



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CARIRI
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
ENGENHARIA CIVIL**

VINÍCIUS GONÇALVES DE BARROS

**ANÁLISE MODAL EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DE VIGA TRELIÇADA COM
PERFIS DE CHAPA DOBRADA.**

JUAZEIRO DO NORTE

2026

VINÍCIUS GONÇALVES DE BARROS

**ANÁLISE MODAL EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DE VIGA TRELIÇADA COM
PERFIS DE CHAPA DOBRADA.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal do Cariri, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Cleirton André Silva de Freitas.

JUAZEIRO DO NORTE

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Cariri
Sistema de Bibliotecas

B277a Barros, Vinícius Gonçalves de.

Análise modal experimental e numérica de viga treliçada com perfis de chapa dobrada/
Vinícius Gonçalves de Barros. – 2026.
24 f. il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro de Ciências
e Tecnologia, Universidade Federal do Cariri, Juazeiro do Norte, CE, 2026.

Orientador: Prof. Dr. Cleirton André Silva de Freitas.

1. Análise modal. 2. Vigas treliçadas. 3. Perfis de chapa dobrada. 4. Método dos
elementos finitos. 5. Análise de estruturas. I. Freitas, Cleirton André Silva de (Orient.).
II. Universidade Federal do Cariri. III. Título.

CDD 624.1772



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO CARIRI
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

“Análise modal experimental e numérica de viga treliçada com perfis de chapa dobrada”

Vinicius Goncalves de Barros

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal do Cariri, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil. Área de concentração: Engenharia Civil.

Aprovada em 27 de agosto de 2026.

Banca Examinadora

Documento assinado digitalmente
 **CLEIRTON ANDRE SILVA DE FREITAS**
Data: 02/09/2026 10:58:37-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Cleirton Andre Silva de Freitas
Orientador(a)

Documento assinado digitalmente
 **ERWIN ULISES LOPEZ PALECHOR**
Data: 02/09/2026 11:02:08-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Erwin Ulises Lopez Palechor
1º membro examinador

Documento assinado digitalmente
 **FRANCISCO ALEX CORREIA MONTEIRO**
Data: 02/09/2026 12:32:30-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.Dr. Francisco Alex Correia Monteiro
2º membro examinador

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela sabedoria, pelo discernimento e pela força concedidos durante toda esta caminhada, essenciais para superar os desafios e concluir mais esta importante etapa da minha vida.

Aos meus pais, Venâncio e Anatália, por todo o amor, dedicação, ensinamentos e incentivo, que foram fundamentais para minha formação pessoal e acadêmica.

À minha esposa, Ana Rafaela, pelo companheirismo, compreensão, paciência e apoio constante, estando ao meu lado nos momentos de dificuldade e nas conquistas alcançadas ao longo deste percurso.

À minha irmã, Jaqueline, ao seu esposo, Breno, e à minha sobrinha, Laura, pelo carinho, pela presença e pelo apoio que sempre me proporcionaram.

Aos professores André, Erwin, Francisco e Alex, e ao técnico de laboratório Igor, pelos ensinamentos, orientações, disponibilidade e contribuições ao longo da minha formação e para o desenvolvimento deste trabalho, especialmente durante a realização das atividades experimentais.

À Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP), pelo apoio financeiro concedido por meio da bolsa de iniciação científica, que contribuiu significativamente para a realização desta pesquisa.

RESUMO

O comportamento dinâmico de vigas treliçadas é influenciado pelas características das ligações entre seus elementos, tornando sua adequada representação importante para a determinação das frequências naturais e dos modos de vibração. Com base nesse aspecto, este trabalho teve como objetivo avaliar a influência de diferentes configurações de ligação sobre o comportamento dinâmico de vigas treliçadas bidimensionais constituídas por perfis de chapa dobrada. Foram investigados três modelos: ligação soldada, ligação parafusada com espaçador de madeira e ligação parafusada. A avaliação foi realizada por meio de análise modal experimental e análise modal numérica, com ensaios de impacto utilizando martelo instrumentado e acelerômetros, associados a modelos desenvolvidos pelo método dos elementos finitos. A comparação das frequências naturais e das formas modais indicou melhor concordância para a configuração parafusada com espaçador de madeira, enquanto o modelo soldado apresentou a maior discrepância entre os resultados. Os resultados evidenciaram a influência das condições de ligação sobre a resposta dinâmica das vigas e a capacidade dos modelos numéricos em representar as principais características modais identificadas experimentalmente.

Palavras-chave: análise modal; viga treliçada bidimensional; perfis de chapa dobrada.

ABSTRACT

The dynamic behavior of truss beams is influenced by the characteristics of the connections between their elements, making their proper representation important for determining natural frequencies and mode shapes. Based on this aspect, this study aimed to evaluate the influence of different connection configurations on the dynamic behavior of two-dimensional truss beams composed of cold-formed steel. Three models were investigated: welded connection, bolted connection with a wooden spacer, and bolted connection. The evaluation was carried out through experimental modal analysis and numerical modal analysis, using impact tests with an instrumented hammer and accelerometers, together with models developed using the finite element method. The comparison of natural frequencies and mode shapes indicated better agreement for the bolted configuration with a wooden spacer, whereas the welded model showed the greatest discrepancy between the results. The findings demonstrated the influence of connection conditions on the dynamic response of the beams and the ability of the numerical models to represent the main modal characteristics identified experimentally.

