétrico. À vista disso, primeiramente foi preciso realizar o “Teste de Normalidade” para verificar se os dados seguem uma distribuição normal e, assim, definir qual tipo de teste estatístico (paramétricos ou não paramétricos) é mais adequado. Salienta-se que, por padrão o Minitab executa o teste de normalidade de Anderson-Darling em um nível de significância de 5%. Em conclusão, os resultados foram interpretados estatisticamente por meio das probabilidades de significância (valores-p) e gráficos gerados pelo Minitab.

3.1.2 Análises de secagem de tinta

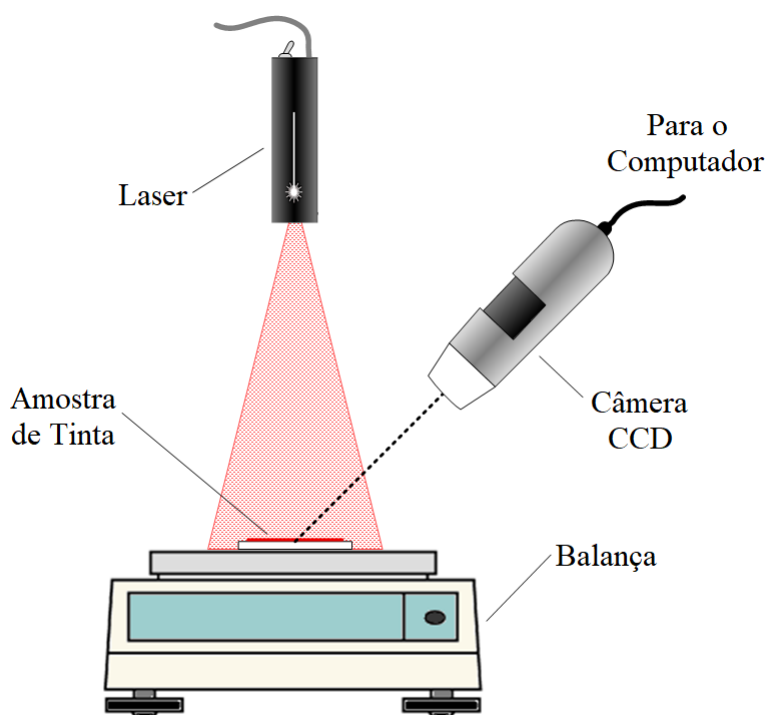
Para verificar e validar a eficiência do sistema de alimentação do laser com bateria, foram realizadas análises de secagem de tinta usando a técnica do *speckle* laser dinâmico e, concomitantemente, foram realizadas análises gravimétricas, que consistem em acompanhar a variação da massa das amostras em intervalos regulares de tempo durante um período específico.

Amalvy et al. (2001) afirmam em seu artigo que a análise gravimétrica é o método mais amplamente utilizado para avaliar o processo de secagem da tinta. Assim, vários estudos empregaram esta técnica para comparar com os resultados obtidos com o método do *speckle* laser dinâmico (por exemplo, Amalvy et al. (2001), Blotta et al. (2011), Faccia et al. (2009) e Pérez et al. (2018)).

Os experimentos foram realizados com o laser analisado, um microscópio digital, uma balança de precisão e um computador pessoal com o *software* Speckle Tool e a biblioteca BSLTL em execução no Octave. A metodologia adotada foi semelhante à utilizada em trabalhos anteriores de Blotta et al. (2011), Federico et al. (2006) e Pérez et al. (2018).

Nos experimentos foi utilizado um esmalte de unha comercial que tem como composição química básica os solventes acetato de butila, acetato de etila, e tolueno; as resinas de formaldeído/tosilamida e nitrocelulose e os plastificantes dibutilftalato e estercalcônio de hecto-rita. As amostras foram preparadas aplicando-se uma fina camada do esmalte na superfície de uma lamínula com um pincel. Na Figura 3.6 é apresentado o *setup* que foi montado para esses experimentos.

Figura 3.6 – Configuração experimental para análise de secagem de tinta.



Fonte: Do autor (2019).

O *software* Speckle Tool foi utilizado para gravar as imagens de *speckle*, as quais registram a atividade da secagem da tinta. Pérez et al. (2018) explicam em seu trabalho que a atividade observada durante o processo de secagem é atribuída principalmente à evaporação do solvente e outras reações de cura. Sendo assim, para se obter um valor quantitativo para essa atividade foi usado o método de análise numérica chamado AVD (Diferença dos Valores Absolutos). Uma vez que, de acordo com Catalano, Rivera e Braga Jr (2019), o algoritmo desse método apresenta baixo custo computacional e proporciona uma boa representação do processo de secagem da tinta. Para a execução das análises foram adotados os procedimentos descritos em Braga Jr, Rivera e Moreira (2016), que processam os dados por intermédio da biblioteca BLSTL e do *software* GNU Octave.

O primeiro experimento foi realizado com o laser conectado à fonte de alimentação original. Para monitorar o processo de secagem, a tinta foi aplicada sobre a superfície da lamínula e após 2 minutos foi iniciado o ensaio. Para efetuar a análise *speckle* laser, as imagens foram registradas em um conjunto de 128 imagens a cada 2 minutos durante 40 minutos. Dessa forma, esses conjuntos de imagens registraram o processo de secagem da tinta e, assim, foi utilizado o método de análise AVD para se obter um valor quantitativo da atividade em cada um deles.

É importante destacar que no código computacional, implementado no *software* Octave, foi utilizada a função AVD1 da biblioteca BSLTL, que fornece um valor de AVD com a normalização proposta por Cardoso e Braga Jr (2014). Ressalta-se também que, para esse cálculo, foram selecionados aleatoriamente 300 pontos em um raio de 50 *pixels* a partir do centro das imagens. Salienta-se ainda que, por meio do *software* Speckle Tool, as imagens foram capturadas a uma taxa de 15 quadros por segundo (em inglês *frames per second*, abreviado como fps), uma resolução de 640 x 480 *pixels* e escala de cinza de 8 *bits* por *pixel*.

Simultaneamente foi realizada a análise gravimétrica da secagem da tinta, pois, como a amostra foi colocada sobre uma balança de precisão (Figura 3.6), imediatamente após a gravação de cada conjunto de imagens, utilizado para o cálculo do índice AVD, foi registrada a respectiva massa da amostra.

O segundo experimento foi realizado exatamente igual ao primeiro, porém o sistema com bateria foi utilizado no lugar da fonte de alimentação original do laser.

Finalmente, os resultados experimentais obtidos com o laser conectado à sua própria fonte de alimentação foram comparados com aqueles obtidos com o sistema com bateria. Para tal, foram construídos gráficos e a análise comparativa foi baseada em regressão linear e no coeficiente de determinação (R^2).

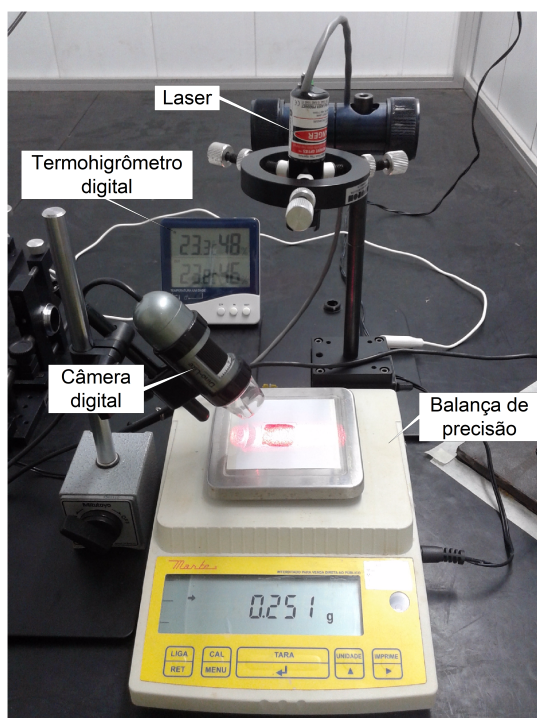
Em todos os experimentos dessa etapa, a temperatura do ambiente e a umidade relativa do ar foram monitoradas por meio de um termohigrômetro.

3.2 Miniaturização das configurações experimentais

Nesta fase do projeto o objetivo foi reduzir as dimensões do *setup* com o propósito de acondicioná-lo em um gabinete que permita a portabilidade do analisador de sementes. Para tanto, foram suprimidas algumas lentes, filtros ópticos e espelhos, que são usados nos *setups* tradicionais, utilizados laser de diodo e câmera digital compactos e reduzida a distância entre os equipamentos. Nesse sentido, o desafio desta etapa foi tornar esse arranjo eficiente e funcional.

A princípio, a metodologia adotada foi a realização de ensaios em laboratório de óptica, utilizando mesa inercial e câmara de proteção contra iluminação externa, de forma a se obter a configuração que realizasse as análises *biospeckle* laser ocupando o menor espaço. Assim sendo, para os experimentos de teste e validação do *setup* foram realizadas análises *speckle* laser dinâmico e gravimétricas de secagem de tinta (FIGURA 3.7). Destaca-se que essas análises são menos complexas de replicar que as análises de sementes, facilitando assim o ajuste mais acurado do *setup*. Para esse fim, foram adotados os mesmos procedimentos descritos no item precedente (Seção 3.1.2).

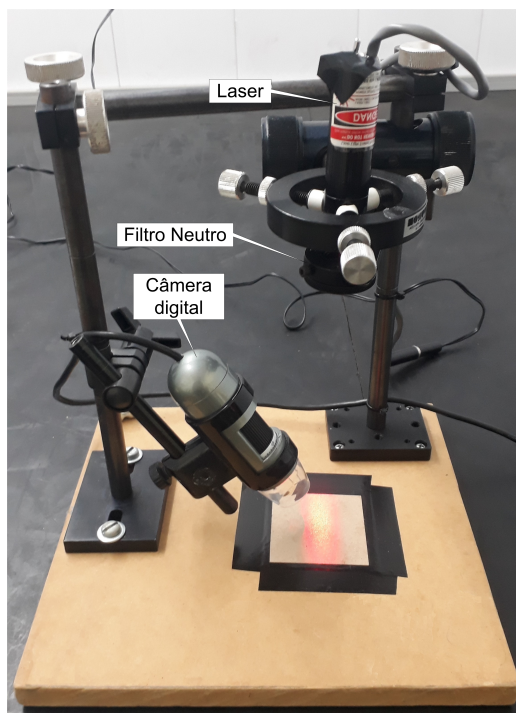
Figura 3.7 – *Setup* para análises *speckle* laser dinâmico e gravimétricas de secagem de tinta.



Fonte: Do autor (2019).

Em seguida, foram registradas as distâncias entre os suportes, as alturas e os ângulos de fixação dos equipamentos e acessórios. De posse desses dados, esta configuração foi montada em um chassi construído com madeira MDF cru e, para a fixação dos equipamentos, foram utilizados acessórios de laboratórios de óptica como bases, hastes, fixadores, etc. Por fim, novamente foram realizadas análises *speckle* laser dinâmico de secagem de tinta para avaliar se a montagem no chassi se equivale à elaborada sobre a bancada. Na Figura 3.8 pode ser observado o arranjo experimental miniaturizado montado no chassi, o qual, posteriormente, foi acondicionado no gabinete projetado para o equipamento portátil.

Figura 3.8 – Montagem do *setup* miniaturizado no chassi.



Fonte: Do autor (2019).

3.3 Avaliação de interferências externas

Conforme citado anteriormente, vários trabalhos advertem que a técnica do *biospeckle* laser é muito sensível a interferências externas como vibrações e a iluminação do ambiente, porém nenhum deles especifica o quanto estas perturbações afetam as análises. Assim sendo, nesta fase do trabalho foi avaliado e quantificado a relação existente entre a magnitude das interferências externas e os resultados obtidos nas análises *speckle* laser dinâmico.

3.3.1 Interferência da iluminação externa

O objetivo desta etapa do projeto foi mensurar os impactos causados pela incidência de iluminação externa (natural e/ou artificial) nas análises BSL e, para tanto, os principais equipamentos utilizados nesses experimentos foram: uma câmara de isolamento luminoso em mesa inercial de um laboratório do CEDIA (veja Figura 2.5), o chassi do *setup* miniaturizado, o gabinete projetado para o protótipo e um luxímetro digital.

O gabinete do protótipo foi construído em madeira compensada com o intuito de acondicionar o sistema de alimentação do laser, o *setup* miniaturizado e os circuitos eletrônicos de motorização do filtro neutro, sendo que estes últimos serão abordados posteriormente. As características do gabinete do protótipo serão detalhadas no Capítulo 4.

Salienta-se que o luxímetro é um instrumento que mede a intensidade da iluminação, natural ou artificial, de um determinado local. Sua unidade de medida é o lux (FIGURA 3.9).

Figura 3.9 – Luxímetro Digital Politerm, modelo POL-10.



Fonte: Politerm Instrumentos de Medição (2019).

O propósito principal nessa fase do trabalho foi verificar se o gabinete projetado para o analisador portátil oferece proteção contra os efeitos da iluminação externa, tanto quanto a câmara de isolamento luminoso. Para esse fim, foram realizadas análises *speckle* laser dinâmico, utilizando o método numérico AVD, em duas abordagens: em uma superfície inerte e no processo de secagem de tinta.

Na primeira, as análises *speckle* laser foram realizadas seguindo os mesmos procedimentos descritos na Seção 3.1.2, porém com o laser iluminando uma superfície inerte, no caso um pedaço de folha de papel pardo, medindo 50 x 50 mm. Teoricamente, o valor que a função AVD deveria retornar de uma superfície inerte, ou seja, sem atividade, seria o valor 0. Entretanto, na prática, esse valor é diferente de 0 devido ao ruído inerente ao sistema, que, de acordo com o trabalho de Kurenda et al. (2013), é causado por fenômenos físicos e ruídos de *hardware*.

Posto isso, foram realizadas as análises AVD da superfície inerte com o equipamento dentro câmara de proteção contra iluminação externa, com as luzes do laboratório apagadas e as cortinas fechadas. Esse é o procedimento usual nas análises *speckle* laser realizadas em laboratório. Nesse cenário, os valores dos índices AVD obtidos foram adotados como a referência para esse estudo. Ademais, por intermédio do luxímetro, foi medida a intensidade luminosa dentro da câmara com o laser desligado.

Em seguida, o ensaio realizado avaliou a interferência da incidência de iluminação externa na análise da superfície inerte. Foi adotado o mesmo procedimento descrito anteriormente, porém agora com a iluminação externa incidindo sobre a superfície inerte com a intensidade recomendada para um laboratório de análises de sementes. Nesse sentido, segundo a norma

ABNT NBR ISO/CIE 8995-1: Iluminação de ambientes de trabalho (ABNT, 2013), a iluminação mantida na superfície do local de trabalho deve ser de 500 lux. Ressalta-se que na norma não há uma recomendação específica para o laboratório de análises de sementes, porém, como o próprio documento orienta, nesse caso deve-se adotar o valor dado para uma situação similar. Sendo assim, foi utilizado como referência os valores recomendados para os laboratórios de indústrias de alimentos e para os laboratórios das construções educacionais, em ambos a NBR 8995-1 estabelece 500 lux como valor mínimo. Para tanto, com o laser desligado, deixou-se a câmara de proteção e as cortinas abertas, as luzes da sala acesas e foi utilizada uma luminária ligada a um circuito dimerizador, o qual proporcionou o ajuste da intensidade recomendada. Dessa forma, foram medidos novamente os valores dos índices AVD.

Por fim, após a obtenção desses dados, foi realizado um terceiro ensaio para verificar se o gabinete projetado para o analisador portátil oferece proteção contra os efeitos da iluminação externa, assim como a câmara de isolamento luminoso. Para tal, o chassi do *setup* miniaturizado foi fixado dentro do gabinete (FIGURA 3.10) que, por sua vez, foi fechado, colocado sobre a mesa inercial e exposto a uma intensidade luminosa 500 lux. Feito isso, procedeu-se as análises AVD da superfície inerte e logo após, com o laser desligado, foi aferida a intensidade luminosa dentro do gabinete, da mesma forma que nos ensaios anteriores.

Figura 3.10 – Gabinete com o chassi do *setup*.



Fonte: Do autor (2019).

Destaca-se que o interior do protótipo foi pintado com tinta *spray* preto fosco, marca Colorgin Decor, de modo a minimizar os reflexos da luz do laser.

Na segunda abordagem, foram realizadas análises *speckle* laser dinâmico de secagem de tinta nas três condições de iluminação descritas anteriormente, ou seja, com o *setup* dentro da câmara de proteção contra a incidência de luz externa, com o *setup* exposto à iluminância recomendada para um laboratório de análises de sementes e com o *setup* no interior do gabinete do protótipo. Nos três ensaios os dados da secagem da tinta foram coletados por meio do método numérico AVD, seguindo os mesmos procedimentos experimentais adotados anteriormente para as análises *speckle* laser. Assim sendo, para a apresentação e comparação entre os resultados obtidos foram construídos gráficos elaborados mediante o *software* Microsoft Excel.

Adicionalmente, foram realizadas análises das imagens capturadas nos ensaios com o *software* ImageJ, que é um programa de processamento e análise de imagens digitais de domínio público e distribuição gratuita. O ImageJ foi utilizado para verificar as diferenças entre as imagens adquiridas sem a incidência de luz e com uma iluminância de 500 lux, as análises foram realizadas por meio dos histogramas das imagens. Salienta-se que o histograma de uma imagem é a representação gráfica da distribuição estatística dos níveis de cinza, ou seja, quantos *pixels* possuem um determinado nível de cinza. Para o estudo, foi necessário escolher 1 dos 20 conjuntos de imagens capturados em cada experimento e, dentro desse conjunto, selecionar uma imagem para a análise. Desse modo, sem nenhum critério específico, foi escolhida a imagem central de cada ensaio, ou seja, a pasta de número 10 e, das 128 imagens contidas em cada pasta, a imagem de número 64.

3.3.2 Interferência das vibrações mecânicas

Prosseguindo no estudo da viabilidade de se construir um equipamento compacto, portátil e dedicado às análises de sementes utilizando a análise BSL, os efeitos das vibrações foram avaliados por meio da análise modal experimental e a análise *speckle* laser dinâmico.

Ressalta-se que esta etapa do trabalho foi desenvolvida em conjunto com o mestrando Daniel Bernardes de Castro, que publicou sua dissertação de mestrado intitulada “Investigação experimental dos efeitos da vibração mecânica na técnica *biospeckle* laser para aplicação em equipamentos portáteis” (CASTRO, 2020) e também parte dessa pesquisa foi apresentada, de forma resumida, no artigo "Avaliação da interferência das vibrações mecânicas na técnica *biospeckle* laser” (GOMES et al., 2019).

Os experimentos foram realizados, predominantemente, no Laboratório de Mecânica Aplicada (LMA) e foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Gabinete do protótipo com o *setup* miniaturizado instalado;
- 6 acelerômetros marca PCB Piezotronics, modelo 352C33 (FIGURA 3.11) - sensibilidade 100 mV/g (10,2 mV/(m/s²)) ($\pm 10\%$), faixa de frequência de 0,5 até 10.000 Hz;
- Célula de carga marca Omega, modelo LCM201-200N (FIGURA 3.12) - excitação de 10 Vcc, máximo de 15 Vcc, saída nominal de 2 mV/V, exatidão de $\pm 1\%$ da saída do fundo de escala, calibração de 5 pontos (em tração) de 0%, 50%, 100%, 50%, 0%;
- Analisador de sinais dinâmicos Stanford Research Systems (SRS), modelo SR785 (FIGURA 3.13) - 2 canais analógicos, faixa de frequência de 102,4 kHz em ambos os canais, $\pm 0,2$ dB de precisão;
- Excitador eletromecânico portátil (*shaker*), marca The Modal Shop, modelo SmartShaker K2007E01 (FIGURA 3.14) - amplificador de potência integrado com entrada BNC, força senoidal de 7 lbf pk, curso de 0,5"pk-pk, suporta cargas úteis de até 2 lbs;
- Fonte de alimentação DC marca Minipa, modelo MPL-3305M - saída dupla regulável, tensão variável de 0 a 32V e corrente variável de 0 a 5A;
- Chassi USB com 4 *slots*, marca National Instruments, modelo cDAQ-9174;
- Módulo de aquisição de sinais (DAQ), marca National Instruments, modelo NI 9234 - 4 entradas analógicos (AI), resolução de entrada de 24 bits e taxa de amostragem máxima de 51,2 kS/s (amostras/segundo);
- Ambiente de desenvolvimento gráfico LabVIEW 2014;
- Linguagem de programação para computação técnico-científica MATLAB R2019a;
- Editor de planilhas eletrônicas Microsoft Excel 2010;
- Dispositivos isoladores de vibração;
- Cavaletes de metal, linhas de nylon e mangueiras de latex.

Figura 3.11 – Acelerômetro piezoelétrico PCB, modelo 352C33.



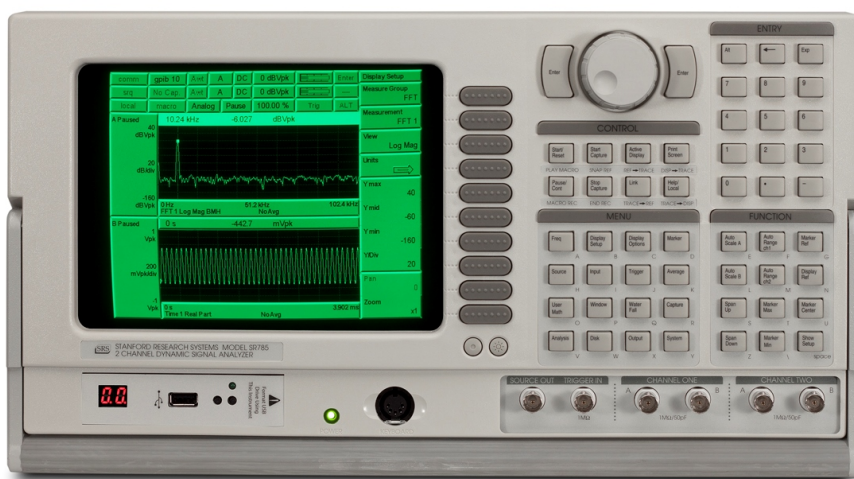
Fonte: PCB Piezotronics (2019).

Figura 3.12 – Célula de carga Omega, modelo LCM201-200N.



Fonte: Omega Engineering (2019).

Figura 3.13 – Analisador de sinais dinâmicos SRS, modelo SR785.



Fonte: Stanford Research Systems (2019).

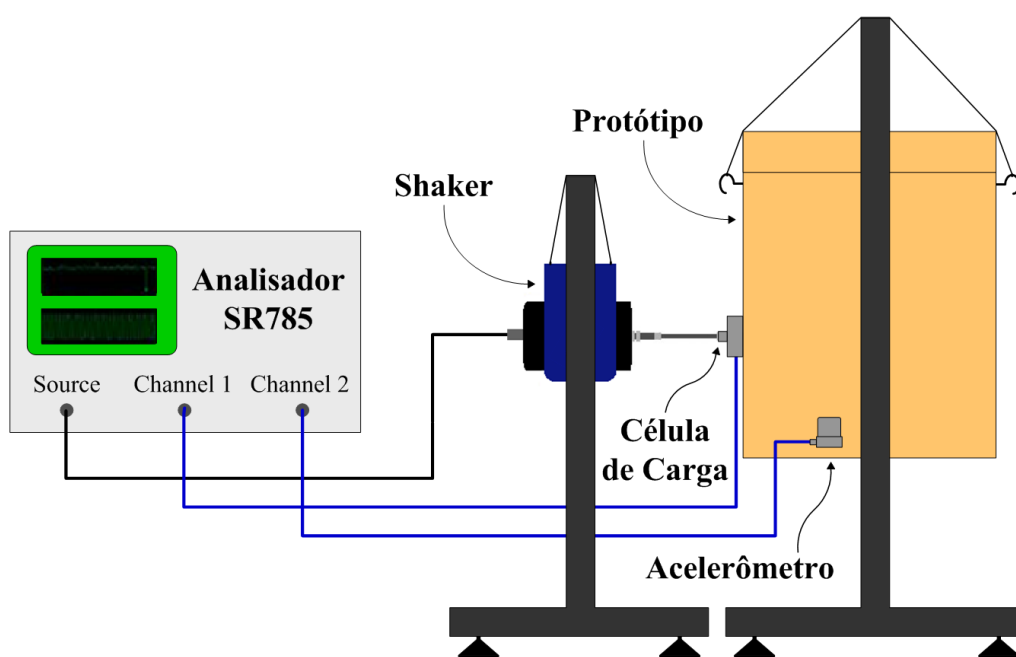
Figura 3.14 – Excitador eletromecânico portátil TMS, modelo SmartShaker K2007E01.



Fonte: The Modal Shop (2019).

Para se obter dados quantitativos do impacto das vibrações nas análises BSL, inicialmente foi realizado um estudo do protótipo por meio de análise modal experimental. Dessa forma, foram identificadas as frequências naturais da estrutura por intermédio da função resposta em frequência (FRF). Para se realizar a FRF, com os equipamentos descritos anteriormente, foi montada uma configuração experimental como a ilustrada no diagrama da Figura 3.15.

Figura 3.15 – Diagrama para a análise FRF.



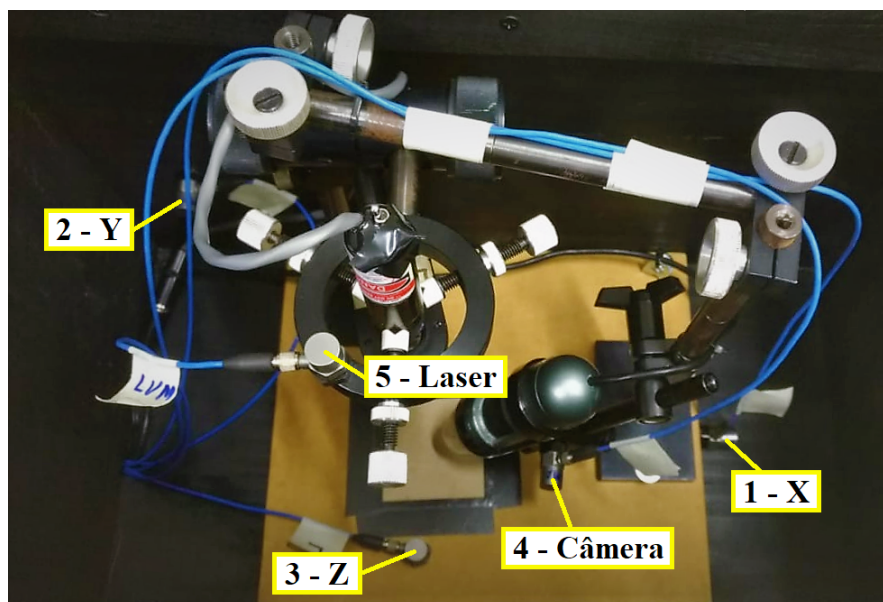
Fonte: Do autor (2019).

Observa-se que o gabinete e o *shaker* foram suspensos em suportes metálicos por meio de fios de nylon. Esse tipo de montagem simula a condição livre-livre, a qual apresenta menor interferência nos resultados (EWINS, 2000).

O próprio analisador de sinais dinâmicos SR785 possui, por intermédio da saída Source, o recurso de gerar sinais de excitação para o *shaker* sem a necessidade de um gerador externo. Normalmente é melhor usar a fonte do SR785 ao invés de uma fonte externa, devido a ela estar sincronizada com a amostragem da entrada (STANFORD RESEARCH SYSTEMS, 2017). O *shaker*, por sua vez, foi conectado à célula de carga por meio de um *stinger*. Em seguida, a célula de carga foi fixada ao gabinete do protótipo e a sua saída conectada ao canal 1 do analisador SR785. Ressalta-se que, para o seu funcionamento, a célula de carga precisa ser alimentada por uma fonte de corrente contínua. Para completar a configuração do teste modal, foi conectado ao canal 2 do analisador um acelerômetro que foi afixado no interior do gabinete.

Entretanto, devido ao protótipo possuir vários componentes, para uma melhor caracterização do sistema foram fixados 5 acelerômetros no seu interior. Um acelerômetro em cada eixo coordenado (X, Y e Z), um no suporte da câmera (Y) e o último no suporte do laser (Z) (FIGURA 3.16).

Figura 3.16 – Disposição dos acelerômetros.



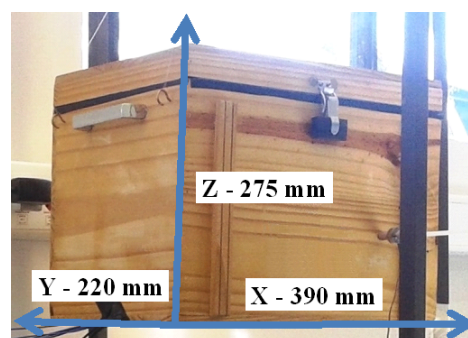
Fonte: Gomes et al. (2019).

