



**DANIELA SEDA SALGADO DE BRITO**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE  
DADOS DE BAIXO CUSTO PARA MONITORAMENTO DA  
INTEGRIDADE ESTRUTURAL DE PONTES EM ESTRADAS  
RURAS**

**LAVRAS - MG**

**2020**

**DANIELA SEDA SALGADO DE BRITO**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS DE BAIXO  
CUSTO PARA MONITORAMENTO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL DE  
PONTES EM ESTRADAS RURAIS**

Dissertação 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 Mestre.

Prof. Dr. Fábio Lúcio Santos  
Orientador

**LAVRAS - MG**

**2020**

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

De Brito, Daniela Seda Salgado.

Desenvolvimento de um sistema de monitoramento de integridade estrutural de pontes em estradas rurais / Daniela Seda Salgado de Brito. - 2020.

60 p. : il.

Orientador: Fábio Lúcio Santos.

Dissertação (Mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2020.

Bibliografia.

1. Monitoramento. 2. Deslocamento. 3. Pontes de madeira. I. Santos, Fábio Lúcio. II. Título.

**DANIELA SEDA SALGADO DE BRITO**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS DE BAIXO  
CUSTO PARA MONITORAMENTO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL DE  
PONTES EM ESTRADAS RURAIS**

**DEVELOPMENT OF A LOW COST DATA ACQUISITION SYSTEM FOR THE  
STRUCTURAL HEALTH MONITORING OF BRIDGES ON RURAL ROADS**

Dissertação 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 Mestre.

APROVADA em 27 de maio de 2020.

Dra. Geice Paula Villibor UFV

Dr. Francisco Scinocca UFLA

Prof. Dr. Fábio Lúcio Santos  
Orientador

**LAVRAS - MG**

**2020**

*À minha mãe  
Maria Aparecida Seda  
pelo exemplo de vida e incentivo.*

*A minha filha  
Anna Elisa Sêda Tenório de Brito*

*Ao meu esposo  
Waldir Jr de Carvalho Tenório de Brito*

*Aos meus irmãos  
Juliana, Rita Helena, Teo e Giovana*

*Dedico*

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Departamento de Engenharia Agrícola, em nome da Universidade Federal de Lavras pelo apoio a pesquisa.

Ao professor Dr. Fabio Lúcio Santos pela orientação e atenção prestada durante a pesquisa.

Ao Doutorando Luciano Mendes, pela amizade e participação no desenvolvimento da pesquisa.

Aos meus irmãos e amigos pelo período de descontração durante a realização das pesquisas.

À todos que direta ou indiretamente me incentivaram para que esse trabalho fosse realizado.

Às bênçãos de Nossa Senhora de Fátima.

À Deus por permitir que esse trabalho fosse realizado.

## RESUMO

A conservação de pontes em estradas rurais tem sido um desafio, principalmente para órgãos da esfera municipal. A área da engenharia pode promover métodos que podem contribuir para solucionar tal desafio através de seus conhecimentos e pesquisas. Ou ainda, construindo novas pesquisas. Um problema característico é o uso constante dessas obras de arte que muitas vezes não têm programas de manutenção preventiva. Em grande parte dos casos, as patologias são detectadas e as providências são tomadas apenas quando a deterioração da estrutura atinge um estado crítico ou quando oferece risco aos usuários, necessitando interdições. O conhecimento do comportamento estrutural advindo desses problemas pode auxiliar na caracterização de sua utilização e definir métodos preventivos para sua conservação. Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de desenvolver um sistema de aquisição de dados, de baixo custo e curta duração, para monitoramento da integridade estrutural de pontes em estradas rurais. Para tal, o sistema foi validado em laboratório e em condições de campo. Considerou, em laboratório, cenário para vibração forçada e livre. Em campo a validação do sistema foi realizada sob vibração forçada. A partir dos resultados, verificou-se que o sistema proposto apresentou baixos erros de medição para baixas frequências quando comparado à sistemas comerciais. Observou-se que os erros do sistema desenvolvido tende a aumentar para frequências superiores a 25 Hz. O sistema proposto considerando as frequências e amplitudes que pontes em estradas rurais operam, pode ser empregado para seu monitoramento, e também ser indicado para o estabelecimento de programas de manutenção, bem como ser empregado para a implementação de programas de conservação por poderes públicos.

**Palavras-chave:** Monitoramento. Deslocamento. Pontes de madeira. Manutenção preventiva.

## ABSTRACT

The conservation of bridges on rural roads is challenging, especially for municipal bodies. Engineering can develop methods to contribute to solving this challenge through knowledge and research. A specific problem is the constant use of these works of art, which often receive no preventive maintenance programs. In most cases, pathologies are detected, and measures are taken only when the deterioration of the structure reaches a critical state or when it poses a risk to users, requiring interdiction. Knowledge of the structural behavior arising from these problems can help characterize its use and define preventive methods for its conservation. This work aimed to develop a low-cost and short-term data acquisition system for the Structural Health Monitoring (SHM) of bridges on rural roads. For this, we validated a system the laboratory and under field conditions. In the laboratory, we considered the scenario for forced and free vibration, while on the field, we only considered forced vibration. The results showed that the proposed system had low measurement errors for low frequencies when compared to commercial systems. The system errors tend to increase for frequencies above 25 Hz. The proposed system considering the frequencies and amplitudes of bridges on rural roads, can be used to monitor these structures and indicated for the establishment of maintenance programs. The system can also be employed for implementing conservation programs by the public authority.

**Keywords:** Monitoring. Displacement. Wooden bridges. Preventive maintenance.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma Típico de Monitoramento. ....	18
Figura 2 - Sistema de Aquisição de Dados National Instruments. ....	24
Figura 3 - Acelerômetro Uniaxial National Instruments.....	24
Figura 4 - Configuração básica de um sistema de aquisição de dados. ....	24
Figura 5 - Aparato experimental empregado no processo de análise e validação do sistema.....	25
Figura 6 - Dispositivo Eletromagnético de excitação (A) e inversor de frequência (B).....	26
Figura 7 - Acelerômetro triaxial MPU- 6050.....	26
Figura 8 - Acelerômetros utilizados na validação do sistema nas vigas Metálica e de Madeira. ....	26
Figura 9 - Microcontrolador Arduino MEGA.....	27
Figura 10 - Case para armazenamento do Microcontrolador Arduino MEGA.....	27
Figura 11 - Suporte para armazenamento do acelerômetro triaxial MPU- 6050.....	27
Figura 12 - Viga metálica e de madeira biengastada.....	28
Figura 13 - Viga metálica e de madeira engastadas.....	29
Figura 14 - Representação esquemática da viga biengastada empregada no processo de teste e validação do sistema de medição.....	30
Figura 15 - Representação esquemática da viga engastada empregada no processo de teste e validação do sistema de medição.....	31
Figura 16 - Representação esquemática da viga engastada em vibração livre empregada no processo de teste e validação do sistema de medição.....	32
Figura 17 - Impressora 3D, modelo Orion Delta CNC.....	34
Figura 18 - Ponte de Madeira sobre o Rio Cervo Lavras / Carmo da Cachoeira.....	35
Figura 19 - Localização dos acelerômetros - eixo perpendicular ao tabuleiro da ponte.....	36
Figura 20 - Localização dos acelerômetros <i>in loco</i> . ....	36
Figura 21 - Posicionamento dos acelerômetros na Estrutura.....	36

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Forma gerada na saída do acelerômetro.....	33
Gráfico 2 - Média RMS para o acelerômetro localizado no vão central na Viga Biengastada de Metal.....	39
Gráfico 3 - Média RMS para o acelerômetro localizado a $\frac{1}{4}$ do vão na Viga Biengastada de Metal.....	40
Gráfico 4 - Média RMS para o acelerômetro localizado no vão central da Viga Biengastada de Madeira.....	41
Gráfico 5 - Média RMS para o acelerômetro localizado a $\frac{1}{4}$ do vão da Viga Biengastada de Madeira.....	42
Gráfico 6 - Média RMS para o acelerômetro localizado no vão central na Viga Engastada de Metal.....	43
Gráfico 7 - Média RMS para o acelerômetro localizado na extremidade do vão na Viga Engastada de Metal.....	43
Gráfico 8 - Média RMS para o acelerômetro localizado no vão central na Viga Engastada de Madeira.....	44
Gráfico 9 - Média RMS para o acelerômetro localizado na extremidade do vão na Viga Engastada de Madeira.....	45
Gráfico 10 - Aceleração em Função do Tempo para o Sistema Desenvolvido.....	47
Gráfico 11 - Aceleração em Função do Tempo para o Sistema Comercial.....	47
Gráfico 12 - Razão de Amortecimento ( $\zeta$ ) para o acelerômetro localizado no vão central na Viga Engastada de Metal.....	48
Gráfico 13 - Razão de Amortecimento ( $\xi$ ) para o acelerômetro localizado na extremidade do vão na Viga Engastada de Metal.....	49
Gráfico 14 - Razão de Amortecimento ( $\xi$ ) para o acelerômetro localizado no vão central na Viga Engastada de Madeira.....	50
Gráfico 15 - Razão de Amortecimento para o acelerômetro localizado na extremidade do vão na Viga Engastada de Madeira.....	50
Gráfico 16 - Média RMS para os acelerômetros localizados no vão central da Ponte de Madeira - Pontos A - B - C - Motocicleta.....	52
Gráfico 17 - Média RMS para os acelerômetros localizados no vão central da Ponte de Madeira - Pontos A - B - C - Utilitário.....	53

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipo de veículos conforme RNTRC.....	37
Tabela 2 - Erro percentual entre os sistemas calculado por meio da Equação 2 no vão central na Viga Biengastada de Metal.....	39
Tabela 3 - Erro percentual entre os sistemas calculado por meio da Equação 2 a $\frac{1}{4}$ do vão na Viga Biengastada de Metal.....	40
Tabela 4 - Erro percentual entre os sistemas calculado por meio da Equação 2 no vão central da Viga Biengastada de Madeira.....	41
Tabela 5 - Erro percentual entre os sistemas calculado por meio da Equação 2 a $\frac{1}{4}$ do vão da Viga Biengastada de Madeira.....	42
Tabela 6 - Erro percentual entre os sistemas calculado por meio da Equação 2 no vão central na Viga Engastada de Metal.....	43
Tabela 7 - Erro percentual entre os sistemas calculado por meio da Equação 2 na extremidade do vão na Viga Engastada de Metal.....	44
Tabela 8 - Erro percentual entre os sistemas calculado por meio da Equação 2 no vão central na Viga Engastada de Madeira.....	44
Tabela 9 - Erro percentual entre os sistemas calculado por meio da Equação 2 na extremidade do vão na Viga Engastada de Madeira.....	45
Tabela 10 - Erro percentual entre os sistemas calculado por meio da Equação 2 no vão central na Viga Engastada de Metal.....	48
Tabela 11 - Erro percentual entre os sistemas calculado por meio da Equação 2 na extremidade do vão na Viga Engastada de Metal.....	49
Tabela 12 - Erro percentual entre os sistemas calculado por meio da Equação 2 no vão central na Viga Engastada de Madeira.....	50
Tabela 13 - Erro percentual entre os sistemas calculado por meio da Equação 2 no vão na Viga Engastada de Madeira.....	51
Tabela 14 - Erro percentual entre os sistemas calculado por meio da Equação 2 no vão central da Ponte de Madeira - Ponto A - B - C - Motocicleta.....	52
Tabela 15 - Erro percentual entre os sistemas calculado por meio da Equação 2 no vão central da Ponte de Madeira - Ponto A - B - C - Utilitário.....	53

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	12
2	<b>OBJETIVOS</b> .....	14
2.1	Objetivo geral.....	14
2.2	Objetivos específicos.....	14
3	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	15
3.1	Estrutura Mista .....	15
3.2	Emprego de Madeira Rolixa .....	15
3.3	Ausência de Manutenção Preventiva.....	16
3.4	Monitoramento em Pontes .....	16
3.5	Plano de Monitoramento.....	18
3.6	Structural Health Monitoring - SHM.....	20
3.7	Monitoramento na Engenharia Civil.....	20
3.8	Sensores .....	21
3.9	Segurança .....	21
3.10	Monitoramento por meio da análise da estrutura quando sujeita a vibrações mecânicas .....	21
3.11	Instrumentação.....	21
4	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	23
4.1	Descrição do Sistema Comercial.....	23
4.2	Descrição e Desenvolvimento do Sistema de Medição Desenvolvido.....	24
4.3	Análise e Validação do Sistema em Laboratório.....	27
4.3.1	Cenários para Vibração forçada.....	28
4.3.2	Cenários para Vibração Livre .....	29
4.4	Validação das Vigas em Vibração forçada .....	30
4.4.1	Cenário: vigas metálica e de madeira biengastadas.....	30
4.4.2	Cenário: vigas metálica e de madeira engastadas .....	31
4.5	Validação das vigas em Vibração Livre .....	32
4.5.1	Cenários: Viga metálica e de madeira engastadas .....	32
5	<b>DESENVOLVIMENTO DE UMA ESTRUTURA DE SUPORTE</b> .....	34
6	<b>APLICAÇÃO DO SISTEMA</b> .....	35
7	<b>Resultados e Discussão</b> .....	38
7.1	<b>Vibração Forçada</b> .....	38
7.1.1	<b>Resultado RMS nas Vigas biengastadas</b> .....	38
7.1.1.1	Viga biapoiada de Metal .....	38
7.1.1.2	Viga biapoiada de Madeira.....	40
7.1.2	<b>Resultado RMS nas Vigas Engastadas</b> .....	42
7.1.2.1	Viga Engastada de Metal .....	42
7.1.2.2	Viga Engastada de Madeira.....	44
7.2	<b>Vibração Livre</b> .....	46
7.2.1	<b>Resultado da Razão de Amortecimento</b> .....	46
7.2.1.1	Viga Engastada de Metal .....	46
7.2.1.2	Viga Engastada de Madeira.....	49
7.3	<b>Vibração Forçada em Campo</b> .....	51
7.3.1	<b>Resultado RMS na Ponte de Madeira sobre o Rio Cervo - Lavras / Carmo da Cachoeira</b> .....	51
8	<b>CONCLUSÃO</b> .....	55
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	56

## 1 INTRODUÇÃO

O escoamento de produtos agrícolas das propriedades rurais é feito por meio das estradas das propriedades até as estradas vicinais e destas até a malha viária. Estas ligações são feitas, muitas vezes, por pontes, em sua maioria de pequeno porte. As pontes de madeira em estradas rurais vicinais se destinam a interligar regiões cuja importância seja muito grande no ponto de vista econômico e social, mas podem ser utilizadas em substituição às soluções convencionais mais complexas e, usualmente, mais onerosas (MORAES, 2007).

Calil Junior et al. (2006) enfatizam a necessidade de que estradas rurais assegurem a entrada de insumos nas propriedades agrícolas, bem como o livre deslocamento das populações do meio rural, sendo que esse processo envolve o desenvolvimento dos municípios do ponto de vista econômico e social.

De acordo com Soriano e Mascia (2009), as pontes podem ser definidas como obras de arte destinadas à transposição de obstáculos naturais ou não, visando à locomoção de veículos diversos e pedestres com segurança e conforto. Nas estradas rurais, essas obras são de fundamental importância para integração regional e, do ponto de vista do setor do agronegócio, proporcionando condições para o tráfego de caminhões e máquinas durante a safra, bem como no escoamento final da produção agrícola.

A construção de pontes utiliza vários tipos de materiais em sua concepção, tendo do engenheiro civil a responsabilidade da seleção do material adequado que deve fazê-lo baseando-se no maior número possível de informações (BILLINGTON, 2003). Dentre os materiais de uso comum na construção rural, destaca-se a madeira, que do ponto de vista ambiental, constitui-se num recurso renovável que requer baixo consumo energético para a sua produção (GUTKOWSKI et al., 2004; STEINBERG et al., 2003).

As pontes de madeira constituem excelente opção para a zona rural, não só pela disponibilidade de matéria prima, como também por suas características físicas e mecânicas, o que reforça a sua viabilidade econômica (CALIL JÚNIOR; GOÉS, 2014).