Keywords: modal analysis; two-dimensional truss beam; cold-formed steel.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Relação entre a frequência fundamental e a aceleração RMS dos pisos avaliados in situ	10
Figura 2 – Influência das restrições nos apoios sobre a resposta dinâmica.....	12
Figura 3 – Comparação entre as frequências naturais obtidas experimental e numericamente	13
Figura 4 – Geometria da viga treliçada e seção transversal do perfil metálico	14
Figura 5 – Fluxograma da pesquisa	14
Figura 6 – Modelo de elementos finitos da viga treliçada bidimensional	15
Figura 7 – Primeiro modo de vibração do Modelo 01 obtido por análise modal numérica	16
Figura 8 – Primeiro modo de vibração do Modelo 02 obtido por análise modal numérica	16
Figura 9 – Primeiro modo de vibração do Modelo 03 obtido por análise modal numérica ...	16
Figura 10 – Protótipo da viga treliçada bidimensional e detalhes das ligações: (a) ligação soldada; (b) ligação parafusada com espaçador de madeira; (c) ligação parafusada	17
Figura 11 – Configuração experimental do ensaio modal e detalhes: (a) Posição do acelerômetro; (b) Apoio.....	18
Figura 12 – Equipamentos utilizados no ensaio modal experimental: (a) chassi de aquisição NI cDAQ-9174; (b) módulo de aquisição NI 9234; (c) acelerômetro piezelétrico uniaxial PCB 352C33; (d) martelo instrumentado PCB 086C03	18
Figura 13 – Distribuição dos pontos de medição e posicionamento dos acelerômetros na viga treliçada bidimensional.....	19
Figura 14 – Diagrama de blocos desenvolvido no LabVIEW para aquisição dos sinais do ensaio modal.....	20
Figura 15 – Forma modal experimental do Modelo 01 obtida no ARTeMIS Modal.....	20
Figura 16 – Forma modal experimental do Modelo 02 obtida no ARTeMIS Modal.....	21
Figura 17 – Forma modal experimental do Modelo 03 obtida no ARTeMIS Modal.....	21

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	VISÃO GERAL E OBJETIVOS DA PESQUISA.....	13
3	ANÁLISE NUMÉRICA POR ELEMENTOS FINITOS.....	14
4	ANÁLISE MODAL EXPERIMENTAL	17
5	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS.....	21
6	CONCLUSÃO	22
	REFERÊNCIAS.....	23

1 INTRODUÇÃO

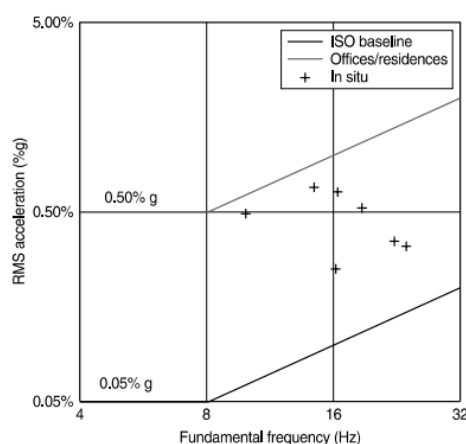
Em decorrência dos constantes avanços na tecnologia dos materiais empregados na engenharia civil, bem como do aumento das exigências de desempenho por parte dos usuários, o projeto de estruturas metálicas deixou de considerar apenas os critérios relacionados à resistência e à estabilidade, passando a incorporar requisitos de desempenho em serviço voltados ao conforto e à funcionalidade das edificações. Nesse contexto, a ABNT NBR 8800:2024 estabelece princípios básicos para a realização de análises dinâmicas submetidas a ações induzidas por pessoas, cujas respostas possam caracterizar estados-limites de serviço associados às vibrações.

A adoção de sistemas estruturais mais esbeltos, com maiores vãos e elevada flexibilidade, pode torná-los mais suscetíveis a vibrações capazes de causar desconforto durante as atividades humanas usuais e, em alguns casos, comprometer o funcionamento de equipamentos. Essa preocupação tem sido incorporada às recentes revisões das normas brasileiras, como a ABNT NBR 6123:2023, que contempla procedimentos mais abrangentes para a análise dinâmica de estruturas submetidas à ação do vento, incluindo a determinação das frequências naturais, modos de vibração e critérios de conforto humano.

A análise dinâmica estrutural consiste no estudo do comportamento das estruturas quando submetidas a ações variáveis no tempo, cujos efeitos não podem ser adequadamente representados por modelos estáticos. Como parte integrante desse estudo, a análise modal constitui uma ferramenta fundamental para a caracterização do comportamento vibracional das estruturas, permitindo determinar as características dinâmicas inerentes de um sistema, expressas por suas frequências naturais, fatores de amortecimento e modos de vibração, e utilizá-las na formulação de um modelo matemático representativo de seu comportamento dinâmico. Essa análise pode ser desenvolvida por meio de abordagens teóricas, numéricas e experimentais (HE; FU, 2001).

A influência dos detalhes construtivos no desempenho vibratório dos pisos leves de aço formado a frio tem sido objeto de diferentes investigações experimentais. Considerando esse aspecto, Xu (2011) realizou um amplo estudo sobre o desempenho vibratório de pisos leves, envolvendo mais de 100 configurações ensaiadas em laboratório, além de avaliações realizadas *in situ*. Foram analisadas diferentes condições de apoio e detalhes construtivos, considerando parâmetros como frequências naturais, deflexões, razão de amortecimento e resposta à aceleração, com o objetivo de identificar os fatores que mais influenciam o comportamento vibratório desses sistemas.

Figura 1 – Relação entre a frequência fundamental e a aceleração RMS dos pisos avaliados *in situ*



Fonte: Xu (2011).

Os resultados apresentados por Xu (2011) evidenciam que o desempenho vibratório dos sistemas de piso é influenciado pelos materiais empregados e pelos detalhes construtivos adotados. A avaliação experimental reforçou a importância da frequência fundamental na caracterização da resposta vibratória, mostrando ainda que o acréscimo de massa, mesmo quando acompanhado pelo aumento da rigidez, pode reduzir os valores das frequências e aproximá-los da faixa de maior sensibilidade humana. O autor também verificou que as condições de ligação nas extremidades das vigas influenciam a frequência fundamental, o amortecimento e a resposta estrutural em razão das restrições impostas às rotações. Além disso, os pisos avaliados *in situ* apresentaram, em quase todos os casos, parâmetros modais superiores aos obtidos em laboratório, indicando que os ensaios laboratoriais forneceram resultados mais conservadores, principalmente em decorrência das diferenças de rigidez, condições de apoio e interação com os demais componentes da edificação.

Guan *et al.* (2019) investigaram o comportamento vibratório de sistemas de piso constituídos por perfis de aço formados a frio, combinando ensaios experimentais e análises numéricas por elementos finitos. Foram elaborados três sistemas de piso, denominados CF-0, CF-1 e CF-2. Nos ensaios dinâmicos, os pisos foram excitados por caminhamento de uma pessoa de aproximadamente 75 kg e por impactos de martelo, sendo utilizados acelerômetros piezelétricos para registrar as respostas e determinar as frequências fundamentais e as taxas de amortecimento.