Destaca-se que, para aumentar a rigidez da estrutura foi adicionada uma barra unindo os suportes da câmera e do laser.

É importante ressaltar que as dimensões do gabinete do protótipo são de 390 x 220 x 275 mm (comprimento x largura x altura), conforme será detalhado na Seção 4.2. Assim sendo, tais dimensões serão tomadas como coordenadas ortogonais (X, Y, Z) do gabinete, as quais serão utilizadas para indicar o local em que cada acelerômetro foi fixado, conforme a Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Coordenadas de fixação dos acelerômetros.

Acelerômetro	Coordenadas (mm)		
	X	Y	Z
1 - X	305	120	8
2 - Y	45	220	90
3 - Z	160	45	15
4 - Câmera	225	95	60
5 - Laser	140	90	205



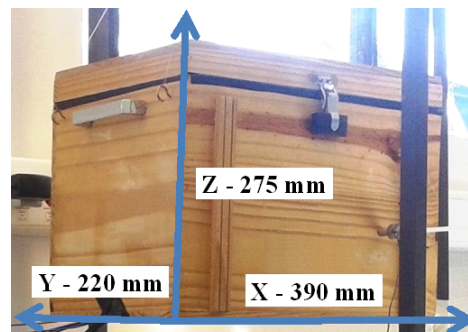
Fonte: Do autor (2019).

O *shaker* e a célula de carga, por suas vezes, também foram fixados ao protótipo nos três eixos e, à vista disso, para cada posição de excitação do *shaker* foram obtidas 5 FRFs, uma

para cada acelerômetro. Na Tabela 3.2 são apresentadas as coordenadas de fixação do *shaker* e a célula de carga.

Tabela 3.2 – Coordenadas de fixação do *shaker* e a célula de carga.

<i>Shaker</i> e célula de carga	Coordenadas		
	X	Y	Z
Eixo X	390	115	95
Eixo Y	300	0	95
Eixo Z	195	60	275



Fonte: Do autor (2019).

Para a excitação do *shaker* o sinal na saída do analisador SR785 foi do tipo *chirp*, que fornece uma onda senoidal com a mesma amplitude para toda faixa de frequência selecionada. Esse tipo de sinal permite medir funções de respostas de frequência rapidamente, sem ter que fazer várias medições discretas usando uma única onda senoidal (STANFORD RESEARCH SYSTEMS, 2017). Sendo assim, foram gerados sinais de *chirp* em várias faixas de frequências diferentes, conforme será mostrado na Tabela 3.3, e em todas as medidas foram utilizadas janelas retangulares nos sinais de entrada e saída. A amplitude do sinal foi de 40 mVpk, uma vez que, conforme relata Porcu et al. (2019), forças de excitação de baixas amplitudes podem ser suficientes para a obtenção das respostas de ressonância. Além disso, foi definido um *burst* de 80% para o sinal. Esse valor significa que, em cada ciclo de amostragem, o sinal do *chirp* foi gerado durante 80% do tempo e nos 20% restantes ficou sem sinal na saída e, nessa pausa, o *shaker* não foi excitado. Esse intervalo permite que o sistema se estabilize antes do início do novo período amostral. Desta forma o analisador pode identificar com maior precisão o início e o final de cada amostragem (STANFORD RESEARCH SYSTEMS, 2017).

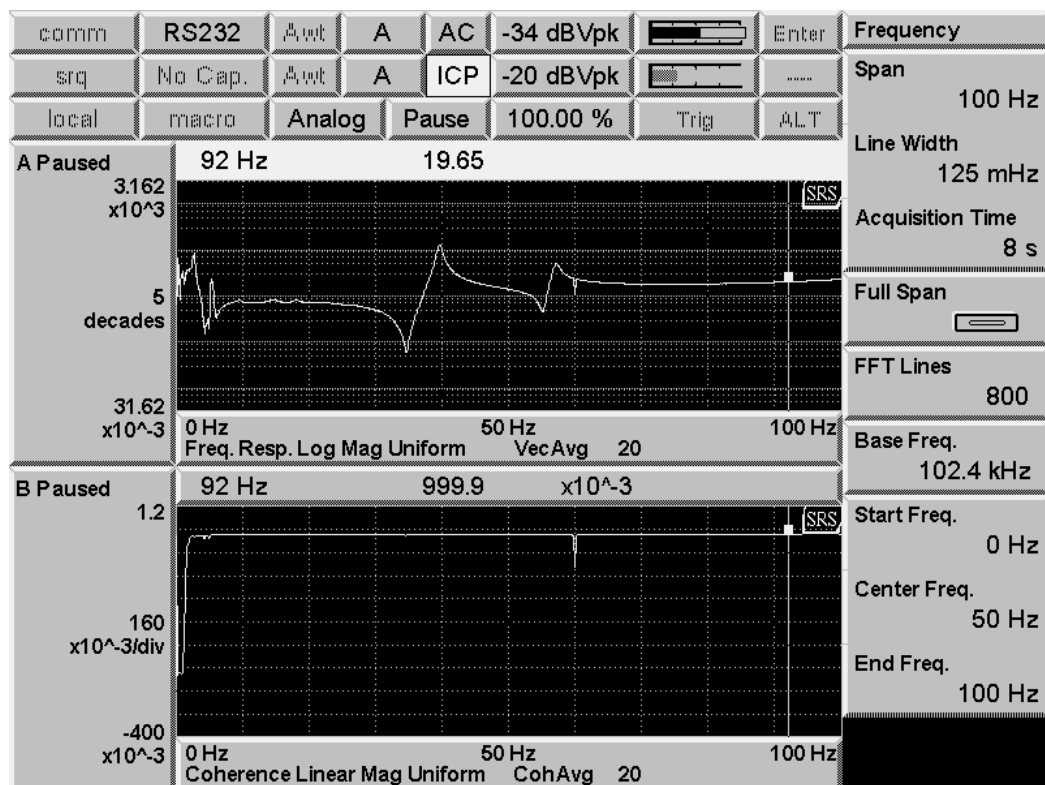
O analisador SR785 possui vários grupos de medições e, assim sendo, a medição desejada (FRF - Frequency Response Function) está associada ao grupo FFT (Fast Fourier Transform). Nele a FRF é determinada como a resposta do dispositivo em teste, que deve ser ligada ao canal 2, dividida pela referência ligada ao canal 1 (STANFORD RESEARCH SYSTEMS, 2017). Sendo que, nesse caso, a resposta foi medida por um dos 5 acelerômetros e a referência é a entrada (excitação) do sistema que foi medida pela célula de carga.

Também deve-se ressaltar que o analisador possui dois *displays* que fazem medições separadas, sendo assim, um deles foi usado para apresentar o resultado da FRF o outro foi con-

figurado para mostrar a função coerência entre os sinais. A função coerência é uma medida quantitativa da similaridade entre dois sinais no domínio da frequência. Esta função pode assumir valores na faixa de 0 a 1, sendo que o valor 1 indica que os dois sinais possuem a mesma informação para uma determinada frequência e o valor 0 indica que a saída do sistema não possui relação com a entrada. Isso posto, por meio desta medição foi avaliada a qualidade do ensaio, pois quanto mais próximo da unidade for o seu valor mais representativa é a FRF obtida.

Além disso, o analisador SR785 possui a opção de aquisição dos dados dos resultados obtidos (formato .sdf) e a captura da imagem que está sendo apresentada no *display* (formato .eps). Desta forma, os arquivos de cada ensaio foram gravados para posteriormente serem formatados e analisados. Na Figura 3.17 é mostrada a captura da tela do analisador após a realização de uma FRF e a correspondente função coerência de um ensaio preliminar.

Figura 3.17 – FRF e coerência para uma varredura (*chirp*) de 0 a 100 Hz.



Fonte: Do autor (2019).

Salienta-se que o analisador SR785 amostra 800 pontos para cada varredura (*chirp*), desse modo, é importante dividir a faixa de frequência em que se deseja realizar a FRF em subfaixas, permitindo que haja uma maior precisão nos dados obtidos. Sabe-se também que, conforme Catalano, Rivera e Braga Jr (2019), nas análises *biospeckle* laser a taxa de captura utilizada na câmera varia de 15 a 30 fps (*frames per second*), inclusive neste trabalho em todos

experimentos essa taxa foi ajustada em 15 fps. Dessa forma, para a definição das faixas de frequência do *chirp* foi realizada uma maior discretização amostral próximo a estas frequências e uma menor discretização em frequências mais altas. Na Tabela 3.3 são apresentadas as faixas de frequência definidas para os ensaios com cada acelerômetro. Também foram realizadas 20 repetições para cada varredura, a fim de se alcançar maior precisão na FRF medida, e, na última coluna, o tempo de duração do *chirp*.

Tabela 3.3 – Discretização das varreduras de frequência (*chirp*).

Faixa de frequência excitada para cada acelerômetro (Hz) (eixos X, Y e Z)	Quantidade de varreduras (médias)	Tempo de Aquisição (segundos)
0 - 25	20	32
0 - 200	20	4
200 - 600	20	2
600 - 1000	20	2

Fonte: Do autor (2019).

Uma vez estimadas as FRFs com os 5 acelerômetros em cada um dos 3 eixos de excitação, o passo seguinte foi identificar as frequências naturais do gabinete. Quando a frequência de excitação do *shaker* coincide com uma frequência natural da estrutura, a resposta na FRF apresenta uma amplificação na sua amplitude. Por conseguinte, as frequências naturais foram elencadas observando-se os picos no espectro das FRFs. Na figura 3.18 é mostrado o arranjo experimental utilizado para as análises FRF.

Figura 3.18 – Configuração experimental para a análise FRF.



Fonte: Do autor (2019).

Na etapa seguinte, ainda com o gabinete do protótipo na condição livre-livre (conforme a Figura 3.15) e com o auxílio do *shaker*, foram realizadas excitações em cada eixo coordenado (X, Y e Z) em frequências específicas e, concomitantemente, procedeu-se três análises *speckle* laser dinâmico para cada uma delas, com o intuito de verificar o quanto a vibração produzida interferiu na técnica. Para tal, foram gerados, por intermédio do analisador SR785, sinais senoidais em cada frequência natural e também em outras frequências que foram definidas conforme a Tabela 3.4. Sendo que, assim como foi justificado na realização das FRFs, foi aplicada uma discretização maior nas baixas frequências e menor nas mais altas.

Tabela 3.4 – Faixas de frequência e discretização.

Faixa de frequência (Hz)	Discretização (Hz)
0 - 29	1
30 - 48	2
50 - 95	5
100 - 490	10
500 - 1000	25

Fonte: Do autor (2019).

Dessa forma, em cada eixo de excitação foram efetuadas 111 análises, sendo que a essas foram acrescidas algumas frequências pontuais correspondentes às frequências de ressonância identificadas nas FRFs, com o objetivo de avaliar a influência da vibração no AVD nas condições de ressonância. Assim sendo, visto que para cada excitação foram realizadas 3 análises AVD, totalizou-se mais de 1100 análises *speckle* laser dinâmico, todas elas a uma amplitude de 80 mVpk.

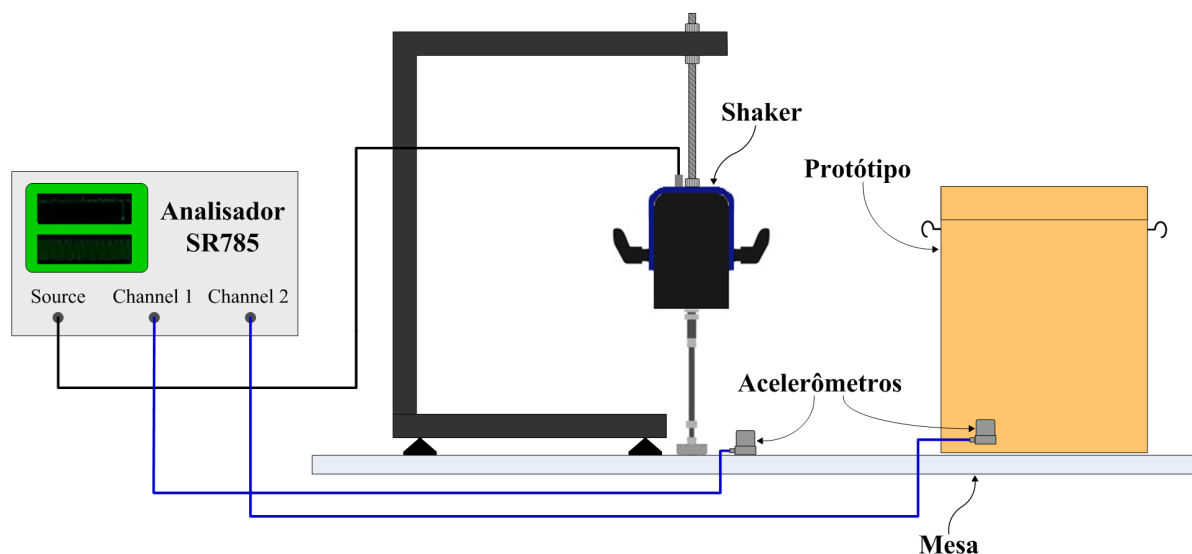
É importante salientar que essas análises foram realizadas utilizando o método numérico AVD, adotando os mesmos procedimentos aplicados em seções anteriores, porém com o laser iluminando uma superfície inerte. Conforme mencionado anteriormente, a função AVD deveria retornar de uma superfície inerte o valor 0, entretanto, na prática, esse valor é diferente de 0 devido ao ruído intrínseco do sistema. Em virtude dessa característica, foi realizada a análise AVD da superfície inerte com o protótipo em repouso e o valor obtido foi adotado como referência para um estudo comparativo em relação aos valores aferidos nos ensaios com excitação via *shaker*. Por conseguinte, aqueles valores que divergiram significativamente desse padrão indicaram que a vibração produzida interferiu no resultado da análise *speckle* laser dinâmico.

Sendo assim, após esses experimentos foram elaborados gráficos e tabelas que indicaram as frequências em que, para o protótipo projetado, as vibrações mecânicas influenciaram nas análises *speckle* laser. A posse desses dados não só permitiu quantificar os efeitos das vibrações mecânicas nas análises, mas também possibilitou o desenvolvimento de um isolador de vibração para atenuar os seus efeitos.

Em seguida, com o intuito de minimizar a interferência das vibrações nas análises BSL, foi elaborado um sistema de isolamento mecânico a ser instalado no protótipo. Para tanto, por meio da função de transmissibilidade foi verificada a eficiência de vários isoladores de vibração.

Conforme exposto anteriormente, a transmissibilidade é a razão entre a amplitude da resposta pela amplitude do movimento da base, à vista disso, na configuração experimental utilizada para a realização dos experimentos foram empregados dois acelerômetros, o analisador SR785 e o *shaker* (FIGURA 3.19). Ressalta-se que, inicialmente, o protótipo foi disposto diretamente sobre uma mesa de madeira (1600 x 685 x 765 mm) visando simular a condição real de uso, sem nenhum sistema de amortecimento de vibrações.

Figura 3.19 – Diagrama para a análise de transmissibilidade.



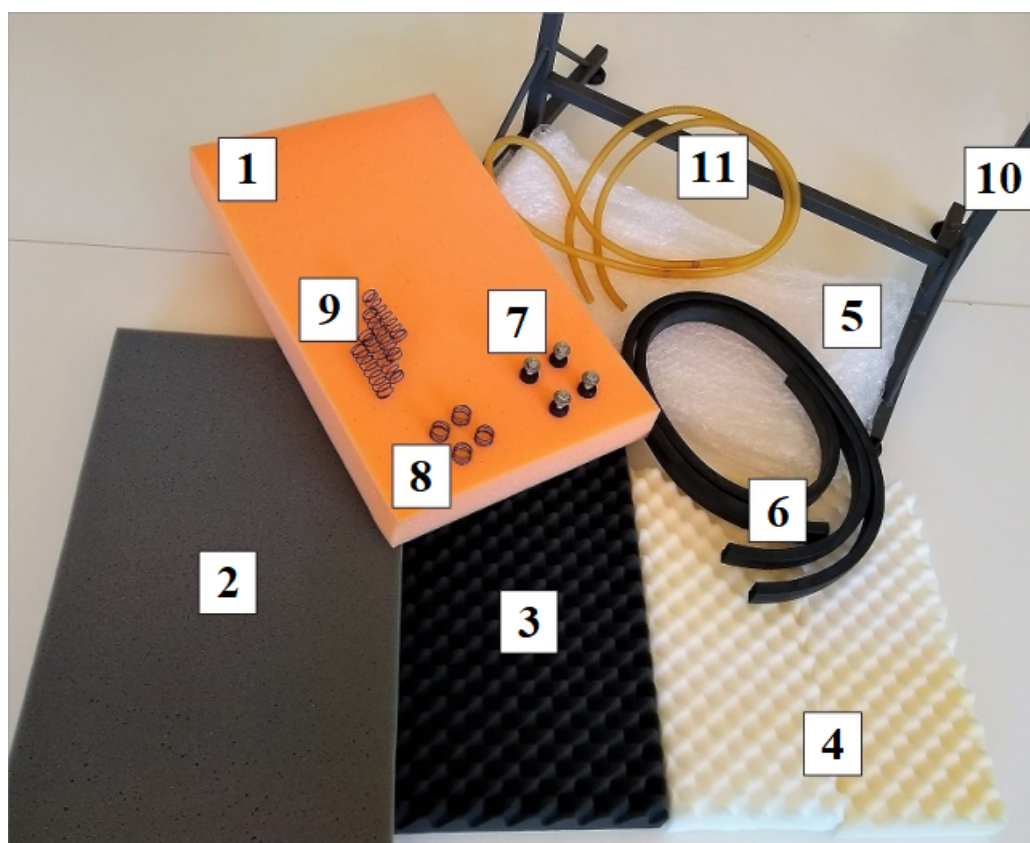
Fonte: Do autor (2020).

O *shaker* foi fixado a uma distância de 300 mm do protótipo e ligado à saída Source do analisador, junto ao *shaker* foi fixado o primeiro acelerômetro que foi ligado ao canal 1 do analisador, ou seja, este acelerômetro é responsável por mensurar o deslocamento medido na base. O segundo acelerômetro foi fixado no interior do gabinete ao lado do local onde é colocada a amostra. Na Figura 3.16 corresponde ao acelerômetro 3-Z, o qual foi responsável por medir a amplitude do deslocamento transmitida ao protótipo.

Feito isso, para a excitação do *shaker* foi definida uma varredura (*chirp*) na faixa de frequência de 0 a 200 Hz, haja vista que em ensaios preliminares observou-se uma grande atenuação na transmissibilidade em frequências acima deste valor. Constatação prevista na teoria de Rao (2008) na Figura 2.12, na qual a magnitude da transmissibilidade (T_r) diminui à medida que a razão de frequência (r) aumenta.

Assim sendo, foram especificados 11 tipos de isoladores de vibração (FIGURA 3.20), conforme descritos na Tabela 3.5. Destaca-se que os dispositivos dos itens 1 ao 9 foram colocados entre a base gabinete e a mesa, enquanto que nos itens 10 e 11 o equipamento foi suspenso por intermédio de um cavalete sobre a mesa. Posto isso, foram levantadas as curvas de transmissibilidade de cada um desses isoladores, para avaliar qual é mais eficiente no isolamento do protótipo contra perturbações mecânicas externas.

Figura 3.20 – Isoladores de vibração avaliados.



Fonte: Castro (2020).

Tabela 3.5 – Características dos isoladores de vibração.

Item	Descrição	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	Espuma preta alveolar	ESPPRE	Dimensões 421 x 232 x 45 mm, massa de 65,75 g
4	Espuma 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	Protótipo suspenso em cavalete por fio de nylon	CAVNYL	Protótipo suspenso por 2 fios de nylon (0,5 mm, 32 kg) no cavalete
11	Protótipo suspenso em cavalete por mangueira	CAVLAT	Protótipo suspenso por 2 mangueiras de latex ref. 202 (diam. externo 10 mm e diam. interno 5 mm)

Fonte: Castro (2020).

Em seguida, utilizando a mesma configuração experimental, foram realizadas análises *speckle* laser com cada isolador, tendo em vista mensurar o quanto cada dispositivo atenua os efeitos das vibrações. Foram adotados os mesmos procedimentos para a análise de uma superfície inerte descritos anteriormente, porém foi selecionado um número específico de frequências visando tornar os experimentos mais dinâmicos e acurados. Desse modo, considerando as diversas análises AVD realizadas na etapa de verificação das frequências de ressonância, foram categorizados três grupos, divididos da seguinte forma:

1. Baixas frequências - valores próximos às taxas de captura da câmera, selecionadas as frequências de 5, 15 e 25 Hz;
2. Frequências naturais - valores nos quais as frequências de ressonância do protótipo foram identificadas de forma mais acentuada, selecionadas as frequências de 42, 60 e 112 Hz;

3. Altas frequências - faixa de valores nos quais as análises *speckle* laser se mostraram menos susceptíveis às vibrações, selecionadas as frequências de 470 e 800 Hz.

Adicionalmente o protótipo foi excitado com ruído branco, que é um sinal randômico com amplo espectro de frequência e com potência constante (STANFORD RESEARCH SYSTEMS, 2017). Nesses experimentos buscou-se simular situações reais do cotidiano, nas quais as vibrações podem ocorrer simultaneamente em várias frequências. Para isso, a faixa de frequência do ruído branco foi limitada entre 0 e 1000 Hz e fez-se uso de janela de Hanning nos sinais de entrada e saída. Isso posto, e ainda visando aferir os efeitos da magnitude das vibrações nas análises *speckle* laser, todos os ensaios foram replicados em três amplitudes de excitação distintas: 40, 70 e 100 mVpk.

Observa-se ainda que, para se obter o índice AVD foram realizadas 4 aquisições de 128 imagens a uma taxa de 15 fps e, assim, o valor final do AVD foi definido pela média dessas aquisições. A Tabela 3.6 resume as condições experimentais utilizadas nos ensaios. Ressalta-se que o código SEMAMO foi atribuído às análises realizadas com o protótipo colocado diretamente sobre a mesa sem nenhum dispositivo isolador.

Tabela 3.6 – Condições experimentais.

Isolador	Fatores Experimentais		
	Frequências	Amplitudes	Análises AVD
SEMAMO			
ESPLAR	5		
ESPCIN	15		
ESPPRE	25		
ESPBRA	42	40	
PLABOL	60	70	4
BORPRE	112	100	
VIBSTO	470		
MOLAPQ	800		
MOLAGD	Ruído branco		
CAVNYL			
CAVLAT			

Fonte: Castro (2020).

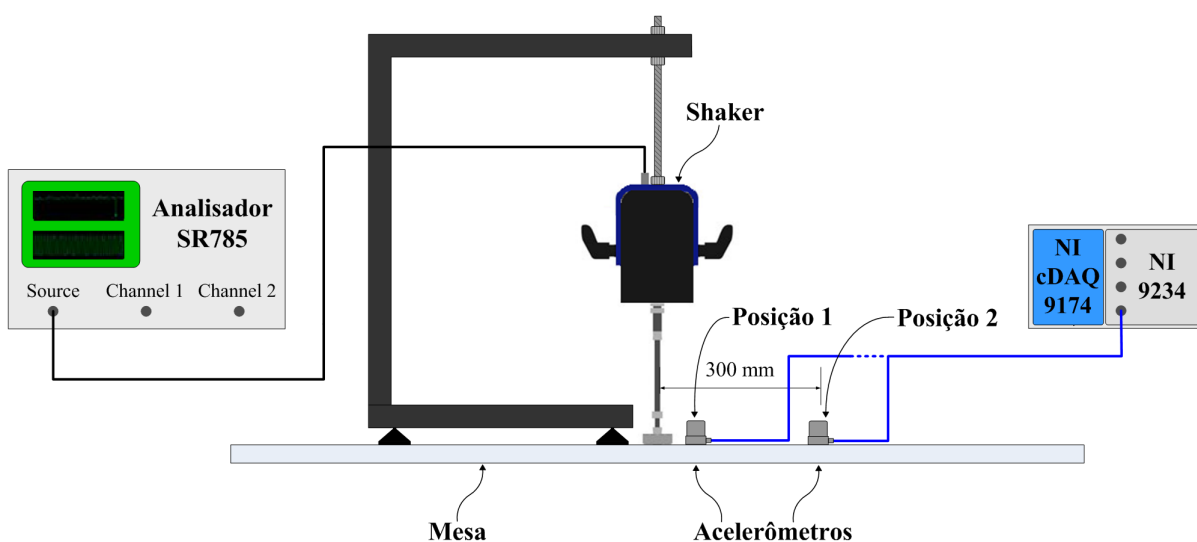
O último experimento desta seção foi um estudo comparativo entre as amplitudes das vibrações provocadas por intermédio do *shaker* e a amplitude das vibrações aleatórias que ocorrem normalmente em um ambiente de trabalho, como o bater de uma porta, equipamentos ligados, o trânsito de veículos nas ruas, etc. Para tal, foram monitoradas as vibrações nos laboratórios CEDIA e LMA, ambos já citados neste trabalho, por meio de um sistema de aquisição

de dados (DAQ), composto pelo chassi NI cDAQ-9174 e o módulo de aquisição NI 9234, e um acelerômetro PCB 352C33. O DAQ foi conectado a um computador no qual os dados foram adquiridos e armazenados pelo LabVIEW e processados no *software* MATLAB. Os sinais foram adquiridos em valores eficazes de aceleração (RMS - *root mean square*), que apresentam um valor de nível correspondente à energia das vibrações, e a taxa de amostragem do canal foi ajustada para 1652 Hz.

Para tanto o acelerômetro foi fixado no centro de uma mesa de trabalho de madeira e foram adquiridos os sinais de vibração durante duas horas. Esse procedimento foi realizado nos dois laboratórios e durante o período de aquisição houve a circulação cotidiana de pessoas no ambiente e o fluxo normal de veículos nas ruas próximas.

Logo após, foram realizadas excitações com o analisador SR785 gerando um ruído branco com frequências entre 0 e 200 Hz e nas três amplitudes que foram utilizadas nos experimentos efetuados nessa seção: 40, 70 e 100 mVpk. Além disso, o *shaker* foi posicionado no centro das mesas e o acelerômetro foi fixado em duas posições diferentes: ao lado do *shaker* e a 300 mm do mesmo, assim como nos ensaios com os isoladores de vibração, conforme pode ser observado no diagrama da Figura 3.21.

Figura 3.21 – Diagrama para aquisição de vibrações em duas posições diferentes na mesa.



Fonte: Do autor (2020).

Finalmente, para efeito de comparação entre as vibrações cotidianas de um ambiente laboratorial e aquelas provocadas pelo *shaker*, tal como para a apresentação dos resultados obtidos em todos experimentos dessa seção, foram construídos gráficos e tabelas elaborados mediante os *softwares* Microsoft Excel e MATLAB.

3.4 Motorização do filtro neutro

Nas configurações experimentais montadas para análises *biospeckle* laser são empregados filtros de densidade neutra, a fim de ajustar a intensidade com que o laser incide na espécie que está sendo iluminada (BRIERS; RICHARDS; HE, 1999; RICHARDS et al., 2013). Entretanto, como deseja-se analisar diferentes tipos de sementes de diversas colorações e texturas a graduação desse filtro não pode ser fixa e foi necessário a utilização de um filtro neutro com variação de intensidade ajustável por meio de rotação (FIGURA 3.22). Conforme Moreira, Cardoso e Braga Jr (2014), a fim de se evitar a saturação ou subexposição das imagens capturadas.

Figura 3.22 – Filtro variável de densidade neutra.



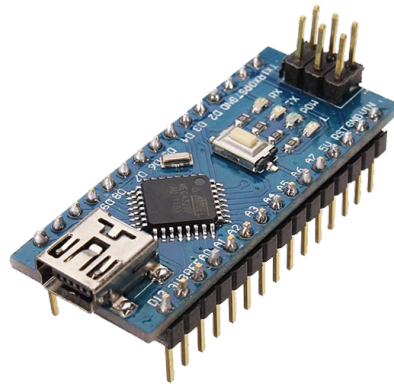
Fonte: Thorlabs Inc. (2019).

Contudo, o controle manual do filtro neutro apresenta dois inconvenientes: (1) o operador pode, acidentalmente, tocar uma das faces do filtro e a gordura contida no dedo alterar o resultado da análise; e (2) o operador precisa realizar muitos movimentos de abrir e fechar o gabinete para obter o ajuste mais adequado para a análise, o que demanda tempo e esforço físico. Posto isso, visando melhorar a operabilidade do analisador, foi motorizada a atuação desse filtro de forma a girá-lo por meio de um motor de passo e não manualmente. Para esse fim, foram utilizados os seguintes componentes:

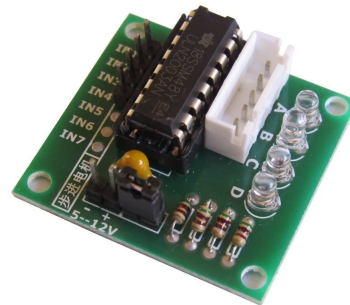
- Arduino Nano (FIGURA 3.23(a)), para receber o comando e enviar os pulsos para o motor de passo;
- *Driver* para motor de corrente contínua (CC) modelo ULN2003 (FIGURA 3.23(b)), para alimentar o motor;
- Motor de passo modelo 28BYJ-48 (FIGURA 3.23(c)), para girar o filtro com precisão;

- *Joystick* analógico modelo KY-023 (FIGURA 3.23(d)), para enviar os comandos de girar o filtro nos sentidos horário ou anti-horário.