A NBR 14037:1997, cita que uma das principais causas do descaso com a manutenção é a definição do edifício em si como objetivo final do processo construtivo, ou seja, quando da entrega da edificação ao proprietário. Esta inversão de valores, derivada da lógica da mercadoria, própria do sistema econômico de mercado vigente, coloca o real motivo pelo qual a edificação foi construída, que é a satisfação das necessidades dos usuários, em segundo plano, o que acontece com as obras de arte (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 1997).

Com o passar do tempo, os inconvenientes resultantes da inexistência de atividades de manutenção preventivas e periódicas se tornam mais frequentes, e ameaçam o sentimento de segurança dos usuários e, por que não dizer, a correlação entre homem e ambiente.

Apesar disso, ao contrário do que se espera, as atividades de manutenção ainda são vistas como um problema financeiro de baixa prioridade, enquanto deveriam ser consideradas como um investimento, retardando o envelhecimento e agregando valor ao produto (CONSELHO REGIONAL DE ENGENHARIA E AGRONOMIA DO PARANÁ - CREA-PR, 2011).

Constata-se, assim, a urgente necessidade de implantar nas estradas municipais e estaduais os avanços tecnológicos atuais para a construção, monitoramento e recuperação das pontes de madeira (CALIL JÚNIOR; GOÉS, 2014). Portanto, para geração de políticas públicas em âmbito municipal, a utilização de sistemas de monitoramento de baixo custo pode ser uma alternativa para a implantação de programas de manutenção desse tipo de estrutura.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Propor um sistema de aquisição de dados de baixo custo para monitoramento da integridade estrutural de pontes em uso de estradas rurais.

### **2.2 Objetivos específicos**

- a) Desenvolver um sistema de aquisição de dados para o monitoramento de pontes em uso de estradas rurais.
- b) Validar o sistema de aquisição de dados em condições de laboratório.
- c) Validar o sistema de aquisição de dados em condições de campo.

### **3 REFERENCIAL TEÓRICO**

#### **3.1 Estrutura Mista**

A madeira, conjuntamente com o concreto, pode constituir uma seção mista, resultando em diversas vantagens relacionadas, por exemplo, à resistência e à durabilidade da construção, conforme descrevem Gelfi *et al.* (2002) e Miotto e Dias (2006).

#### **3.2 Emprego de Madeira Roliça**

Segundo Calil Júnior e Góes (2014), o emprego da madeira roliça viabiliza umas das técnicas mais competitivas dos pontos de vista técnico e econômico para construir pontes, permitindo que a madeira seja utilizada em sua forma natural, o que diminui os níveis de industrialização, manipulação e transporte, aumentando a velocidade de construção e melhorando seu aproveitamento, possibilitando reutilização integral, agregando valor, destacando-a como um material de construção ecologicamente correto, por ser proveniente da atividade de reflorestamento.

Pigozzo (2004) destaca que o custo de uma ponte de madeira construída com técnica atualizada é baixo, sua construção é relativamente fácil e durabilidade amplamente satisfatória, que devem ser construídas com peças de madeira roliça apresentando eixo longitudinal praticamente retilíneo, seção transversal relativamente uniforme e sem defeitos, não apresentando presença de ataque de agentes bióticos, que de acordo com Calil Junior et al. (2006) são principalmente os fungos, insetos e furadores marinhos. Estes organismos necessitam de algumas condições para sua sobrevivência, entre elas: temperatura, oxigênio, umidade e fonte adequada de alimento, geralmente a madeira. Embora o grau de dependência destes parâmetros seja variável, cada um precisa estar presente para ocorrer a deterioração.

Moraes (2007) ressalta a tendência atual em considerar estruturas que, além de eficientes, sejam de execução rápida e custo baixo para que elas possam ser construídas, inclusive, em locais de difícil acesso e pouca infraestrutura. Neste contexto, mostra-se que a alternativa mais simples para a construção das pontes mistas madeira-concreto é a utilização de vigas simples de madeira (roliças ou serradas, justapostas ou espaçadas) suportando o tabuleiro de concreto.

### 3.3 Ausência de Manutenção Preventiva

A necessidade de pontes novas em estradas rurais e a recuperação das existentes é discutido e determinado, principalmente no âmbito municipal, pois essas estruturas apresentaram deterioração precoce causada pela ausência de programas de manutenção preventiva. Em grande parte dos casos, as patologias são detectadas e as providências são tomadas apenas quando a deterioração da estrutura atinge um estado crítico ou quando oferece risco aos usuários, necessitando interdições (CALLIL JUNIOR; LAHR; DIAS, 2003).

### 3.4 Monitoramento em Pontes

De acordo com Santos (2014), o monitoramento e ensaio de pontes é uma atividade com uma forte base experimental, cuja utilidade tem vindo a suscitar o interesse crescente de projetistas e responsáveis pela gestão de obras de arte. Os requisitos para esta atividade têm aumentado nas últimas décadas, estendendo-se às questões associadas com a durabilidade dos materiais e das estruturas, o que tem estimulado novos desenvolvimentos.

Para suprir certas deficiências, como identificar a existência de fissuras, deformações excessivas que embora seja de fácil execução, esta técnica de inspeção é subjetiva, pois permite que mudanças nas propriedades dos materiais, que compõem os elementos estruturais, passem despercebidas, assim, utiliza-se o monitoramento de estruturas, que trabalha por meio da instrumentação da estrutura e é capaz de realizar a inspeção através dos parâmetros modais dinâmicos.

A definição desses parâmetros permite conhecer o comportamento dinâmico do sistema estrutural e definir a necessidade da manutenção (PRAVIA; BRAIDO, 2015). Ainda sob as considerações de Pravia e Braido (2015), verificada a necessidade de se realizar a inspeção em pontes, podem-se utilizar ferramentas atuais para a correta avaliação da estrutura. A identificação estrutural, também conhecido como sistema de monitoramento, encaixa-se neste contexto por ser capaz de indicar a necessidade de fortalecimento ou substituição de pontes existentes por meio da instrumentação da estrutura (WIBERG, 2008). A obtenção de dados dinâmicos pode ser realizada através da instalação de acelerômetros nas obras de arte especiais a serem avaliadas.

O monitoramento de uma estrutura é uma forma distinta de avaliação do seu desempenho com base em valores diretamente medidos *in situ*, permitindo a verificação das teorias de comportamento estrutural consideradas no modelo e análise dessa estrutura, bem

como a detecção precoce de eventuais deficiências estruturais. Consiste na coleta periódica e organizada de informação, seguida de uma análise sistemática dessa informação.

O constante avanço da tecnologia, o uso constante de plataformas baseadas na internet, nano sensores, Big Data, entre outros, o que vem modificando os modos tradicionais de trabalho e, por consequência, atingindo primeiramente as áreas relacionadas a engenharia. Sensores localizados em dispositivos móveis estão acessíveis a grande parcela da população e vão além de otimizar a experiência dos usuários com seus dispositivos. Os sensores disponíveis nestes equipamentos podem ser utilizados para a determinação de deslocamentos, através do uso dos seus acelerômetros e giroscópio, conforme o trabalho de Mlenek et al. (2017) que visa verificar o emprego de Smartsensors no monitoramento de vibrações de estruturas comparadas com métodos tradicionais baseados em mensurações topográficas e geodésicas.

A utilidade do monitoramento estrutural está diretamente associada à segurança, devido à detecção prematura de comportamentos anômalos reduzindo o risco de colapso súbito, contribuindo assim para a preservação de vidas humanas e de bens materiais. Também no caso de ocorrência de um evento extremo, como um sismo, incêndio ou colisão de veículos com elementos estruturais, a informação coletadas através do sistema de monitoramento permite antecipar e fundamentar decisão sobre as consequências desse evento para a estrutura e sobre as condições de segurança remanescentes (SANTOS, 2014).

A obtenção de dados dinâmicos pode ser realizada através da instalação de acelerômetros nas obras de arte especiais a serem avaliadas, além disso, as leituras dos dados de vibração são ideais para serem utilizados como base para um sistema de monitoramento contínuo, desde que sejam de fácil coleta e forneçam o comportamento global relativo através de poucos sensores (OWEN; PEARSON, 2004).

Negrão e Simões (1992), evidenciam que o monitoramento não é exclusivo apenas para estruturas que necessitem de recuperação. No caso de futuras pontes, um consequente aumento do comprimento do vão, combinado com o desejo de utilizar lajes do tabuleiro mais esbeltas, levanta preocupações acerca do comportamento dinâmico. Mas, as novas pontes também devem ser monitoradas antes de entrar em operação, onde estão em perfeito estado fornecendo informações úteis para uma avaliação posterior.

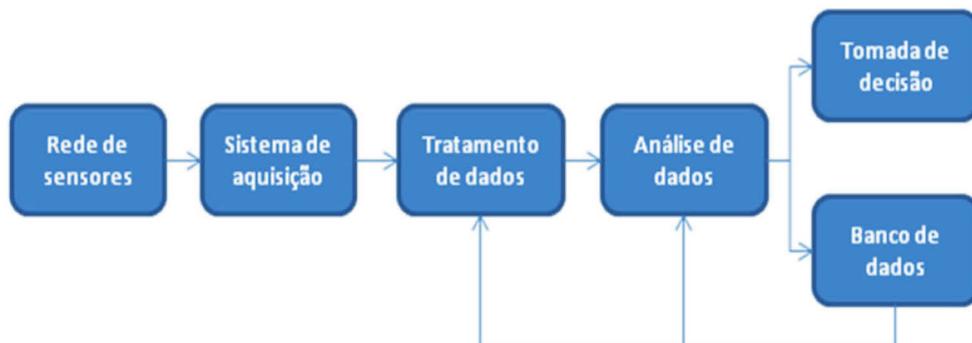
Louis (2010), ao abordar a sustentabilidade das estruturas, destaca-se a longevidade que as mesmas podem atingir se obedecerem a três parâmetros: (a) aumento da capacidade de transporte; (b) aumento da vida útil de serviço e; (c) aprimoramento do gerenciamento,

fortalecendo e reparando sistemas. O aumento de vida útil pode ser obtido apenas com a execução adequada de inspeção e manutenção.

As tecnologias de implementação e medição de diagnóstico necessárias para executar o Structural Health Monitoring (SHM) geralmente produzem uma grande quantidade de dados. Quase todos os procedimentos dessa extração executam inerentemente alguma forma de compactação de dados. A compactação de dados em vetores de característica de pequena dimensão é necessária para obter estimativas precisas da distribuição estatística dos dados. Como exemplo, o uso de erros residuais entre as previsões do modelo auto-regressivo e os históricos de tempo medidos reais representa um vetor de característica unidimensional que também pode ser pensado em uma forma de condensação de informações.

Outra relevância do monitoramento estrutural, é a utilização da informação obtida para uma programação mais eficiente das ações de manutenção, tornando-se assim possível prolongar a vida útil de uma estrutura, minimizando os custos diretos associados a intervenções e os custos indiretos decorrentes de restrições de funcionamento. O monitoramento de estruturas consiste na aquisição e organização de dados, seguida de uma análise sistemática dessa informação, conforme Figura 1.

Figura 1 - Fluxograma Típico de Monitoramento.



Fonte: Araújo Neto (2013).

### 3.5 Plano de Monitoramento de estruturas

Segundo Pravia e Braido (2015), para suprir deficiências de inspeção, o monitoramento de estruturas é capaz de realizar a inspeção a partir de parâmetros modais. Colombo et al. (2014) consideram a necessidade de criar um plano de monitoramento de estruturas das obras. Para tal, sugere alguns pontos relevantes, tais como:

- a) tipo de estrutura a ser investigada;
- b) informações obtidas na documentação existente disponível;
- c) Informações obtidas através do histórico de inspeções já realizadas ao longo dos anos na obra e através da inspeção preliminar atual;
- d) análises estruturais preliminares.

Embora exista grande diversidade de situações específicas, alguns dos casos em que o monitoramento é mais utilizado são os seguintes (INAUDI; WALDER, 2009):

- a) estruturas novas em que são utilizadas técnicas inovadoras;
- b) estruturas que existam incertezas sobre sua construção no que diz respeito à qualidade dos materiais ou da mão de obra;
- c) estruturas que possuem grande importância econômica ou social;
- d) estruturas existentes com deficiências identificadas ou sua condição suscite dúvidas.

Segundo Sohn et al. (2002), a avaliação operacional corresponde a quatro questões referentes à implementação de um sistema de monitoramento de integridade:

- a) como os danos são definidos para o sistema que está sendo monitorado;
- b) quais são as condições, tanto operacionais quanto ambientais, sob as quais o sistema a ser monitorado funciona;
- c) quais são as limitações na aquisição de dados no ambiente operacional;
- d) quais são os motivos tecnológicos e/ou de segurança de vida útil para realizar o monitoramento.

Ainda, conforme literatura de Sohn et al. (2002), no processo de Monitoramento de Integridade Estrutural, a parte de aquisição de dados envolve a seleção de tipos de sensores a serem utilizados, os locais onde os sensores devem ser colocados, o número de sensores a serem utilizados e o hardware de aquisição, armazenamento e transmissão de dados. Outra consideração é com que frequência os dados devem ser coletados. Os tipos de estruturas que têm sido o foco dos estudos de monitoramento recém-revisados são aeronaves, infraestrutura civil como pontes e edifícios, além de amostras de laboratório como vigas e placas com material compósito.

### **3.6 Monitoramento de Integridade Estrutural (Structural Health Monitoring – SHM)**

Para Farrar e Doebling (1999), o processo de implementação de uma estratégia de detecção de danos para a indústria aeroespacial, civil e infraestrutura de engenharia mecânica é chamada de Monitoramento de Integridade Estrutural (Structural Health Monitoring - SHM). Os autores acreditam que problemas relacionados a SHM sejam, fundamentalmente, de reconhecimento estatístico de padrões. Portanto, os estudos de detecção de danos aqui analisados estão resumidos no contexto de uma paradigma de reconhecimento de padrões estatísticos. Este paradigma pode ser descrito como um processo. Segundo estudos de detecção de danos analisados na pesquisa de Sohn et al. (2002) estão resumidos no contexto de um paradigma de coleta de padrões estatísticos que pode ser descrito como um processo com:

- a) avaliação operacional;
- b) aquisição de dados e tratamento;
- c) extração e condensação de informações;
- d) desenvolvimento de modelo estatístico.

### **3.7 Monitoramento na Engenharia Civil**

Um exemplo do uso do monitoramento na engenharia civil pode ser encontrado no trabalho de Branco e Paulo (2012), no qual é apresentada toda a sequência de projetos e ações para a construção de pontes com vida útil de projeto de mais de 100 anos. Uma definição simples e direta para monitoramento é uma sequência de observações ou mensurações sistemáticas devidamente registradas e acompanhadas de avaliação posterior. No caso do monitoramento estrutural, parâmetros relativos à condição e desempenho da estrutura são observados, gravados e avaliados com o intuito de fornecer de forma precisa e ágil o estado patológico na qual a estrutura se encontra (ARAÚJO NETO, 2013).

### **3.8 Sensores**

Segundo o Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM), um sensor é um instrumento que é diretamente afetado por um fenômeno, corpo ou substância que carrega a quantidade a ser medida e converte em um sinal que pode ser lido por um observador ou um instrumento (INMETRO 2008). As etapas anteriores culminam na decisão por um sensor que deve corresponder às exigências definidas. Hoje, existem diversas tecnologias usadas para o SHM.

### **3.9 Segurança**

Apesar do SHM não ser capaz de evitar acidentes, os parâmetros lidos pelo sistema e as análises que se fazem dinamicamente evitam um acúmulo de danos e, conseqüentemente, diminuem a probabilidade de falhas. Outra questão importante é a capacidade de aviso na eminência de um colapso, que pode evitar mortes e a avaliação da condição da estrutura depois de um acidente (HOLLAND, 2011).

### **3.10 Monitoramento por meio da análise da estrutura quando sujeita a vibrações mecânicas**

O monitoramento de pontes pode ser feito por meio da análise do comportamento da estrutura, quando sujeita a vibrações mecânicas, segundo o estudo de Pravia e Braido (2015), que apresentaram uma forma alternativa de inspeção para pontes considerando os parâmetros dinâmicos da estrutura. O processo compreendeu três etapas: fazer a estrutura vibrar; extrair a resposta da aceleração por meio de acelerômetros e analisar as respostas obtidas.