Tabela 1 – Frequências fundamentais e amortecimento

Specimens	Load case	f_T (Hz)	f_{FE} (Hz)		f_{FE-FS}/f_T	f_{FE-SS}/f_T	Damping ratio (%)
			f_{FE-FS}	f_{FE-SS}			
CF-0	Hammer	14.6	–	15.1	–	1.03	1.51
	Walking	14.7	–	–	–	1.03	1.98
CF-1	Hammer	14.4	15.6	15.3	1.08	1.06	1.37
	Walking	14.4	–	–	1.08	1.06	1.58
CF-2	Hammer	14.4	15.8	15.6	1.10	1.08	1.41
	Walking	14.4	–	–	1.10	1.08	1.62

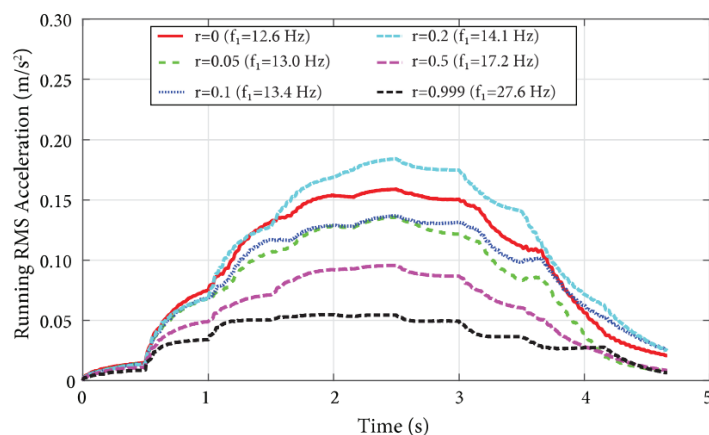
FE: finite element.

Fonte: Guan *et al.* (2019).

Os resultados obtidos por Guan *et al.* (2019) mostraram boa concordância entre os ensaios experimentais e os modelos de elementos finitos, com diferença máxima de 10% para as frequências obtidas e compatibilidade entre as primeiras formas modais identificadas pelos dois métodos. A comparação entre os protótipos indicou ainda que a presença da malha de aço, empregada como elemento resistente ao cisalhamento, exerceu influência mínima sobre os parâmetros dinâmicos avaliados e sobre a deflexão central, enquanto o aumento da largura do piso promoveu redução da deflexão, com pequena alteração no comportamento vibratório. Nas análises paramétricas, o reforço das restrições nas extremidades resultou em acréscimo da frequência fundamental e redução da deflexão central. Com base nos resultados experimentais, numéricos e nos critérios de projeto analisados, os autores recomendaram, para esse sistema de piso, um limite mínimo de 10 Hz para esse parâmetro e máximo de 1 mm para a deflexão central sob carga concentrada de 1 kN.

As condições de contorno constituem um aspecto importante na avaliação do comportamento dinâmico das estruturas, uma vez que as restrições impostas nos apoios podem alterar a rigidez do sistema e, consequentemente, sua resposta vibratória. Zhang e Xu (2020) realizaram estudos paramétricos para avaliar os principais fatores que influenciam o comportamento vibratório desses sistemas, considerando a frequência dos passos, a relação de massas, a razão de amortecimento, a trajetória de caminhada e as condições de apoio nas extremidades.

Figura 2 – Influência das restrições nos apoios sobre a resposta dinâmica

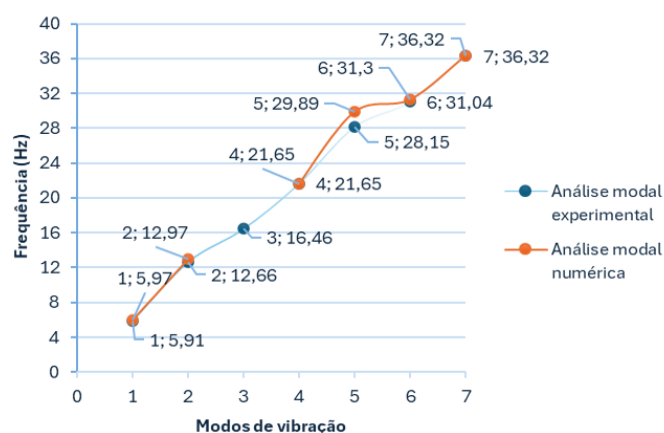


Fonte: Zhang e Xu (2020).

Os resultados mostraram que o aumento da restrição rotacional nos apoios tende a reduzir a resposta dinâmica do piso, embora esse comportamento não tenha sido observado em todas as condições analisadas. Para uma restrição intermediária, a frequência fundamental atingiu 14,1 Hz, aproximando-se de um múltiplo da frequência dos passos adotada no estudo e favorecendo a ocorrência de ressonância, com resposta superior à verificada no sistema simplesmente apoiado. Zhang e Xu (2020) concluíram, portanto, que o aumento das restrições nos apoios de extremidade nem sempre resulta na redução das vibrações, sendo necessário considerar conjuntamente as condições de contorno, a frequência fundamental da estrutura e as características da excitação na definição de critérios de projeto voltados ao desempenho vibratório.

O estudo realizado por Kortiš *et al.* (2016) teve como objetivo determinar as frequências naturais e os modos de vibração de uma estrutura de aço por meio de ensaio modal experimental, utilizando os resultados obtidos para avaliar a representatividade do modelo numérico. A estrutura treliçada analisada é constituída por aço inoxidável, com seções transversais retangulares unidas por soldagem, e apoiada sobre dois perfis de aço considerados corpos rígidos. Os acelerômetros empregados na medição da resposta estrutural foram instalados nas ligações entre as diagonais e os banzos inferiores. A aceleração vertical foi medida em 14 pontos, enquanto a aceleração horizontal foi registrada em 7 pontos. A estrutura foi excitada por meio de um martelo modal, com impactos aplicados nos 20 graus de liberdade considerados no ensaio.