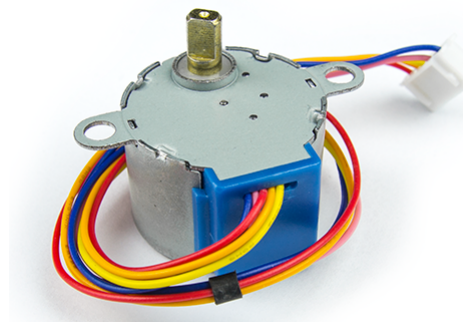
Figura 3.23 – Componentes do Sistema.



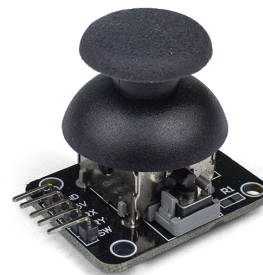
(a) Arduino Nano.



(b) Módulo *driver* ULN2003.



(c) Motor de passo 28BYJ-48.



(d) *Joystick* KY-023.

Fonte: Robocore Tecnologia (2019).

A programação do Arduino foi realizada por intermédio da IDE (Integrated Development Environment ou Ambiente Integrado de Desenvolvimento), que facilita a implementação dos *softwares* e a interação com os periféricos (*shields*). Ademais, conforme expõe Arduino Education (2019), a IDE faz a comunicação entre o computador e o Arduino e é multiplataforma, ou seja, pode ser instalada em diversos sistemas operacionais diferentes (Windows, GNU/Linux e MacOS) (FIGURA 3.24).

A linguagem de programação utilizada na IDE foi o Wiring, que é muito similar à linguagem C++, e para a implementação do algoritmo foi empregada a biblioteca Stepper.h, que facilita o controle de motores de passo.

Figura 3.24 – Ambiente Integrado de Desenvolvimento do Arduino.



```

Blink §

This example code is in the public domain.

http://www.arduino.cc/en/Tutorial/Blink
*/

// the setup function runs once when you press reset or power the board
void setup() {
  // initialize digital pin LED_BUILTIN as an output.
  pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
}

// the loop function runs over and over again forever
void loop() {
  digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH); // turn the LED on (HIGH is the voltage level)
  delay(1000); // wait for a second
  digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW); // turn the LED off by making the voltage LOW
  delay(1000); // wait for a second
}

```

Fonte: Arduino Education (2019).

Por fim, foi confeccionado um suporte para acoplar mecanicamente o motor de passo ao eixo giratório do filtro neutro.

3.5 Validação do protótipo

O objetivo dessa última etapa do projeto foi testar e validar o protótipo do analisador de sementes. Destaca-se que, as dimensões, o formato e a massa do gabinete do protótipo dependeram dos equipamentos desenvolvidos nas etapas anteriores do projeto. Nele foram instalados os seguintes equipamentos e componentes:

- Fonte de alimentação: fonte original, bateria, regulador/limitador e conexões;
- *Setup* miniaturizado: chassi com câmera microscópica, laser, filtro neutro variável e suportes;
- Sistema de amortecimento de vibrações;
- Motorização do filtro neutro: Arduino Nano, *driver* para motor CC, motor de passo, *joystick* analógico e conexões.

Como visto anteriormente, além da acomodação dos equipamentos, o gabinete deve impedir a entrada de iluminação externa e também precisa-se atentar para que nenhuma parte do protótipo produza vibrações ou ruídos. Por fim, do ponto de vista construtivo, foram considerados os aspectos ergonômicos e de usabilidade no *design* do analisador.

Assim sendo, foram realizados os testes e a validação do protótipo do analisador por meio de análises de sementes de soja (*Glycine max* L.) e de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). As sementes de feijão utilizadas nos experimentos foram da variedade Feijão-Vagem Macarrão Baixo adquiridas comercialmente da marca Isla (pureza 100%, safra 18/18 e válido até setembro de 2022), por sua vez, as sementes de soja foram cedidas pelo Laboratório de Sementes da UFLA e foram produzidas na safra de 2019/2020. É importante ressaltar que as sementes analisadas foram preparadas segundo os procedimentos descritos nas Regras para Análises de Sementes – RAS (BRASIL, 2009), mais especificamente, de acordo com as instruções para o Teste Tetrazólio em Sementes.

Feito isso, foram analisadas 5 sementes de soja e 5 de feijão. Inicialmente foram adquiridas as imagens das sementes utilizando o *software* Speckle Tool e, para cada semente, foram capturadas 128 imagens a uma taxa de 15 fps. Em seguida, foram realizadas análises gráficas no aplicativo Portable Speckle por meio do método AVD, as quais permitiram visualizar as regiões de maior atividade biológica em cada semente. A partir dessas imagens, foi efetuada uma análise numérica AVD na região de maior atividade em cada semente, para tanto, a área de interesse foi selecionada utilizando a função *thsp_gaussian()* da biblioteca BSLTL em execução no *software* Octave. Cabe salientar aqui que, conforme Braga Jr, Rivera e Moreira (2016), a função *thsp_gaussian()* seleciona aleatoriamente um determinado número de pontos seguindo uma distribuição Gaussiana em torno de um ponto na imagem. Desse modo, na função *thsp_gaussian()* foram definidos 400 pontos em um raio de 20 *pixels* e o ponto na imagem foi selecionado clicando no centro da região desejada para a análise. Destaca-se que, nas análises AVD foi utilizado o algoritmo *AVDI*.

Para efeito de comparação, também foram realizadas análises AVD em uma região inerte de cada imagem, ou seja, fora da área ocupada pela semente, seguindo os mesmos procedimentos.

Por fim, os resultados foram apresentados por intermédio de figuras mostrando mapas de atividades e tabelas com os índices AVD das sementes analisadas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos.

4.1 Avaliação da estabilidade da fonte de tensão original e desenvolvimento de um sistema de alimentação portátil para o laser

4.1.1 Análises de níveis de tensão

O manual técnico do fabricante do laser analisado não fornece informações sobre a estabilidade da intensidade de iluminação (COHERENT INC., 2011). Contudo, como exposto anteriormente, esse laser já foi utilizado em várias análises *biospeckle* que obtiveram resultados considerados satisfatórios e publicados. Sendo assim, para a avaliação da fonte de alimentação original foram realizadas aquisições de dados das tensões na Rede Elétrica (127 Vac), na saída da Fonte de Alimentação (6 Vdc) e na saída do Sensor Fotodetector (6 Vdc). Na Tabela 4.1 são mostrados os valores médios e os desvios padrão de cada ensaio com o laser conectado à fonte original. Destaca-se que um baixo valor de desvio padrão indica que o sinal observado é mais estável.

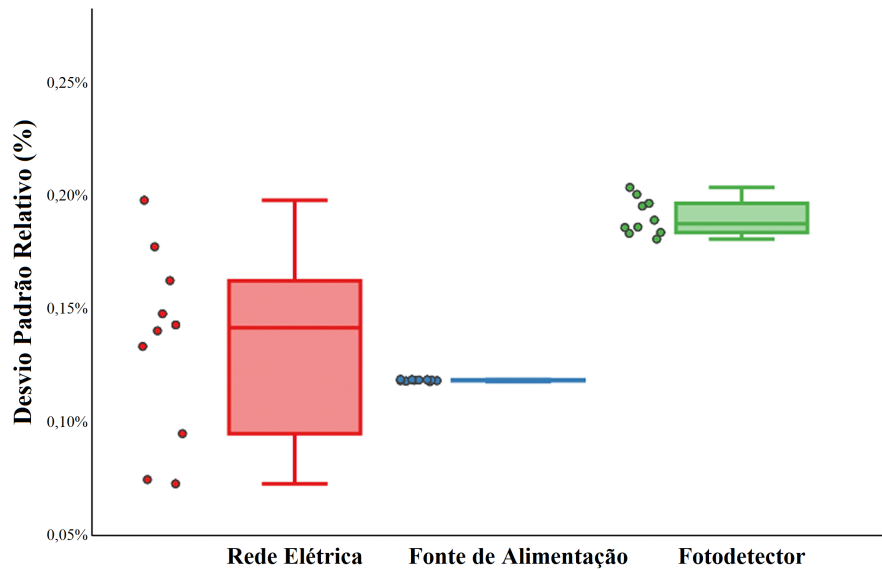
Tabela 4.1 – Valores médios e desvios padrão das tensões na rede elétrica, na saída da fonte de alimentação e na saída do fotodetector, com o laser conectado à fonte de alimentação original, em volts (V).

	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5	Ensaio 6	Ensaio 7	Ensaio 8	Ensaio 9	Ensaio 10
Rede Elétrica										
Média	129,996	129,849	129,445	128,910	128,693	129,737	129,855	129,838	129,800	129,617
Desvio Padrão	0,23068	0,09668	0,25632	0,18083	0,17163	0,09418	0,19193	0,18552	0,12302	0,21060
Fonte										
Média	6,02110	6,02104	6,02100	6,02094	6,02086	6,02077	6,02073	6,02064	6,02055	6,02056
Desvio Padrão	0,00714	0,00715	0,00715	0,00714	0,00713	0,00714	0,00712	0,00712	0,00709	0,00710
Fotodetector										
Média	5,98816	5,99045	5,99362	5,99855	6,00650	6,01587	6,02183	6,02795	6,03279	6,03371
Desvio Padrão	0,01098	0,01083	0,01102	0,01116	0,01181	0,01225	0,01208	0,01178	0,01142	0,01123

Fonte: Do autor (2019).

A partir dos dados obtidos, foram calculados os desvios padrão relativos - RSD% (do inglês *Relative Standard Deviations*) dos 10 ensaios e foi construído o gráfico demonstrado na Figura 4.1.

Figura 4.1 – Desvios padrão relativos com o laser conectado à fonte de alimentação original.



Fonte: Do autor (2019).

Além disso, esses resultados também podem ser apresentados por meio do desvio padrão relativo médio dos 10 ensaios. O RSD médio foi calculado pela razão entre a soma dos desvios padrão e a soma das médias dos conjuntos de dados. Ele expressa a variação relativa (%) presente nos conjuntos de dados em relação às médias (BITTENCOURT, 2014) e foi calculado, para cada sinal observado, usando a Equação 4.1:

$$\overline{RSD} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{\sum_{i=1}^n \bar{X}_i} \times 100 \quad (4.1)$$

sendo que \overline{RSD} é o desvio padrão relativo médio, S_i é o desvio padrão de cada ensaio, \bar{X}_i é a média das tensões medidas em cada ensaio e n é o número de ensaios realizados.

Posto isso, na Tabela 4.2 são apresentados os valores médios dos desvios padrão relativos para os 10 ensaios realizados com o laser conectado à fonte de alimentação original.

Tabela 4.2 – Desvios padrão relativos médios da tensão da rede elétrica, na saída da fonte de alimentação e na saída do fotodetector, com o laser conectado à fonte de alimentação original.

Sinais	Tensão da Rede Elétrica	Tensão da Fonte de Alimentação	Tensão do Fotodetector
RSD%	0,134%	0,118%	0,191%

Fonte: Do autor (2019).

Conforme mostram os resultados apontados na Tabela 4.2 o sinal da fonte de alimentação tem a menor variação em sua saída, o sinal no fotodetector tem a maior e a rede elétrica possui um valor intermediário, sendo todas menores que 0,2%.

Em seguida, o mesmo procedimento foi realizado com o laser conectado a uma bateria e a um regulador/limitador de tensão/corrente. O uso desse regulador chaveado permitiu o ajuste acurado dos níveis de tensão e de corrente. Desse modo, na Tabela 4.3 são mostrados os valores médios e os desvios padrão de cada ensaio com o laser conectado à bateria.

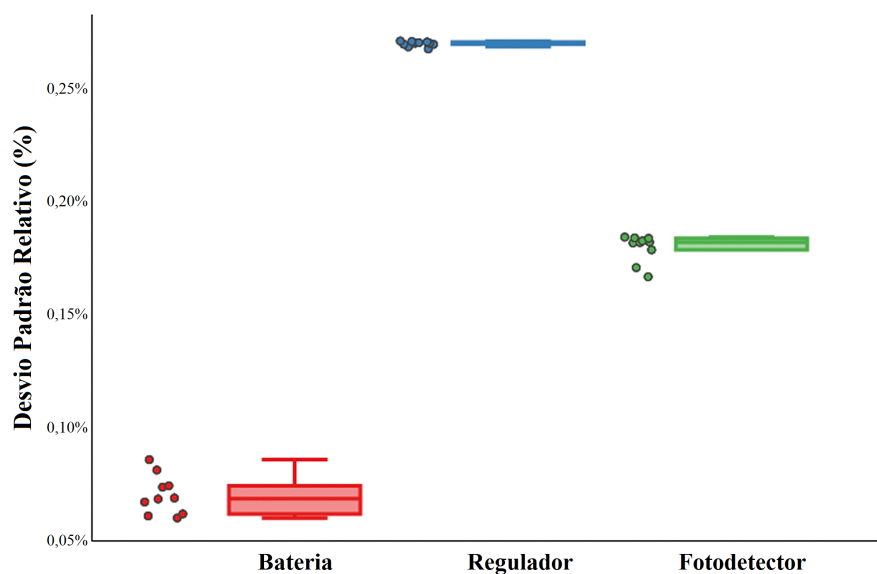
Tabela 4.3 – Valores médios e desvios padrão das tensões na bateria, na saída do regulador e na saída do fotodetector, com o laser conectado à bateria, em volts (V).

	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5	Ensaio 6	Ensaio 7	Ensaio 8	Ensaio 9	Ensaio 10
Bateria										
Média	12,4034	12,3197	12,2712	12,2312	12,2228	12,1623	12,1176	12,1109	12,0543	12,0232
Desvio Padrão	0,01006	0,01056	0,00902	0,00835	0,00906	0,00836	0,00811	0,00736	0,00722	0,00741
Regulador										
Média	6,01171	6,01160	6,01159	6,01193	6,01201	6,01171	6,01172	6,01174	6,01150	6,01129
Desvio Padrão	0,01627	0,01625	0,01624	0,01629	0,01630	0,01624	0,01621	0,01621	0,01614	0,01609
Fotodetector										
Média	5,99075	5,98145	5,98218	5,97615	5,97512	5,97518	5,97854	5,97944	5,98920	5,99027
Desvio Padrão	0,01070	0,01088	0,01089	0,01091	0,01086	0,01098	0,01102	0,01100	0,01023	0,00999

Fonte: Do autor (2019).

Conforme realizado anteriormente com os dados da fonte original, na Figura 4.2 são mostrados os desvios padrão relativos dos ensaios com o laser conectado à bateria por meio de um regulador.

Figura 4.2 – Desvios padrão relativos com o laser conectado à bateria e ao regulador de tensão.



Fonte: Do autor (2019).

E ainda, com base nesses resultados, obteve-se os desvios padrão relativos médios para os 10 ensaios realizados com o laser conectado à bateria, conforme especificado na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Desvios padrão relativos médios da tensão na bateria, na saída do regulador e na saída do fotodetector, com o laser conectado à bateria.

Sinais	Tensão da Bateria	Tensão do Regulador	Tensão do Fotodetector
RSD %	0,070%	0,269%	0,179%

Fonte: Do autor (2019).

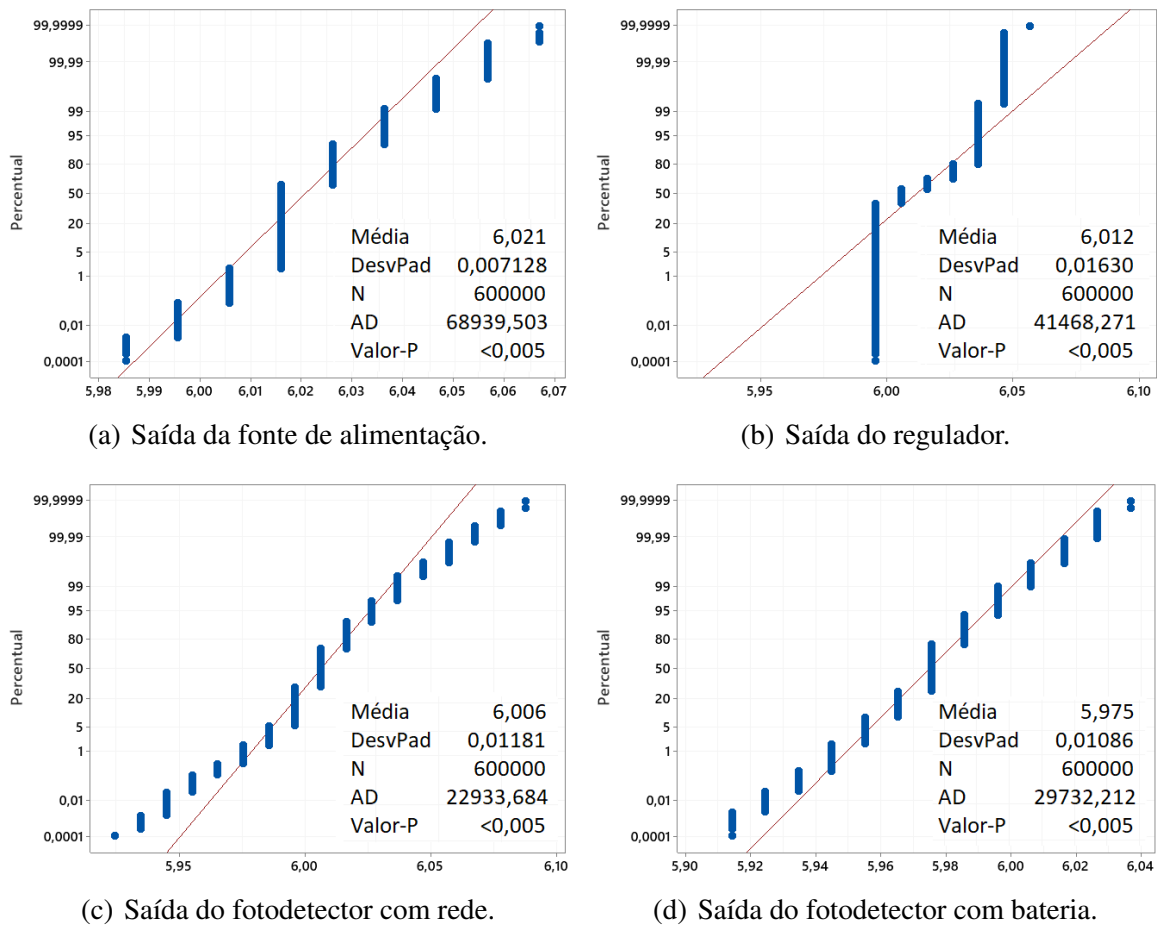
Assim sendo, mediante os resultados mostrados na Tabela 4.4, pode-se observar que a tensão de saída da bateria apresentou a menor variabilidade, 0,07%, e a saída do regulador a maior, em torno de 0,27%, no entanto, a instabilidade da tensão na saída do fotodetector permaneceu praticamente a mesma que a observada com a fonte de alimentação original, cerca de 0,18%.

Em adição, para comprovar a compatibilidade entre os dois sistemas de alimentação do laser, foram realizadas análises estatísticas entre os dados obtidos na saída da fonte de alimentação original com os da saída do regulador/limitador e os dados adquiridos na saída do fotodetector, primeiramente com o laser ligado à rede elétrica e depois conectado ao sistema com bateria.

Para tanto, por meio Minitab foi realizado o “Teste de Equivalência para 2 amostras”, porém, como mencionado anteriormente, antes foi necessário executar dois testes: o “Teste de Normalidade” e o “Teste para 2 Variâncias”. Inicialmente procedeu-se o teste de normalidade dos dados para os 4 sinais e, para todos eles, o teste de Anderson-Darling apresentou um Valor-P < 0,005, rejeitando-se assim a hipótese de normalidade da distribuição dos dados, em nível de confiança de 95% (FIGURAS 4.3(a), 4.3(b), 4.3(c) e 4.3(d)).

Em seguida, foi realizado o “Teste para 2 Variâncias”, no qual, em razão da ausência de normalidade dos dados em todos os sinais, não foi marcada a opção “Usar teste e intervalos de confiança com base na distribuição normal”. Desse modo, o Minitab executa os testes não paramétricos de Levene e de Bonett, assim como, por padrão, assume o valor de 95% para o intervalo de confiança. Na primeira análise, foram comparados o sinal da saída da fonte de tensão original do laser e o sinal da saída do regulador. Feito isso, tanto o teste de Levene quanto o teste de Bonett revelaram um Valor-P igual a 0 e, portanto, deve-se rejeitar a hipótese de que as variâncias sejam iguais (FIGURA 4.4).

Figura 4.3 – Teste de normalidade dos dados.



Fonte: Do autor (2020).

Figura 4.4 – Resultado do teste entre as variâncias da fonte de alimentação e do regulador.

Teste

Hipótese nula $H_0: \sigma_1 / \sigma_2 = 1$
 Hipótese alternativa $H_1: \sigma_1 / \sigma_2 \neq 1$
 Nível de significância $\alpha = 0,05$

Método	Estatística			Valor-p
	de teste	GL1	GL2	
Bonett	555752,72	1		0,0000000000
Levene	327806,76	1	1199998	0,0000000000

Fonte: Do autor (2020).

Da mesma forma, foram confrontados os dados gravados na saída do fotodetector, ora com o laser conectado à fonte de tensão, ora com o laser ligado ao sistema com bateria. Os resultados para os testes de Leneve e de Bonett foram os mesmos do teste anterior, ou seja, Valor-P igual a 0 e, também nesse caso, rejeita-se a hipótese de que as variâncias sejam iguais (FIGURA 4.5).

Figura 4.5 – Resultado do teste entre as variâncias na saída do fotodetector, com a rede elétrica e com a bateria alimentando.

Teste

Hipótese nula $H_0: \sigma_1 / \sigma_2 = 1$
 Hipótese alternativa $H_1: \sigma_1 / \sigma_2 \neq 1$
 Nível de significância $\alpha = 0,05$

Método	Estatística		Valor-p
	de teste	GL	
Bonett	2471,68	1	0,0000000000
Levene	4801,59	1 1199998	0,0000000000

Fonte: Do autor (2020).

Por fim, os dados foram submetidos ao “Teste de Equivalência para 2 amostras”, assim, conforme abordado anteriormente, nessa análise foi adotado um intervalo de confiança de 99% ($p < 0,01$) e determinado um intervalo de equivalência de $\pm 1\%$. Sendo assim, como o valor nominal da tensão da fonte de alimentação e do regulador é de 6 Vdc, o valor do limite inferior do intervalo foi definido em -0,06 e para o limite superior em 0,06. Haja vista que os testes anteriores indicaram que as variâncias entre os pares não são iguais, não foi assinalado a opção de “Assumir variâncias iguais”.

Posto isso, inicialmente foi testada a equivalência entre os dados adquiridos na saída da fonte de tensão original do laser os dados na saída do regulador. A execução do teste retornou um Valor-P igual a 0 e, conseqüentemente, pode-se afirmar a equivalência entre os dois sinais (FIGURAS 4.6 e 4.7).

Figura 4.6 – Resultado do teste de equivalência entre a fonte de alimentação e o regulador.

Diferença: Média(Fonte) - Média(Regulador)

Diferença	IC 99% para EP	Intervalo de Equivalência
0,0088447	0,000022967 (0; 0,0088982)	(-0,06; 0,06)

O IC está dentro do intervalo de equivalência. Pode-se afirmar a equivalência.

Teste

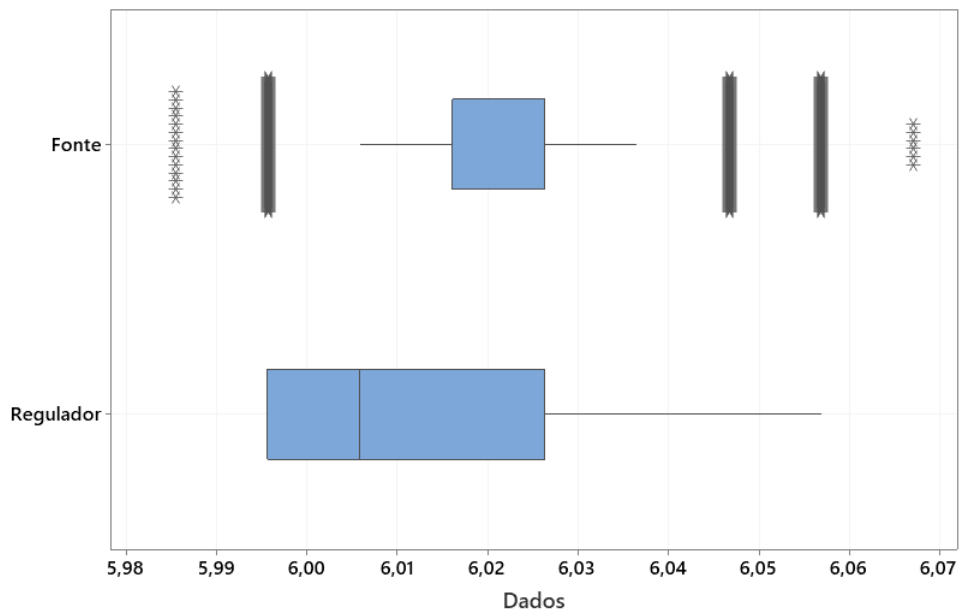
Hipótese nula: Diferença $\leq -0,06$ ou Diferença $\geq 0,06$
 Hipótese alternativa: $-0,06 < \text{Diferença} < 0,06$
 Nível α : 0,01

Hipótese Nula	GL	Valor-T	Valor-p
Diferença $\leq -0,06$	821350	2997,5	0,0000000000
Diferença $\geq 0,06$	821350	-2227,3	0,0000000000

O maior dos dois valores-P é 0,000. Pode-se afirmar a equivalência.

Fonte: Do autor (2020).

Figura 4.7 – Gráfico da distribuição dos dados da fonte de alimentação e do regulador.



Fonte: Do autor (2020).

Do mesmo modo, foram comparados os dados gravados na saída do fotodetector, primeiro com o laser conectado à fonte de tensão e, depois, com o laser ligado ao sistema com bateria. O resultado para o teste de equivalência foi o mesmo do teste anterior, ou seja, Valor-P igual a 0 e, também nesse caso, pode-se afirmar a equivalência entre os dois conjuntos de dados com nível de confiança de 99% (FIGURAS 4.8 e 4.9).

Figura 4.8 – Resultado do teste de equivalência entre a saída do fotodetector com a rede elétrica e com a bateria alimentando.

Diferença: Média(Sensor com rede) - Média(Sensor com bateria)

Diferença	IC 99% para EP	Intervalo de equivalência	Intervalo de Equivalência
0,031374	0,000020711	(0; 0,0314219)	(-0,06; 0,06)

O IC está dentro do intervalo de equivalência. Pode-se afirmar a equivalência.

Teste

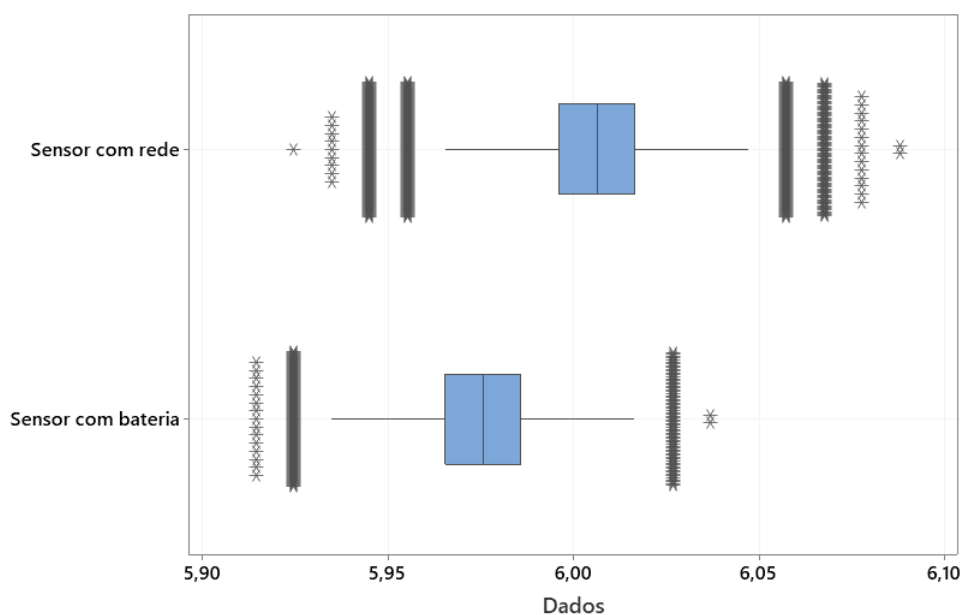
Hipótese nula: Diferença \leq -0,06 ou Diferença \geq 0,06
 Hipótese alternativa: -0,06 < Diferença < 0,06
 Nível α : 0,01

Hipótese Nula	GL	Valor-T	Valor-p
Diferença \leq -0,06	1191546	4411,9	0,0000000000
Diferença \geq 0,06	1191546	-1382,2	0,0000000000

O maior dos dois valores-P é 0,000. Pode-se afirmar a equivalência.