### **3.11 Instrumentação**

Carvalho Neto e Veloso (2016) analisaram pontes e as instrumentaram com extensômetros e acelerômetros, utilizando dois módulos de aquisição remotamente sincronizados para a aquisição de dados, com equipamento modelo ADS-2000 da empresa Lynx® a uma taxa de aquisição mínima de 100 Hz. Para a medição das vibrações devidas à passagem dos trens e também para realizar a análise modal experimental, foram usados piezo-acelerômetros apropriados para medidas em baixa frequência da marca Wilcoxon® dispostos

verticalmente e transversalmente ao longo do tabuleiro de cada ponte. Os acelerômetros foram colocados em seções distantes a um quarto do comprimento do vão da ponte instrumentada, os resultados mostraram que o monitoramento e análise estrutural das pontes e viadutos ferroviários da Estrada de Ferro dos Carajás adotada permitiram uma avaliação precisa das suas condições de segurança, tendo em conta o seu estado atual depois de mais de 20 anos em operação. Verificou-se ainda em todas as pontes estudadas que os fatores de amplificação dinâmica medidos foram menores que os calculados a partir das recomendações normativas. Os resultados dessa pesquisa permitiram identificar os elementos estruturais e as pontes e viadutos que se encontravam em condições mais críticas e requerem inspeção e manutenção mais cuidadosas.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

O sistema de aquisição de dados de baixo custo para monitoramento da integridade estrutural de pontes, foi validado em laboratório e em condições de campo. Durante o processo de validação, os resultados do sistema de aquisição de dados do sistema de baixo custo foram comparados com um sistema comercial. O trabalho foi realizado no Laboratório de Vibrações Mecânicas do Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras. As validações e aplicação do sistema em campo foram realizadas em uma ponte localizada em estrada rural no Município. Essa ponte foi construída empregando-se tabuleiro de madeira com estrutura do mesmo material.

### 4.1 Descrição do Sistema Comercial

O sistema de monitoramento comercial utilizado foi desenvolvido pela *National Instruments*, sendo composto por um Chassi CompactDAQ cDAQ-9174 de 4 slots, que opera a uma temperatura de -20 a 55°C com alimentação por USB, projetado para sistemas portáteis de pequeno porte que fazem medições com sensores, um módulo de entrada de som e vibração de 4 canais NI9234, com 4 canais de entrada analógica, faixa de tensão de entrada analógica de -5 a 5V, taxa de amostragem máxima de 51,2 kS/s/ch que mede sinais de sensores piezoelétricos com eletrônica embarcada (IEPE) e outros tipos de sensores. Para configuração e armazenamento do dados coletados foi empregado um computador portátil. O sensor comercial utilizado foi um acelerômetro uniaxial de alta sensibilidade fabricado pela PCB com sensibilidade de 99,5 mV/g.

Os dados de aceleração no domínio do tempo foram obtidos, armazenados e tratados por meio do software LabView®<sup>®</sup>, a partir de um programa elaborado para a realização da aquisição de dados, com a função de apresentá-los enquanto lidos em tela na forma gráfica e numérica, em tempo real. Nas Figuras 2 e 3 estão ilustrados alguns componentes do Sistema Comercial da *National Instruments*.

Figura 2 - Sistema de Aquisição de Dados National Instruments.



Fonte: National Instruments - AI (2020).

Figura 3 - Acelerômetro Uniaxial National Instruments.

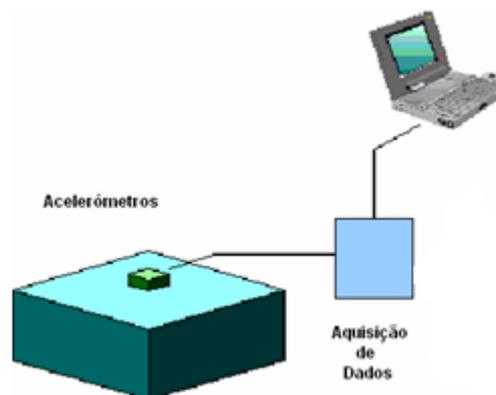


Fonte: National Instruments - AI (2020).

#### 4.2 Descrição e desenvolvimento do sistema de aquisição de dados desenvolvido

O Sistema de aquisição de dados desenvolvido, foi composto por um acelerômetro, processador para aquisição de dados e um notebook para armazenamento dos mesmos. Na Figura 4, é ilustrado, de forma esquemática, um sistema básico para aquisição de dados.

Figura 4 - Configuração básica de um sistema de aquisição de dados.

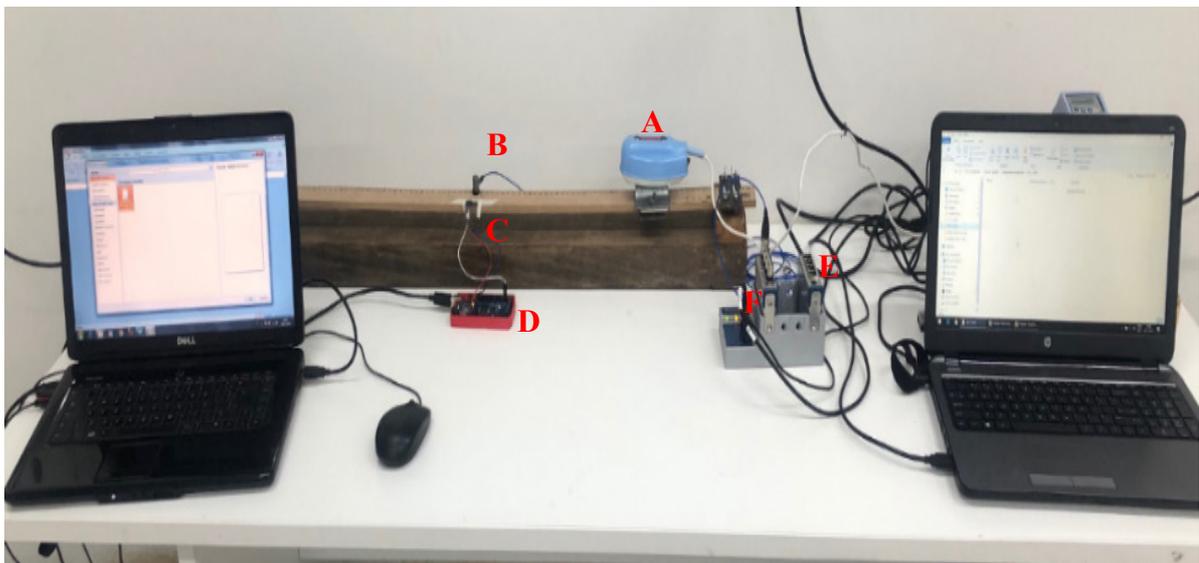


Fonte: Adaptado da ABNT (2006).

O Sistema de medição foi montado em um aparato experimental empregado no processo de análise e validação do sistema, ilustrado na Figura 5. Tal sistema medição e o aparato de análise e validação foram compostos pelos seguintes itens:

- a) dispositivo eletromecânico de excitação (FIGURA 6);
- b) acelerômetro triaxial MPU- 6050, com faixa de aceleração, de 2 a 16 g (FIGURA 7), sendo configurado a 16 g, localizado na viga metálica (FIGURA 8) e de madeira (FIGURA 8) de dimensões 5 cm x 60 cm x 0,2 cm e 5 cm x 100 cm x 0,8 cm, respectivamente;
- c) microcontrolador Arduino MEGA (FIGURA 9) de 256 KB de Flash, 8 KB de RAM e 4 KB de EEPROM, para coleta dos dados processados e armazenados em um Notebook;
- d) dispositivo de suporte do aparato eletrônico desenvolvido em PLA, poliácido láctico, que é um polímero constituído por moléculas de ácido láctico, com utilização de recursos renováveis (FIGURAS 10 e 11) a partir de uma impressora 3D, demonstrada na Figura 17, para dar forma ao sistema desenvolvido, além de minimizar os efeitos de impactos e outras ações.

Figura 5 - Aparato experimental empregado no processo de análise e validação do sistema.



Fonte: Da autora (2020).

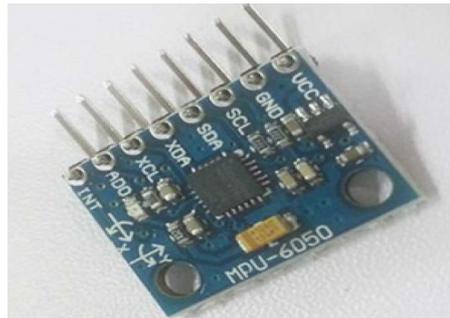
Legenda: (A) Dispositivo Eletromecânico de excitação; (B) Acelerômetro Uniaxial National Instruments; (C) Acelerômetro triaxial MPU- 6050; (D) Microcontrolador Arduino MEGA; (E) Chassi CompactDAQ cDAQ-9174; (F) Canais NI-9234.

Figura 6 - Dispositivo Eletromecânico de excitação (A) e inversor de frequência (B).



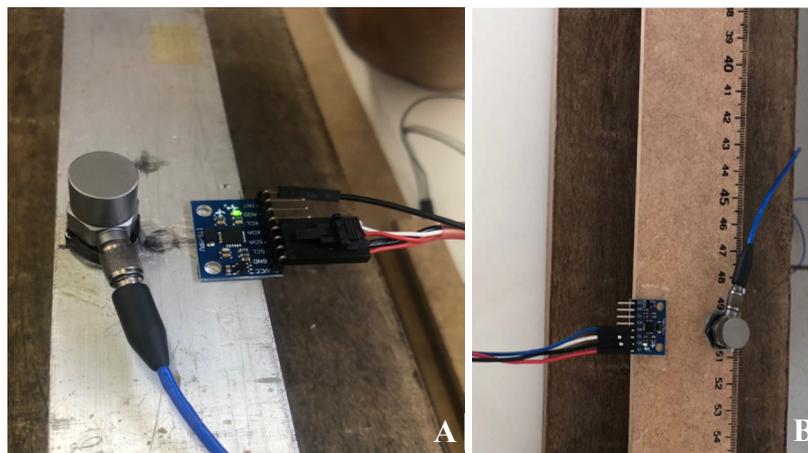
Fonte: Da autora (2020).

Figura 7 - Acelerômetro triaxial MPU- 6050.



Fonte: Da autora (2020).

Figura 8 - Acelerômetros utilizados na validação do sistema nas vigas Metálica e de Madeira.



Fonte: Da autora (2020).

Figura 9 - Microcontrolador Arduino MEGA.



Fonte: Da autora (2020).

Figura 10 - Case para armazenamento do Microcontrolador Arduino MEGA.



Fonte: Da autora (2020).

Figura 11 - Suporte para armazenamento do acelerômetro triaxial MPU- 6050.



Fonte: Da autora (2020).

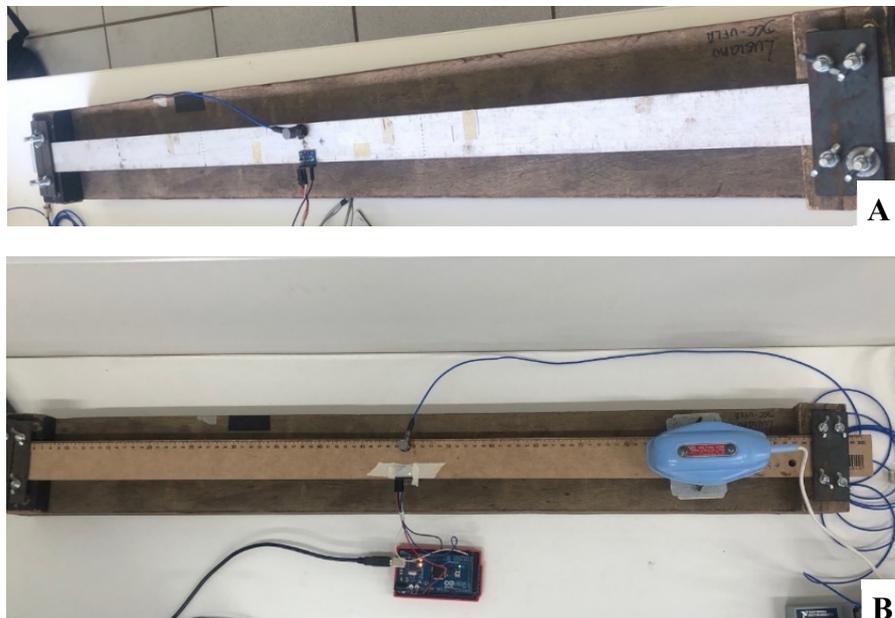
### 4.3 Análise e Validação do Sistema em Laboratório

Para análise e validação do sistema de monitoramento, foi desenvolvido uma bancada de laboratório para estudo dos diferentes cenários. Para os diferentes experimentos realizados foram empregadas as taxas de aquisição de 280 e 550 Hz, sendo este último valor o limite de aquisição para o sistema proposto.

### 4.3.1 Cenários para Vibração forçada

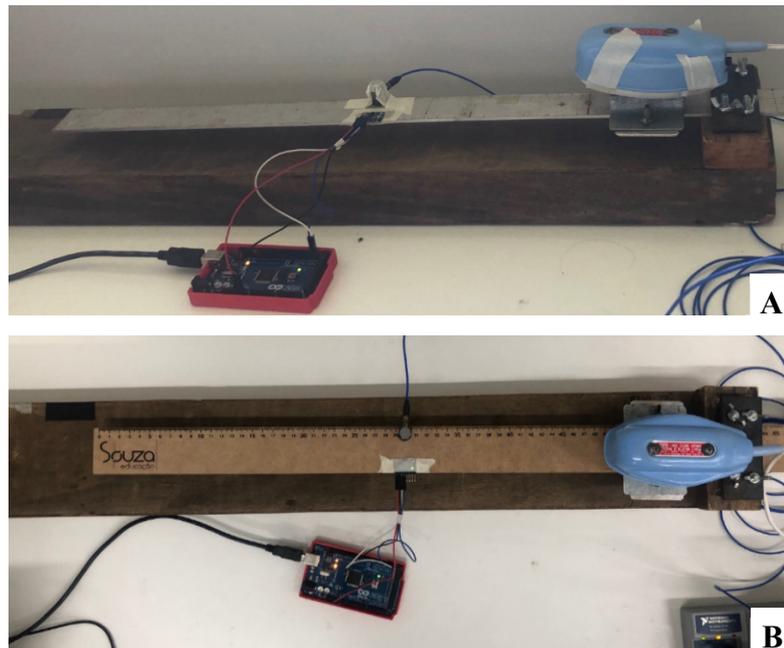
Para o estudo de vibrações forçadas foi empregado um aparato experimental composto por: vigas metálica e de madeira biengastadas e vigas metálica e de madeira engastadas. Foi utilizado um vibrador eletromecânico acionado por um inversor de frequência para induzir uma excitação a partir de vigas metálica e de madeira engastadas e biengastadas conforme Figuras 12 e 13 em base de madeira (FIGURA 5), com acelerômetros localizados em locais definidos em pontos que apresentaram maiores deflexões.

Figura 12 - Viga metálica e de madeira biengastadas.



Fonte: Da autora (2020).

Figura 13 - Viga metálica e de madeira engastadas.



Fonte: Da autora (2020).

No estudo de vibrações as frequências de excitação foram definidas a partir das frequências de ressonância dos sistemas avaliados, vigas metálica e de madeira. Para tal, foi realizada uma análise de varredura de frequência, a partir da qual foram determinadas as frequências naturais do sistema, considerando-se a amplificação da resposta em seu respectivo modo de vibração. Com base nessas análises, estabeleceu-se os pontos fixação dos transdutores em função do comportamento modal, visando regiões como maiores deflexões.

#### 4.3.2 Cenários para Vibração Livre

Para análise de vibração livre, foram empregadas vigas engastadas, metálica e de madeira. Para o estudo de vibrações livres optou-se por um estímulo inicial por impulso, sem a utilização do vibrador eletromecânico. Os acelerômetros foram posicionados na região central da viga e em sua extremidade livre. Por meio de um experimento de decremento logarítmico, foi realizada a validação sistema desenvolvido.