Figura 3 – Comparação entre as frequências naturais obtidas experimental e numericamente



Fonte: Adaptado de Kortiš *et al.* (2016).

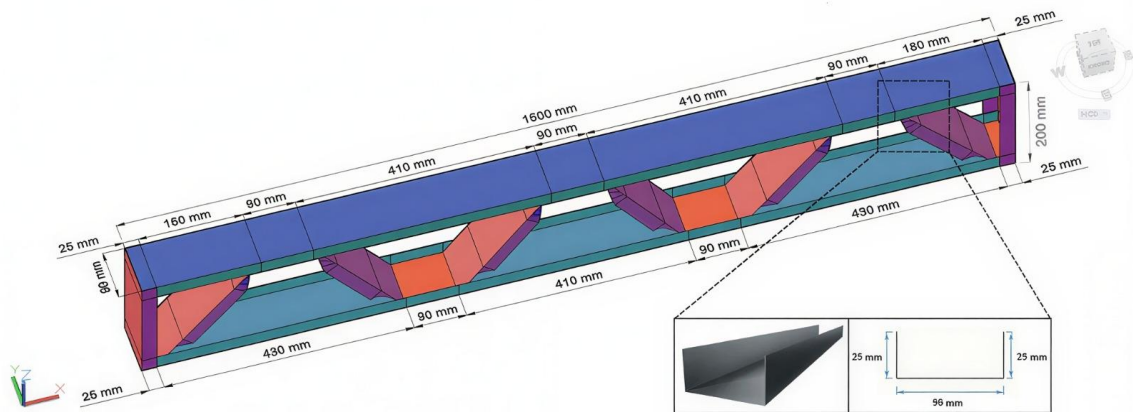
Os resultados obtidos indicaram que as frequências naturais determinadas experimentalmente apresentaram valores ligeiramente inferiores aos obtidos na análise numérica, evidenciando uma maior rigidez do modelo computacional em relação à estrutura ensaiada em laboratório. Contudo, foi observada boa concordância entre as formas modais experimentais e numéricas, indicando que o modelo teórico apresentou adequada descrição do comportamento dinâmico da estrutura.

2 VISÃO GERAL E OBJETIVOS DA PESQUISA

Este trabalho apresenta um estudo do comportamento dinâmico de vigas treliçadas bidimensionais constituídas por perfis metálicos de chapa dobrada, com ênfase na determinação de suas frequências naturais e modos de vibração. A pesquisa tem como objetivo comparar os resultados obtidos por meio das análises modais experimental e numérica, verificando a representatividade dos modelos numéricos e avaliando a influência dos diferentes tipos de conexão entre os componentes sobre o comportamento dinâmico das vigas.

O estudo foi desenvolvido a partir de três configurações de vigas treliçadas bidimensionais, diferenciadas pelo tipo de conexão entre seus elementos estruturais: ligação soldada, ligação parafusada com espaçador de madeira e ligação parafusada. Para cada configuração, foram realizadas análises modais pelos dois métodos adotados.

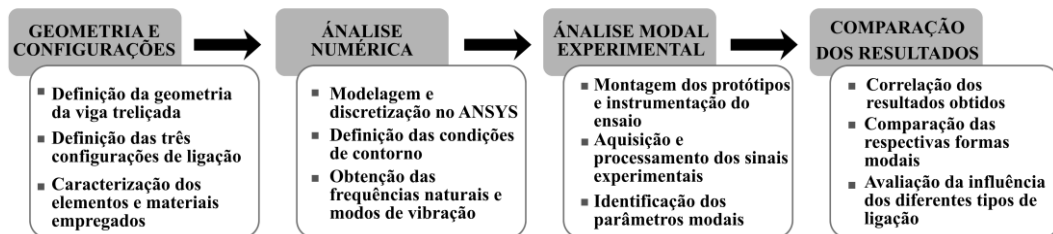
Figura 4 – Geometria da viga treliçada e seção transversal do perfil metálico



Fonte: Autor (2026).

Na etapa numérica, os modelos foram desenvolvidos no software ANSYS® 2025 R2, considerando as propriedades dos materiais, as condições de contorno e os critérios de discretização. Paralelamente, foram realizados ensaios de Análise Modal Experimental (*Experimental Modal Analysis* – EMA), seguidos do processamento dos dados e da identificação dos parâmetros modais. A comparação entre os resultados obtidos pelas duas abordagens permitiu avaliar a correspondência entre os modelos numéricos e experimentais e investigar os efeitos das diferentes configurações de ligação sobre a resposta dinâmica das estruturas.

Figura 5 – Fluxograma da pesquisa



Fonte: Autor (2026).

3 ANÁLISE NUMÉRICA POR ELEMENTOS FINITOS

A análise numérica foi desenvolvida utilizando os softwares AutoCAD® e ANSYS Workbench® 2025 R2. Inicialmente, foi elaborado no AutoCAD® o modelo geométrico da viga treliçada, contemplando os banzos superior e inferior, os perfis laterais e as diagonais com suas respectivas regiões estampadas. A partir dessa geometria, foram estabelecidos três modelos correspondentes às configurações de ligação investigadas neste estudo: ligação soldada, ligação parafusada com espaçadores de madeira e ligação parafusada.