Fonte: Do autor (2020).

Figura 4.9 – Gráfico da distribuição dos dados da saída do fotodetector com a rede elétrica e com a bateria alimentando.



Fonte: Do autor (2020).

Portanto, confirma-se que as variabilidades dos níveis de tensão medidos na saída do fotodetector, tanto com o laser alimentado pela fonte de alimentação original quanto com o laser ligado ao sistema com bateria, são equivalentes.

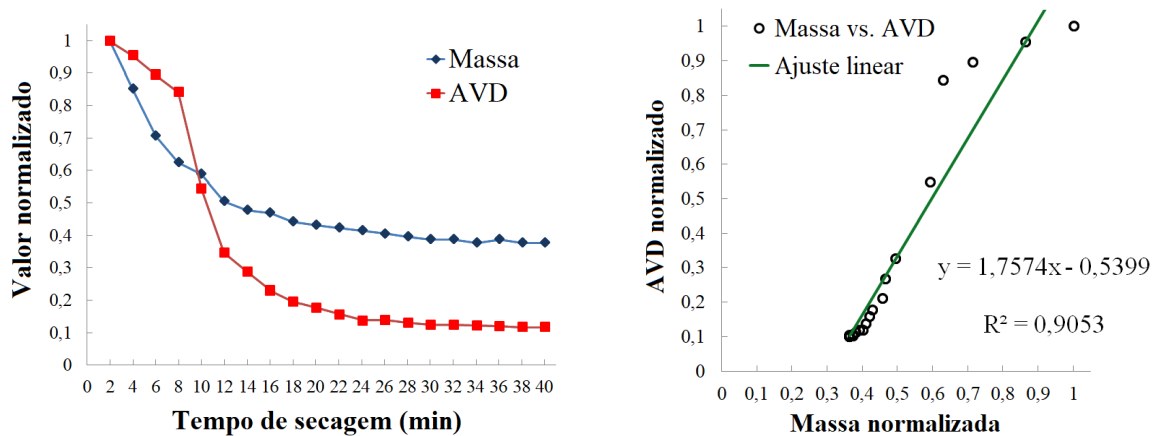
4.1.2 Análises de secagem de tinta

Foram realizadas análises *speckle* laser dinâmico de secagem da tinta a fim de comparar os resultados obtidos com o laser alimentado pela fonte de alimentação original e por meio do sistema com bateria e regulador. Em ambos os casos, análises gravimétricas foram realizadas simultaneamente para registrar a perda de massa devido à evaporação do solvente.

Inicialmente, os ensaios foram realizados com o laser conectado à fonte de alimentação original. Na Figura 4.10(a) são mostradas as curvas obtidas pelas análises *speckle* laser, usando o método AVD, e os resultados das pesagens em função do tempo de secagem. Na Figura 4.10(b) é apresentado o diagrama de dispersão e a linha de regressão linear entre os valores de AVD e das medidas de massa, com a respectiva equação e coeficiente de determinação (R^2).

Em seguida, exatamente o mesmo procedimento foi realizado com o laser alimentado pelo sistema com bateria. Dessa forma, pode-se observar que os gráficos apresentados nas Figuras 4.11(a) e 4.11(b) são muito semelhantes aos do primeiro experimento.

Figura 4.10 – A análise de secagem da tinta com o laser conectado à fonte de alimentação original.

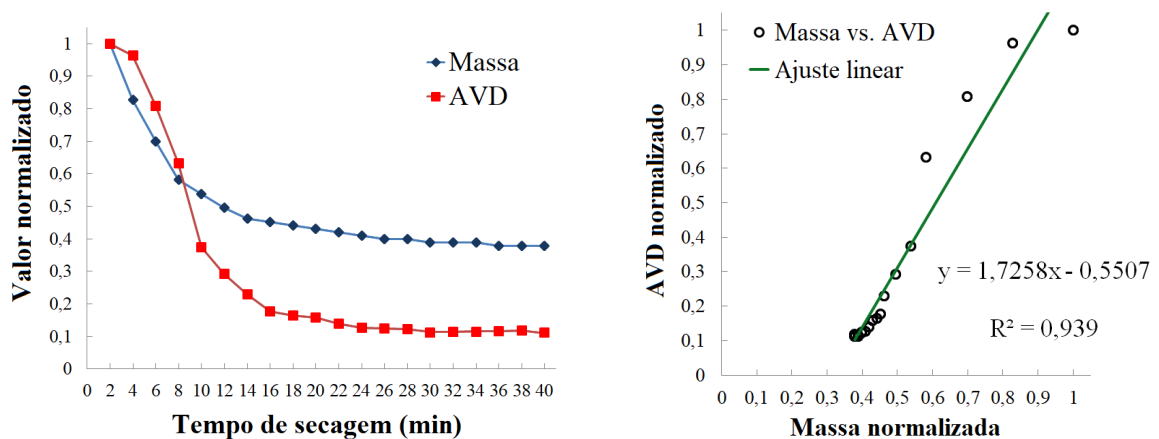


(a) Curvas de secagem dos índices AVD e das massas ao longo do tempo.

(b) Valores de massa vs. valores de AVD e a linha de regressão linear.

Fonte: Do autor (2019).

Figura 4.11 – A análise de secagem da tinta com o laser conectado ao sistema com bateria.



(a) Curvas de secagem dos índices AVD e das massas ao longo do tempo.

(b) Valores de massa vs. valores de AVD e a linha de regressão linear.

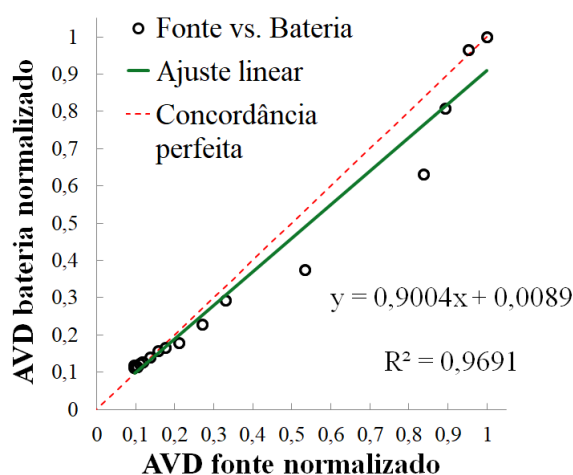
Fonte: Do autor (2019).

Sendo assim, baseado nas curvas das Figuras 4.10(a) e 4.11(a), nota-se que as análises AVD registraram alta atividade nos primeiros minutos. Porém, à medida que as tintas frescas começaram a secar, os índices AVD diminuíram até se tornarem constantes, aproximadamente a partir dos 30 minutos. Da mesma forma, as medidas gravimétricas apresentaram uma perda acentuada de massa nos primeiros minutos e também permaneceram praticamente constantes após 30 minutos. Os resultados observados nesses gráficos foram semelhantes aos relatados nos trabalhos de Amalvy et al. (2001), Blotta et al. (2011), Faccia et al. (2009) e Pérez et al. (2018).

Além disso, nas Figuras 4.10(b) e 4.11(b) as linhas de ajuste mostram uma forte relação entre os valores calculados de AVD e as massas medidas, ambas obtiveram um valor para o R-quadrado acima de 0,90. Desse modo, considerando o método gravimétrico como referência, os coeficientes de determinação indicaram uma estabilidade ligeiramente maior do laser quando alimentado pelo sistema com bateria ($R^2 \approx 0,94$) do que pela fonte de alimentação original ($R^2 \approx 0,91$).

Adicionalmente, na Figura 4.12 os valores do índice AVD com o laser alimentado por sua própria fonte de alimentação foram plotados contra os valores de AVD do sistema com bateria. Observa-se que, nos tempos correspondentes de secagem, os valores AVD são muito semelhantes, por conseguinte, há uma aproximação do ângulo da reta de ajuste linear ao da reta de concordância perfeita (45 graus) e o valor de R-quadrado é de aproximadamente 0,97 (97%), significando que a linha se ajusta muito bem aos dados experimentais.

Figura 4.12 – Valores de AVD com o laser conectado à fonte de alimentação original vs. valores de AVD do sistema com bateria e a linha de regressão linear.



Fonte: Do autor (2019).

Portanto, na comparação entre os dois sistemas de alimentação do laser, houve uma grande semelhança entre os resultados obtidos nas análises de níveis de tensão, assim como nas análises de secagem de tinta, o que confirma a estabilidade da intensidade de iluminação do laser avaliado quando conectado à fonte de alimentação original e demonstra que ao ser conectado ao sistema com bateria projetado o desempenho é equivalente. Enfim, no que diz respeito à estabilidade da intensidade de iluminação, conclui-se que o laser de diodo avaliado pode ser alimentado por baterias recarregáveis para aplicações portáteis de análises Biospeckle Laser (BSL).

Em todos os experimentos dessa etapa, a temperatura ambiente foi medida entre 26,1 e 26,9 °C e a umidade relativa entre 61 e 63 %.

4.2 Miniaturização das configurações experimentais

O propósito dessa etapa foi construir um *setup* que tenha dimensões reduzidas, de maneira tal que o analisador possa ser utilizado de forma portátil. Para tanto, foi tomado como referência o arranjo experimental permanente instalado no CEDIA (FIGURA 2.3). Inicialmente, também em um laboratório do CEDIA e utilizando uma mesa inercial com uma câmara de proteção contra iluminação externa, foram realizados ensaios visando reduzir o espaço ocupado por essas configurações experimentais.

Nesse sentido, a primeira providência foi eliminar algumas lentes, filtros ópticos e espelhos que são usados nos *setups* tradicionalmente montados em laboratórios. Esses normalmente utilizam uma lente expansora para divergir o feixe do laser e, assim, iluminar de forma homogênea toda a área da amostra que está sendo analisada. No *setup* miniaturizado, a expansão do feixe foi conseguida atuando-se manualmente no anel de ajuste do foco, na parte frontal do laser, até se obter o máximo de espalhamento. Feito isso, considerando-se o *setup* de referência e as dimensões de sementes de médio porte como, por exemplo, de milho, feijão, café, soja, etc., definiu-se que o feixe deveria iluminar uma circunferência de no mínimo 20 mm de diâmetro. Para atender a esse requisito, e com o laser posicionado a um ângulo de 90° em relação à área iluminada, foi constatado que a altura mínima de sua extremidade frontal precisava ser de 173 mm.

Além da lente expansora, os *setups* tradicionais utilizam um filtro de densidade neutra para ajustar a intensidade com que o laser incide sobre a amostra. Contudo, como exposto anteriormente na Seção 3.4, para a análise de diferentes tipos de sementes de diversas colorações e texturas é necessário o ajuste da intensidade do laser e, por conseguinte, esse filtro não somente não pôde ser suprimido como deve possuir variação de intensidade ajustável. Assim sendo, o filtro foi posicionado entre o laser e a amostra a uma altura de 155 mm. Destaca-se que, nessa configuração, não foi necessário o uso de espelhos.

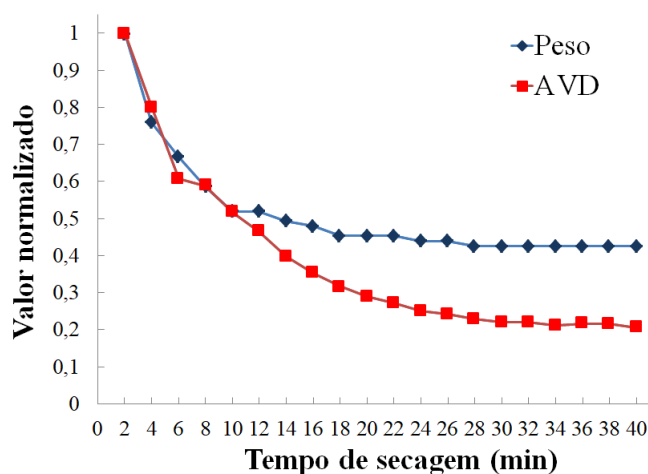
Em seguida, ainda tomando como base as configurações experimentais montadas em laboratórios de óptica, o microscópio digital foi fixado com uma inclinação de 60° em relação ao plano horizontal. Feito isso, verificou-se a menor distância em que, mantendo esse ângulo,

o microscópio foi capaz de focar o centro da área iluminada pelo laser, sem obstruir o feixe óptico. Desse modo, foi definida a altura mínima de 19 mm para o microscópio.

Após a montagem do arranjo experimental miniaturizado na mesa inercial do laboratório, foi possível medir a altura mínima necessária para o gabinete do protótipo acomodar os equipamentos, que foi de 270 mm, assim como o comprimento e largura mínimos de 230 mm e 145 mm, respectivamente.

Porém, visando validar essa configuração antes da montagem dos equipamentos no gabinete, ainda na mesa inercial e baseado nas distâncias entre os suportes, as alturas e os ângulos de fixação definidos, foi montado um *setup* para análises *speckle* laser dinâmico e gravimétricas de secagem de tinta. Para esse fim, foram adotados os mesmos procedimentos descritos na Seção 3.1.2. Ademais, salienta-se que nessa configuração a amostra foi colocada sobre a plataforma de pesagem da balança e, portanto, foi necessário compensar a sua altura (veja a Figura 3.7). Na Figura 4.13 são mostradas as curvas obtidas pelas análises *speckle* laser, usando o método AVD, e os resultados das pesagens em função do tempo de secagem.

Figura 4.13 – Curvas de secagem dos índices AVD e das massas ao longo do tempo, no *setup* miniaturizado laboratorial.

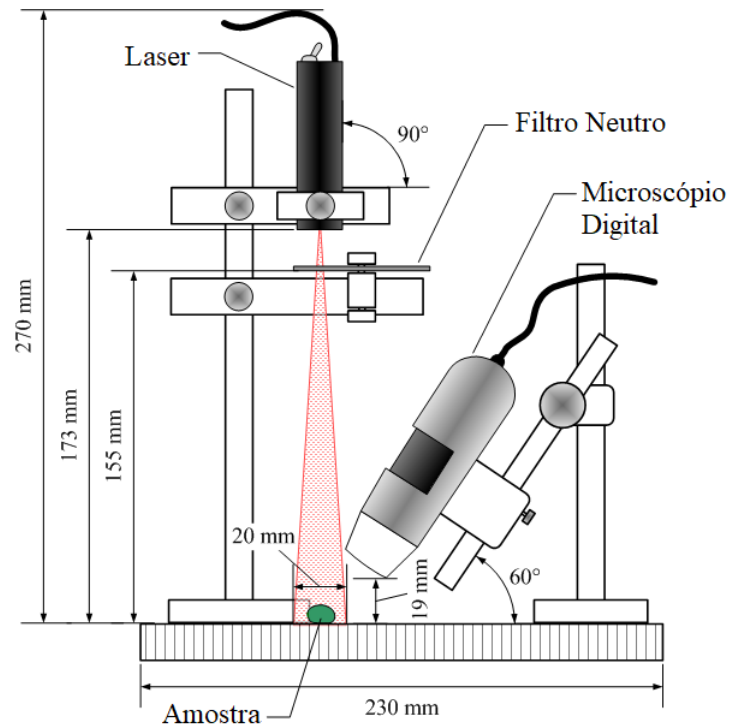


Fonte: Do autor (2019).

Observa-se que as duas curvas apresentam um decaimento exponencial em função do tempo, o que é um comportamento consolidado na literatura que trata da secagem de tinta. Acresce que esse gráfico é muito semelhante aos mostrados nas Figuras 4.10(a) e 4.11(a), construídos na etapa de análise da alimentação do laser, na qual não havia a preocupação de miniaturização na montagem do *setup*.

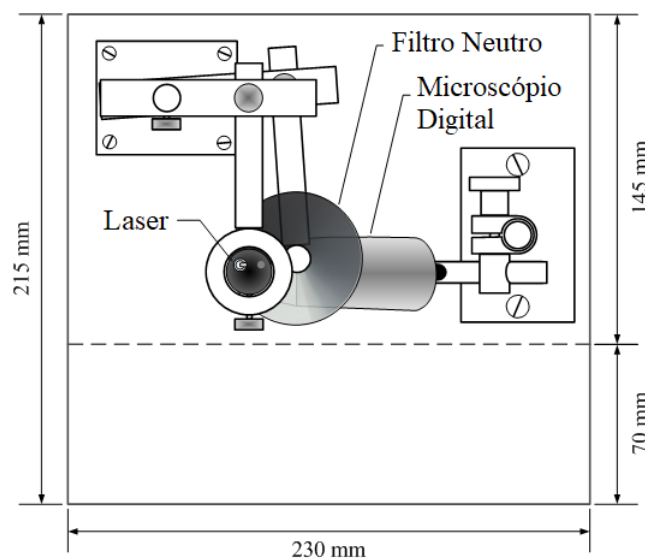
Por fim, o *setup* foi montado em uma base de madeira com as mesmas disposições, para tal foi utilizada uma peça de madeira MDF cru de 230 x 215 mm e espessura de 17 mm. Destacando-se que foi reservada uma largura 70 mm maior que a exigida para a montagem do *setup*, pois foi considerado o espaço livre necessário para o usuário do analisador posicionar a semente para análise (FIGURAS 4.14 e 4.15).

Figura 4.14 – Visão frontal da configuração experimental miniaturizada.



Fonte: Do autor (2019).

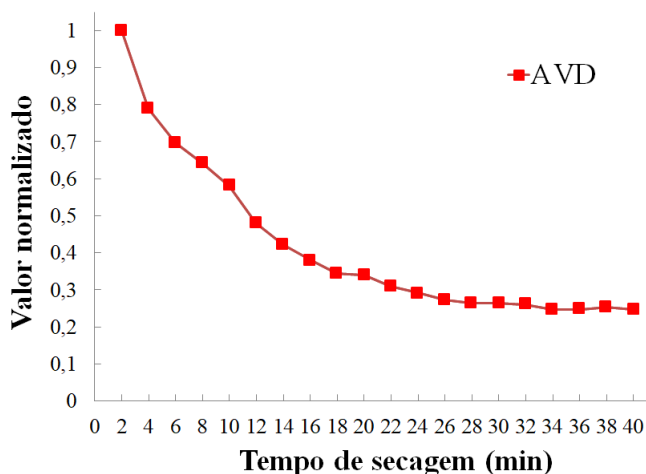
Figura 4.15 – Visão superior da configuração experimental miniaturizada.



Fonte: Do autor (2019).

Feito isso, novamente foram realizadas análises AVD de secagem da tinta para avaliar se o *setup*, montado no chassi, corresponde ao que foi miniaturizado na bancada do laboratório, na Figura 4.16 pode ser observada a curva resultante desse ensaio.

Figura 4.16 – Curva de secagem dos índices AVD ao longo do tempo, no *setup* montado no chassi.

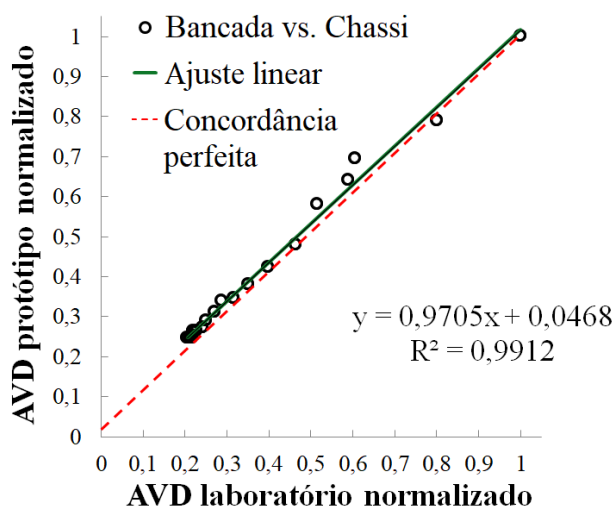


Fonte: Do autor (2019).

Sendo assim, no primeiro experimento percebe-se que a tinta secou aproximadamente 30 minutos após a sua aplicação, tanto na análise gravimétrica como na AVD. Da mesma forma, observa-se uma grande similaridade entre os resultados obtidos nas análises AVD dos dois ensaios. Em ambos, nota-se que houve uma alta atividade nos primeiros minutos e que os índices AVD diminuíram até se tornarem praticamente constantes, também indicando que a tinta secou a partir dos 30 minutos. Verifica-se que nos dois casos os AVD estabilizaram entre 0,20 e 0,25, em valores normalizados.

Complementarmente, foi plotado um gráfico de dispersão dos valores do índice AVD com o *setup* miniaturizado laboratorial contra os valores de AVD do *setup* montado no chassi. À vista disso, constata-se que nos tempos correspondentes de secagem os valores de AVD são muito semelhantes e, desse modo, o valor do coeficiente de determinação (R^2) foi de aproximadamente 0,99, ou seja 99%, demonstrando que os resultados obtidos nos dois experimentos apresentaram forte similaridade (FIGURA 4.17).

Figura 4.17 – Valores de AVD com o *setup* miniaturizado laboratorial vs. valores de AVD do *setup* montado no chassi.



Fonte: Do autor (2019).

Portanto, conclui-se que os resultados alcançados nas análises de secagem de tinta com o *setup* miniaturizado, montado no chassi, foram compatíveis com os de outras análises de secagem de tinta feitas nesse trabalho e de outros autores, citados na Seção 4.1.2, nas quais não havia a preocupação de miniaturização das configurações experimentais. Adicionalmente, no que tange à instalação do *setup*, ao fim dessa etapa do projeto definiu-se que as dimensões internas mínimas para o gabinete do protótipo devem ser de 230 x 215 x 270 mm (comprimento x largura x altura).

Contudo, é importante observar que além do *setup* o gabinete do protótipo precisa acondicionar o sistema de alimentação do laser e os circuitos eletrônicos de motorização do filtro neutro, sendo que estes últimos serão abordados posteriormente. Posto isso, definiu-se por um dimensionamento interno total de 390 x 220 x 275 mm, construído com madeira compensada de 10 mm de espessura.

No período em que se realizaram os experimentos, a temperatura foi de $21,6 \pm 0,2^\circ\text{C}$ e a umidade de $61 \pm 1\%$.

4.3 Avaliação de interferências externas

4.3.1 Interferência da iluminação externa

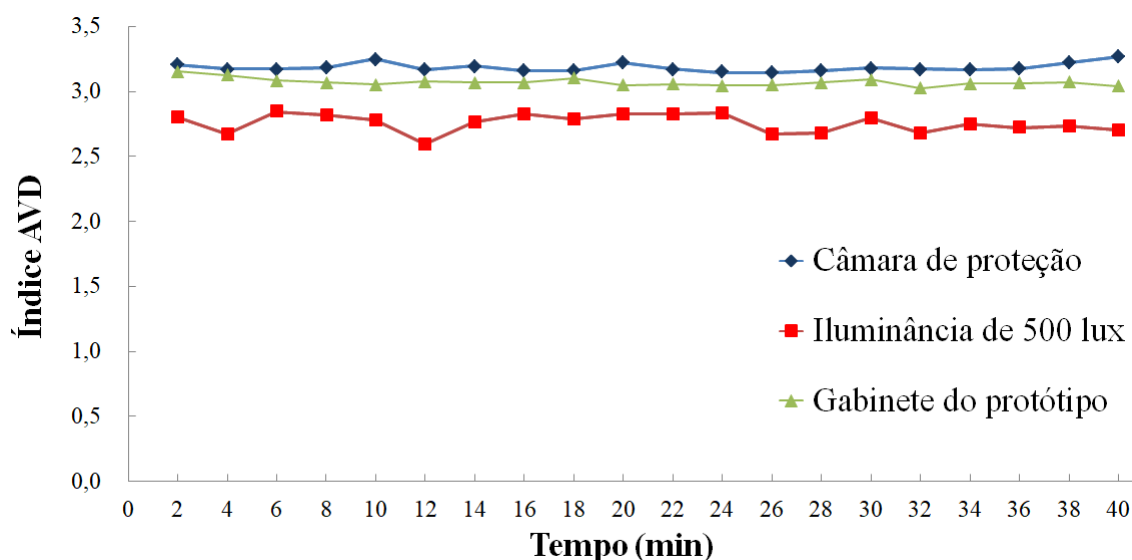
O intuito dessa etapa foi verificar se o gabinete projetado para o analisador portátil oferece proteção contra os efeitos da iluminação externa, tal como a câmara de isolamento lu-

minosos do laboratório do CEDIA, utilizada como referência para o estudo. Para tanto, foi avaliada a influência da incidência de iluminação externa (natural e/ou artificial) nas análises BSL. Nesse contexto, foram realizadas análises *speckle* laser dinâmico em uma superfície sem atividade (inerte) e em uma amostra com alta atividade (secagem de tinta).

Assim sendo, o experimento com a superfície inerte foi executado em três condições de iluminação diferentes. Na primeira situação as análises AVD foram realizadas com o chassi do *setup* miniaturizado colocado no interior da câmara de proteção contra iluminação externa, na qual, com o laser desligado, a iluminância medida foi de 0,06 lux. Na Figura 4.18 pode-se observar os valores dos índices AVD obtidos nesse ensaio, na linha identificada como "Câmara de proteção". Destaca-se que esses resultados foram adotados como referência para o experimento.

Em seguida, a superfície inerte foi exposta a uma intensidade luminosa de 500 lux e, novamente, foram medidos os valores dos índices AVD. Por fim, o chassi do *setup* foi fixado dentro do gabinete do protótipo, que foi fechado e mantido sob uma intensidade luminosa de 500 lux. Dessa forma, os índices AVD foram mensurados como nos ensaios anteriores e, logo depois, com o laser desligado a iluminância medida no seu interior foi de 0,01 lux.

Figura 4.18 – Índices AVD medidos em uma superfície inerte.



Fonte: Do autor (2019).

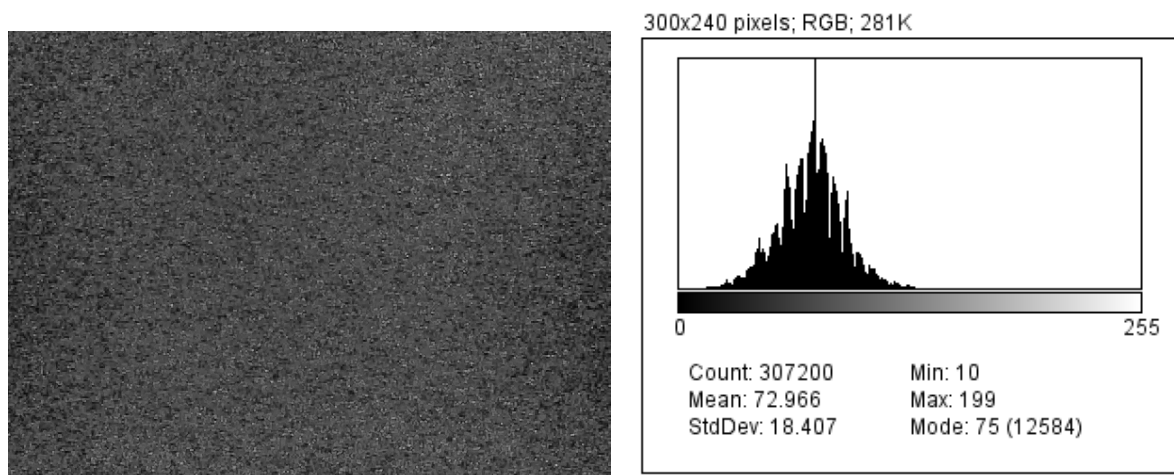
Sendo assim, as análises *speckle* laser com a superfície inerte na câmara de proteção contra iluminação resultaram em um AVD médio de 3,18, calculado a partir dos 20 índices AVD obtidos no ensaio. Esse valor foi tomado como referência para o estudo e também foi considerado o ruído inerente ao sistema, uma vez que, idealmente, o AVD de uma superfície inerte deveria ser igual a zero.

Entretanto, quando a superfície inerte recebe a incidência de 500 lux de iluminação externa, a média dos 20 índices AVD apurados cai para 2,75. Comprovando assim que, como presumido, as análises *speckle* laser são afetadas pela incidência de luz natural ou artificial no objeto de interesse.

Logo após, no último experimento com a superfície inerte, foi utilizado o gabinete do protótipo e a média dos índices AVD foi de 3,07. Por conseguinte, devido à proximidade dos valores de AVD e de iluminância em relação aos valores de referência, obtidos na câmara de proteção, pode-se inferir que o equipamento desenvolvido oferece a mesma proteção, contra iluminação externa, que é alcançada nas montagens laboratoriais.