#### 4.4 Validação das Vigas em Vibração forçada

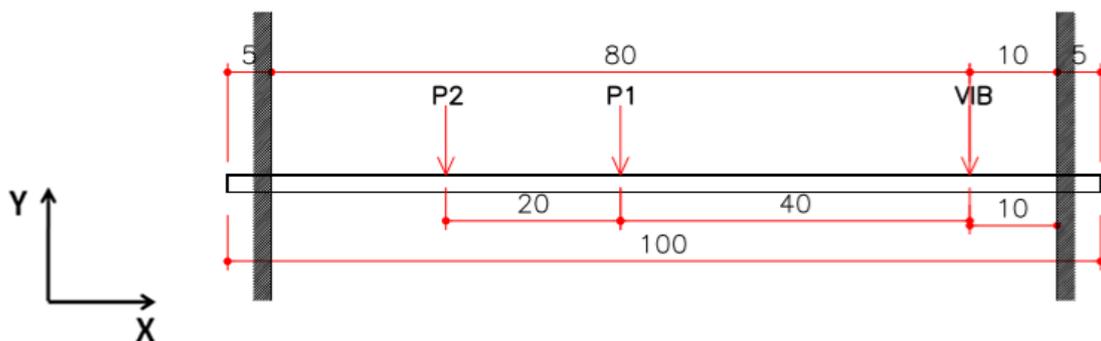
##### 4.4.1 Cenário: vigas metálica e de madeira biengastadas

Foi instalado na viga metálica (dimensões 5 cm x 100 cm x 0,2 cm) e na viga de madeira (dimensões 5 cm x 100 cm x 0,8 cm), engastadas em uma base de madeira, um vibrador eletromecânico (VIB) para gerar a excitação dos sistemas a partir de um inversor de frequência.

Para a viga metálica as frequências de excitação foram de 16,5 Hz, 25,5 Hz e 35,5 Hz, as quais correspondem à frequências de ressonância do sistema determinadas por análise de varredura de frequências. Os pontos de medição foram no vão central do apoio (P1) e a  $\frac{1}{4}$  do vão (P2) ao lado oposto da fonte de excitação, conforme Figura 14. Configuração similar foi empregada para a viga de madeira, cujas frequências de excitação foram de 12 Hz; 24 Hz e 36 Hz. Foram feitas cinco repetições em cada ponto de medição.

O tempo da medição foi definido em cinco segundos para os cenários propostos. Durante o processo de validação, a aquisição de dados foi realizada simultaneamente com o sistema comercial para, posterior, análise e comparação dos resultados.

Figura 14 - Representação esquemática da viga biengastada empregada no processo de teste e validação do sistema de aquisição de dados.



Fonte: Da autora (2020).

Após a aquisição de dados para os cenários considerados, empregando-se o sistema desenvolvido e o sistema comercial simultaneamente, todos os dados foram processados e analisados. A avaliação dos dados de aceleração medidos foi feita por meio de médias RMS (Root Mean Square) (EQUAÇÃO 1) e o erro percentual entre os sistemas submetidos a vibração forçada calculado por meio da Equação 2.

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

em que,

$N$  = número de amostras;

$x$  = aceleração coletada em cada instante de tempo ( $t$ ), em  $\text{m/s}^2$ .

$$\text{Erro}(\%) = \left( \frac{A_d - A_c}{A_c} \right) 100 \quad (2)$$

em que,

$A_d$  = aceleração RMS do sinal do Sistema Desenvolvido,  $\text{m/s}^2$ ;

$A_c$  = aceleração RMS do sinal do Sistema Comercial da *National Instruments*, em  $\text{m/s}^2$ .

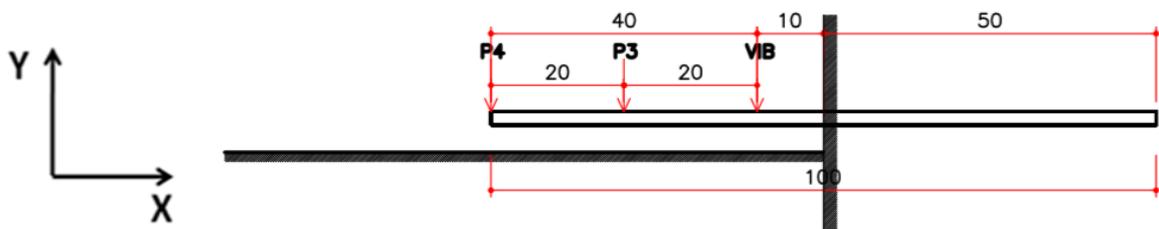
#### 4.4.2 Cenário: vigas metálica e de madeira engastadas

Foi instalado na viga metálica (dimensões 5 cm x 100 cm x 0,2 cm) e na viga de madeira (dimensões 5 cm x 100 cm x 0,8 cm), engastadas em uma base de madeira, um vibrador eletromecânico (VIB) para gerar a excitação dos sistemas.

Na viga metálica as frequências de excitação foram de 15 e 27,5 Hz, foram feitas cinco repetições em cada ponto de medição, ou seja, no vão central do balanço (P3) e na extremidade do vão (P4) ao lado oposto da fonte de excitação, conforme Figura 15.

Para a viga de madeira as frequências empregadas foram de 22 Hz e 35 Hz. O tempo da medição foi definido em cinco segundos.

Figura 15 - Representação esquemática da viga engastada empregada no processo de teste e validação do sistema de medição.



Fonte: Da autora (2020).

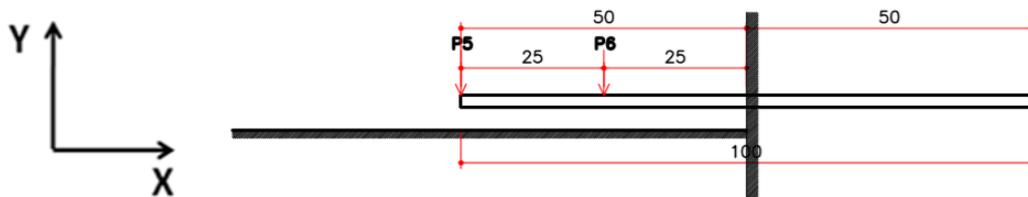
Após a aquisição dos dados os mesmos foram processados e analisados. A avaliação dos dados de aceleração medidos foi feita por meio de médias RMS (EQUAÇÃO 1) e o erro percentual entre os sistemas submetidos a vibração forçada calculado por meio da Equação 2.

#### 4.5 Validação das vigas em Vibração Livre

##### 4.5.1 Cenários: Viga metálica e de madeira engastadas

As vigas metálica e de madeira foram engastadas e excitadas nas extremidades, sendo que as excitações foram constituídas por um impulso em sua extremidade livre. Os acelerômetros foram posicionados na extremidade do balanço (P5) e no vão central (P6), conforme Figura 16. Após a excitação inicial, o sistema foi monitorado por aproximadamente 6 segundos, durante o processo de decaimento logarítmico. Foram empregadas cinco repetições para cada ponto de análise.

Figura 16 - Representação esquemática da viga engastada em vibração livre empregada no processo de teste e validação do sistema de medição.



Fonte: Da autora (2020).

Após a aquisição de dados para os cenários considerados, estes foram processados e analisados. Para a validação do sistema, optou-se pela avaliação de um parâmetro físico associado ao cenário proposto para vibrações livres, especificamente a Razão de Amortecimento ( $\zeta$ ) (EQUAÇÃO 3). A Razão de Amortecimento foi obtida a partir de experimentos de decaimento logarítmico, com o objetivo da simplificação de cálculo.

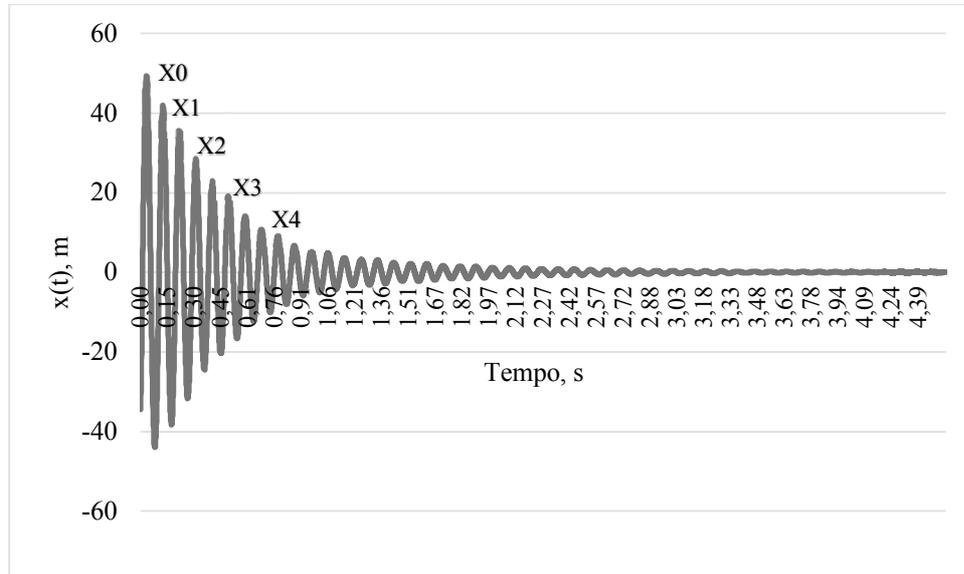
$$\zeta = \frac{\delta}{\sqrt{4\pi^2 + \delta^2}} \quad (3)$$

em que,

$\delta$  = decaimento logarítmico dos ciclos.

A partir do Gráfico 1, define-se:  $\delta = \frac{1}{n} \ln\left(\frac{x_0}{x_n}\right)$ .

Gráfico 1 - Forma gerada na saída do acelerômetro.

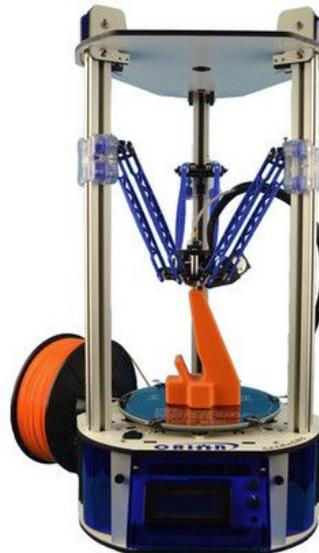


Fonte: Da autora (2020).

## 5 DESENVOLVIMENTO DE UMA ESTRUTURA DE SUPORTE

Foi elaborada uma estrutura de suporte para abrigar o Microcontrolador Arduino MEGA (FIGURA 9) e um suporte para o Acelerômetro triaxial MPU- 6050 (FIGURA 7), o projeto foi desenvolvido empregando-se o programa *SketchUp* (versão estudante). Esses suportes, em sua forma final, são apresentados nas Figuras 10 e 11, os quais foram produzidos em impressora 3D, modelo Orion Delta CNC (FIGURA 17), disponível no Departamento de Ciências da computação da UFLA. Os suportes foram construídos utilizando-se PLA (poliácido láctico).

Figura 17 - Impressora 3D, modelo Orion Delta CNC.



Fonte: SeeMeCNC (2020).

## 6 APLICAÇÃO DO SISTEMA

Após validação do sistema em laboratório, optou-se pela realização da sua validação e aplicação em condições de campo. Para tal, foi monitorada uma ponte de madeira em uso na região de Lavras - MG. Assim, para a realização dos testes de campo considerou-se a vibração forçada a partir do deslocamento de dois veículos, em três velocidades pré-determinadas.

A ponte monitorada de 18,00 metros de comprimento e de 4,00 m de largura, em estrutura de madeira, foi identificada qualitativamente, com potenciais problemas estruturais (FIGURA 18).

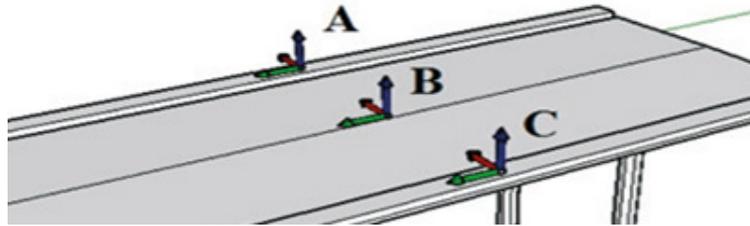
Figura 18 - Ponte de Madeira sobre o Rio Cervo Lavras / Carmo da Cachoeira.



Fonte: Da autora (2020).

Os acelerômetros foram posicionados no vão central da estrutura, no centro e nas duas laterais de modo a obter o comportamento mais amplificado da estrutura (PRAVIA; BRAIDO, 2015). Foram monitorados sinais de vibração no eixo perpendicular ao tabuleiro da ponte, conforme Figura 19 e 20, nos diferentes pontos de medição propostos, a Figura 21 ilustra o posicionamento dos dois acelerômetros na estrutura.

Figura 19 - Localização dos acelerômetros - eixo perpendicular ao tabuleiro da ponte.



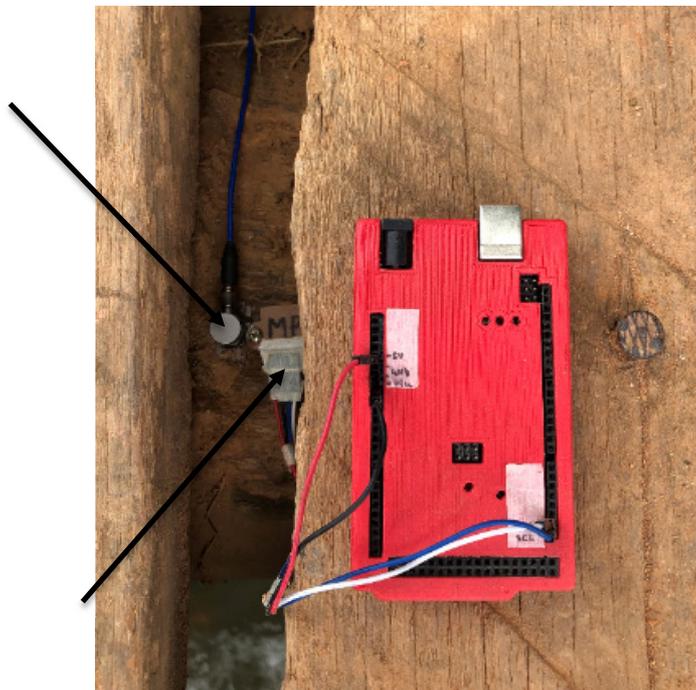
Fonte: Pravia e Braido (2015).

Figura 20 - Localização dos acelerômetros *in loco*.



Fonte: Da autora (2020).

Figura 21 - Posicionamento dos acelerômetros na Estrutura.



Fonte: Da autora (2020).

Os tipos de veículos que transitaram sobre a ponte, para fins de verificação do Sistema Desenvolvido foram uma moto BMW modelo G 650 GS de 0,2 T e um Veículo Utilitário SsangYong modelo Kironm M 200 XD de 2,53 T.

Conforme classificação do Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN) e Registro Nacional de Transporte Rodoviário de Cargas (RNTRC) os veículos leves são os com peso bruto total (PBT) inferior ou igual a 3,50 T e veículos pesados correspondem aos veículos com carga superior a 3,50 T. Na Tabela 4, encontram-se os tipos de veículos em função do seu peso, relativo ao RNTRC.

Tabela 1 - Tipo de veículos conforme RNTRC.

Tipo de Veículo	Peso
Utilitário Leve	0,50 T a 1,49 T
Caminhonete/Furgão	1,50 T a 3,49 T
Caminhão Leve	3,50 T a 7,99 T
Caminhão Simples	8,00 T a 29,00 T

Fonte: Agência Nacional de Transportes Terrestre - ANTT (2020).

Foram avaliados os níveis de aceleração utilizando-se o sistema desenvolvido e o sistema comercial, para cada ponto de medição (FIGURA 19), considerando-se três repetições nas velocidades de 10, 20 e 30 Km/h. Após a aquisição dos dados, empregando-se os dois sistemas simultaneamente, esses foram processados e analisados. A avaliação da aceleração medidos foi feita por meio de médias RMS (EQUAÇÃO 1) e o erro percentual entre os sistemas submetidos a vibração forçada calculado por meio da Equação 2.