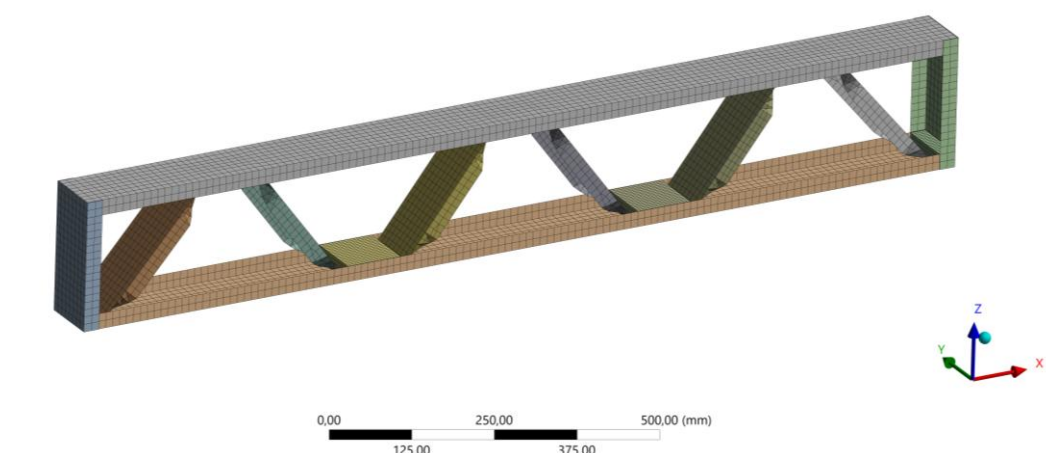
Os componentes metálicos foram representados por superfícies, considerando a pequena espessura dos perfis em relação às demais dimensões, possibilitando sua posterior discretização por elementos de casca (*shell elements*). Nos modelos com ligações parafusadas, as regiões de conexão foram definidas considerando o posicionamento dos parafusos. No

modelo soldado, essas regiões foram mantidas contínuas, de modo a representar a continuidade característica desse tipo de união.

Após a conclusão da modelagem geométrica, os componentes foram exportados em formato IGES e importados para o ANSYS Workbench® 2025 R2, preservando a posição relativa e a orientação definidas no AutoCAD®. A partir da geometria importada, foi configurada a análise modal, dando sequência às etapas de definição das propriedades dos materiais, das espessuras, das ligações e das condições de contorno.

No modelo numérico, foi adotado o material *Structural Steel*, disponível na biblioteca do software, sendo adotada espessura de 0,5 mm para os perfis. Nas regiões estampadas das diagonais, foi atribuída espessura de 1,0 mm, correspondente ao processo de estampagem. Para os espaçadores, foi utilizada madeira comercialmente identificada como maçaranduba, cujas propriedades mecânicas foram definidas com base em dados disponíveis na literatura para *Manilkara huberi* (ARAUJO JUNIOR *et al.*, 2020).

Figura 6 – Modelo de elementos finitos da viga treliçada bidimensional



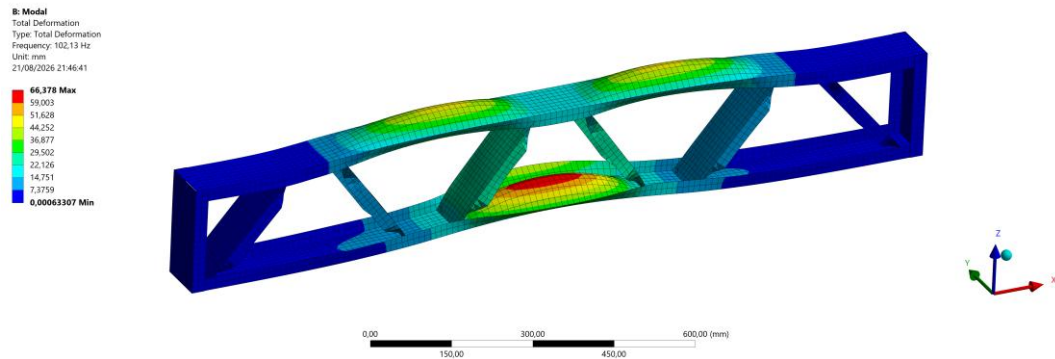
Fonte: Autor (2026).

As interfaces entre os componentes foram definidas por meio de contatos do tipo *Bonded*, admitindo aderência perfeita entre as superfícies conectadas. Nas configurações parafusadas, o efeito das ligações mecânicas foi representado pela combinação entre a discretização geométrica das regiões de conexão e a condição de contato adotada. A discretização da estrutura foi realizada com elementos de casca, utilizando tamanho de malha de 12 mm em todos os modelos analisados.

As condições de contorno foram definidas nas regiões de apoio localizadas nas extremidades da viga, restringindo os deslocamentos horizontal e vertical. Após essa definição, a análise modal foi solucionada para obtenção dos parâmetros modais inerentes para cada tipo de ligação.

Os resultados obtidos para as três configurações analisadas são apresentados a seguir, considerando apenas o primeiro modo de vibração identificado em cada modelo e sua respectiva frequência natural.

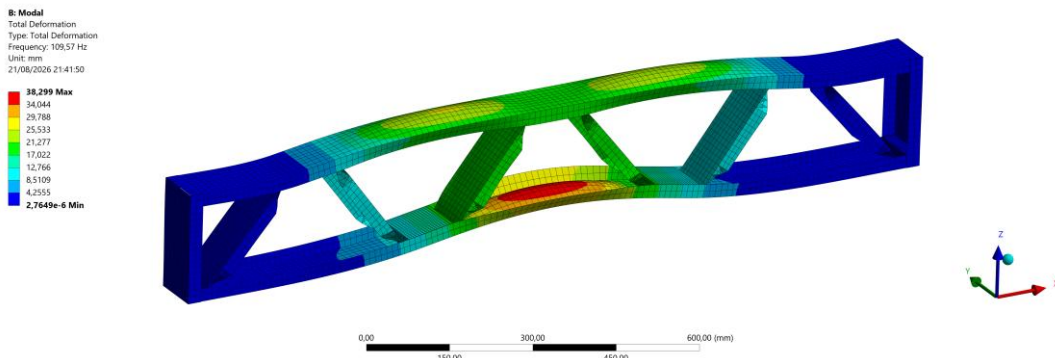
Figura 7 – Primeiro modo de vibração do Modelo 01 obtido por análise modal numérica



Fonte: Autor (2026).