Ademais, foram avaliadas as imagens capturadas nos 3 ensaios por meio do *software* ImageJ, com o qual foram gerados histogramas a partir de uma imagem selecionada em cada experimento. Mais especificamente foi utilizada a imagem de número 64 do conjunto de imagens de número 10. O histograma da imagem do experimento com o *setup* miniaturizado no interior da câmara de proteção (FIGURAS 4.19(a) e 4.19(b)) foi muitíssimo semelhante ao gerado mediante a imagem com o *setup* dentro do gabinete (FIGURAS 4.20(a) e 4.20(b)).

Figura 4.19 – Análise de uma imagem da superfície inerte, com o *setup* dentro da câmara de proteção.

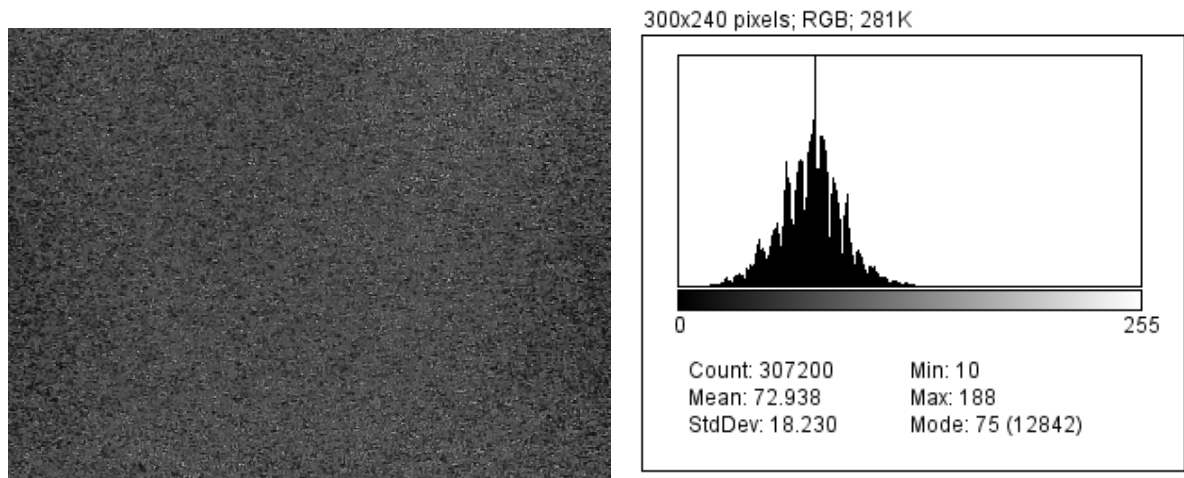


(a) Imagem do *speckle* de uma superfície inerte.

(b) Histograma.

Fonte: Do autor (2020).

Figura 4.20 – Análise de uma imagem da superfície inerte, com o *setup* dentro do gabinete do protótipo.



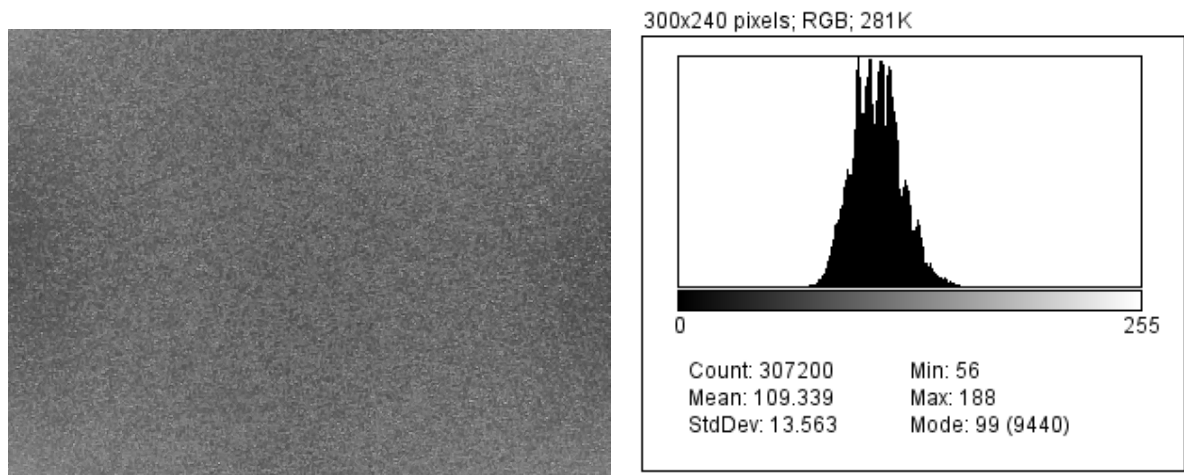
(a) Imagem do *speckle* de uma superfície inerte.

(b) Histograma.

Fonte: Do autor (2020).

Em contrapartida, o histograma obtido com o ensaio realizado com incidência de 500 lux foi bastante distinto daqueles obtidos com a câmara de proteção e o gabinete do protótipo, como pode ser observado nas Figuras 4.21(a) e 4.21(b).

Figura 4.21 – Análise de uma imagem da superfície inerte, com incidência de 500 lux de iluminância.



(a) Imagem do *speckle* de uma superfície inerte.

(b) Histograma.

Fonte: Do autor (2020).

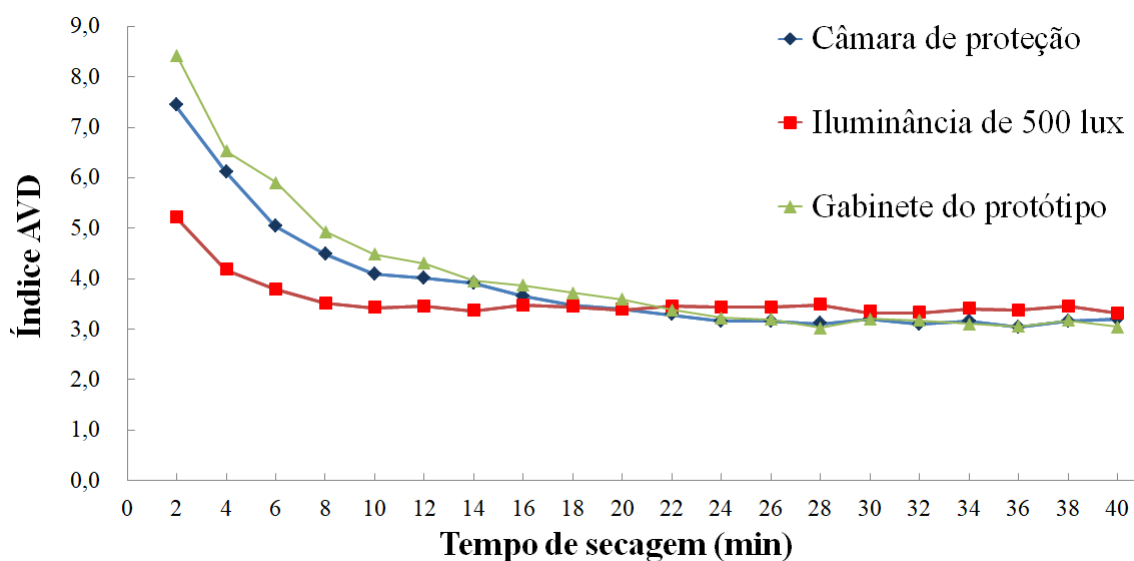
Baseado nos histogramas percebe-se que nenhuma das imagens está ocupando os extremos laterais da escala que representa a gama de tons de cinza. Se estivessem muito à esquerda indicaria que a imagem está subexposta (predominância de tons escuros) ou se estivessem muito à direita indicaria superexposição (predominância de tons claros). As três imagens possuem tons médios de cinza, no entanto, entre elas nota-se que no histograma da imagem com inci-

dência de 500 lux o valor médio dos *pixels* é de aproximadamente 109, enquanto que nas outras duas situações próximo de 73. É importante observar também que o valor de cinza modal, ou seja, o valor que ocorre com maior frequência, é de 99 com 500 lux e de 75 nos outros dois casos. Desse modo, é possível deduzir que a imagem com a iluminância de 500 lux é mais clara que as outras.

Além disso, vê-se que o histograma da imagem com 500 lux é mais estreito, isto é, possui uma menor diferença entre os tons mais claros e mais escuros e, portanto, um baixo contraste. Por outro lado, os histogramas das imagens capturadas na câmara de proteção e no gabinete do protótipo possuem os *pixels* mais distribuídos ao longo da escala de níveis de cinza e, à vista disso, são imagens com maior contraste. Sendo assim, em virtude das imagens adquiridas com iluminância de 500 lux serem mais claras e com menor contraste a definição dos grãos individuais do padrão *speckle* foi prejudicada e, conseqüentemente, os valores dos índices AVD medidos foram menores, com exposto no gráfico da Figura 4.18.

Dando prosseguimento ao estudo, em uma segunda abordagem foram realizadas análises de secagem de tinta nas três condições de iluminação do experimento anterior, ou seja, no interior da câmara de proteção, com a incidência de uma iluminação externa de 500 lux de iluminância e utilizando o gabinete do protótipo. No gráfico da Figura 4.22 são mostradas as curvas obtidas em cada ensaio.

Figura 4.22 – Índices AVD medidos durante a secagem da tinta.



Fonte: Do autor (2019).

Nessa situação, os resultados obtidos com as análises de secagem de tinta corroboraram com o raciocínio exposto no experimento com a superfície inerte, uma vez que as curvas obtidas

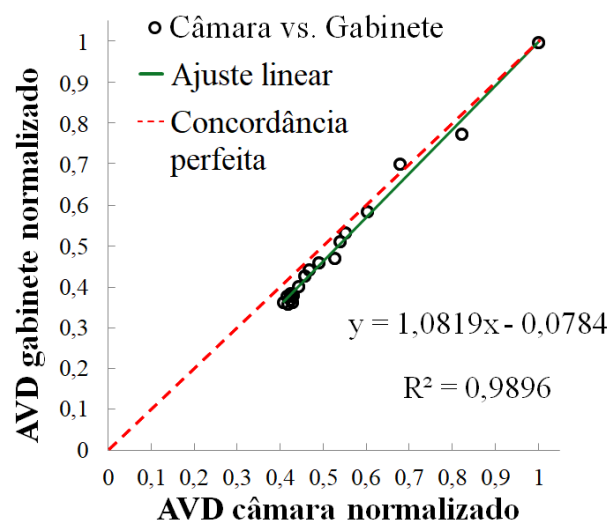
na câmara de proteção e no protótipo são muito semelhantes. Nos dois casos as curvas indicam que a tinta secou cerca de 26 minutos após sua aplicação e os índices AVD estabilizaram no valor de, aproximadamente, 3,2.

Acresce que, o ensaio com a incidência de 500 lux no local da amostra comprovou o impacto da interferência da iluminação externa nas análises *speckle* laser. Nesse caso, o valor do AVD se estabilizou em torno de 3,4 a partir dos 10 minutos e, assim, tem-se a falsa impressão que a tinta secou após esse período de tempo.

Assim como no ensaio com a superfície inerte, por intermédio do *software* ImageJ foram analisadas as imagens adquiridas nos experimentos com secagem de tinta. Os resultados obtidos foram análogos, isto é, os histogramas indicaram que com a incidência de 500 lux as imagens ficam mais claras e perdem contraste. Por conseguinte, a execução das análises *speckle* laser são afetadas.

Contudo, cabe lembrar que este trabalho verifica a viabilidade de se construir um equipamento portátil para análises de sementes utilizando a técnica do BSL e, nesse contexto, a principal comparação que se deve estabelecer é entre os resultados alcançados no protótipo e aqueles obtidos no laboratório de óptica. Assim sendo, e ainda utilizando os dados da secagem de tinta, para a análise final dessa seção foi construído um gráfico de dispersão a partir dos valores do índice AVD na câmara de proteção e os valores de AVD no protótipo. Feito isso, o gráfico da Figura 4.23 apresenta uma reta de ajuste linear muito próxima à reta de concordância perfeita e um coeficiente de determinação da regressão (R^2) de aproximadamente 0,99 (99%).

Figura 4.23 – Valores de AVD com o *setup* miniaturizado no interior da câmara de proteção vs. valores de AVD com o *setup* dentro do gabinete do protótipo.



Fonte: Do autor (2019).

Portanto, nesta etapa foram realizadas várias análises *speckle* laser e de imagens por meio de histogramas em duas situações distintas: em uma superfície sem atividade (inerte) e em uma amostra com alta atividade (secagem de tinta). Baseado nessas duas situações extremas foi possível constatar a influência da iluminação externa nas análises *speckle* laser e, dessa forma, comprovar a eficiência do gabinete do protótipo na proteção contra essa interferência.

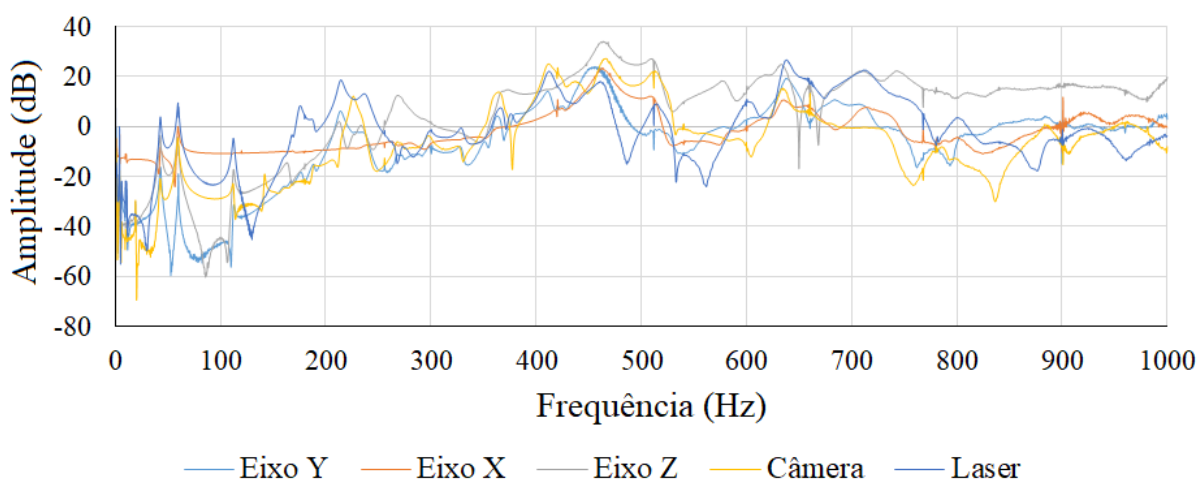
Todos os experimentos foram realizados sobre uma mesa inercial, a temperatura do ambiente foi de $21,4 \pm 0,6^\circ\text{C}$ e a umidade relativa do ar ficou entre 60 e 62%.

4.3.2 Interferência das vibrações mecânicas

4.3.2.1 Determinação das frequências naturais do protótipo

No intuito de se obter informações quantitativas dos efeitos das vibrações nas análises BSL, inicialmente foram identificadas as frequências naturais do protótipo por intermédio da função de resposta em frequência (FRF). Seguindo a metodologia descrita anteriormente, na Figura 4.24 é apresentado um gráfico que mostra as análises FRFs dos 5 acelerômetros instalados dentro do gabinete, com o *shaker* excitando no eixo X.

Figura 4.24 – FRFs dos 5 acelerômetros considerando a excitação no eixo X.



Fonte: Do autor (2019).

Nota-se que os picos nas curvas indicam as frequências naturais (ou de ressonância) da estrutura. Desta forma, por intermédio dos gráficos, pode-se observar que alguns picos ocorrem nitidamente na mesma frequência nos 5 acelerômetros. Entretanto, em alguns casos os picos não são muito acentuados e/ou aparecem em apenas 1 ou 2. Sendo assim, o critério utilizado para a definição das frequências de ressonância foram as situações em que os picos puderam ser

identificados claramente em, pelo menos, 3 acelerômetros. Isso posto, a Tabela 4.5 relaciona as frequências naturais que foram extraídas do gráfico, com o *shaker* excitando no eixo X.

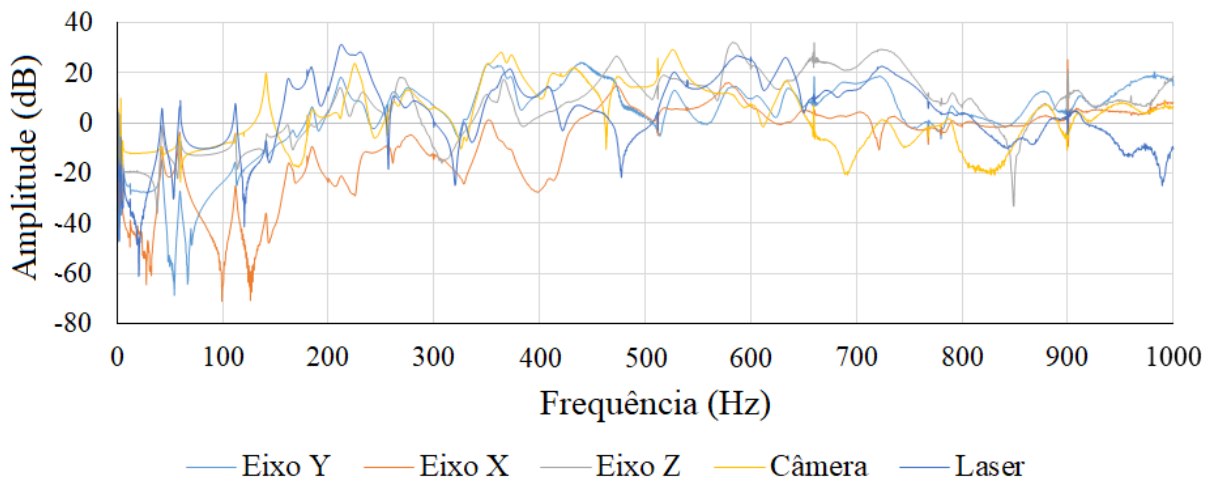
Tabela 4.5 – Frequências naturais do protótipo com excitação no eixo X.

Frequência (Hz)	Frequência (Hz)	Frequência (Hz)
4,1	112,0	459,0
6,2	212,0	504,0
9,6	265,0	642,0
42,5	360,0	707,0
59,0	412,0	

Fonte: Do autor (2019).

Em seguida o *shaker* foi orientado na direção do eixo Y do protótipo e foram obtidas as FRFs com o auxílio dos 5 acelerômetros, como pode ser observado no gráfico da Figura 4.25.

Figura 4.25 – FRFs dos 5 acelerômetros considerando a excitação no eixo Y.



Fonte: Do autor (2019).

Seguindo o mesmo procedimento adotado para a excitação no eixo X, foram extraídas as frequências naturais analisando o gráfico. Desta forma, a Tabela 4.6 relaciona as frequências de ressonância com o *shaker* excitando na direção do eixo Y.

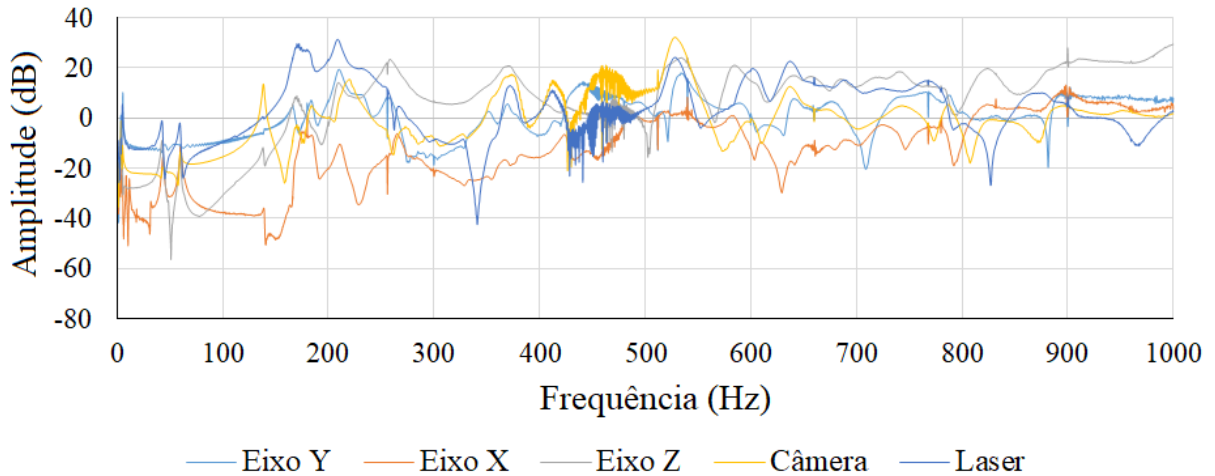
Tabela 4.6 – Frequências naturais do protótipo com excitação no eixo Y.

Frequência (Hz)	Frequência (Hz)	Frequência (Hz)	Frequência (Hz)
3,5	112,0	226,0	588,0
4,2	140,0	266,0	628,0
5,1	160,0	366,0	660,0
42,0	185,0	469,0	728,0
59,5	209,0	522,0	900,0

Fonte: Do autor (2019).

Por fim, o *shaker* foi orientado na direção do eixo Z do protótipo e foram obtidas as FRFs com o auxílio dos 5 acelerômetros, como pode ser observado no gráfico da Figura 4.26.

Figura 4.26 – FRFs dos 5 acelerômetros considerando a excitação no eixo Z.



Fonte: Do autor (2019).

Como realizado anteriormente, foram extraídas as frequências naturais do gráfico. Desta forma, a Tabela 4.7 relaciona as frequências de ressonância com o *shaker* excitando na direção do eixo Z.

Tabela 4.7 – Frequências naturais do protótipo com excitação no eixo Z.

Frequência (Hz)	Frequência (Hz)	Frequência (Hz)
3,7	170,0	584,0
5,1	206,0	642,0
41,0	263,0	826,0
58,5	367,0	
136,0	533,0	

Fonte: Do autor (2019).

Na Tabela 4.8 é apresentado o agrupamento das frequências naturais que foram identificadas nos eixos X, Y e Z que possuem valores aproximados.

Tabela 4.8 – Agrupamento das frequências naturais identificadas no eixos X, Y e Z de excitação.

Excitação			Excitação		
Eixo X	Eixo Y	Eixo Z	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z
	3,5		360,0	366,0	367,0
4,1	4,2	3,7	412,0		
	5,1	5,1	459,0		
6,2				469,0	
9,6			504,0		
42,5	42,0	41,0		522,0	
59,0	59,5	58,5			533,0
112,0	112,0			588,0	584,0
	140,0	136,0		628,0	
	160,0		642,0		642,0
		170,0		660,0	
	185,0		707,0		
212,0	209,0	206,0		728,0	
	226,0				826,0
265,0	266,0	263,0		900,0	

Fonte: Do autor (2019).

Em conclusão, as frequências naturais do protótipo foram elencadas considerando-se aquelas que possuem valores próximos entre si e que foram observadas em pelo menos duas das três excitações. Para tanto, foram calculadas as médias aritméticas entre os valores aproximados de frequência (TABELA 4.9).

Tabela 4.9 – Frequências naturais do protótipo.

Frequências Naturais	Frequências Naturais
4,0	209,0
5,1	265,0
42,0	364,0
59,0	586,0
112,0	642,0
138,0	

Fonte: Do autor (2019).

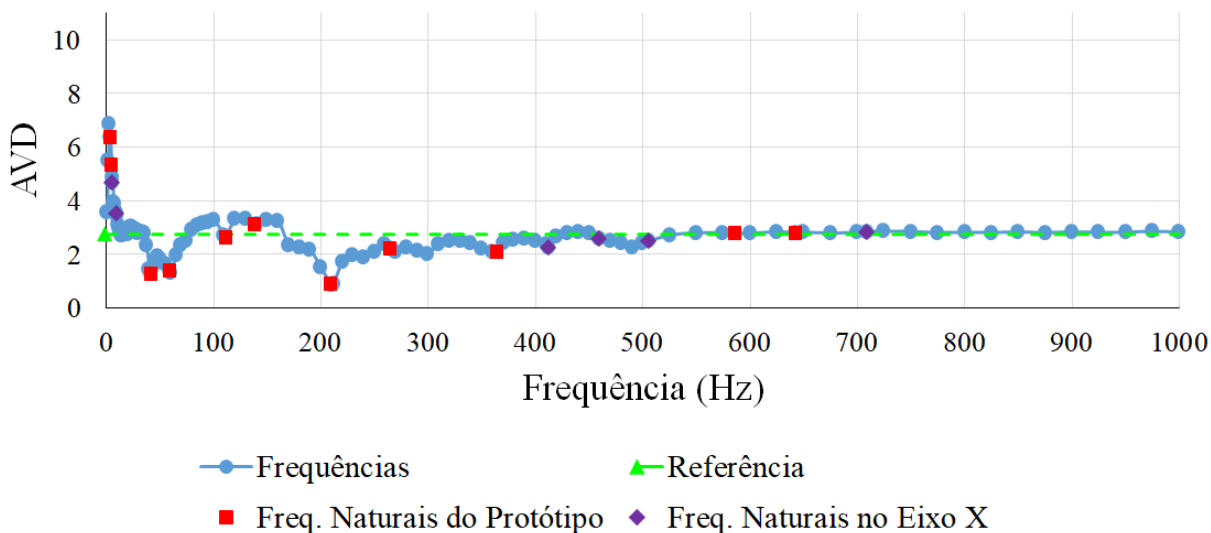
É importante destacar que todas as excitações dessa etapa foram realizadas a uma amplitude de 80 mVpk.

4.3.2.2 Análises AVD com excitação mecânica

Nessa fase, foram realizadas análises *speckle* laser dinâmico com o método AVD durante o tempo em que o gabinete era excitado nas frequências naturais e várias outras, conforme

definido anteriormente (Tabela 3.4). Sendo assim, foram realizadas excitações nos três eixos coordenados (X, Y e Z) e para cada frequência procedeu-se três análises *speckle* laser dinâmico. Na Figura 4.27 são apresentados graficamente os resultados obtidos com a excitação no eixo X.

Figura 4.27 – AVDs com excitação no eixo X.

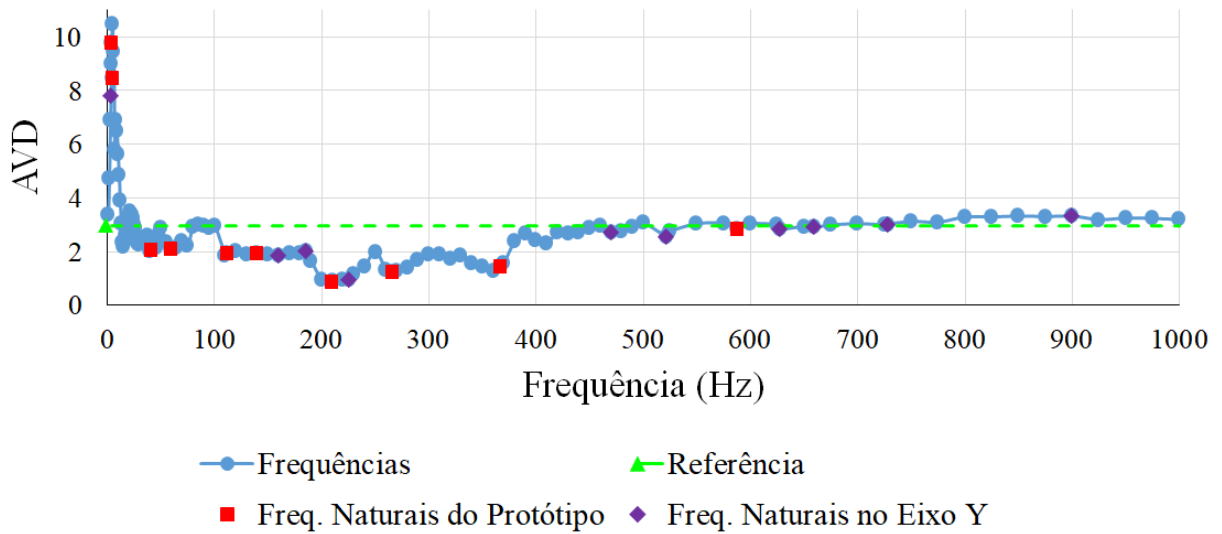


Fonte: Do autor (2019).

Observa-se que cada ponto do gráfico corresponde ao resultado da média aritmética dos três valores de AVD medidos em uma determinada frequência. Também é importante salientar que a média dos três valores mensurados com o protótipo em repouso foi adotada como referência para a comparação com os valores aferidos com excitação via *shaker*. Dessa forma, para a excitação no eixo X a média dos 3 valores obtidos na frequência 0 foi de 2,752, representada por um marcador na cor verde. Da mesma forma, os marcadores mostrados na cor azul indicam os índices AVD na discretização das frequências na faixa de 0 a 1000 Hz, na cor vermelha estão representados os valores obtidos nas frequências naturais do protótipo (TABELA 4.9) e, além dessas, em roxo são demonstradas a frequências naturais detectadas apenas na excitação do equipamento no eixo X.