## **7 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **7.1 Vibração Forçada**

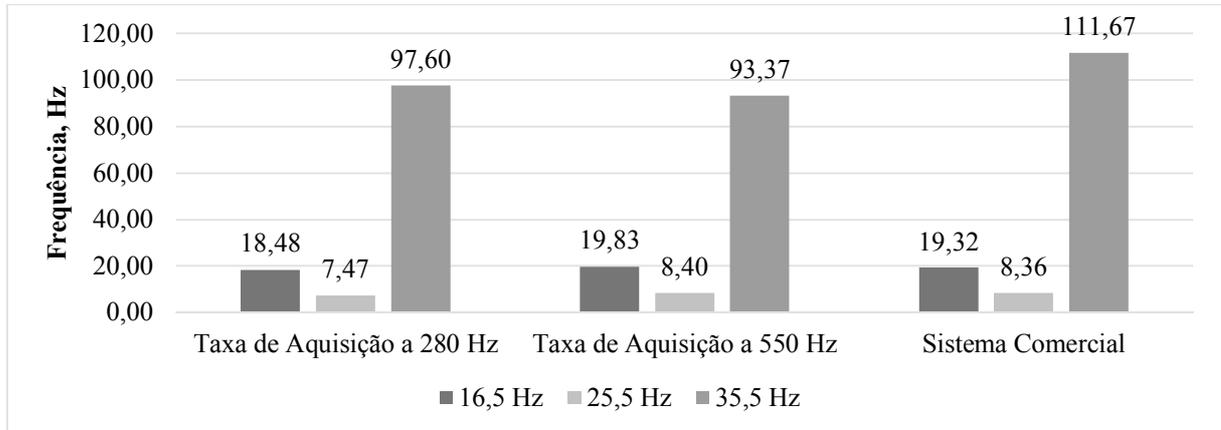
#### **7.1.1 Resultado RMS nas Vigas Biengastadas**

##### **7.1.1.1 Viga Biengastada de Metal**

No Gráfico 2 são apresentados os resultados para a viga metálica biengastada segundo vibração forçada no vão central. Pode-se observar que, considerando as taxas de aquisição de 280 Hz e 550Hz, o erro para as frequências de 16,5 Hz e 25,5 Hz entre o sistema desenvolvido e o sistema comercial foi inferior a 11% para a taxa de aquisição de 280 Hz (TABELA 2). Destaca-se que, apesar do critério de Nyquist ter sido considerado, os resultados para a taxa de aquisição de 280 Hz foram significativamente piores do que para taxa de 550 Hz, em que foram observados erros inferiores à 3% para as mesmas frequências nesta taxa de aquisição de dados.

Ainda sobre erros apresentados entre os sistemas de aquisição (TABELA 2), observou-se que para a frequência de 35,5 Hz, os erros observados foram superiores a 12%. Tal resultado, pode indicar uma limitação do sistema de baixo custo em relação ao sistema comercial. Ressalta-se que o sistema comercial, apesar de apresentar taxas de aquisição de até 25,6 kHz, foi configurado com as para sua menor taxa de aquisição, que por padrão é de 1652Hz.

Gráfico 2 - Média RMS para o acelerômetro localizado no vão central na Viga Bi engastada de Metal.



Fonte: Da autora (2020).

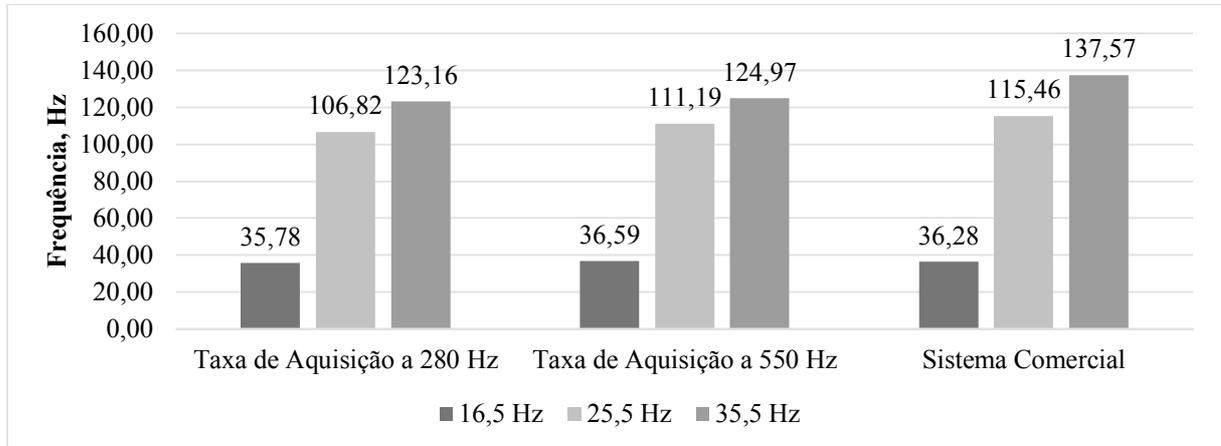
Tabela 2 - Erro percentual entre os sistemas calculado por meio da Equação 2 no vão central na Viga Bi engastada de Metal.

Frequência	Taxa de Aquisição a 280 Hz	Taxa de Aquisição a 550 Hz
16,5 Hz	-4,35%	2,63%
25,5 Hz	-10,68%	0,51%
35,5 Hz	-12,60%	-16,38%

Fonte: Da autora (2020).

Assim como para os acelerômetros localizados no vão central da viga metálica os acelerômetros localizados a  $\frac{1}{4}$  do vão, tiveram erros (TABELA 3) menores à taxa de aquisição de 550 Hz para as frequências de 16,5 Hz e 25,5 Hz (GRÁFICO 3), inferior a 4% em relação ao sistema comercial, enquanto que para a taxa de aquisição de 280 Hz o erro para as referidas frequências foi menor que 8%, praticamente o dobro. Do mesmo modo, para a frequência de 35,5 Hz os erros apresentados foram na faixa de 10% para as duas taxas de aquisição indicando a provável limitação do sistema de baixo custo em relação ao sistema comercial.

Gráfico 3 - Média RMS para o acelerômetro localizado a  $\frac{1}{4}$  do vão na Viga Bi engastada de Metal.



Fonte: Da autora (2020).

Tabela 3 - Erro percentual entre os sistemas calculado por meio da Equação 2 a  $\frac{1}{4}$  do vão na Viga Bi engastada de Metal.

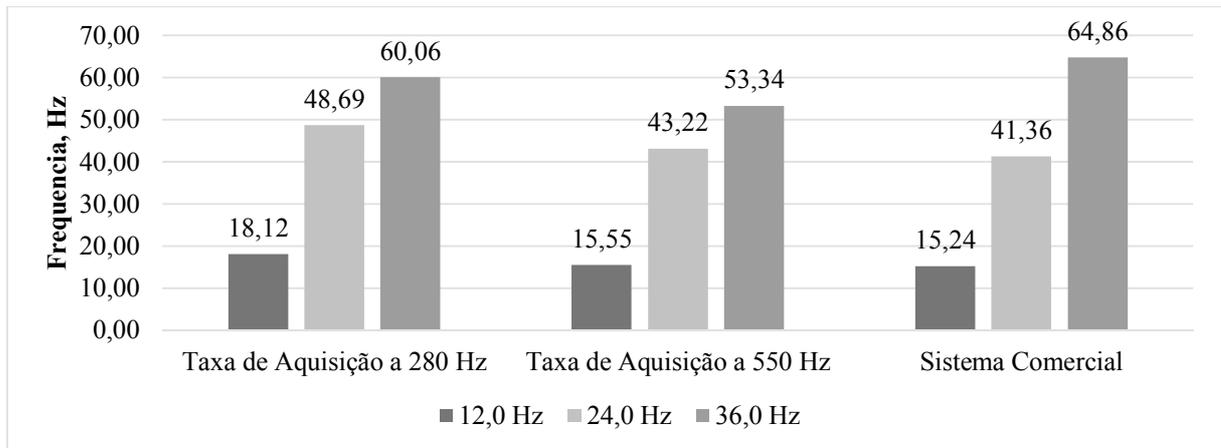
Frequência	Taxa de Aquisição a 280 Hz	Taxa de Aquisição a 550 Hz
16,5 Hz	-1,37%	0,85%
25,5 Hz	-7,48%	-3,69%
35,5 Hz	-10,48%	-9,16%

Fonte: Da autora (2020).

### 7.1.1.2 Viga bi- engastada de Madeira

Conforme Gráfico 4, confirmando os resultados obtidos para a viga biengastada de metal, os erros do sistema desenvolvido comparados ao comercial, para a taxa de aquisição de 550 Hz, para a viga de madeira, também foram satisfatórios, sendo inferiores a que 5% para 12,0 Hz e 24,0 Hz. Para a taxa de aquisição de 280 Hz foram superiores a 15% (TABELA 4). Para a frequência de 36,0 Hz o erro apresentado foi superior a 17%.

Gráfico 4 - Média RMS para o acelerômetro localizado no vão central da Viga Bi engastada de Madeira.



Fonte: Da autora (2020).

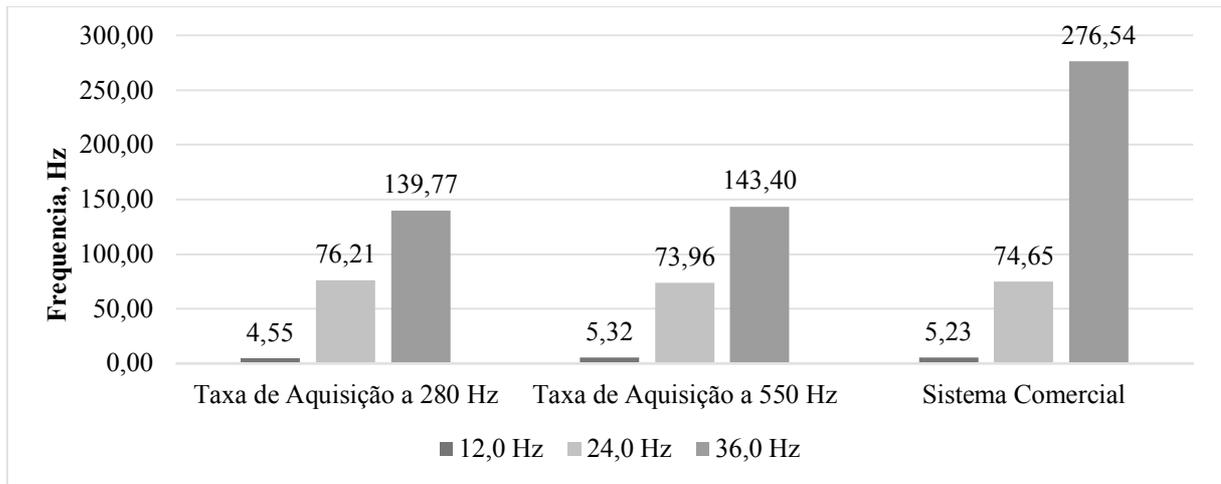
Tabela 4 - Erro percentual entre os sistemas calculado por meio da Equação 2 no vão central da Viga Bi engastada de Madeira.

Frequência	Taxa de Aquisição a 280 Hz	Taxa de Aquisição a 550 Hz
<b>12,0 Hz</b>	18,87%	2,03%
<b>24,0 Hz</b>	17,71%	4,49%
<b>36,0 Hz</b>	-7,41%	-17,77%

Fonte: Da autora (2020).

Conforme Gráfico 5, os resultados obtidos para a viga bi engastada de madeira, os erros (TABELA 5) do sistema desenvolvido comparados ao comercial à taxa de aquisição de 550 Hz com os acelerômetros a  $\frac{1}{4}$  do vão, foram menores que 2% para 12,0 Hz e 24 Hz. Para a taxa de 280 Hz, para as frequências de 12,0 Hz e 24 Hz, foram observado erros de 13%. Para a frequência de 36,0 Hz o erro apresentado foi aproximadamente 50% para as taxas de aquisição de 280 e 550 Hz.

Gráfico 5 - Média RMS para o acelerômetro localizado a  $\frac{1}{4}$  do vão da Viga Biengastada de Madeira.



Fonte: Da autora (2020).

Tabela 5 - Erro percentual entre os sistemas calculado por meio da Equação 2 a  $\frac{1}{4}$  do vão da Viga Bi engastada de Madeira.

Frequência	Taxa de Aquisição a 280 Hz	Taxa de Aquisição a 550 Hz
12,0 Hz	-12,93%	1,78%
24,0 Hz	2,09%	-0,93%
36,0 Hz	-49,46%	-48,14%

Fonte: Da autora (2020).

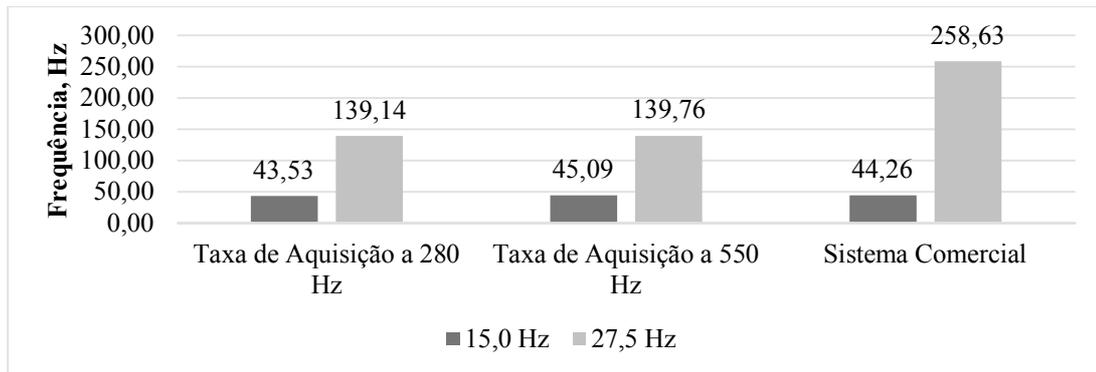
## 7.1.2 Resultado RMS nas Vigas Engastadas

### 7.1.2.1 Viga Engastada de Metal

Na Gráfico 6 foram apresentados os resultados para a viga engastada de metal em vibração forçada no seu vão central, nota-se que para as frequências aqui definidas considerando as taxas de aquisição de 280 Hz e 550Hz, o erro para a frequência de 15,0 Hz entre o sistema desenvolvido e o sistema comercial foi da ordem de 2% (TABELA 6).

Observando a Tabela 6, nota-se que erros percentuais apresentados entre os dois sistemas de aquisição para a frequência de 27,5 Hz foram superiores a 45%, indicando ainda a provável limitação do sistema de baixo custo em relação ao sistema comercial quando submetidos a frequências maiores.

Gráfico 6 - Média RMS para o acelerômetro localizado no vão central na Viga Engastada de Metal.



Fonte: Da autora (2020).

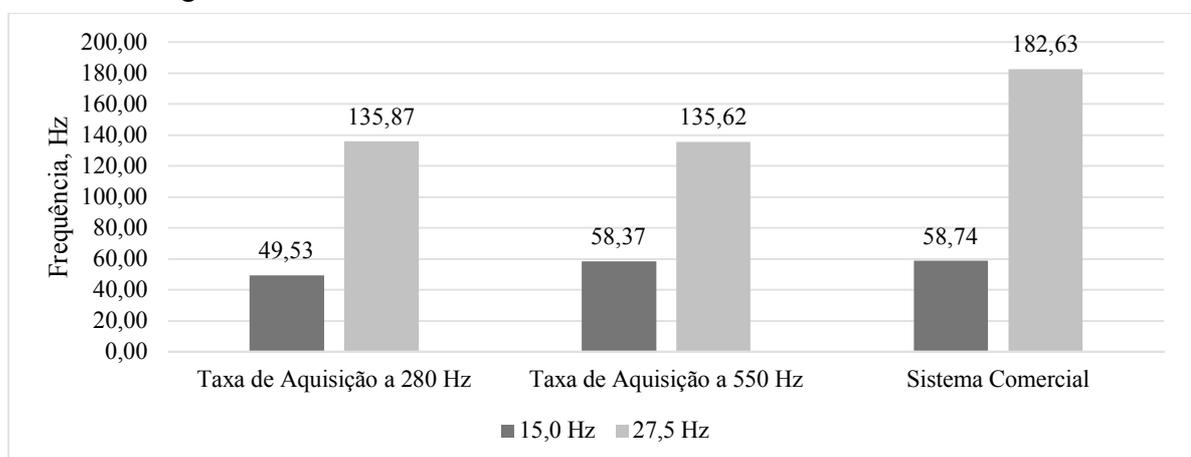
Tabela 6 - Erro percentual entre os sistemas calculado por meio da Equação 2 no vão central na Viga Engastada de Metal.