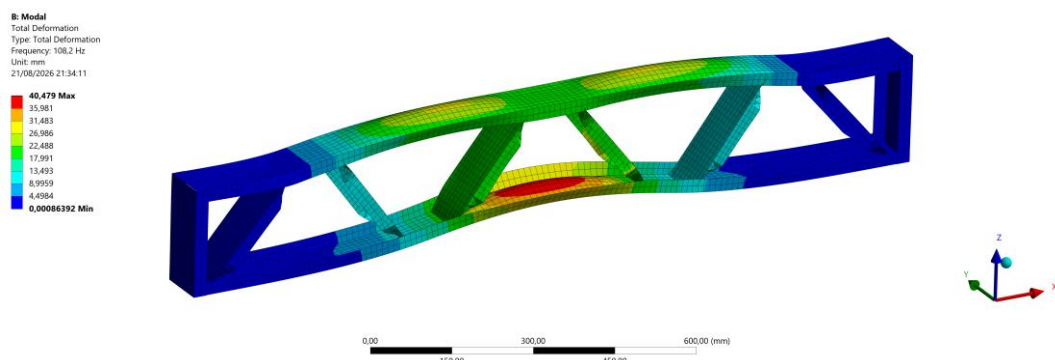
Para a configuração com ligação soldada, o primeiro modo de vibração apresentou frequência natural de 102,13 Hz, com maior deformação na região central da viga e redução progressiva dos deslocamentos em direção às extremidades.

Figura 8 – Primeiro modo de vibração do Modelo 02 obtido por análise modal numérica



Fonte: Autor (2026).

Figura 9 – Primeiro modo de vibração do Modelo 03 obtido por análise modal numérica



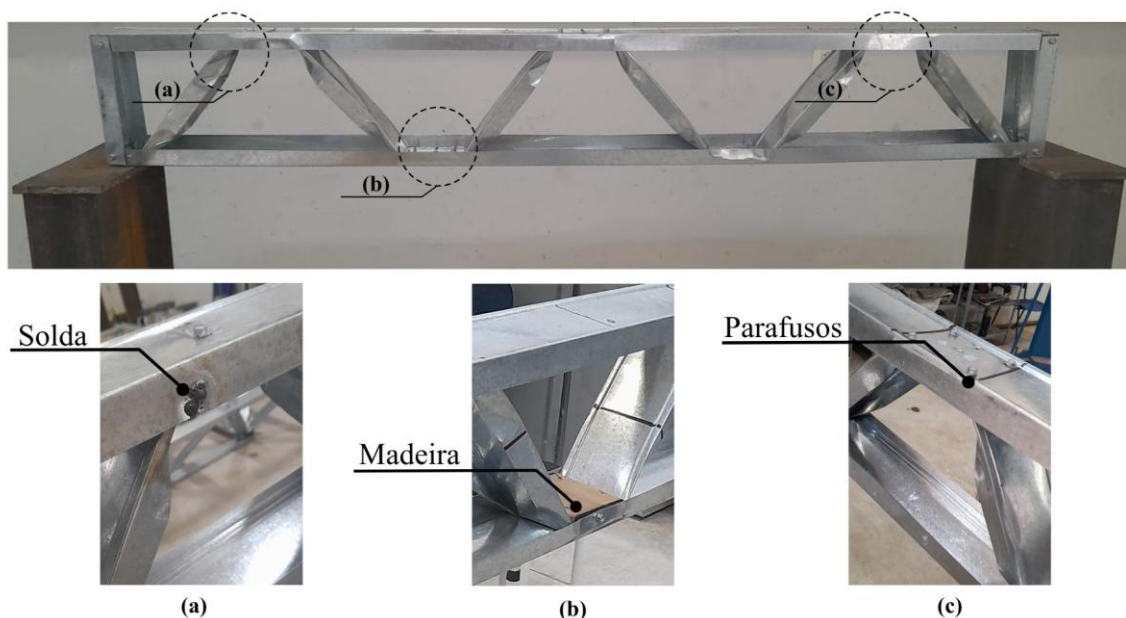
Fonte: Autor (2026).

Para os modelos parafusado com espaçadores de madeira e parafusado, foram obtidas frequências de 109,57 Hz e 108,20 Hz, respectivamente, sendo verificadas características modais semelhantes em ambas as configurações, com maiores amplitudes de deformação próximas ao meio do vão e comportamento compatível com a forma modal identificada para a estrutura.

4 ANÁLISE MODAL EXPERIMENTAL

A análise modal experimental foi conduzida em três protótipos de vigas treliçadas bidimensionais, com o objetivo de identificar seus parâmetros dinâmicos e investigar a influência das diferentes configurações de ligação sobre a resposta vibratória da estrutura. Os protótipos apresentam geometria global e perfis metálicos equivalentes, sendo diferenciados exclusivamente pelo sistema de ligação adotado entre os elementos estruturais. A Figura 10 apresenta o protótipo da viga treliçada bidimensional e os detalhes construtivos das três configurações avaliadas: (a) ligação soldada, (b) ligação parafusada com espaçador de madeira e (c) ligação parafusada.

Figura 10 – Protótipo da viga treliçada bidimensional e detalhes das ligações: (a) ligação soldada; (b) ligação parafusada com espaçador de madeira; (c) ligação parafusada

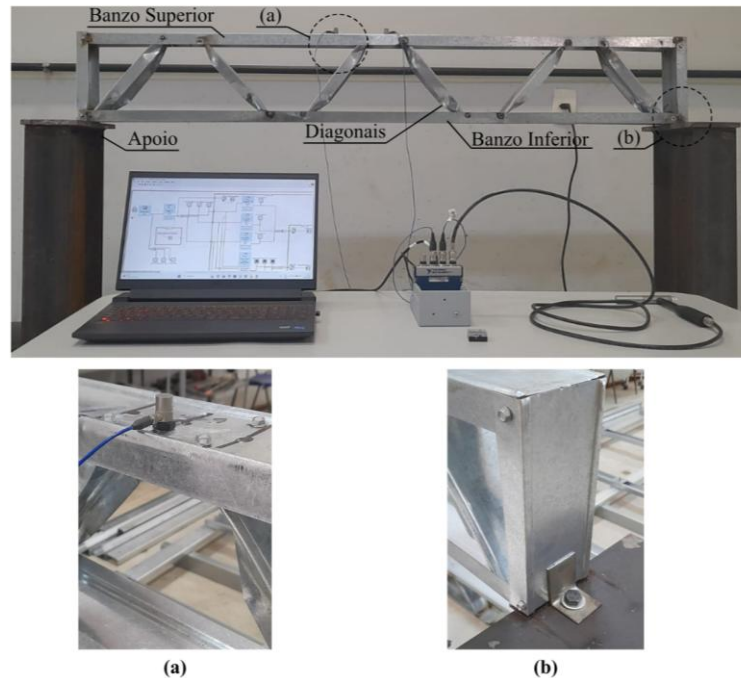


Fonte: Autor (2026).