Similarmente, na Figura 4.28 são mostrados os resultados obtidos com a excitação no eixo Y. Destaca-se que o valor AVD de referência nesse ensaio foi de 2,957.

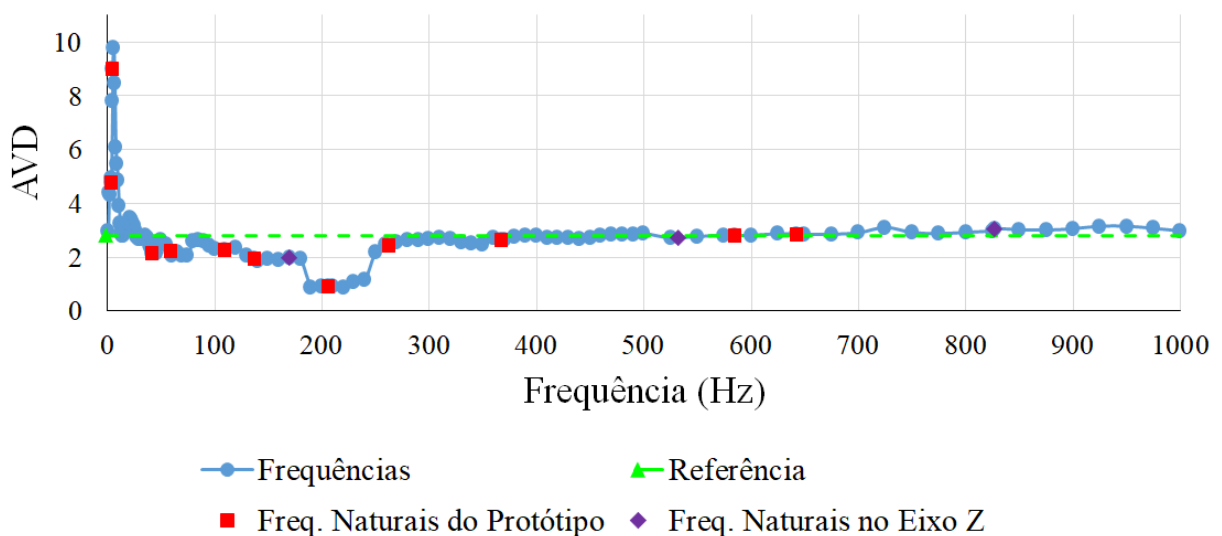
Figura 4.28 – AVDs com excitação no eixo Y.



Fonte: Do autor (2019).

Por fim, na Figura 4.29 são exibidos os resultados com a excitação no eixo Z e o valor AVD de referência foi de 2,798.

Figura 4.29 – AVDs com excitação no eixo Z.



Fonte: Do autor (2019).

Analisando os gráficos das três excitações (X, Y e Z) pode-se observar três situações distintas:

- Nas frequências abaixo da frequência de captura da câmera (15 fps) houve um significativo aumento no valor do índice AVD, inclusive para as frequências naturais. Considerando-se que os valores de referência estão entre 2,75 e 2,96, nas frequências próximas a 5 Hz o valor do AVD foi até 3 vezes maior;

- Nas excitações entre 15 e 500 Hz ocorreram atenuações nos valores do AVD, sendo que, nas frequências naturais observou-se uma maior redução nesse valor. Nos três casos verificou-se uma maior diminuição na frequência de 209 Hz;
- Acima da frequência de 500 Hz não ocorreram variações relevantes, nem mesmo nas frequências naturais do protótipo.

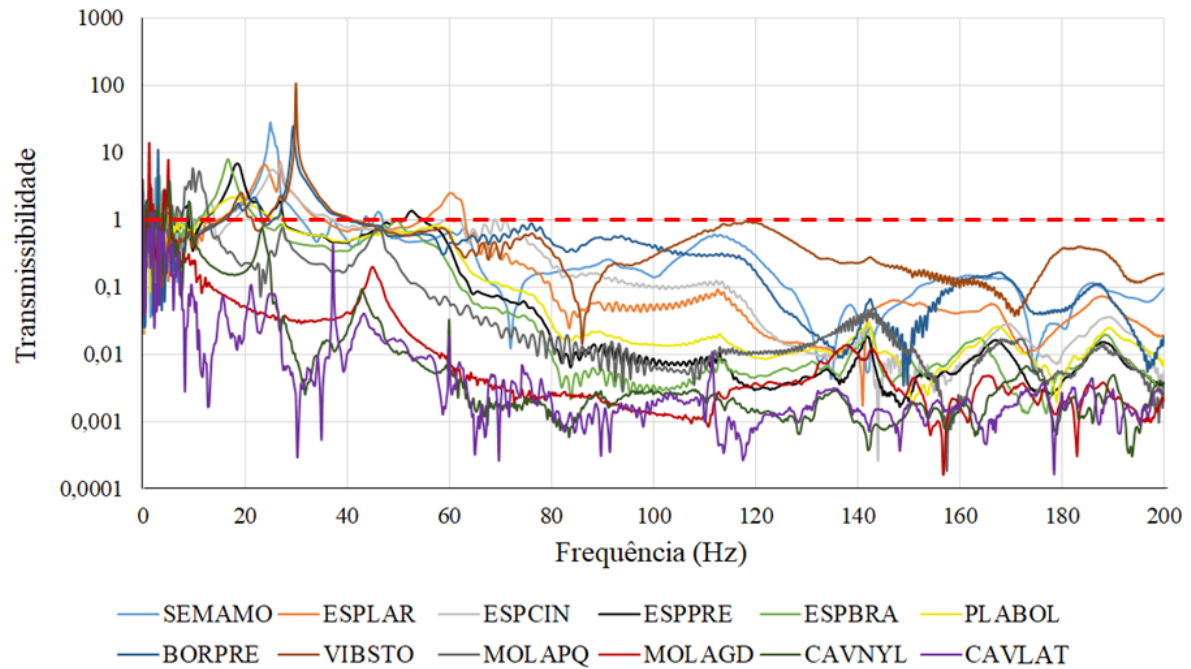
Sendo assim, conclui-se que as análises *speckle* laser sofrem uma maior interferência das vibrações em baixas frequências. Infere-se que para frequências abaixo da taxa de captura da câmera as vibrações provocaram uma percepção do fenômeno do *speckle* laser acima do real e, por isso, o aumento dos índices AVD. Para as frequências acima da taxa de captura e principalmente próximas às frequências de ressonância, que amplificam a amplitude de excitação do protótipo, observou-se que a câmera não foi capaz de capturar satisfatoriamente o fenômeno. À vista disso, foi observado experimentalmente que as imagens perderam definição, ficaram com pouca nitidez e, conseqüentemente, resultaram em índices AVD menores. Ademais, conjectura-se que a própria estrutura do protótipo contribui para filtrar os efeitos das vibrações nas frequências acima de 500 Hz.

Dessa forma, os resultados obtidos confirmaram o pressuposto de que as vibrações mecânicas interferem nas análises *speckle* laser e apontaram para a necessidade de se projetar um isolador que atenuie as vibrações em baixas frequências.

4.3.2.3 Análises de transmissibilidade

Para o projeto do sistema de isolamento mecânico foram realizados testes de transmissibilidade com 11 dispositivos diferentes. Além desses, para fins de comparação, foi efetuado um teste com o protótipo diretamente sobre a mesa sem amortecimento, identificado nos gráficos pelo código SEMAMO. Assim sendo, na Figura 4.30 são mostrados os 12 ensaios e a identificação dos códigos dos isoladores pode ser vista na Tabela 3.5, bem como as suas especificações gerais.

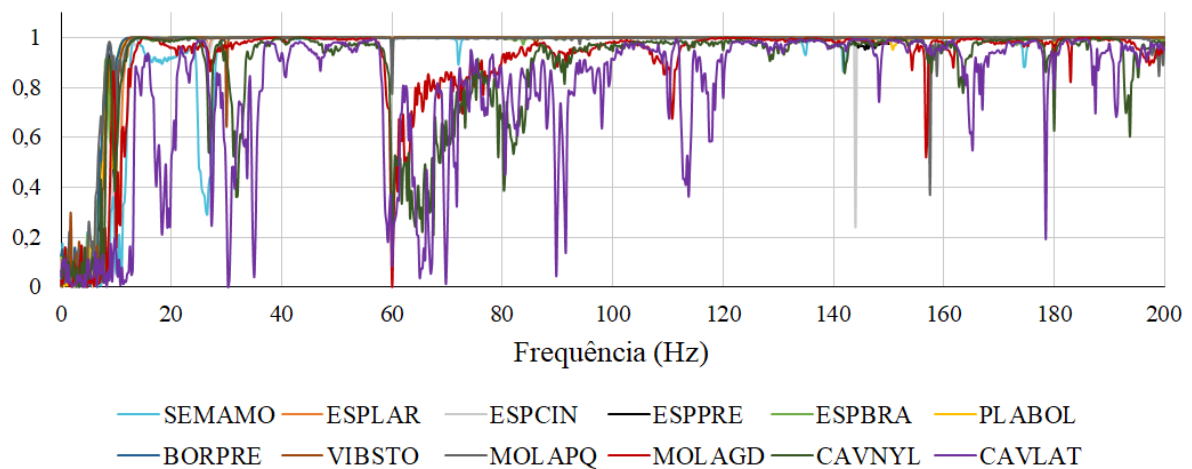
Figura 4.30 – Transmissibilidades.



Fonte: Do autor (2020).

Analisando a figura, observa-se que na faixa de frequência entre 0 e 9 Hz ocorrem variações nos valores de transmissibilidade e, por conseguinte, as informações extraídas dessa faixa do espectro devem ser analisadas com cuidado. Além disso, os resultados obtidos com a função de coerência confirmam que a qualidade dos sinais adquiridos nessa faixa de frequência é baixa, possivelmente devido à resposta de frequência dos transdutores e/ou algum componente da configuração experimental (FIGURA 4.31).

Figura 4.31 – Coerências dos testes de transmissibilidade.

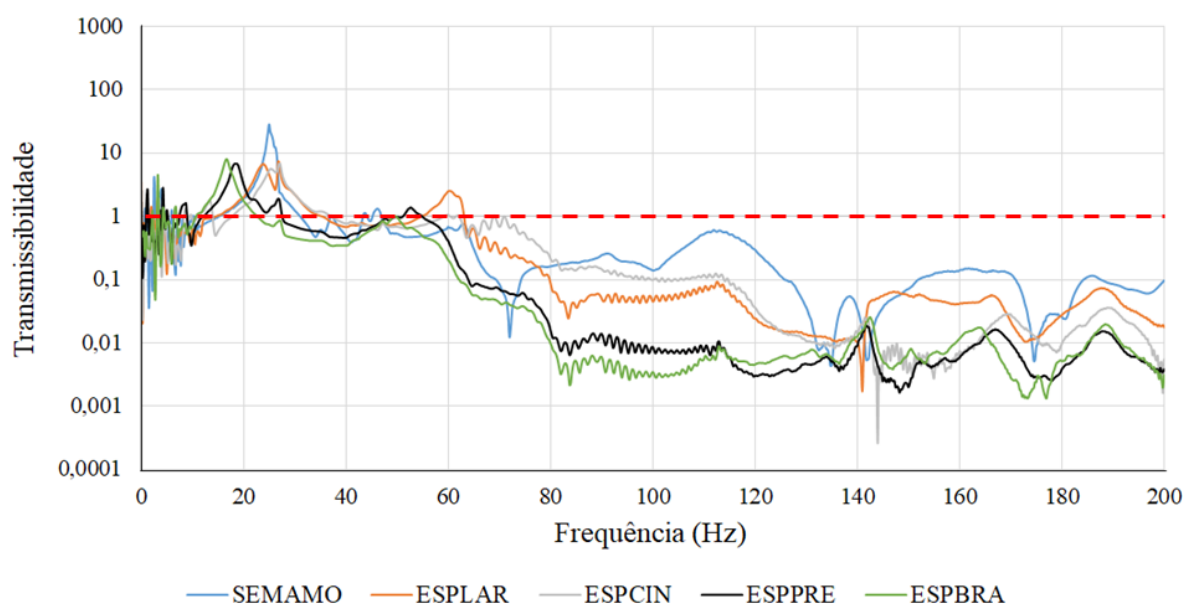


Fonte: Do autor (2020).

Continuando a análise dos ensaios (FIGURA 4.30), para frequências acima de aproximadamente 65 Hz a transmissibilidade é menor que 1 em todos os gráficos, ou seja, não há amplificação do sinal. Em contrapartida, na faixa de frequências entre 9 e 65 Hz os isoladores apresentam pontos com transmissibilidade maior que 1, isto é, aumenta a amplitude da vibração. Sendo que os picos mais evidentes, entre 2 e 30 Hz, identificam as regiões de amplificação de cada isolador.

Posto isso, tendo em vista facilitar a visualização e a avaliação das curvas de transmissibilidade, os isoladores foram agrupados em três categorias: 1. Espumas (FIGURA 4.32); 2. Borracha, vibra-stop e molas (FIGURA 4.33); 3. Plástico bolha e cavaletes (FIGURA 4.34).

Figura 4.32 – Transmissibilidade das espumas.



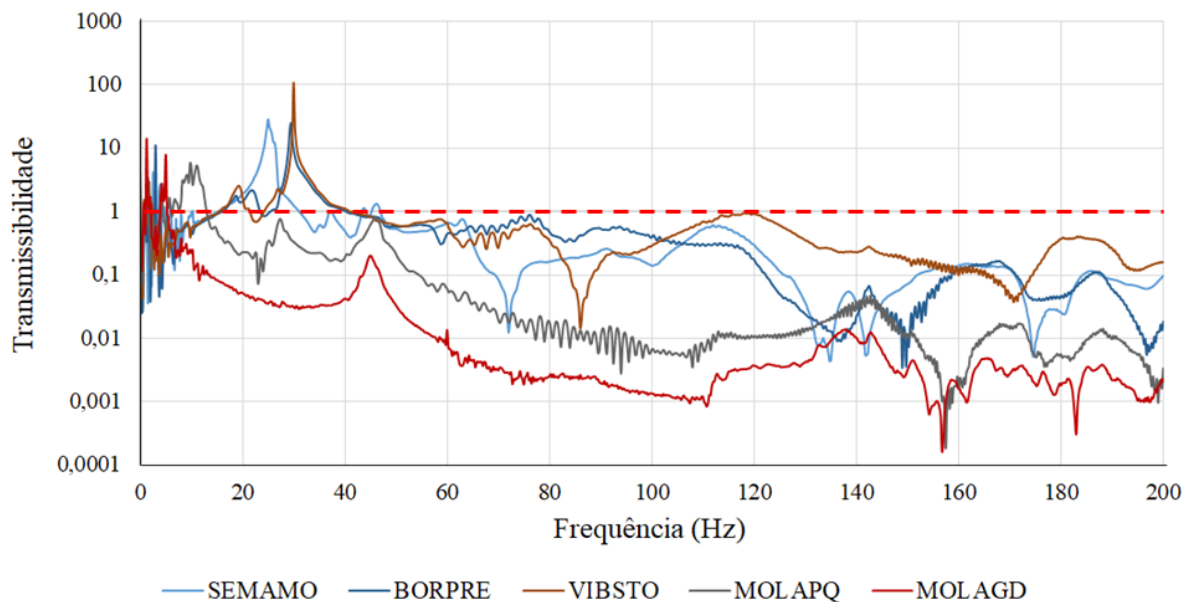
Fonte: Do autor (2020).

Na Figura 4.32 pode-se observar que o isolador de vibrações mais eficiente foi a espuma branca alveolar (ESPBRA) que apresentou frequência de amplificação mais baixa, aproximadamente 16,75 Hz, e sua curva, no geral, apresentou os menores valores de transmissibilidade. Em seguida, com uma curva muito semelhante, aparece a espuma preta alveolar (ESPRE) com frequência de amplificação de 18,5 Hz. As espumas laranja (ESPLAR) e cinza (ESPCIN), que possuem densidades próximas, também apresentaram resultados bastante similares entre si, com frequências de amplificação de 26,75 e 27 Hz, respectivamente.

Destaca-se que para o ensaio do protótipo sem amortecimento (SEMAMO) a frequência de amplificação foi de 25 Hz. Nota-se, também, que entre as frequências 30 e 55 Hz o com-

portamento das curvas das espumas e da curva sem isolador é parecido, desse modo, pode-se deduzir que nessa faixa de frequência a atuação das espumas não é significativa.

Figura 4.33 – Transmissibilidade da borracha, do vibra-stop e das molas.

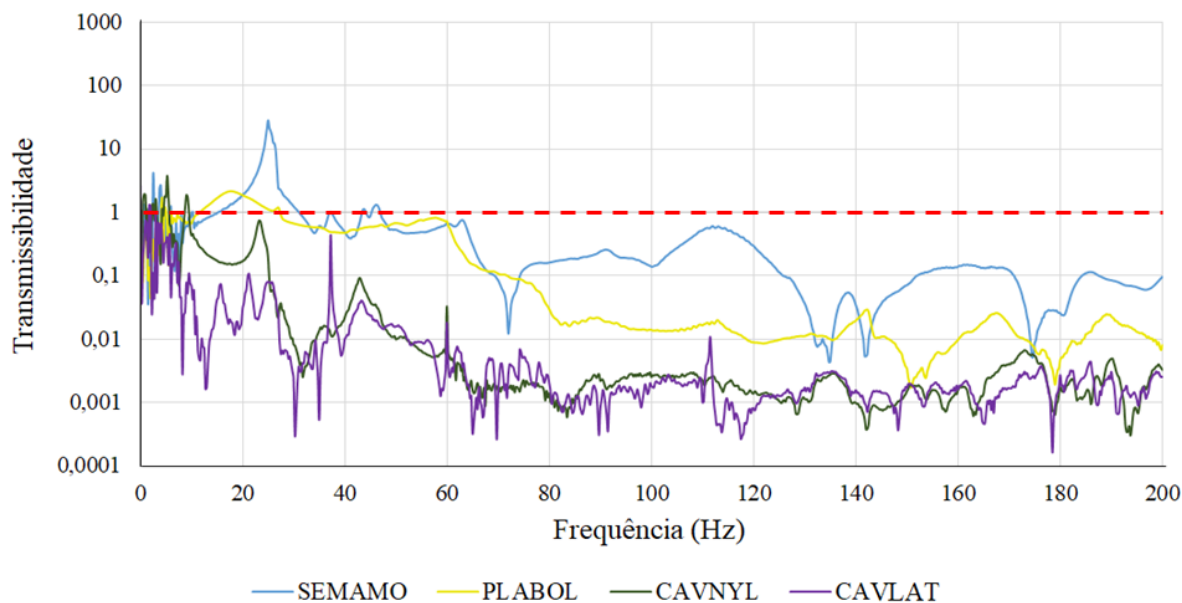


Fonte: Do autor (2020).

No grupo de isoladores da Figura 4.33 as molas tiveram o melhor desempenho, sendo que a mola grande (MOLAGD) apresentou maior eficiência na atenuação da transmissibilidade que a mola pequena (MOLAPQ). No caso da mola grande pode-se notar nitidamente dois picos de maior amplitude nas frequências de 1,25 e 5 Hz. Entretanto eles aparecem em uma região na qual ocorrem muitas oscilações e, conforme foi exposto anteriormente, a função coerência do ensaio apresentou em resultado ruim. Inferindo-se, então, que nas frequências muito baixas a confiabilidade dos ensaios foi menor, o pico em 1,25 Hz foi descartado e a frequência de ressonância foi considerada em 5 Hz. É importante ressaltar que acima de 5,5 Hz a transmissibilidade da MOLAGD é menor que 1, ou seja, as vibrações são atenuadas. Por sua vez, a mola MOLAPQ apresentou sua frequência de ressonância em 9,75 Hz e uma curva quase idêntica à MOLAGD, porém com menor eficiência na atenuação da transmissibilidade.

Ainda nesse gráfico, os isoladores borracha preta (BORPRE) e vibra-stop (VIBSTO), por serem mais rígidos, demonstraram baixa eficiência de isolamento. Eles apresentaram frequências de ressonância de 29,5 e 30 Hz, respectivamente, e curvas de transmissibilidade, em geral, com maior amplitude que a do protótipo sem amortecimento (SEMAMO).

Figura 4.34 – Transmissibilidade do plástico bolha e suspenso em cavaletes.



Fonte: Do autor (2020).

Conforme pressuposto, os ensaios realizados com o protótipo suspenso em cavaletes por intermédio de mangueiras de latex e fios de nylon apresentaram o melhor resultado para o isolamento das vibrações. Entretanto, estes testes foram efetuados exclusivamente com o intuito de comparar os dispositivos de isolamento, uma vez que, da forma como foi projetado o protótipo, este tipo de instalação não é operacionalmente viável.

As curvas geradas com o protótipo suspenso em cavalete por meio do fio de nylon (CAVNYL) e da mangueira de latex (CAVLAT) são muito similares e também são aquelas que apresentaram maior nível de atenuação entre todos os dispositivos. Contudo, em razão da mangueira de latex ser menos rígida do que o fio de nylon, em frequências abaixo de aproximadamente 35 Hz os resultados de CAVLAT foram melhores que de CAVNYL. Sendo assim, para CAVLAT foi obtida uma frequência de ressonância de 2 Hz e para CAVNYL 5,25 Hz.

Observa-se também, nesse gráfico, que o teste de transmissibilidade do plástico bolha (PLABOL) apresentou, no geral, um nível de atenuação intermediário entre os dispositivos avaliados. Para o PLABOL a frequência de ressonância foi identificada no valor de 17,75 Hz.

Na Tabela 4.10 são mostradas as frequências de ressonância dos dispositivos isoladores de vibração e as respectivas amplitudes. Ressalta-se que a tabela foi ordenada por ordem crescente de frequência.

Tabela 4.10 – Frequências de ressonância e amplitudes.

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

Fonte: Do autor (2020).

Mediante as curvas de transmissibilidade dos gráficos e as frequências de ressonância pode-se inferir que os isoladores que apresentaram maior eficiência de isolamento das vibrações foram aqueles em que as frequências de amplificação identificadas tiveram o menor valor.

4.3.2.4 Avaliação da influência dos isoladores nas análises *speckle* laser

Foram realizadas análises *speckle* laser dinâmico com o intuito de verificar o quanto cada isolador atenua os efeitos das vibrações provocadas pelo *shaker*. Para tanto, foram efetuadas análises numéricas AVD com excitações nas frequências de 5, 15, 25, 42, 60, 112, 470 e 800 Hz, assim como foi realizado para o ruído branco. Adicionalmente, tendo em vista aferir os efeitos da magnitude das vibrações nas análises AVD, todos os ensaios foram replicados em três amplitudes de excitação distintas: 40, 70 e 100 mVpk, conforme descrito na Seção 3.3.2.

Na Tabela 4.11 são apresentados os valores de AVD obtidos com cada isolador, nas frequências supracitadas e nas 3 amplitudes de excitação. No total, foram obtidos 324 índices AVD a partir de 1296 aquisições de 128 imagens a uma taxa de 15 fps.

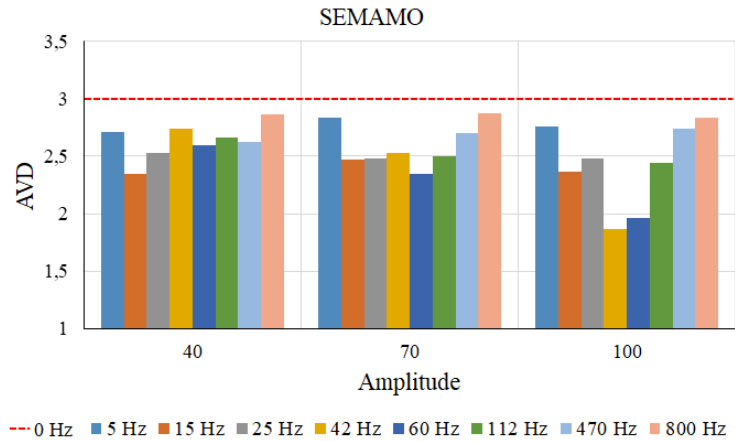
Tabela 4.11 – Índices AVD para os isoladores de vibração.

Isolador	Ampl. (mVpk)	Frequências (Hz)								Ruído Branco
		5	15	25	42	60	112	470	800	
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
MOLAGR	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
CAVLAT	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).

Para facilitar a visualização e apresentação desses dados, foram gerados gráficos para os resultados obtidos com cada isolador. Observa-se que foi traçada uma linha de referência correspondente ao valor do índice AVD medido com o protótipo em repouso (0 Hz) que foi de 3,02. O gráfico mostrado na Figura 4.35 ilustra os dados aferidos com o protótipo sem amortecimento (SEMAMO).

Figura 4.35 – Variação do índice AVD para o protótipo sem amortecimento.

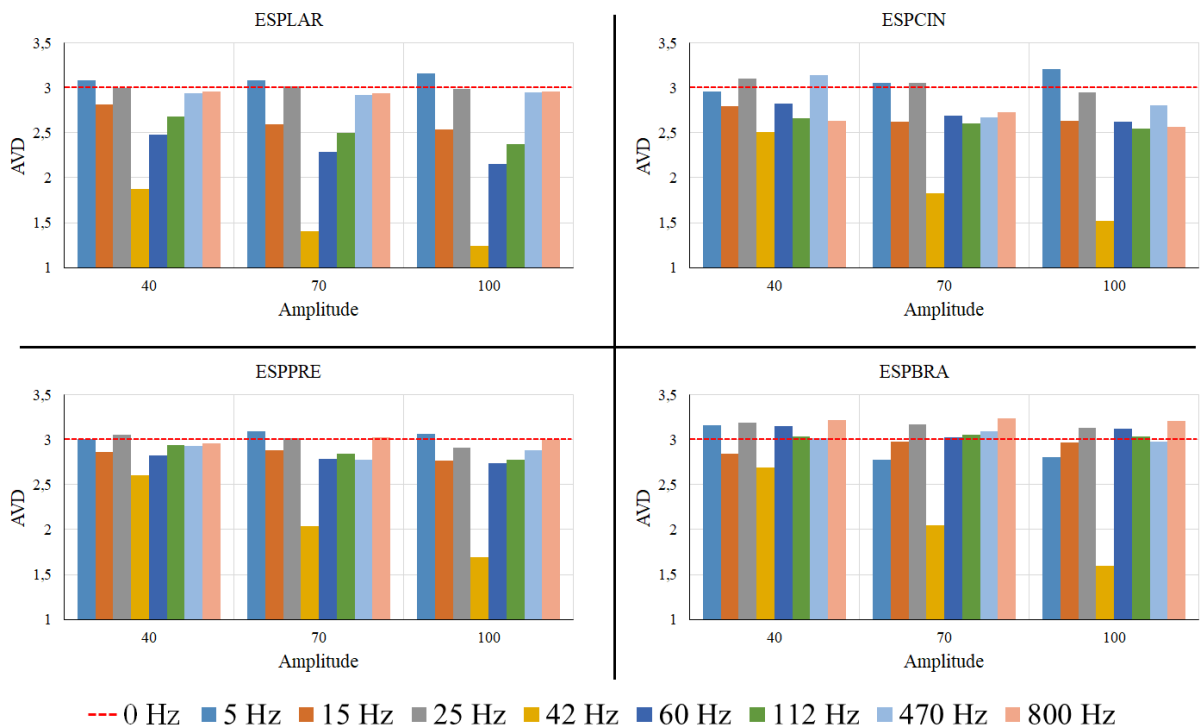


Fonte: Do autor (2020).

Avaliando o gráfico é possível inferir que para todas as frequências e nos 3 níveis de excitação os valores de AVD sofreram uma variação negativa, mais acentuada nas frequências de 42 e 60 Hz, que são frequências naturais nitidamente identificadas nas análises FRFs, com amplitude de 100 mVpk.

Assim como foi realizado nas análises de transmissibilidade, os gráficos dos isoladores foram divididos em 3 categorias: 1. Espumas; 2. Borracha, vibra-stop e molas; 3. Plástico bolha e cavaletes. Na Figura 4.36 são mostrados os resultados alcançados com as espumas.