Frequência	Taxa de Aquisição a 280 Hz	Taxa de Aquisição a 550 Hz
15,0 Hz	-1,66%	1,86%
27,5 Hz	-46,20%	-45,96%

Fonte: Da autora (2020).

Os resultados para os acelerômetros localizados na extremidade do vão da viga engastada de metal (GRÁFICO 7) à taxa de aquisição de 550 Hz, indicaram que o erro para a frequência de 15,0 Hz (TABELA 7) foi inferior a 1%, enquanto que, para a taxa de aquisição de 280 Hz, na mesma frequência, o erro superou 15%. Para a frequência de 27,5 Hz, nas duas taxas de aquisição, o erro foi superior a 25%.

Gráfico 7 - Média RMS para o acelerômetro localizado na extremidade do vão na Viga Engastada de Metal.



Fonte: Da autora (2020).

Tabela 7 - Erro percentual entre os sistemas calculado por meio da Equação 2 na extremidade do vão na Viga Engastada de Metal.

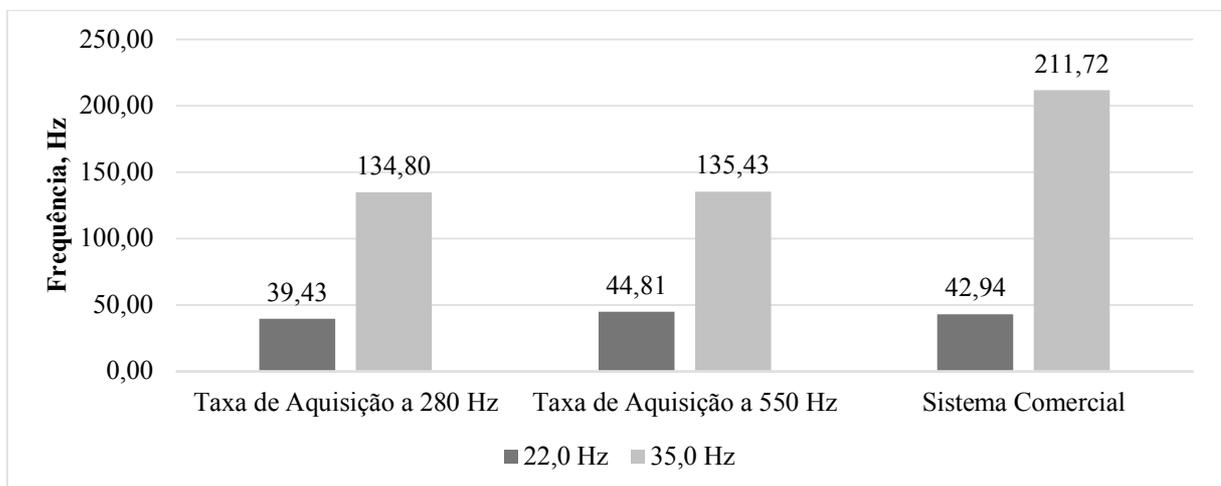
Frequência	Taxa de Aquisição a 280 Hz	Taxa de Aquisição a 550 Hz
15,0 Hz	-15,67%	-0,62%
27,5 Hz	-25,60%	-25,74%

Fonte: Da autora (2020).

### 7.1.2.2 Viga Engastada de Madeira

Na Gráfico 8, estão apresentados os resultados para os acelerômetros localizados no vão central da viga engastada de madeira, que corroboraram com os resultados obtidos anteriormente. À taxa de aquisição de 550 Hz, o erro para a frequência de 22,0 Hz foi de 4,35%, menor que o erro à taxa de 280 Hz, 8,17% (TABELA 8). Para a frequência induzida de 35,0 Hz os erros, mais uma vez se mostraram elevados, em torno de 36% como demonstra a tabela 8.

Gráfico 8 - Média RMS para o acelerômetro localizado no vão central na Viga Engastada de Madeira.



Fonte: Da autora (2020).

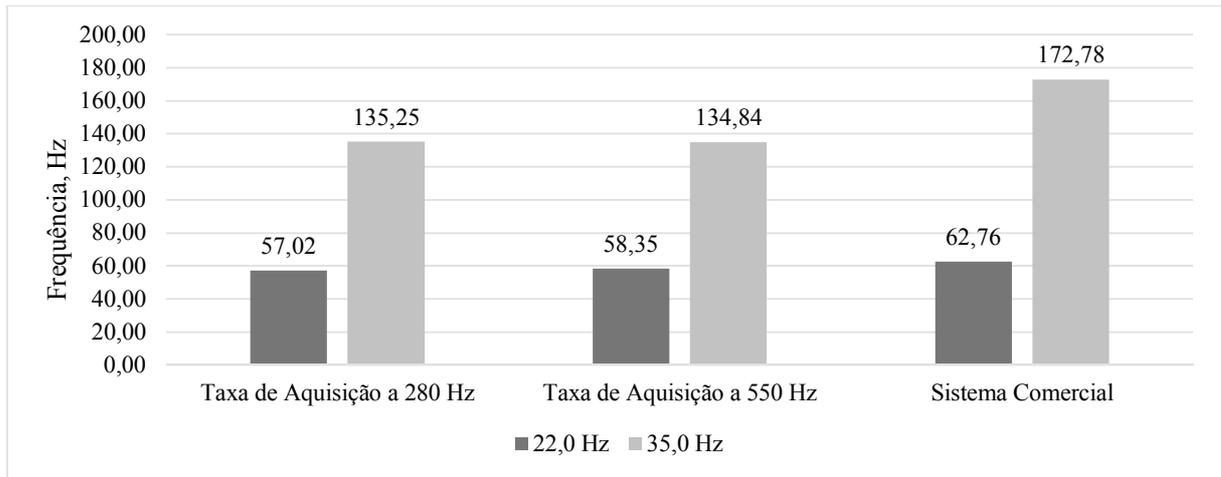
Tabela 8 - Erro percentual entre os sistemas calculado por meio da Equação 2 no vão central na Viga Engastada de Madeira.

Frequência	Taxa de Aquisição a 280 Hz	Taxa de Aquisição a 550 Hz
22,0 Hz	-8,17%	4,35%
35,0 Hz	-36,33%	-36,03%

Fonte: Da autora (2020).

Ainda para viga engastada de madeira, com os acelerômetros localizados na sua extremidade, os resultados (GRÁFICO 9) para a taxa de aquisição de 550 Hz, o erro para a frequência de 22,0 Hz foi menor que o erro à taxa de 280 Hz (TABELA 9). Já para a frequência induzida de 35,0 Hz os erros foram em torno de 22% (TABELA 9).

Gráfico 9 - Média RMS para o acelerômetro localizado na extremidade do vão na Viga Engastada de Madeira.



Fonte: Da autora (2020).

Tabela 9 - Erro percentual entre os sistemas calculado por meio da Equação 2 na extremidade do vão na Viga Engastada de Madeira.

Frequência	Taxa de Aquisição a 280 Hz	Taxa de Aquisição a 550 Hz
22,0 Hz	-9,14%	-7,02%
35,0 Hz	-21,72%	-21,96%

Fonte: Da autora (2020).

Correlacionando os resultados obtidos em todos os cenários de vibração forçada com o sistema desenvolvido operando a menores frequências com taxa de aquisição de 550 Hz, apresentou comportamento similar a sistema comercial. Entretanto, observou-se que na medição de frequências mais altas, o erro do sistema propostos tende a aumentar quando comparado ao comercial.

Entretanto, considerando as aplicações propostas ao sistema, sua resposta mostrou-se satisfatória e confiável. Segundo Baimbridge et al. (2002), as frequências de excitação causadas pelo movimento de pedestres operam geralmente entre valores de 0,4 e 3,5 Hz, enquanto que as frequências de excitação devido às rajadas de vento operam entre 0,01 e 1,0 Hz. De acordo com Silva e Roehl (1999), a frequência de excitação referente ao

movimento dos veículos sobre uma ponte depende da velocidade de tráfego e também da rugosidade superficial do tabuleiro, podendo chegar a situações extremas, no caso de pontes rodoviárias, a valores iguais a 6,8 Hz (veículo trafegando a 170 km/h). De um modo geral, as pontes de madeira nas estradas vicinais, são submetidas a baixas frequências de excitação, ou seja, a valores máximos de 3,0 Hz, o que pode confirmar a eficácia do sistema condizentes com os resultados obtidos nos ensaios em laboratório, reforçando que a utilização de sistemas de baixo custo, como o apresentado, pode ser uma excelente opção, desde que realizada com critério, pois existe uma limitação do sistema de baixo custo em relação ao sistema comercial, mesmo configurado para sua menor taxa de aquisição, uma vez que as aplicações exigem medições de frequências e amplitudes.

Adicionalmente, na engenharia agrícola, vários trabalhos tem sido realizados a partir do monitoramento de vibrações (SANTOS et al., 2010; SOUZA, 2004; SRIVASTAVA; GOERING; ROHRBACH, 1996), os quais demandam medições de faixas de frequências específicas e demandam baixa adição de massa aos sistemas durante a medição, o que caracterizaria uma possibilidade de utilização de sistemas como o proposto nesse trabalho. Diante o exposto, o Sistema Desenvolvido, pode ser aplicados em situações semelhante, uma vez que as frequências são compatíveis, tornando um método viável e de baixo custo de análise.

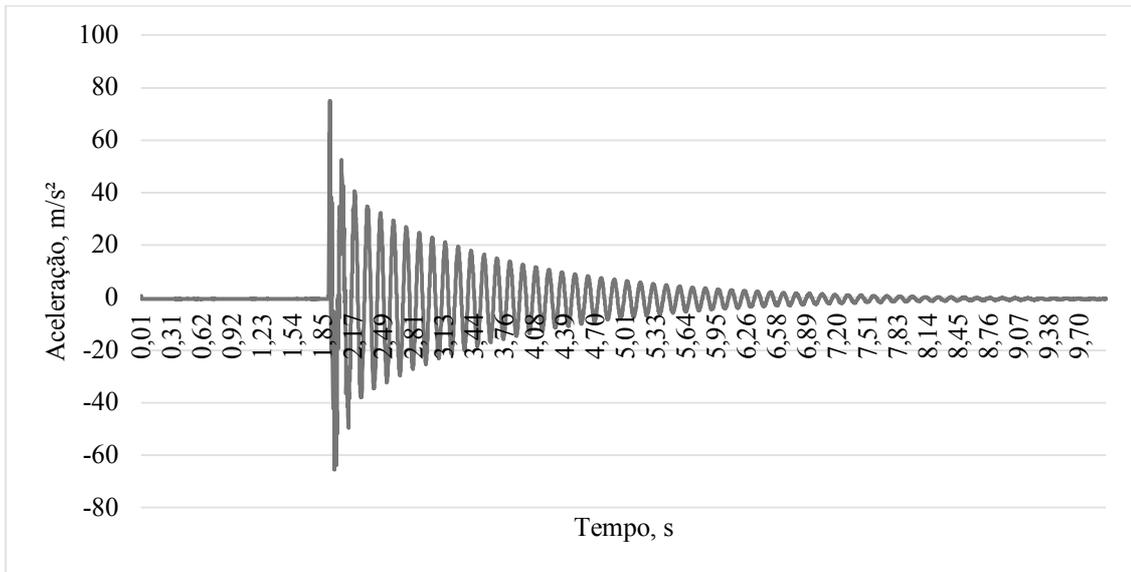
## **7.2 Vibração Livre**

### **7.2.1 Resultado da Razão de Amortecimento**

#### **7.2.1.1 Viga Engastada de Metal**

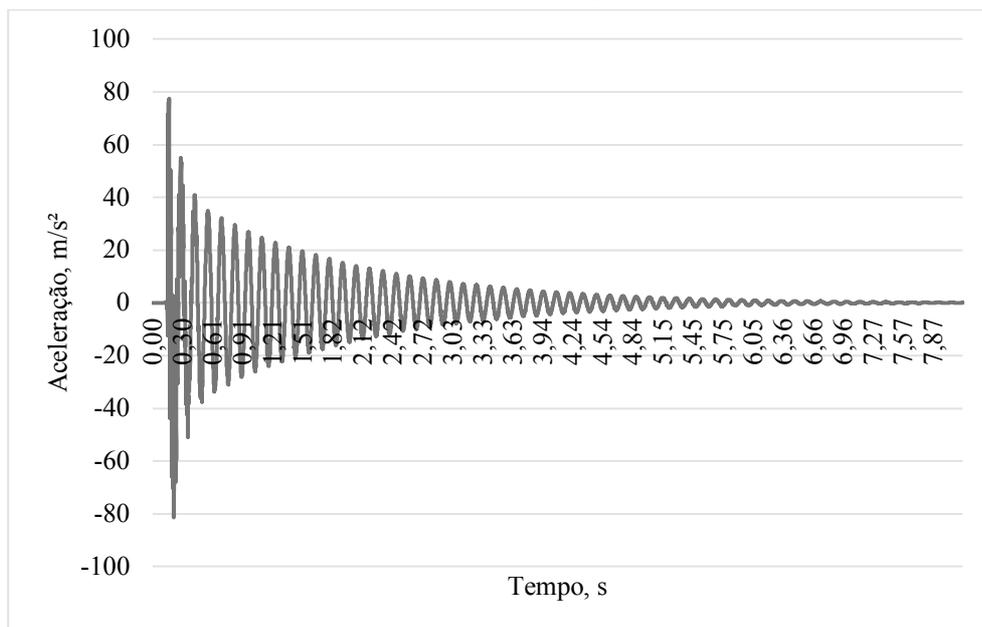
Os Gráficos 10 e 11 ilustram o sinal no tempo para a aquisição realizada considerando dos diferentes sistemas de aquisição de dados. Contrastando os resultados em relação ao pico máximo e pico mínimo medido na viga metálica na extremidade do vão, cujos valores aceleração ( $m/s^2$ ) obtidos foram de 74,98 e 77,35 (pico máximo) e 52,12 e 54,86 (pico mínimo) para o Sistema Desenvolvido e Comercial, respectivamente.

Gráfico 10 - Aceleração em Função do Tempo para o Sistema Desenvolvido.



Fonte: Da autora (2020).

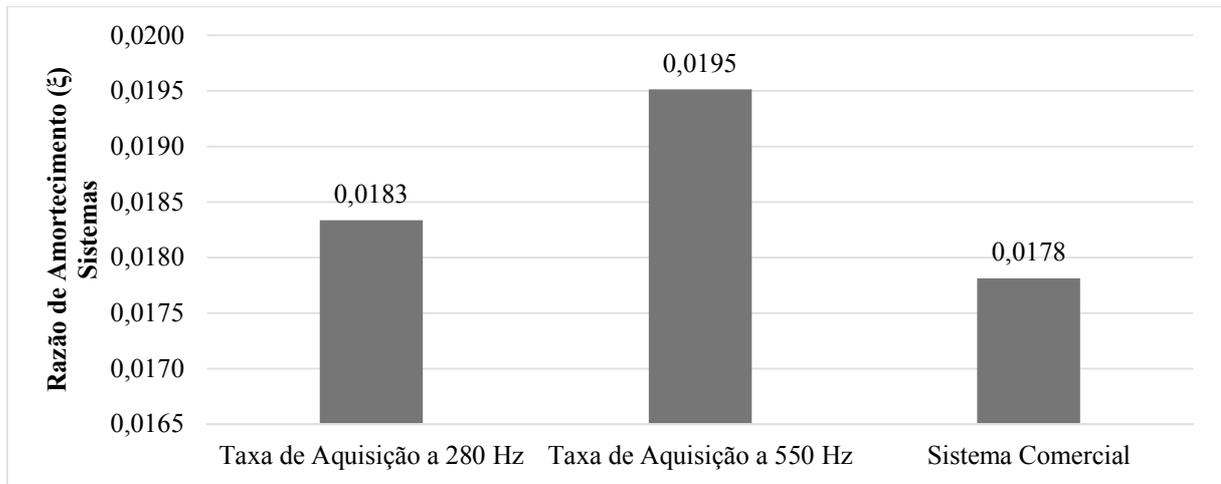
Gráfico 11 - Aceleração em Função do Tempo para o Sistema Comercial.