A montagem experimental foi realizada em bancada de laboratório, de modo a reproduzir as condições de contorno consideradas no modelo numérico. A viga foi apoiada sobre dois suportes metálicos posicionados em suas extremidades, sendo a vinculação aos apoios realizada por meio de elemento metálico fixado por parafuso. Essa configuração permitiu restringir os deslocamentos da estrutura de acordo com as condições estabelecidas na

modelagem, mantendo a compatibilidade entre as configurações numérica e experimental.

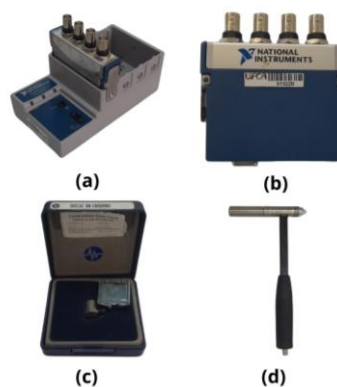
Figura 11 – Configuração experimental do ensaio modal e detalhes: (a) Posição do acelerômetro; (b) Apoio



Fonte: Autor (2026).

A instrumentação utilizada no ensaio foi composta por um sistema de aquisição de dados, um módulo de aquisição dinâmica, dois acelerômetros piezelétricos uniaxiais e um martelo instrumentado. O martelo foi empregado na aplicação da excitação por impacto, enquanto os acelerômetros registraram a resposta vibratória da estrutura. Os sinais provenientes dos sensores foram registrados pelo sistema de aquisição para posterior processamento e análise dos dados experimentais.

Figura 12 – Equipamentos utilizados no ensaio modal experimental: (a) chassi de aquisição NI cDAQ-9174; (b) módulo de aquisição NI 9234; (c) acelerômetro piezelétrico uniaxial PCB 352C33; (d) martelo instrumentado PCB 086C03

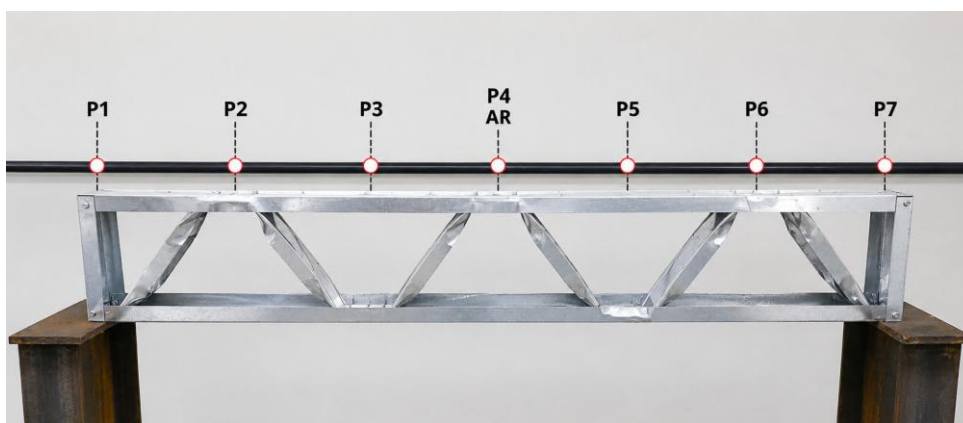


Fonte: Autor (2026).

Para a aquisição das respostas dinâmicas, foi empregado o método do acelerômetro móvel (*roving accelerometer method*), no qual um dos sensores permaneceu fixo durante todo o ensaio, atuando como referência, enquanto o segundo acelerômetro foi deslocado sucessivamente entre os pontos de medição previamente definidos.

A viga foi subdividida em sete pontos de medição igualmente espaçados ao longo de seu comprimento, com intervalo de 250 mm entre posições consecutivas. Em cada posição do acelerômetro móvel, foram adquiridos simultaneamente o sinal de força proveniente do martelo instrumentado e os sinais de aceleração registrados pelos sensores.

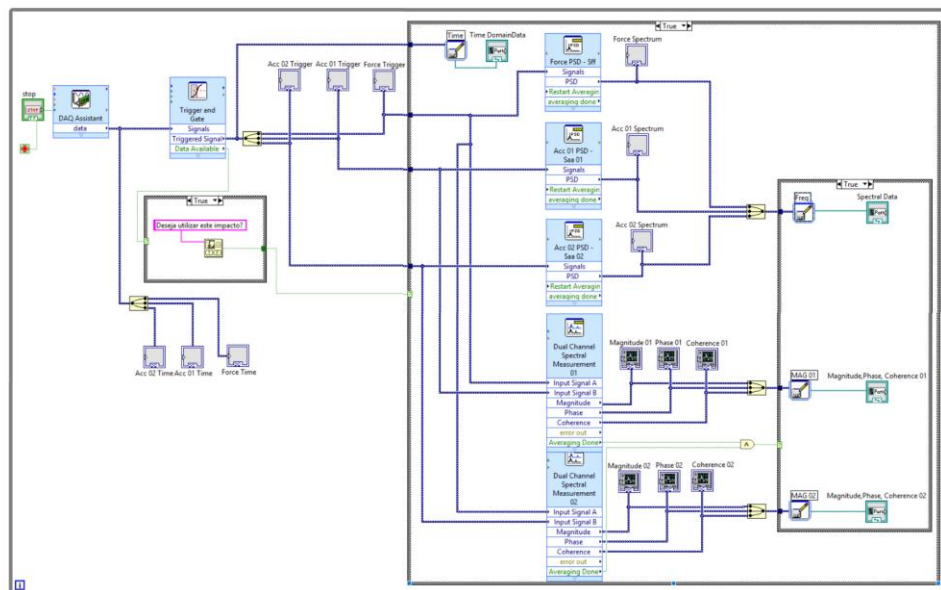
Figura 13 – Distribuição dos pontos de medição e posicionamento dos acelerômetros na viga treliçada bidimensional



Fonte: Autor (2026).