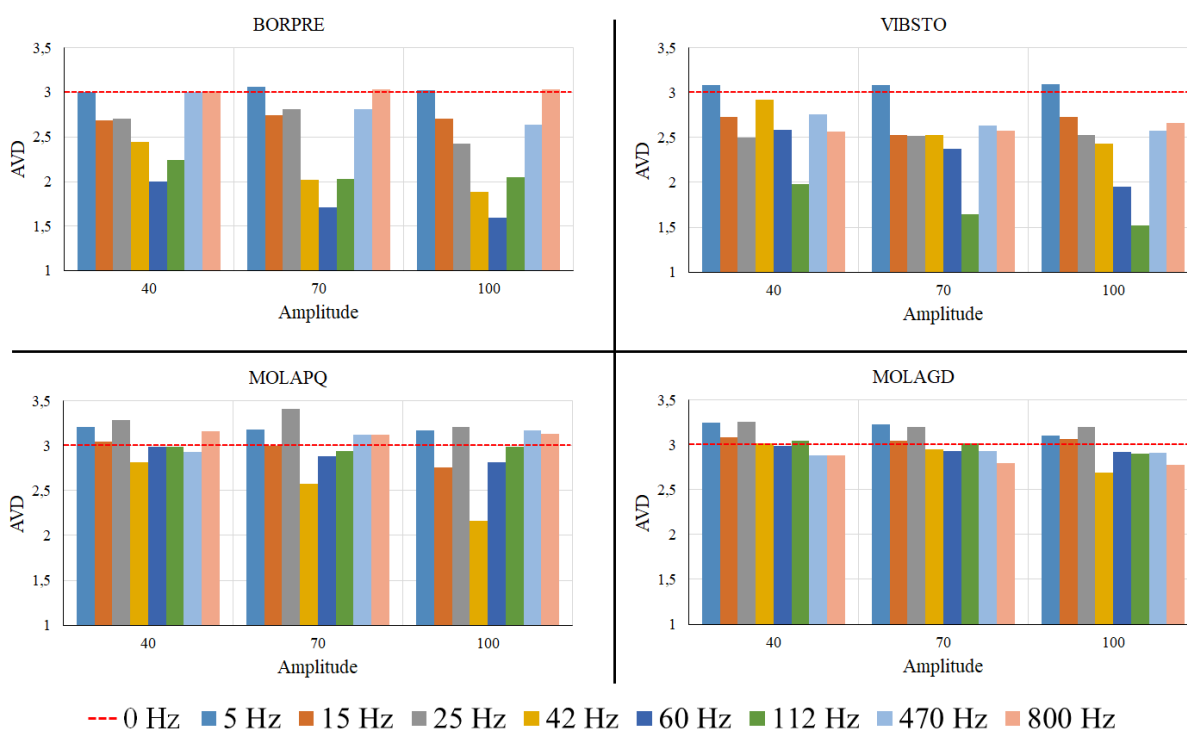
Figura 4.36 – Variação do índice AVD para o protótipo isolado por espumas.



Fonte: Do autor (2020).

A partir desses gráficos é possível observar que em determinadas frequências e amplitudes os valores de AVD ficaram próximos ao valor medido sem vibração, o que demonstra que houve uma atenuação da transmissibilidade das excitações. Todavia, comparando com o gráfico de SEMAMO, nota-se uma maior variação negativa desse índice na frequência de 42 Hz em todos os ensaios, o que indica que as espumas não foram eficientes na absorção dessa frequência natural do protótipo. Além disso, também é importante destacar que as espumas com formato alveolar (ESPPRE e ESPBRA), no geral, propiciaram melhores resultados que aquelas com formato reto (ESPLAR e ESPCIN), assim como nos testes de transmissibilidade (FIGURA 4.32). Na Figura 4.37 são apresentados os resultados obtidos com a borracha, o vibra-stop e as molas.

Figura 4.37 – Variação do índice AVD para o protótipo isolado pela borracha, o vibra-stop e as molas.

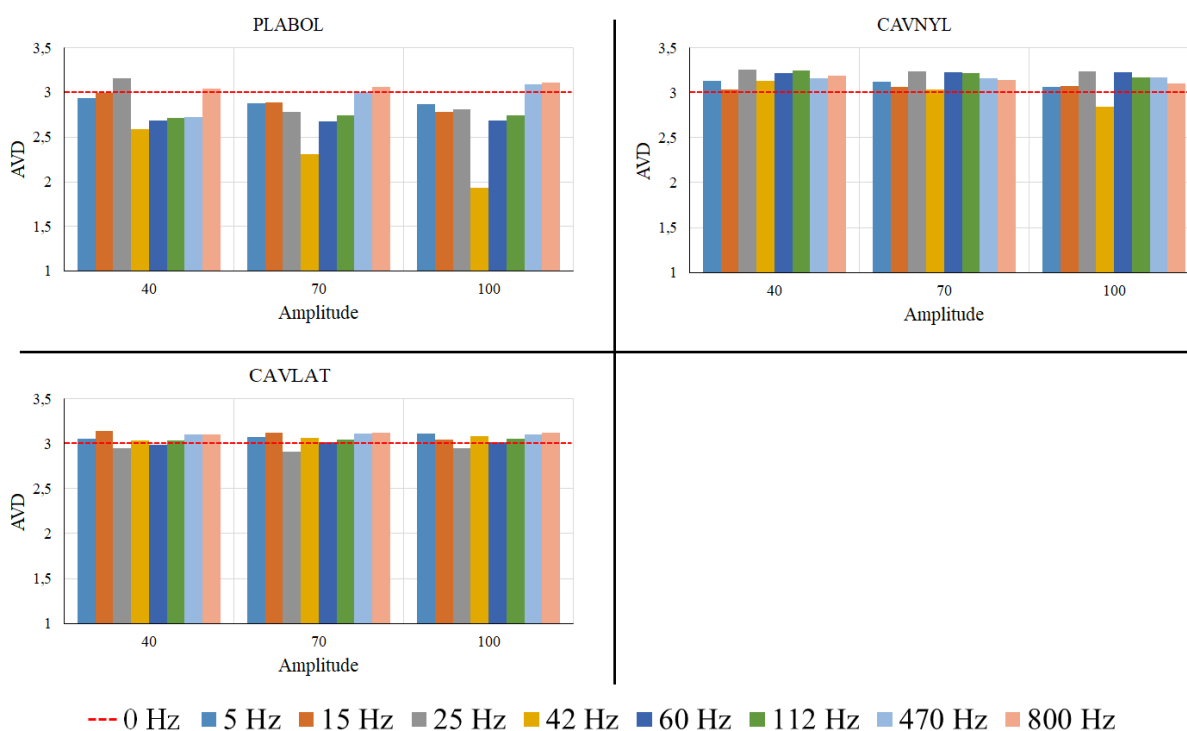


Fonte: Do autor (2020).

No grupo de isoladores desses gráficos o melhor desempenho foi o das molas, da mesma forma que foi observado nos teste de transmissibilidade mostrado na Figura 4.33. A variabilidade para a mola pequena (MOLAPQ) e para a mola grande (MOLAGD) foi a menor entre os isoladores analisados até então, sendo que em algumas frequências e amplitudes ela foi positiva em outras negativa, mas, no geral, próximas ao valor de AVD medido com o protótipo em repouso. Salienta-se que a isolação da MOLAGD mostrou-se mais eficiente que a da MOLAPQ, sobretudo na frequência de 42 Hz, que sofreu a maior variação nos ensaios anteriores. Em

contrapartida, os isoladores borracha preta (BORPRE) e vibra-stop (VIBSTO) obtiveram resultados inferiores aos ensaios realizados sem amortecimento (SEMAMO). Eles sofreram uma variação negativa muito acentuada, principalmente nas frequências de 42, 60 e 112 Hz, que são frequências naturais do protótipo. Em seguida, foram efetuados os ensaios com o plástico bolha e com o protótipo suspenso em cavalete (FIGURA 4.38).

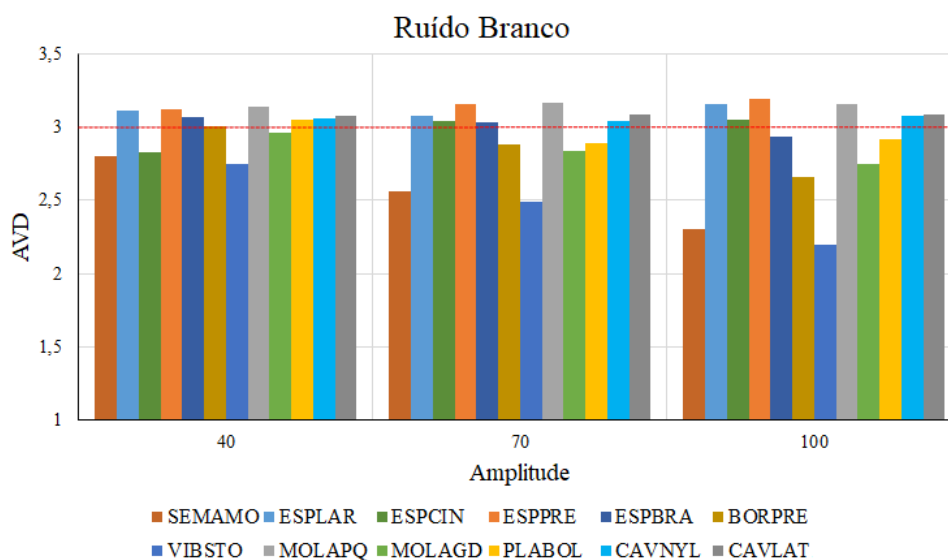
Figura 4.38 – Variação do índice AVD para o protótipo isolado pela plástico bolha e suspenso em cavalete.



Fonte: Do autor (2020).

Por intermédio desse gráfico é possível verificar que o ensaio com o plástico bolha (PLABOL) retornou um bom resultado, similar aos das espumas ESPPRE e ESPBRA, porém também não conseguiu filtrar satisfatoriamente a frequência natural de 42 Hz, que se mostrou a situação mais crítica nesses ensaios. Por outro lado, os melhores resultados foram alcançados com o protótipo suspenso por fios de nylon (CAVNYL) e por mangueiras de latex (CAVLAT). Ambos apresentaram a menor variabilidade do índice AVD entre os isoladores estudados e, entre eles, a configuração CAVLAT demonstrou a menor variabilidade em torno do valor de referência. Corroborando os resultados apresentados nos teste de transmissibilidade (FIGURA 4.34). Por fim, na Figura 4.39 são apresentados os resultados obtidos em todos os isoladores quando excitados por ruído branco (0 a 200 Hz).

Figura 4.39 – Variação do índice AVD para o protótipo excitado por ruído branco.

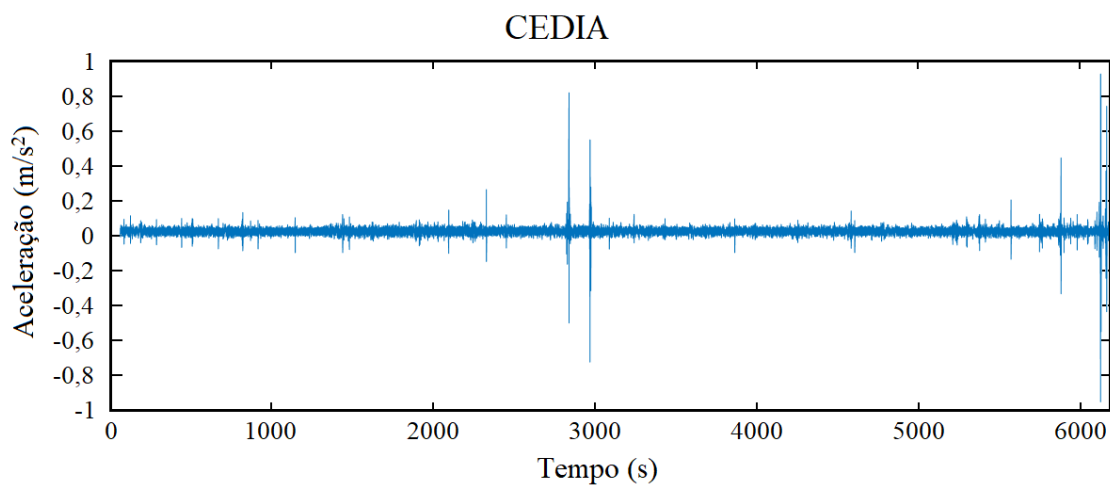


Nos ensaios realizados com ruído branco todos isoladores, em geral, se mostraram eficientes em relação a absorção das vibrações, com variabilidade próxima ao valor de referência. Exceção deve ser feita ao vibra-stop (VIBSTO), que demonstrou um resultado inferior aos ensaios com o protótipo sem amortecimento (SEMAMO).

4.3.2.5 Comparação entre as magnitudes das excitações aplicadas via *shaker* e as vibrações de um ambiente de trabalho

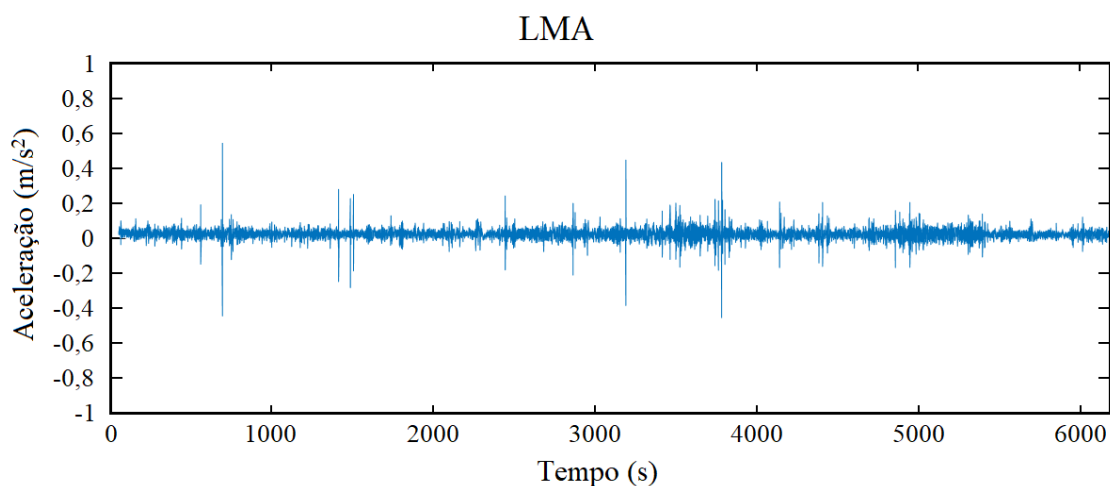
Em todos os experimentos realizados nessa seção, as excitações mecânicas fornecidas pelo *shaker* procuraram simular as vibrações aleatórias que ocorrem normalmente em um ambiente de trabalho. No entanto, é importante investigar se as amplitudes das excitações forçadas empregadas nesses ensaios são compatíveis com aquelas encontradas em situações reais do cotidiano. Para esse fim, foram monitoradas as vibrações nos laboratórios CEDIA e LMA, conforme descrito na metodologia proposta. Nas Figuras 4.40 e 4.41 podem ser observados os resultados obtidos nos dois ambientes.

Figura 4.40 – Registro do sinal temporal das vibrações no laboratório CEDIA.



Fonte: Do autor (2020).

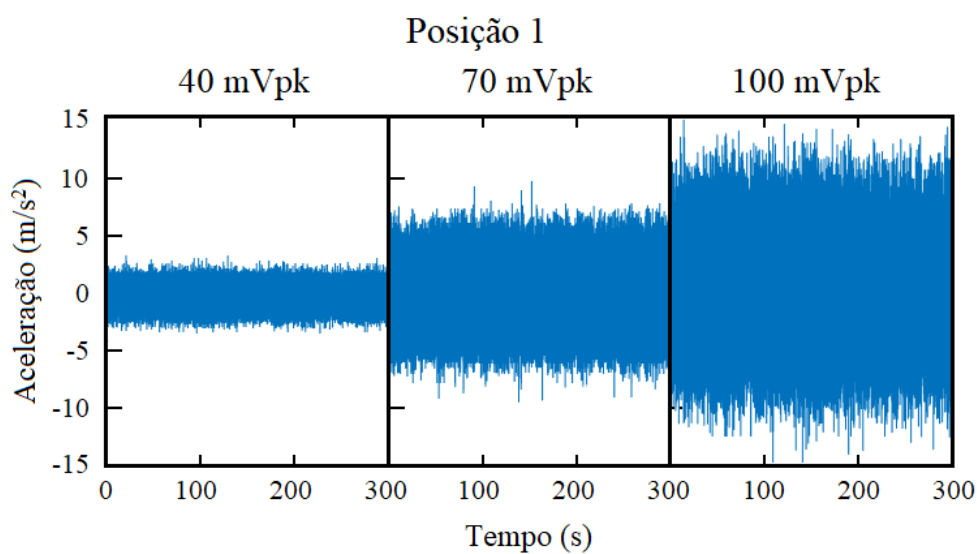
Figura 4.41 – Registro do sinal temporal das vibrações no laboratório LMA.



Fonte: Do autor (2020).

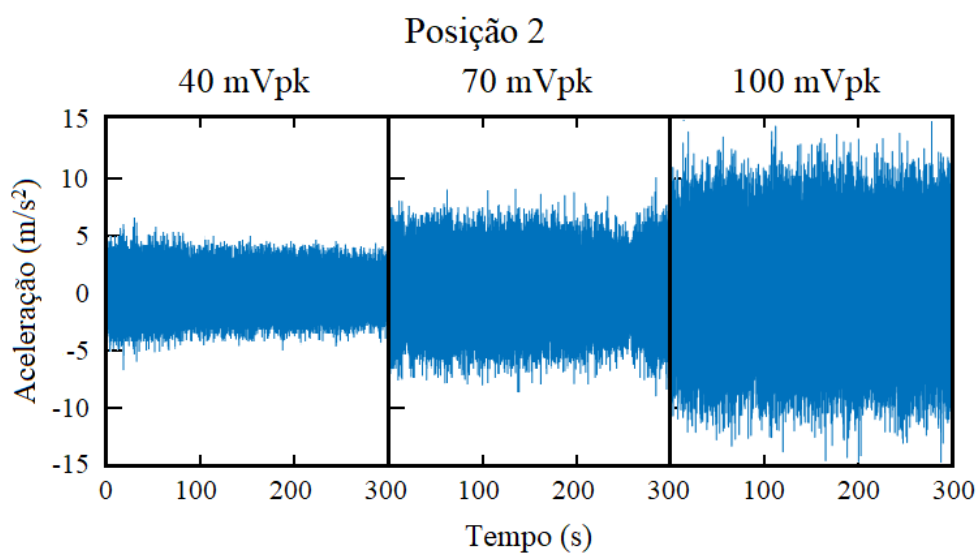
As amplitudes das formas de onda mostradas nos gráficos podem ser apresentadas em valores eficazes (RMS). Dessa forma, o valor medido das vibrações no CEDIA foi de $0,0271 \text{ m/s}^2$ e no LMA de $0,0272 \text{ m/s}^2$, ou seja, foram muito semelhantes. Além disso, o maior pico observado no CEDIA foi de aproximadamente $0,9 \text{ m/s}^2$ e no LMA de $0,6 \text{ m/s}^2$. Continuando o estudo comparativo, nas Figuras 4.42 e 4.43 são mostradas partes (5 minutos) dos ensaios excitados pelo *shaker* na posição 1 (acelerômetro fixado próximo ao *shaker*) e posição 2 (acelerômetro a 300 mm do *shaker*), conforme exposto na metodologia. Destaca-se que, para esses ensaios foi utilizado o analisador SR785 gerando um ruído branco nas amplitudes de 40, 70 e 100 mVpk.

Figura 4.42 – Posição 1: resposta temporal das acelerações nas três amplitudes de excitação.



Fonte: Do autor (2020).

Figura 4.43 – Posição 2: resposta temporal das acelerações nas três amplitudes de excitação.



Fonte: Do autor (2020).

Na Tabela 4.12 são apontados os valores eficazes obtidos nos ensaios apresentados nas Figuras 4.42 e 4.43.

Tabela 4.12 – Valores eficazes (RMS) das acelerações nas posições 1 e 2 (em m/s²).

Posição	Amplitudes		
	40 (mVpk)	70 (mVpk)	100 (mVpk)
1	0,698	2,074	3,309
2	0,917	1,848	3,298

Fonte: Do autor (2020).

É importante lembrar que, na posição 1 o acelerômetro foi colocado ao lado do *shaker* e na posição 2 ele estava a 300 mm. Apesar disso, para a amplitude de excitação de 40 mVpk o valor eficaz da vibração foi maior na posição 2. Em contrapartida, para as amplitudes de 70 e 100 mVpk os valores na posição 1 foram maiores, apesar de bastante próximos.

Portanto, pode-se inferir que os valores medidos para as excitações forçadas na mesa resultaram em magnitudes muito maiores que aqueles encontrados nos dois ambientes observados. Em números aproximados, considerando o menor nível de excitação promovido pelo *shaker* (40 mVpk), o valor eficaz obtido na posição 1 foi 25 vezes superior aos valores mensurados nos dois laboratórios, tanto no CEDIA como no LMA, e o valor medido na posição 2 foi 33 vezes maior. Além disso, analisando os picos encontrados nos laboratórios, $0,9 \text{ m/s}^2$ no CEDIA e $0,6 \text{ m/s}^2$ no LMA, observa-se que eles estão na mesma ordem de grandeza dos ensaios realizados com ruído branco e 40 mVpk. Ressalta-se que as mesas utilizadas nos dois laboratórios não possuíam qualquer tipo de isolador de vibração.

Nesse sentido, é possível constatar que o protótipo foi submetido a excitações de maior magnitude que aquelas verificadas no cotidiano dos ambientes de trabalho investigados. Ademais, os picos de maior intensidade, que ocorreram esporadicamente nos dois laboratórios, tiveram amplitudes análogas as excitações de menor amplitude. Posto isso, infere-se que os isoladores de vibração que tiveram bons desempenhos nos testes de transmissibilidade serão ainda mais eficientes em situações reais de utilização do equipamento.

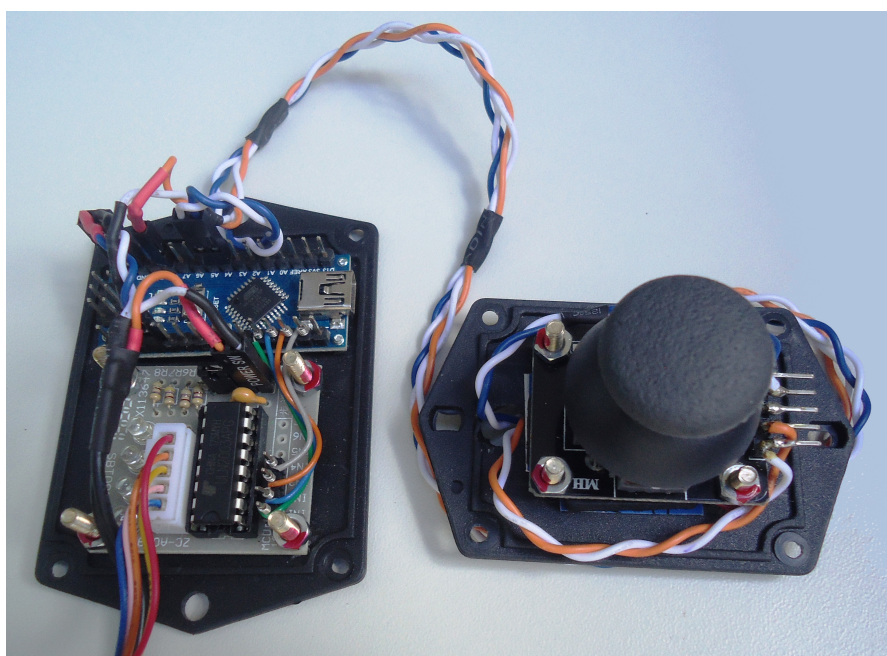
A conclusão dessa seção é que, conforme pressuposto, as vibrações mecânicas interferem nos resultados das análises *speckle* laser dinâmico. Fato percebido sobretudo para as baixas frequências e nas frequências naturais do protótipo. Entretanto, a partir de análises de transmissibilidade foram testados isoladores que minimizaram os efeitos das vibrações. Por fim, entre os isoladores testados, chegou-se à definição que as molas grandes (MOLAGD) apresentaram melhor performance quanto à eficiência e operacionalidade, as quais foram instaladas definitivamente no protótipo.

4.4 Motorização do filtro neutro

Nessa etapa do projeto, foi desenvolvido um sistema para motorizar a rotação do filtro neutro que ajusta a intensidade com que o laser incide na espécie que estava sendo iluminada. Para tal, foi utilizada uma plataforma de prototipagem Arduino Nano e um *driver* para o acionamento do motor de passo que foi acoplado ao eixo giratório do filtro. O motor de passo

utilizado, modelo 28BYJ-48, possui uma precisão de 5,625 graus e, portanto, são necessários 64 passos para completar uma volta. À vista disso, foi implementado um algoritmo no qual o motor executa uma volta completa em 30 segundos, ou seja, a velocidade rotacional do motor é de 2 RPM. Essa velocidade foi definida de forma empírica, observando-se visualmente a variação da imagem à medida que se operava o *joystick*. Acresce que o *joystick* foi programado para que ao ser acionado para direita o motor gira no sentido horário e quando acionado para esquerda o motor gira no sentido anti-horário. Na Figura 4.44 pode ser observada a montagem dos circuitos eletrônicos do sistema.

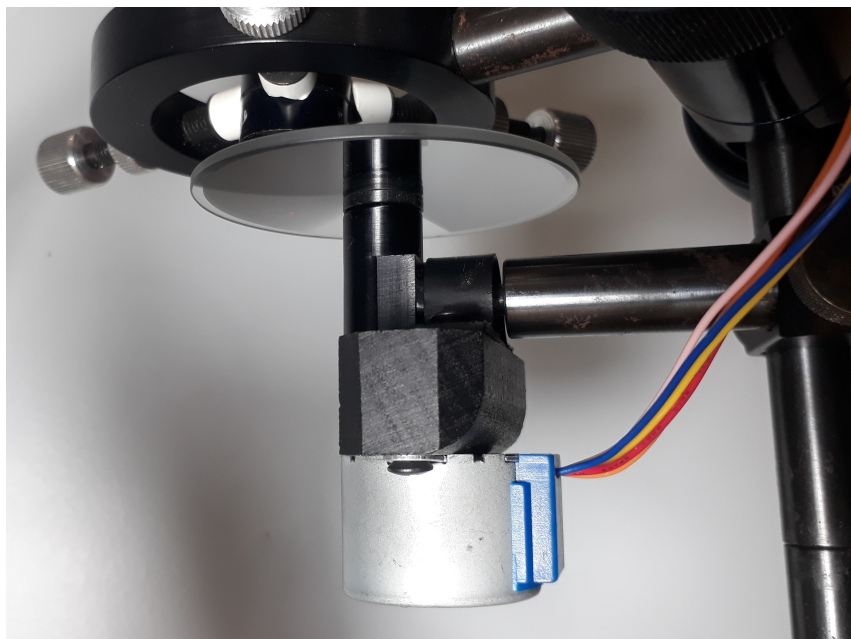
Figura 4.44 – Circuitos eletrônicos de controle.



Fonte: Do autor (2020).

Por fim, foram confeccionadas duas peças, uma em madeira para fixar o motor de passo ao suporte do filtro neutro e outra em alumínio para acoplar o eixo do motor ao eixo giratório do filtro (FIGURA 4.45).

Figura 4.45 – Fixação e acoplamento do motor de passo ao filtro neutro.



Fonte: Do autor (2020).

É importante ressaltar que após a montagem final do protótipo a massa total do equipamento foi de 5,4 kg.

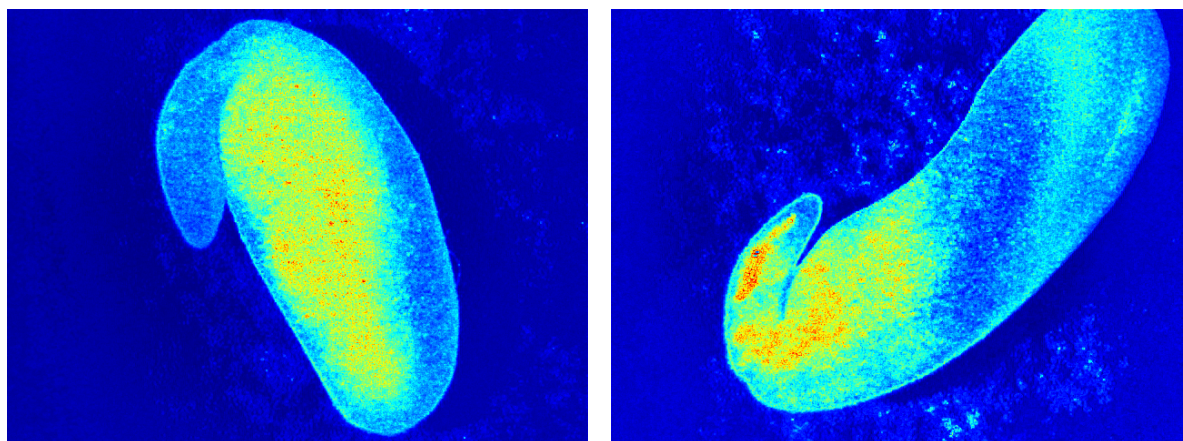
4.5 Validação do protótipo

Nessa última etapa do projeto o objetivo foi testar e validar o protótipo realizando análises de sementes. Para tanto, foram analisadas no protótipo 5 sementes de soja e 5 sementes de feijão.

Estas sementes foram preparadas conforme orienta a RAS (Regras para Análises de Sementes), em seguida foram capturadas as imagens utilizando o *software* Speckle Tool e então foram realizadas as análises gráficas das sementes por meio do aplicativo Portable Speckle. Salienta-se que a análise gráfica cria um mapa de atividades da semente, no qual a cor azul indica baixa atividade biológica e a vermelha indica alta atividade. Na Figura 4.46(a) é mostrado a análise gráfica de uma semente de soja e na Figura 4.46(b) a de uma semente de feijão.