Fonte: Da autora (2020).

Os resultados da Razão de Amortecimento ( $\zeta$ ) para a Vibração Livre com os acelerômetros localizados no vão central da viga engastada de metal, estão demonstrados no Gráfico 12 para as taxas de aquisição de 280 Hz e 550Hz e para o Sistema Comercial e os erros demonstrados na Tabela 10, onde foram obtidos erros de aproximadamente 3% e 9,5% respectivamente para as taxas de aquisição aplicadas.

Gráfico 12 - Razão de Amortecimento ( $\xi$ ) para o acelerômetro localizado no vão central na Viga Engastada de Metal.



Fonte: Da autora (2020).

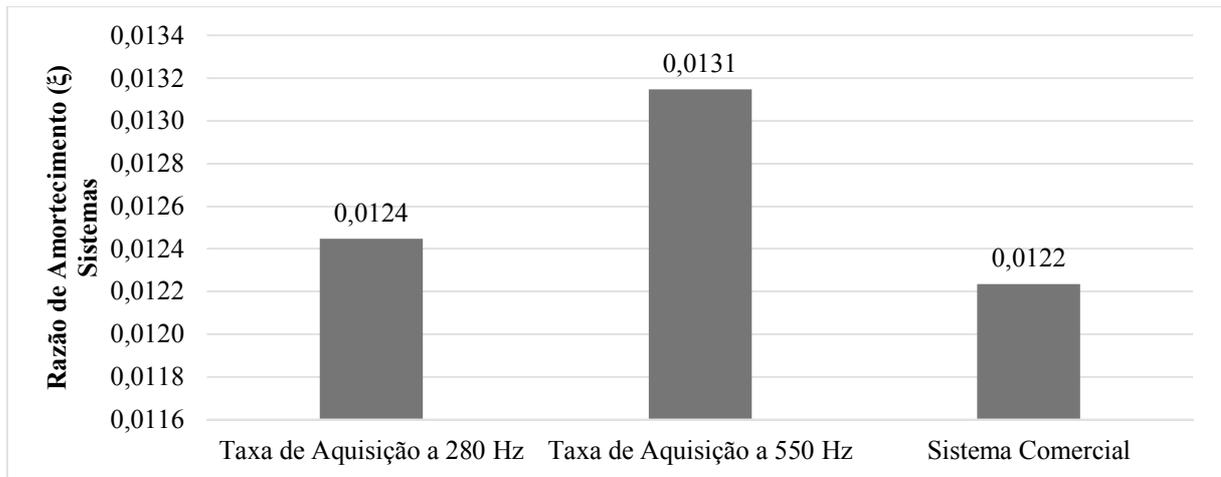
Tabela 10 - Erro percentual entre os sistemas calculado por meio da Equação 2 no vão central na Viga Engastada de Metal.

Taxa de Aquisição a 280 Hz	Taxa de Aquisição a 550 Hz
2,96 %	9,55 %

Fonte: Da a4utora (2020).

Os resultados para os acelerômetros localizados na extremidade do vão da viga engastada de metal, (GRÁFICO 13) nas duas taxas de aquisição de 280 Hz e 550Hz e para o Sistema Comercial, os erros da Razão de Amortecimento estão demonstrados na Tabela 11, onde foram obtidos erros de aproximadamente 2% e 7,5% respectivamente para as taxas de aquisição aplicadas.

Gráfico 13 - Razão de Amortecimento ( $\xi$ ) para o acelerômetro localizado na extremidade do vão na Viga Engastada de Metal.



Fonte: Da autora (2020).

Tabela 11 - Erro percentual entre os sistemas calculado por meio da Equação 2 na extremidade do vão na Viga Engastada de Metal.

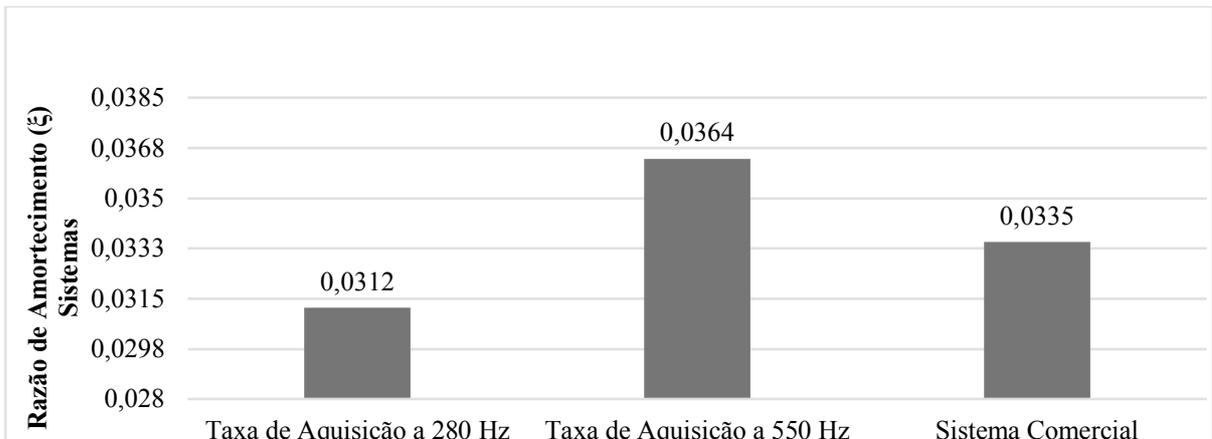
Taxa de Aquisição a 280 Hz	Taxa de Aquisição a 550 Hz
1,74 %	7,46 %

Fonte: Da autora (2020).

### 7.2.1.2 Viga Engastada de Madeira

A seguir são apresentados os resultados referentes à Viga Engastada de Madeira no vão central, conforme valores demonstrados no Gráfico 14, os erros obtidos do Sistema Desenvolvido em relação ao Sistema comercial pode ser observado na Tabela 12, onde foram inferiores a 9% nas duas taxas de aquisição.

Gráfico 14 - Razão de Amortecimento ( $\xi$ ) para o acelerômetro localizado no vão central na Viga Engastada de Madeira.



Fonte: Da autora (2020).

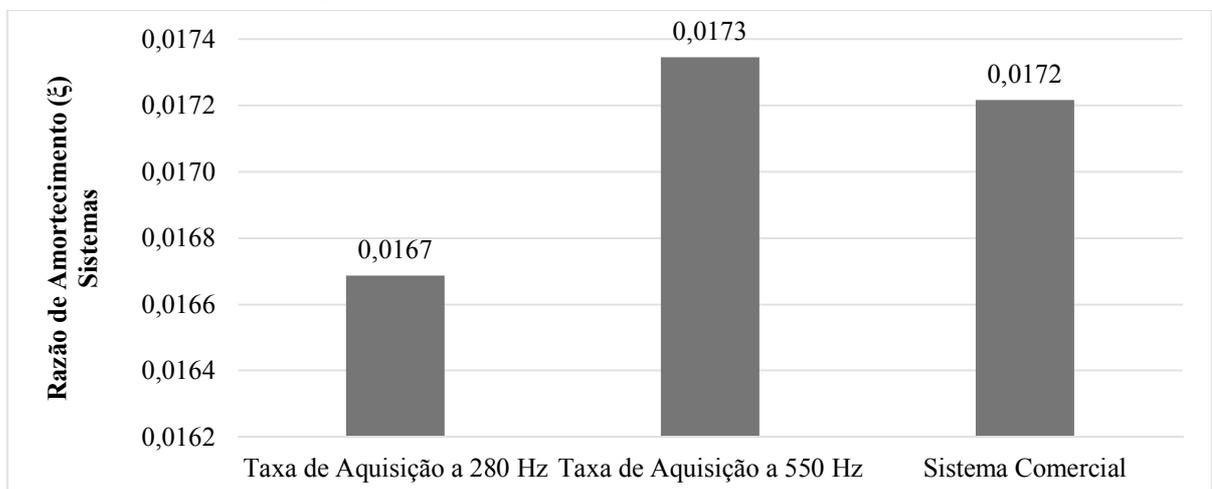
Tabela 12 - Erro percentual entre os sistemas calculado por meio da Equação 2 no vão central na Viga Engastada de Madeira.

Taxa de Aquisição a 280 Hz	Taxa de Aquisição a 550 Hz
6,83 %	8,86 %

Fonte: Da autora (2020).

De acordo com o Gráfico 15, onde são demonstrados os valores das razões de amortecimento do Sistema Desenvolvido e do Sistema Comercial para os acelerômetros na extremidade do vão da viga de madeira, os erros ficaram em torno de 3% e 1% (TABELA 13) respectivamente para as duas taxas de aquisição.

Gráfico 15 - Razão de Amortecimento para o acelerômetro localizado na extremidade do vão na Viga Engastada de Madeira.



Fonte: Da autora (2020).

Tabela 13 - Erro percentual entre os sistemas calculado por meio da Equação 2 no vão na Viga Engastada de Madeira.

Taxa de Aquisição a 280 Hz	Taxa de Aquisição a 550 Hz
-3,08 %	0,75 %

Fonte: Da autora (2020).

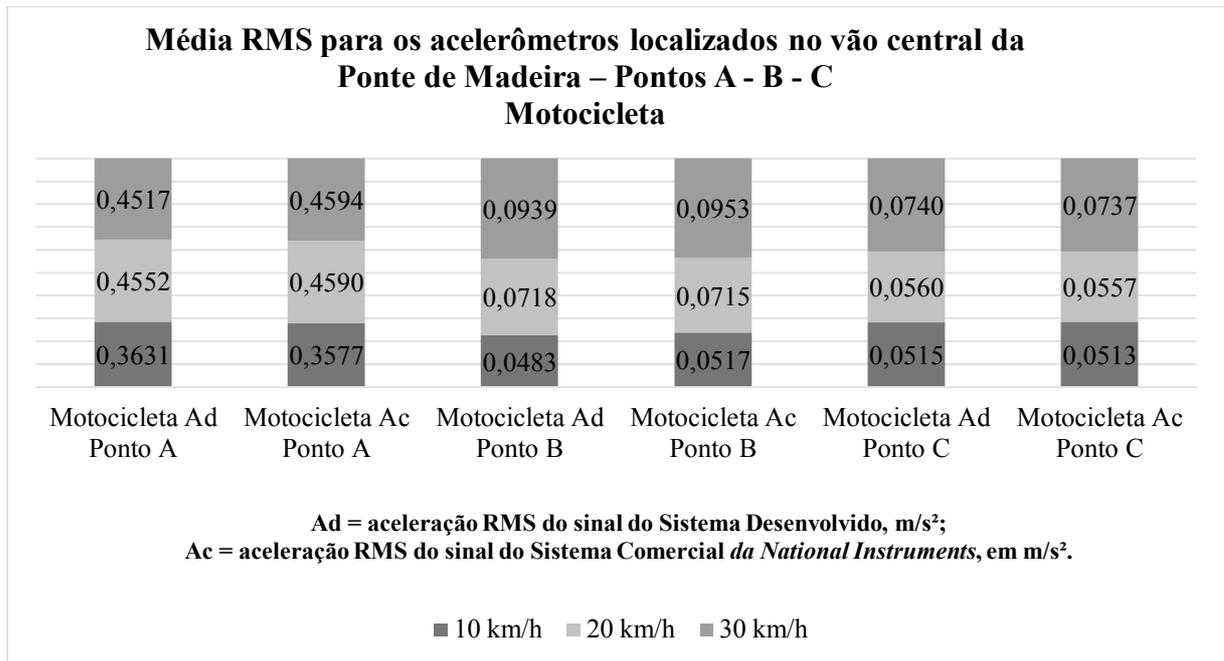
A medição de níveis de vibração pode ser utilizada para caracterização de diferentes estruturas. Moutinho, Cunha e Caetano (2010), enfatizaram que os pavimentos de edifícios correntes são susceptíveis de apresentarem níveis de vibração excessivos decorrentes da elevada flexibilidade que frequentemente possuem, aliada aos baixos coeficientes de amortecimento que muitas vezes os caracteriza. É o caso de pavimentos metálicos e de madeira, de reduzida massa e espessura, sujeitos às ações dinâmicas induzidas pelos seus utilizadores. Nestas situações, os níveis de vibração podem ser ainda mais elevados na eventualidade de ocorrência de fenômenos de ressonância originados pela proximidade da frequência da excitação produzida por utilização, relativamente às frequências naturais do pavimento.

### 7.3 Vibração Forçada em Campo

#### 7.3.1 Resultado RMS na Ponte de Madeira sobre o Rio Cervo - Lavras / Carmo da Cachoeira

No Gráfico 16 estão apresentados os resultados da Validação do Sistema Desenvolvido comparando-o ao Sistema Comercial feito “*in loco*”, no ponto A, B e C, com o tráfego da Motocicleta para a taxa de aquisição de 550 Hz, que foi a que demonstrou melhor resultado nos ensaios de laboratório sob vibração forçada. Os erros estão demonstrados na tabela 14, que se apresentam baixos, para as velocidades de 10, 20 e 30 Km/h, respectivamente.

Gráfico 16 - Média RMS para os acelerômetros localizados no vão central da Ponte de Madeira - Pontos A - B - C - Motocicleta.



Fonte: Da autora (2020).

Tabela 14 - Erro percentual entre os sistemas calculado por meio da Equação 2 no vão central da Ponte de Madeira - Ponto A - B - C - Motocicleta.

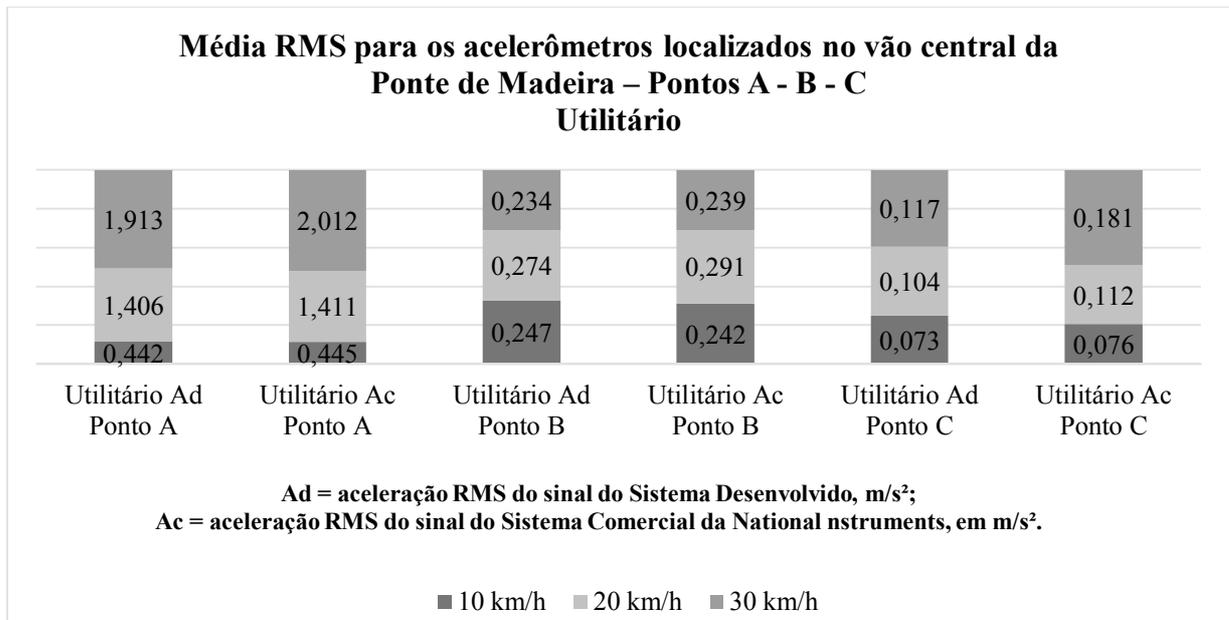
Taxa de Aquisição a 550 Hz		
Ponto	Velocidade	Motocicleta
<b>A</b>	10 km/h	1,51%
	20 km/h	0,82%
	30 km/h	1,66%
<b>B</b>	10 km/h	6,51%
	20 km/h	0,38%
	30 km/h	1,42%
<b>C</b>	10 km/h	0,25%
	20 km/h	0,55%
	30 m/h	0,40%

Fonte: Da autora (2020).