Observando as figuras, nota-se uma maior atividade na região vascular das sementes, sendo que na semente de feijão também é possível verificar alta atividade no eixo embrionário, conforme ilustrado nas Figuras 4.47(a) e 4.47(b).

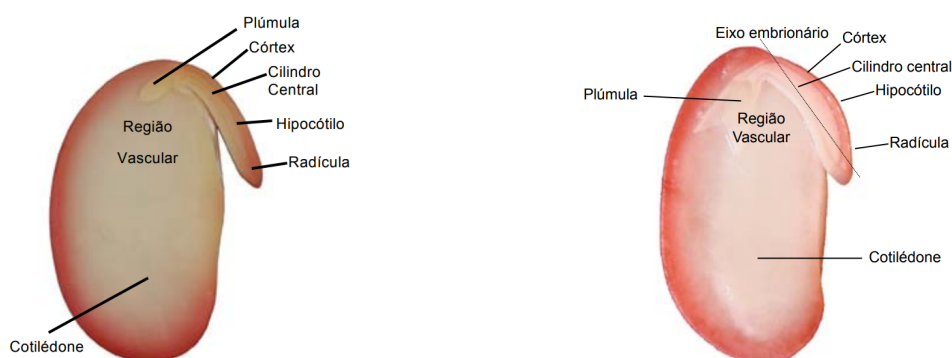
Figura 4.46 – Análises Gráficas utilizando o método AVD.



(a) Mapa de atividades de uma semente de soja. (b) Mapa de atividades de uma semente de feijão.

Fonte: Do autor (2021).

Figura 4.47 – Estruturas das sementes de soja e de feijão.



(a) Semente de soja (*Glycine max* L.).

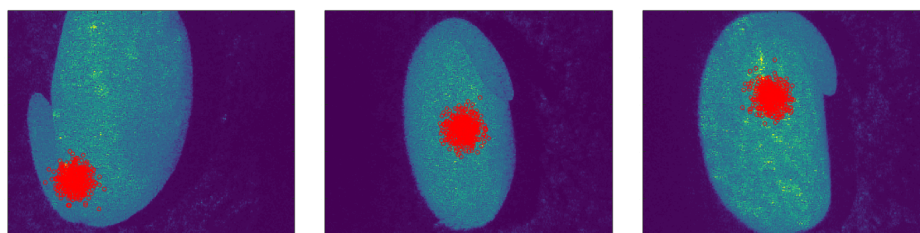
(b) Semente de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.).

Fonte: Brasil (2009).

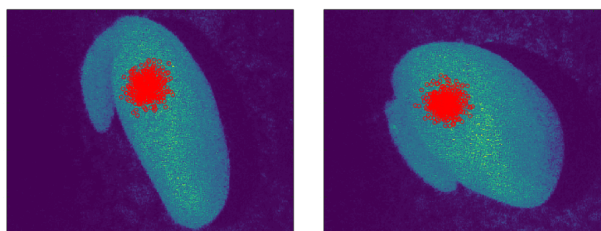
Uma vez criados os mapas de atividades foi possível realizar a análise numérica AVD na região de maior atividade de cada semente, para tal, foi selecionada a área de análise por meio da função *thsp_gaussian()* da biblioteca BSLTL, em execução no *software* Octave. Os parâmetros dessa função foram ajustados para 400 pontos em um raio de 20 *pixels* em torno do ponto escolhido. As Figuras 4.48(a), 4.48(b), 4.48(c), 4.48(d) e 4.48(e) mostram as imagens das 5 sementes de soja e as regiões nas quais foram realizadas as análises. Por sua vez, a Tabela 4.13 apresenta o valor do índice AVD mensurado em cada semente, valor esse que quantifica a atividade biológica na região selecionada.

Do mesmo modo, as Figuras 4.49(a), 4.49(b), 4.49(c), 4.49(d) e 4.49(e) mostram as imagens das 5 sementes de feijão e as regiões nas quais foram realizadas as análises. E, por fim, a Tabela 4.14 apresenta o valor do índice AVD mensurado em cada semente.

Figura 4.48 – Seleção da região para as análises numéricas das sementes de soja.



(a) Semente de soja 1. (b) Semente de soja 2. (c) Semente de soja 3.



(d) Semente de soja 4. (e) Semente de soja 5.

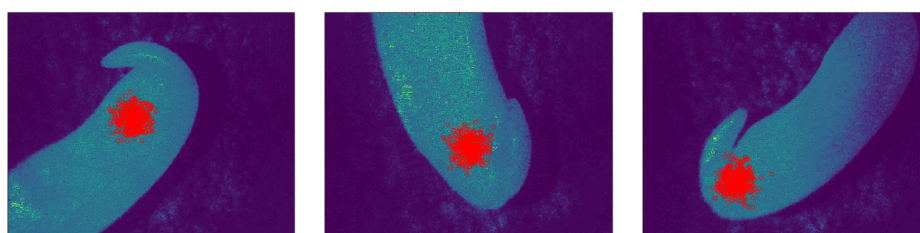
Fonte: Do autor (2021).

Tabela 4.13 – Índices AVD das sementes de soja.

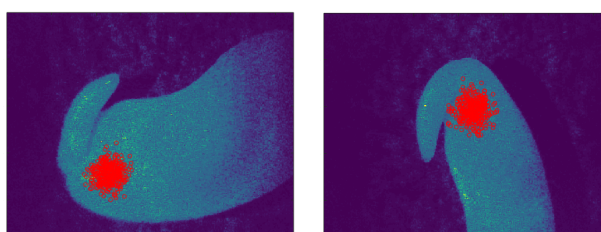
Semente	AVD
1	11,390
2	10,166
3	9,267
4	10,380
5	12,995

Fonte: Do autor (2021).

Figura 4.49 – Seleção da região para as análises numéricas das sementes de feijão.



(a) Semente de feijão 1. (b) Semente de feijão 2. (c) Semente de feijão 3.



(d) Semente de feijão 4. (e) Semente de feijão 5.

Fonte: Do autor (2021).

Tabela 4.14 – Índices AVD das sementes de feijão.

Semente	AVD
1	6,497
2	8,255
3	6,640
4	9,223
5	6,288

Fonte: Do autor (2021).

Os resultados dos experimentos realizados com o protótipo do analisador demonstraram que foi possível criar mapas de atividades das sementes, nos quais podem ser visualizadas as regiões de maior atividade biológica nas sementes. Ademais, a partir das imagens capturadas foi possível realizar análises numéricas nessas áreas, sendo que as sementes de soja apresentaram maior atividade, com valores dos índices AVD aproximadamente entre 9,3 e 13,0; ao passo que as análises das sementes de feijão retornaram valores entre 6,3 e 9,2, em números aproximados.

Adicionalmente, seguindo os mesmos procedimentos descritos anteriormente, foram realizadas análises numéricas AVD em regiões inertes das imagens, ou seja, fora da área ocupada pela semente, e os valores das 10 sementes variaram entre 0,7 e 1,2, aproximadamente. Note que, conforme já mencionado, o valor do índice AVD de uma superfície inerte (sem atividade) deveria ser 0, entretanto, na prática, esse valor representa o ruído intrínseco do sistema. Contudo, a diferença detectada entre os valores de AVD obtidos nas regiões de maior atividade nas sementes e os valores medidos nas regiões inertes, comprovam que as análises realizadas no protótipo conseguem identificar níveis distintos de atividades.

5 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusão

No presente trabalho foi demonstrado a importância da estabilidade da fonte de alimentação do laser e desenvolvido um sistema portátil com bateria equivalente. Em seguida foram construídos o *setup* miniaturizado e o gabinete do protótipo. Feito isso, foram investigadas as interferências da iluminação externa e das vibrações mecânicas nas análises BSL e, por conseguinte, desenvolvido proteções para minimizar os seus efeitos. Posteriormente, visando melhorar a operabilidade do equipamento, foi desenvolvido um sistema que motoriza o ajuste do filtro neutro variável. Por fim, foram realizadas análises de sementes que comprovaram a eficiência do analisador. Visto que, foram obtidos resultados consistentes e compatíveis com aqueles alcançados nas análises BSL realizadas em laboratórios dos centros de pesquisa das universidades.

Sendo assim, com o desenvolvimento do protótipo, conclui-se que é viável a construção de um equipamento compacto, portátil e dedicado às análises da viabilidade e vigor em diferentes tipos de sementes utilizando a técnica do *biospeckle* laser.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

É importante lembrar que os trabalhos foram conduzidos no sentido de investigar a viabilidade da construção de um equipamento compacto para análises de sementes utilizando a técnica do BSL e, para tanto, procurou-se alcançar resultados equivalentes aos obtidos nas análises realizadas nos laboratórios de óptica das universidades. Entretanto, a fim de otimizar a eficiência e a performance do analisador pode-se vislumbrar várias perspectivas de trabalhos futuros, as quais são enumeradas a seguir:

1. Fonte de alimentação do laser: sugere-se pesquisar a utilização de uma bateria com melhor relação autonomia/massa. Uma vez que a bateria empregada no estudo foi superdimensionada, com autonomia de mais de 24 horas e massa de 2,1 kg. Destaca-se que, caso sejam utilizados diferentes equipamentos ou dispositivos deve-se proceder a análise da estabilidade da intensidade de iluminação do laser, conforme a Seção 3.1;
2. *Setup* miniaturizado: considera-se que a utilização de laser, microscópio digital e filtro neutro mais compactos permitirá uma maior miniaturização do analisador de semen-

tes. Assim como o desenvolvimento de uma estrutura monobloco para fixação desses equipamentos, conferindo maior rigidez e, por conseguinte, menor susceptibilidade às vibrações mecânicas;

3. Interferência da iluminação externa nas análises BSL: recomenda-se uma investigação mais abrangente dos efeitos da iluminação nas análises BSL, observando uma maior gama de níveis de iluminância e também a interferência de iluminações com diferentes temperaturas de cor;
4. Customização do aplicativo para análises BSL em dispositivos móveis: sugere-se modificar o *app* Portable Speckle, desenvolvido para ser executado em *smartphones* e *tablets*, especificamente para realização de análises de sementes. Desse modo, a fim de que o *software* não exija muita intervenção do usuário final, deve-se definir apenas um tipo de análise gráfica e também um único tipo de análise numérica, bem como, possuir o menor número possível de parâmetros configuráveis. Recomenda-se também, implementar a seleção da região a ser realizada a análise mediante o toque no local desejado da imagem da semente, uma vez que no Portable Speckle é possível selecionar apenas uma linha ou coluna. Por fim, é importante observar que o *software* original foi programado para capturar as imagens por intermédio da câmera traseira do *smartphone*, entretanto, esta rotina do programa deve ser modificada para receber as imagens da câmera que está instalada no interior do protótipo, que será ligada ao celular por meio da porta micro USB.
5. Construção do protótipo: propõem-se projetar um novo gabinete com um *design* mais ergonômico que melhore a usabilidade do equipamento.
6. Desenvolvimento de metodologias e procedimentos para análises BSL: sugere-se uma ampla pesquisa que defina metodologias e procedimentos para avaliar o vigor e viabilidade das sementes utilizando a técnica do BSL, entretanto não mais em *setups* laboratoriais, mas em equipamentos portáteis como o desenvolvido nesse trabalho. Propõem-se que pesquisadores da área comparem os resultados obtidos nesse protótipo com aqueles alcançados com metodologias conhecidas e empregadas como, por exemplo, os testes do Tetrázólio e de Condutividade Elétrica.

REFERÊNCIAS

- AHMED, A. **Eletrônica de Potência**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2000. 479 p.
- AMALVY, J. I. et al. Application of dynamic speckle interferometry to the drying of coatings. **Progress in Organic Coatings**, v. 42, n. 1, p. 89–99, 2001.
- ARDUINO EDUCATION. **Arduino Software (IDE) on Windows PCs**. 2019. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Main/Education>>.
- ARIZAGA, R. et al. Display of local activity using dynamical speckle patterns. **Optical Engineering**, v. 41, n. 2, p. 287–294, 2002.
- 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.
- ARS TECHNICAL. **IMAX with laser: Superb contrast, 4K resolution, and huge colour gamuts**. 2018. Disponível em: <<https://arstechnica.com/civis/viewtopic.php?f=2&t=1296001&start=80>>.
- ASAKURA, T. Dynamic properties of bio-speckles and their application to blood flow measurements. **Anritsu News**, v. 8, n. 38, p. 4–9, 1988.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO/CIE 8995-1: Iluminação de ambientes de trabalho — parte 1: Interior**. Rio de Janeiro, 2013. 46 p.
- AVITABILE, P. **Modal Testing: A Practitioner's Guide**. New York: Wiley, 2018.
- AZEVEDO, R. L. **Incremento germinativo da semente do café (Coffea arabica L.): aplicação de um campo magnético uniforme com monitoramento pelo biospeckle laser**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2018.
- BARBOSA, F. D. **Avaliação de Métodos para o Monitoramento da Qualidade do Café**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.
- BASU, R. Seed viability. seed quality: basic mechanisms and agricultural implications. **Haworth Press**, New York, p. 1–42, 1995.
- 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**. Tese (Doutorado) — Faculdade de Engenharia. UFRGS, Porto Alegre, 2006.
- BITTENCOURT, H. R. **Estatística aplicada à engenharia. Curso de especialização em engenharia de processos e de sistemas de produção**. [S.l.], 2014.
- BLOTTA, E. et al. Evaluation of speckle-interferometry descriptors to measuring drying-of-coatings. **Signal Processing**, v. 91, n. 10, p. 2395–2403, 2011.
- Braga Jr, R. A. **Bio-Speckle: Uma Contribuição para o Desenvolvimento de uma Tecnologia Aplicada à Análise de Sementes**. 117 p. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.
- Braga Jr, R. A. O biospeckle laser e sua utilização na agricultura – revisão. In: **Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 43**. Campo Grande: CONBEA/SBEA, 2014. Disponível em: <<http://conbea14.sbea.org.br/2014/anais/R0069-1.pdf>>.

- Braga Jr, R. A. 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.
- Braga Jr, R. A.; RIVERA, F. P.; MOREIRA, J. **A practical guide to biospeckle laser analysis: theory and software**. Lavras: Ed. UFLA, 2016.
- Braga Jr, R. A. et al. Reliability of biospeckle image analysis. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 45, p. 390–395, 2006.
- Braga Jr, R. A. et al. Potencial do biospeckle laser para avaliação da viabilidade de sementes. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 25, n. 3, p. 646–649, 2001.
- BRAGA, N. C. Driver para diodo laser (art870). **Instituto NCB**, 2018. Disponível em: <<https://newtoncbraga.com.br/index.php/eletronica/57-artigos-e-projetos/6415-art870>>.
- BRASIL. **Regras para análise de sementes**. Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Departamento Nacional de Produção Vegetal, 2009.
- BRIERS, J. D.; RICHARDS, G.; HE, X. Capillary-blood-flow monitoring using laser speckle contrast analysis (lasca). **Journal of Biomedical Optics**, v. 4, n. 1, p. 164–175, 1999.
- BRUKER CORPORATION. **MQ-ONE Seed Analyzer XL**. 2018. Disponível em: <<https://www.bruker.com/products/mr/td-nmr/minispec-mq-one/mq-one-seed-analyzer-xl/overview.html>>.
- BRUNEL, L. et al. Adaptive speckle imaging interferometry: a new technique for the analysis of microstructure dynamics, drying processes and coating formation. **Journal Optics Express**, Sydney, v. 15, n. 23, p. 15250–15259, 2007.
- BSLTL. **Biospeckle laser tool library**. 2019. <<http://www.nongnu.org/bsltl/>>. Acessado em: 15 out. 2019.
- CARDOSO, R. R.; Braga Jr, R. A. Enhancement of the robustness on dynamic speckle laser numerical analysis. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 63, p. 19–24, 2014.
- CARDOSO, R. R.; Braga Jr, R. A.; RABAL, H. J. Alternative protocols on dynamic speckle laser analysis. In: **International Conference on Speckle Metrology**. Vigo: SPIE, 2012. v. 8413, n. 84131F, p. 2131–2136.
- CARVALHO, P. R. **Boas práticas químicas em biossegurança**. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2013. 701 p.
- CASTRO, D. B. **Investigação experimental dos efeitos da vibração mecânica na técnica biospeckle laser para aplicação em equipamentos portáteis**. 74 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2020.
- CATALANO, M. D.; RIVERA, F. P.; Braga Jr, R. A. Viability of biospeckle laser in mobile devices. **Optik**, v. 183, p. 897–905, 2019.
- CESÁRIO, A. A. **Estimativa da vida em fadiga de componentes de implementos rodoviários através de métodos espectrais**. 130 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

CHAVES, M. J. **Desenvolvimento de uma metodologia para análise do biospeckle laser com portabilidade, acessibilidade e robustez.** 92 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

COHERENT INC. **Diode Laser Modules and Pattern Generators.** Santa Clara, CA, 2011. Disponível em: <<https://edge.coherent.com/assets/pdf/2011-Diode-Laser-Modules-and-Pattern-Generators-Catalog.pdf>>.

COSTA, A. G. et al. Determination of macaw fruit harvest period by biospeckle laser technique. **African Journal of Agricultural Research**, v. 12, n. 9, p. 674–683, 2017.

EMBRAPA RONDÔNIA. **Laboratório de Análise de Sementes.** Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2019. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/rondonia/infraestrutura/laboratorio-de-analise-de-sementes>>.

EWINS, D. J. **Modal testing: theory, practice, and application.** 2. ed. Hertfordshire: Research Studies Press, 2000. 576 p.

FACCIA, P. A. et al. Differentiation of the drying time of paints by dynamic speckle interferometry. **Progress in Organic Coatings**, v. 64, n. 4, p. 350–355, 2009.

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.

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

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

FRANÇA NETO, J. B.; KRZYŻANOWSKI, F. C.; HENNING, A. A. A importância do uso de sementes de soja de alta qualidade. **Informativo Abrates**, Londrina, v. 20, n. 1-2, p. 37–38, 2010.

FUJII, H.; ASAKURA, T. Statistical properties of image speckle patterns in partially coherent light. **Nouvelle Revue d'Optique**, v. 6, n. 1, p. 5, 1975.

FUJII, H. et al. Evaluation of blood flow by laser speckle image sensing. part 1. **Applied Optics**, v. 26, n. 24, p. 5321–5325, 1987.

GALLAIS, L.; GRIFFIN, M. J. Low back pain in car drivers: A review of studies published 1975 to 2005. **Journal of sound and vibration**, v. 298, n. 3, p. 499–513, 2006.

GODINHO, R. P. et al. Online biospeckle assessment without loss of definition and resolution by motion history image. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 50, p. 366–372, 2012.

GOMES, J. E. S. et al. Avaliação da estabilidade e desenvolvimento de um sistema portátil de alimentação para um laser aplicado em análises biospeckle laser em processos agropecuários. In: **Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 47.** Brasília: CONBEA/SBEA, 2018. Disponível em: <<http://publicacoes.conbea.org.br/anais/baixar/3404>>.

GOMES, J. E. S. et al. Avaliação da interferência das vibrações mecânicas na técnica biospeckle laser. In: **XXVIII Congresso da Pós-Graduação da UFLA**. Lavras: PRPG/UFLA, 2019. p. 1107–1113. Disponível em: <https://prpg.ufla.br/images/congresso/anais_CPG2019.pdf>.

GRIFFIN, M. J.; ERDREICH, J. Handbook of human vibration. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 90, n. 4, p. 2213, 1991.

HEYDECKER, W. Vigour. **Viability of Seeds**, London, v. 1, p. 209–252, 1972.

INAZAWA, P. G.; GUIMARÃES, G. d. A. **Construção e dimensionamento de um driver de laser de diodo para termoablação - LAIS**. 2016. 61 p. Monografia (Bacharelado em Engenharia Eletrônica), Universidade de Brasília, Brasília.

JORDAN, R. **Análise Modal Experimental. Notas de aula**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.

KADERLI, F.; GOMES, H. M. Análise do conforto quanto à vibração em automóveis de passeio. **Revista Liberato**, Novo Hamburgo, v. 12, p. 185–204, 2011.

KHALIL, A. Processing of laser speckle contrast images: study of mathematical models and use of nonlinear analyses to investigate the impact of aging on microvascular blood flow. **Signal and Image processing**, Université d'Angers, 2017.

KRZYŻANOWSKI, F. C.; VIEIRA, R. D.; FRANÇA NETO, J. B. Vigor de sementes: conceitos e testes. **Informativo Abrates**, Londrina, 1999.

KURENDA, A. et al. Effect of cytochalasin b, lantrunculin b, colchicine, cycloheximid, dimethyl sulfoxide and ion channel inhibitors on biospeckle activity in apple tissue. **Food Biophysics**, v. 8, n. 4, p. 290–296, 2013.

LIMA JR, M. J. V. Manual de procedimentos de análise de sementes florestais. **Informativo Abrates**, Londrina, 2011.

MARTINS, I. C. F. **Estudo do tempo de embebição de sementes para o método de condutividade elétrica para análise da viabilidade e vigor das sementes de *Caesalpinia ferrea* Martius, *Pterogyne nitens* Tul e *Copaifera langsdorffii* Desf.** 2011. 68 p. Monografia (Bacharelado em Engenharia Florestal), Universidade de Brasília, Brasília.

MASETTO, T. E.; FARIA, J. M. R.; QUEIROZ, S. E. E. Evaluation of the seed quality in *cedrela fissilis* - (meliaceae) by x-ray test. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 6, p. 1708–1712, 2008.

MINITAB LLC. **Visão geral de Teste de equivalência de 2 amostra**. 2020. Disponível em: <<https://support.minitab.com/pt-br/minitab/18/help-and-how-to/statistics/equivalence-tests/how-to/2-sample-equivalence-test/before-you-start/overview/>>.

MONTEIRO, R. V. A. et al. Computational and mathematical modeling of a buck driver type of a tubular led lamp. **Revista IEEE América Latina**, v. 14, n. 9, p. 2201–2209, 2016.

MOOR INSTRUMENTS. **Laser Speckle Contrast Imager moorFLPI-2**. 2018. Disponível em: <<https://us.moor.co.uk/product/moorflpi-2-laser-speckle-contrast-imager/291>>.

- MOREIRA, J. **Desenvolvimento de uma ferramenta computacional de livre acesso para o processamento de imagens do speckle laser dinâmico**. 153 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.
- MOREIRA, J.; CARDOSO, R. R.; Braga Jr, R. A. Quality test protocol to dynamic laser speckle analysis. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 61, p. 8–13, 2014.
- NATIONAL INSTRUMENTS. **Medição de vibração com acelerômetros**. 2019. Disponível em: <<http://www.ni.com/white-paper/3807/pt/>>.
- NÓBREGA, P. G. B.; HANAI, J. B. A análise modal na avaliação de estruturas de concreto pré-moldado. In: **Encontro Nacional de Pesquisa-Projeto-Produção em Concreto Pré-moldado**, 1. São Carlos: EESC-USP, 2005. Disponível em: <http://www.set.eesc.usp.br/1enppcpm/cd/conteudo/trab_pdf/132.pdf>.
- OLIVEIRA, A. B. d. M. **Eletrônica Analógica. Fundamentos e Guias de Aulas Práticas – Ensino Técnico. Volume 1 – Diodos**. Belo Horizonte: Gráfica do CEFET-MG, 2014.
- OMEGA ENGINEERING. **Células de Carga em Subminiatura para Tração e Compressão - Modelos Métricos e Imperiais**. 2019. Disponível em: <<https://br.omega.com/pptst/LCM201.html>>.
- PCB PIEZOTRONICS. **Accelerometer model: 352C33**. 2019. Disponível em: <<http://www.pcb.com/products.aspx?m=352C33>>.
- PEREIRA, L. S. et al. Conversor buck-boost – análise teórica e prática. **Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão**, v. 3, n. 2, 2011.
- POLITERM INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO. **Luxímetro Digital modelo POL-10**. 2019. Disponível em: <<http://www.politerm.com.br/Produto-c-1-Luximetro-Digital-modelo-POL-10-versao-83-83.aspx>>.
- PORCU, M. C. et al. Effectiveness of the frf curvature technique for structural health monitoring. **Construction and Building Materials**, v. 226, p. 173–187, 2019.
- PRA, A. L. D.; PASSOLI, L. I.; RABAL, H. J. Evaluation of laser dynamic speckle signals applying granular computing. **Signal Processing**, v. 89, n. 3, p. 266–274, 2009.
- PÉREZ, A. J. et al. A portable dynamic laser speckle system for sensing long-term changes caused by treatments in painting conservation. **Sensors**, Basel, v. 18, n. 1, 2018.
- QUESADA, R. C. **Controle de Vibrações**. São Paulo: Editora e Distribuidora Educacional, 2019. 200 p.
- RABAL, H. J.; Braga Jr, R. A. Dynamic laser speckle and applications. **CRC Press**, Boca Raton, 2008.
- RAO, S. **Vibrações mecânicas**. 4. ed. São Paulo: Pearson Universidades, 2008. 448 p.
- RICHARDS, L. M. et al. Low-cost laser speckle contrast imaging of blood flow using a webcam. **Biomedical optics express**, v. 4, n. 10, p. 2269–2283, 2013.
- ROBOCORE TECNOLOGIA. **Loja Virtual**. 2019. Disponível em: <<https://www.robocore.net/>>.

- RODRIGUES, S. et al. Aplicação do speckle dinâmico na análise de sementes de feijão (*phaseolus vulgaris* l.). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 9, n. 2, p. 119–124, 2007.
- RUZICKA, J. E.; DERBY, T. F. **Influence of Damping in Vibration Isolation**. Universidade de Michigan: Shock and Vibration Information Center, 1971. 269 p.
- SAVIONEK, D. **Medição e avaliação da exposição humana à vibração transmitida ao sistema mão-braço durante a atividade ciclística**. 2010. Monografia (Bacharelado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- SIEGMAN, A. E. **Lasers**. Mill Valley: University Science Books, 1986.
- SILVA, L. F. Vibrações de corpo inteiro e vibrações localizadas. In: _____. **Patologia do trabalho**. 2. ed. São Paulo: Atheneu, 2013. v. 1, cap. 12, p. 381–422.
- SILVA, M. L. **Caracterização biométrica, germinação e uso da técnica Biospeckle como ferramenta auxiliar na determinação da viabilidade de sementes de Araçá-boi**. 72 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Roraima, Boa Vista, 2016.
- SINGH, P. et al. Application of laser biospeckle analysis for assessment of seed priming treatments. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 169, p. 105212, 2020. ISSN 0168-1699. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169919308956>>.
- STANFORD RESEARCH SYSTEMS. **Model SR785 - Dynamic Signal Analyzer**. Sunnyvale, 2017. 548 p. Disponível em: <<https://www.thinksrs.com/downloads/pdfs/manuals/SR785m.pdf>>. Acesso em: 05 jul. 2019.
- STANFORD RESEARCH SYSTEMS. **Dynamic Signal Analyzer SR785 — 100 kHz 2-ch. FFT analyzer**. 2019. Disponível em: <<https://www.thinksrs.com/contact/about.html>>.
- SUTTON, D. B.; PUNJA, Z. K. Investigating biospeckle laser analysis as a diagnostic method to assess sprouting damage in wheat seeds. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 141, p. 238–247, 2017. ISSN 0168-1699. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169917302892>>.
- TBIT. **Analizador de sementes Groundeye Série L**. 2019. Disponível em: <<https://www.tbit.com.br/produtos/serie-l/>>.
- THE MODAL SHOP. **SmartShaker™ with Integrated Power Amplifier Models K2004E01 and K2007E01**. 2019. Disponível em: <<http://www.modalshop.com/excitation/SmartShaker-with-Integrated-Power-Amplifier?ID=272>>.
- THORLABS INC. **Filtros metálicos de densidade neutra arredondados variáveis continuamente**. 2019. Disponível em: <https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=1393>.
- VIANA, D. C. **Instrumentação óptica aplicada à análise de qualidade e tratamento de água e esgoto: soluções de baixo custo para estações de pequeno porte**. 200 p. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2017.

VIDAL, M. C.; SILVA, F. T. C. Biospeckle laser na determinação de atividade biológica em sementes de milho e soja. In: **IV Congresso Interno de Iniciação Científica da Universidade do Estado de Mato Grosso**. Cáceres: UNEMAT, 2008.

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, 1995.

ZDUNEK, A. et al. The biospeckle method for the investigation of agricultural crops: a review. **Optics and Lasers in Engineering**, London, v. 52, p. 276–285, 2014.

ZDUNEK, A. et al. Comparison of puncture test, acoustic emission and spatial-temporal speckle correlation technique as methods for apple quality evaluation. **Acta Agrophys**, v. 11, n. 1, p. 303–315, 2008.

ZHONG, X. et al. Dynamic laser speckle analysis via normal vector space statistics. **Optics Communications**, v. 305, p. 27–35, 2013.