No Gráfico 17 estão apresentados os resultados da Validação do Sistema Desenvolvido comparando-o ao Sistema Comercial feito “*in loco*”, no ponto A, B e C, com o tráfego do veículo utilitário, para a taxa de aquisição de 550 Hz, que foi a que demonstrou

melhor resultado nos ensaios de laboratório sob vibração forçada. Os erros estão demonstrados na Tabela 15, que se apresentam baixos, para as velocidades de 10, 20 e 30 km/h, respectivamente.

Gráfico 17 - Média RMS para os acelerômetros localizados no vão central da Ponte de Madeira - Pontos A - B - C - Utilitário.



Fonte: Da autora (2020).

Tabela 15 - Erro percentual entre os sistemas calculado por meio da Equação 2 no vão central da Ponte de Madeira - Ponto A - B - C - Utilitário.

Taxa de Aquisição a 550 Hz		
Ponto	Velocidade	Utilitário
<b>A</b>	10 km/h	0,68%
	20 km/h	0,35%
	30 km/h	4,92%
<b>B</b>	10 km/h	2,35%
	20 km/h	5,38%
	30 km/h	1,96%
<b>C</b>	10 km/h	3,18%
	20 km/h	7,03%
	30 km/h	35,37%

Fonte: Da autora (2020).

Importante ressaltar que, a partir dos resultados apresentados no Gráficos 17, é possível observar uma significativa diferença de resposta para o ponto A de medição. Os

resultados para as acelerações RMS no ponto A, indicam que, a partir da resposta dinâmica da estrutura monitorada, já há um processo de deterioração que pode vir a culminar em sua falha. O comportamento discutido foi observado de forma qualitativa e confirma os resultados quantitativos obtidos no processo de medição da estrutura, principalmente, no Ponto A de medição.

No caso das pontes de madeira em estradas rurais, esses resultados indicam que o sistema de medição proposto, pode auxiliar gestores municipais a implementar programas de monitoramento e manutenção dessas estruturas, que são fundamentais para o escoamento de produtos agrícolas (CALIL JUNIOR et al., 2006; MORAES, 2007). Além disso, a utilização do sistema proposto junto a um programa de manutenção realizado a partir do uso de ferramentas de SHM (FARRAR; DOEBLING, 1999; SOHN et al., 2002), caracteriza-se como uma importante ferramenta de apoio ao gestor municipal, a qual pode ser empregada em diferentes estruturas pertencentes ao município e que demandem manutenção.

## **8 CONCLUSÃO**

Foi desenvolvido um sistema de monitoramento de baixo custo para monitorar pontes em uso de estradas rurais, este sistema foi validado em condições de laboratório e de campo.

Verificou-se que o sistema proposto apresentou baixos erros de medição para baixas frequências quando comparado ao sistema comercial.

Observou-se que os erros do sistema desenvolvido tende a aumentar para frequências superiores a 25 Hz, considerando tal faixa de frequência, o sistema de aquisição pode ser empregado para monitoramento de estruturas como pontes de madeira.

O sistema de aquisição de dados pode ser utilizado com confiabilidade em aplicações onde a faixa de frequência seja menor que 25 Hz. Tal sistema, como forma de diminuir custos, pode ser indicado para o estabelecimento de programas de manutenção, bem como ser empregado para a implementação de programas de conservação por gestores de poderes públicos.

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRE (ANTT). **RNTRC**. Brasília: ANTT, 2020. Disponível em: <[http://www.antt.gov.br/cargas/arquivos\\_old/RNTRC.html](http://www.antt.gov.br/cargas/arquivos_old/RNTRC.html)>. Acesso em: 28 jan. 2020.
- ALMEIDA, P. A. O.; RODRIGUES, J. F. S.; LIMA, A. B. **Critérios de otimização de projetos de pontes a partir de espectros de aceleração induzidas por veículos nos tabuleiros**. Contrato ACTUA-ND-4600004851/08. Relatório final da pesquisa realizada para concessionária da Rodovia Pres. Dutra LSE-DEE105-R20100924, 2010. 98 p.
- ARAÚJO NETO, G. N. Monitoração na construção civil. **Boletín Técnico**, Mérida, 2013. Disponível em: <<file:///C:/Users/55339/Downloads/B5-Monitorao-na-Construo-Civil.pdf>>. Acesso em: 2 out. 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR14037**: manual de operação, uso e manutenção das edificações Conteúdo e recomendações para elaboração e apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 1997. 5 p.
- \_\_\_\_\_. **NBR15307**: ensaios não destrutivos - Provas de cargas dinâmicas em grandes estruturas - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2006. 13 p.
- BAIMBRIDGE, R. et al. Bonded-in rod connections for timber structures- development of design methods and test observation. International. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, Guildford, v. 22, n. 1, p. 47-59, 2002.
- BILLINGTON, D. P. **The art of structural design: a swiss legacy**. Estados Unidos: Princeton University Art Museum, 2003. 212 p.
- BOLINA, C. C. et al. Vibrações: as frequências naturais estimadas e experimental de uma estrutura. In: CONGRESSO NACIONAL DE MATEMÁTICA APLICADA À INDÚSTRIA, 2014, Caldas Novas. **Anais...** Caldas Novas: UNB Gama, 2014. p. 1-9.
- BRANCO, F. A.; PAULO, P. V. O projeto de pontes para vidas superiores há 100 anos. **Revista ALCONPAT**, Mérida, v. 2, n. 1, p. 1-9, Enero/Abr. 2012.
- CALIL JUNIOR, C. et al. **Manual de projeto e construção de pontes de madeira**. São Carlos: Suprema, 2006. 252 p.
- CALIL JÚNIOR, C.; GÓES, J. L. N. Programa emergencial das pontes de madeira para o Estado de São Paulo. **Minerva**, São Paulo, v. 2, n. 1, p. 33-40, 2014.
- CALIL JUNIOR, C.; LAHR, F. A. R.; DIAS, A. A. **Dimensionamento de elementos estruturais de madeira**. Barueri: Manole, 2003. 152 p.
- CARVALHO NETO, J. A.; VELOSO, L. A. C. M. Monitoramento de pontes em concreto armado da estrada de ferro Carajás - Brasil. **Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural**, Passo Fundo, v. 13, n. 1, p. 7-25, jan./jun. 2016.

COLOMBO, A. B. et al. Ações de Inspeção e Monitoramento Estrutural em Pontes e Viadutos de uma Ferrovia Brasileira. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS, 7., 2014, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABECE, 2014. p. 1-10.

CONSELHO REGIONAL DE ENGENHARIA E AGRONOMIA DO PARANÁ (CREA-PR). Paraná, 2011. Disponível em: <<https://www.crea-pr.org.br/ws/>>. Acesso em: 20 jan. 2020.

DIAS, A. M. P. G. et al. Load-carrying capacity of timber concrete joints with owl-type fasteners. **Journal of Structural Engineering**, New York, v. 133, n. 5, p. 720-727, May 2007.

DOEBLING, S.; FARRAR, C. R. Using statistical analysis to enhance modal-based damage identification. In: DULIEU-BARTON, J. M.; STASZEWSKI, W. J.; WORDEN, K. **Structural damage assessment using advanced signal processing procedures: DAMAS'97: Proceedings of the International Conference on Damage Assessment of Structures (DAMAS '97)**. Sheffield: Sheffield Academic Press, 1997. p. 199-210.

FARRAR, C. R.; DOEBLING, S. W. Vibration-based structural damage identification. **Philosophical Transactions: mathematical, physical and engineering sciences**, London, v. 359, n. 1778, p. 131-149, 1999.

GELFI, P. et al. Stud shear connection design for composite concrete slab and wood beams. **Journal of Structural Engineering**, New York, v. 128, n. 5, p. 1544-1550, Jan. 2002.

GUTKOWSKI, R. M. et al. Investigation of notched composite wood-concrete connections. **Journal of Structural Engineering**, New York, v. 130, n. 10, p. 1553-1561, Oct. 2004.

HOLLAND, M. **Bridge monitoring technology plays critical role following Mississippi river barge crash**. [S.l.: s.n.], 2011. Disponível em: <http://www.cecer.army.mil/td/tips/index.cfm>>. Acesso em: 6 jul. 2019.

INAUDI, D.; WALDER, R. Integrated structural health monitoring systems for bridges. In: CONGRESSO DE SEGURANÇA E CONSERVAÇÃO DE PONTES, 1., 2009, Lisboa. **Anais...** Lisboa: ASCP'09, 2009. p. 65-69.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA (INMETRO). **Vocabulário Internacional de Metrologia: conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM 2009)**. Rio de Janeiro: INMETRO, 2009. 78 p.

LOUIS, A. R. **Sustainable bridges: green links to the future**. 2010. 91 p. Thesis (Master's degree) - The Ohio State University, Ohio, 2010.

MIOTTO, J. L.; DIAS, A. A. Reforço e recuperação de estruturas de madeira. **Semina: ciências exatas e tecnológicas**, Londrina, v. 27, n. 2, p. 163-174, jul./dez. 2006.

MLENEK, D. C. et al. Monitoramento dinâmico de estruturas: estudo comparativo entre técnicas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 27; EXPOCART, 28., 2017, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SBC, 2017. p. 14-18.

- MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. 7. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2009. 260 p.
- MORAES, V. M. **Ponte mista de madeira-concreto em vigas treliçadas de madeira**. 2007. 181 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira, 2007.
- MOUTINHO, C.; CUNHA, A.; CAETANO, E. Novas metodologias para a análise de vibrações em pavimentos de edifícios. In: CONGRESSO NACIONAL DE MECÂNICA EXPERIMENTAL GUIMARÃES, 8., 2010, Minho. **Anais...** Minho: APAET, 2010. p. 1-7.
- NATIONAL INSTRUMENTS (AI). **Accurate measurements for any budget**. Austin: AI, 2020. Disponível em: <<https://www.ni.com/pt-br.html>>. Acesso em: 25 jan. 2020.
- NEGRÃO, O. H. J.; SIMÕES, C. M. L. Dimensionamento e otimização da geometria de pontes em tirantes metálicas. In: ENCONTRO NACIONAL DE MECÂNICA COMPUTACIONAL, 3., 1992, Coimbra. **Anais...** Coimbra: Departamento de Engenharia Civil, 1992. p. E5.1-E5.13.
- OWEN, S. J.; PEARSON, R. S. The use of dynamic data for the structural health monitoring of bridges. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENGINEERING SURVEYS FOR CONSTRUCTION WORKS AND STRUCTURAL ENGINEERING, 1., 2004, United Kingdom. **Proceedings...** Nottingham: Institute of Engineering Surveying and Space Geodesy, 2004.
- PIGOZZO, J. C. **Estudos e aplicações de barras de aço coladas, como conectores em lajes mistas de madeira e concreto para tabuleiros de pontes**. 2004. 358 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.
- PRAVIA, Z. M. C.; BRAIDO, J. D. Measurements of bridges' vibration characteristics using a mobile phone. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 8, n. 5, p. 721-743, out. 2015.
- RAO, S. S. **Mechanical vibrations**. 3. ed. New York: Addison-Wesley, 1995. 912 p.
- SANCHES JÚNIOR, F.; VENTURINI, W. S. Damage modelling of reinforced concrete beams. **Advances in Engineering Software**, Barking, v. 38, n. 8/9, p. 538-546, Aug./Sept. 2006.
- SANTOS, F. L. et al. Efeito da frequência e amplitude de vibração sobre a derriça de frutos de café. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.14, n.4, p. 425-431, abr. 2010.
- SANTOS, L. O. Monitoramento e ensaio de pontes. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS, 7., 2014, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABECE, 2014. p. 1-14.
- SEEMECNC. **3D printers & more**. Ligonier: SeeMeCNC, 2020. Disponível em: <<https://www.seemecnc.com/>>. Acesso em: 25 mar. 2020.

SILVA, J. G. S.; ROEHL, J. L. P. Formulação probabilística para análise de tabuleiros de pontes rodoviárias com irregularidades superficiais. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DYNAMIC PROBLEMS IN MECHANICS, 7., 1999, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: [s.n.], 1999. v. 21, n. 3, p. 433-445.

SOHN, H.; WORDEN, K.; FARRAR, C. R. Novelty detection using auto-associative neural network. In: SYMPOSIUM ON IDENTIFICATION OF MECHANICAL SYSTEMS: INTERNATIONAL MECHANICAL ENGINEERING CONGRESS AND EXPOSITION, New York, 2001. **Proceedings...** New York: ASME, 2001. v. 2, p. 1525-1532.

SOHN, H. et al. **Applying the LANL statistical pattern recognition paradigm for structural health monitoring to data from a surface-effect fast patrol boat.** Los Alamos National Laboratory Report LA-13761- MS, 2001.

\_\_\_\_\_. **A review of structural health monitoring literature: 1996-2001.** LA-13761-MS, TRN: AH200122%%88, Los Alamos National Laboratory Report in Preparation, 2002.

SORIANO, J. **Estruturas mistas em concreto e em madeira: análise de vigas e painéis e aplicações na construção civil.** 2001. 264 p. Tese (Doutorado em Construções Rurais e Ambientação) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

SORIANO, J.; MASCIA, N. T. Estruturas mistas em madeira-concreto: uma técnica racional para pontes de estradas vicinais. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 4, p. 1260-1269, jul. 2009.

SOUZA, C. M. A. **Desenvolvimento e modelagem de sistemas de derriça e de abanação de frutos do cafeiro.** 2004. 123 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2004.

SRIVASTAVA, A. K.; GOERING, C. E.; ROHRBACH, R. P. **Engineering principles of agricultural machines.** Michigan: ASAE, 1996. 601 p.

STEINBERG, E. et al. Connectors for timber-lightweight concrete composite structures. **Journal of Structural Engineering**, New York, v. 129, n. 11, p. 1538-1545, Oct. 2003.

STRASER, E. G. et al. A modular, wireless network platform for monitoring structures. In: INTERNATIONAL MODAL ANALYSIS CONFERENCE, 16., 1998. **Proceedings...** Santa Bárbara, Califórnia: IMAC, 1998. p. 450-456.

TODD, M.; JOHNSON, G.; VOHRA, S. Progress towards deployment of bragg grating-based fiber optic systems in structural monitoring applications. In: EUROPEAN COST F3 CONFERENCE ON SYSTEM IDENTIFICATION AND STRUCTURAL HEALTH MONITORING, 2000, Madrid. **Proceedings...** Madrid: [s.n.], 2000. p. 521-530.

TODD, M. D. et al. Vibration-based damage assessment utilizing state space geometry changes: local attractor variance ratio. **Smart Materials and Structures**, New York, v. 10, n. 5, p. 1000-1008, 2001.

VALENTE, C.; SPINA, D. Crack detection in beam elements using the gabor transform. In: ADAPTIVE COMPUTING IN ENGINEERING DESIGN AND CONTROL-'96, 1997, Plymouth. **Proceedings...** Plymouth: University of Plymouth, 1997. p. 147-156.

VANDIVER, T. L. Health Monitoring of US Army Missile Systems. In: CHANG, F.-K. (Ed.). **Structural health monitoring: current status and perspectives**. Palo Alto: Stanford University, 1997. p. 191-196.

WIBERG, J. **Bridge monitoring to allow for reliable dynamic FE modelling: a case study of the new Årsta Railway Bridge**. Stockholm: KTH, 2006. 151 p.

PRAVIA, Z. M. C.; BRAIDO, J. D. Measurements of bridges' vibration characteristics using a mobile phone. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 8, n. 5, p. 732-743, 2015.