A aquisição dos dados experimentais foi realizada por meio de um instrumento virtual (*Virtual Instrument – VI*) desenvolvido na plataforma LabVIEW. O programa foi projetado para realizar a aquisição simultânea dos sinais provenientes do martelo instrumentado e dos dois acelerômetros, bem como possibilitar o monitoramento das respostas nos domínios do tempo e da frequência durante a execução dos ensaios. Posteriormente, os dados experimentais foram tratados no software MATLAB por meio de uma rotina destinada à seleção e organização das colunas de dados necessárias à etapa subsequente da análise.

Figura 14 – Diagrama de blocos desenvolvido no LabVIEW para aquisição dos sinais do ensaio modal

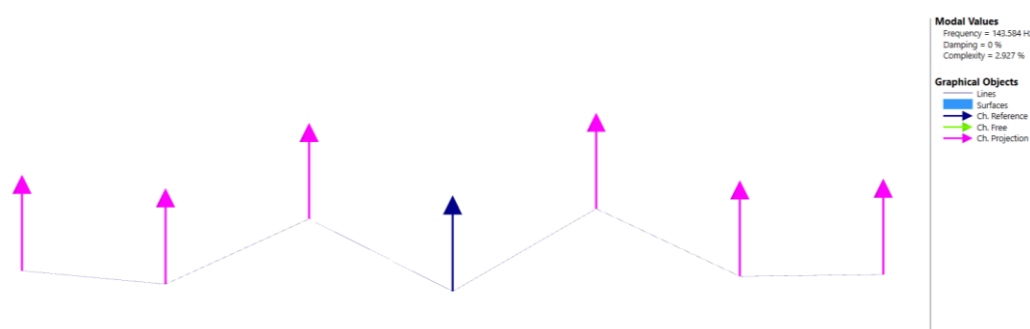


Fonte: Autor (2026).

Após o tratamento dos dados experimentais, os arquivos resultantes foram importados para o software ARTeMIS Modal para a identificação dos parâmetros modais da estrutura. Inicialmente, foi construída a geometria da viga a partir dos mesmos sete pontos definidos no procedimento experimental, aos quais foram associados os respectivos sinais adquiridos. A identificação modal foi realizada pelo método *Frequency Domain Decomposition* (FDD), a partir da análise das respostas no domínio da frequência, em que os picos dos valores singulares são associados às frequências naturais da estrutura, possibilitando também a identificação das respectivas formas modais.

Para o modelo com ligação soldada, o primeiro modo de vibração apresentou frequência natural de 143,58 Hz, com forma modal caracterizada pelas maiores amplitudes de resposta nas regiões intermediárias da viga.

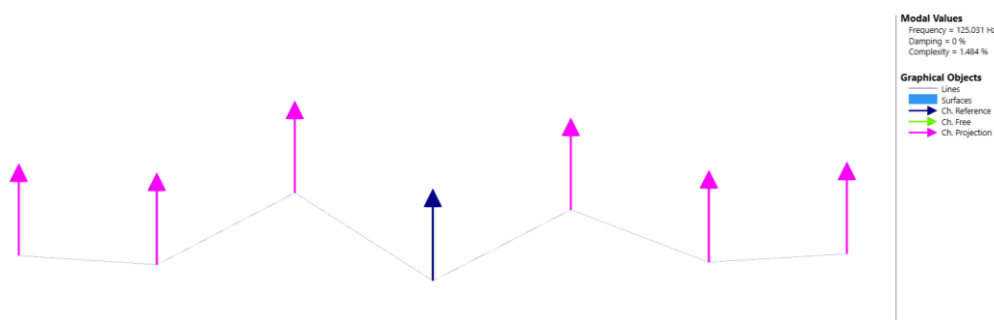
Figura 15 – Forma modal experimental do Modelo 01 obtida no ARTeMIS Modal



Fonte: Autor (2026).

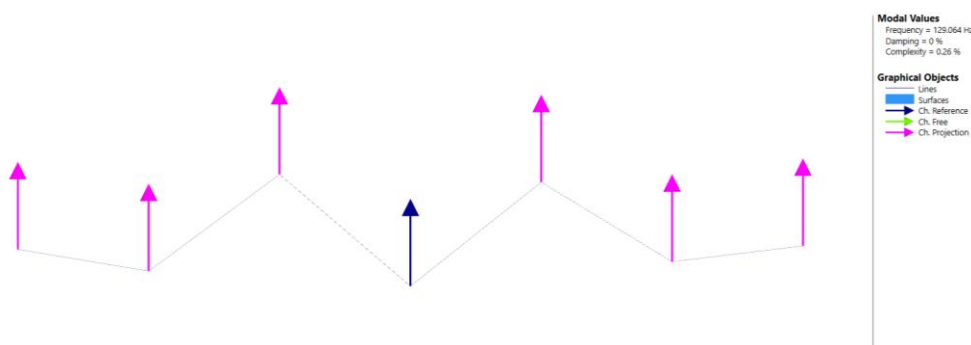
Para o modelo 02, correspondente à ligação parafusada com espaçadores de madeira, o primeiro modo de vibração apresentou frequência natural de 125,03 Hz, enquanto no modelo parafusado foi obtido o valor de 129,06 Hz. A proximidade entre esses resultados evidencia comportamento dinâmico semelhante entre as duas configurações, que também apresentaram formas modais semelhantes, com distribuição da resposta ao longo do comprimento da viga.

Figura 16 – Forma modal experimental do Modelo 02 obtida no ARTeMIS Modal



Fonte: Autor (2026).

Figura 17 – Forma modal experimental do Modelo 03 obtida no ARTeMIS Modal



Fonte: Autor (2026).

5 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

A comparação entre as análises modais experimental e numérica constitui um procedimento importante para avaliar a representatividade de modelos computacionais na descrição do comportamento dinâmico de estruturas. Para as três configurações investigadas, os resultados foram correlacionados com base nas frequências naturais e nos respectivos modos de vibração. Essa abordagem permite verificar a concordância entre os métodos e avaliar a influência das diferentes configurações de ligação sobre o comportamento dinâmico da viga treliçada.

Tabela 2 – Comparação entre os resultados numéricos e experimentais

Modelo	Tipo de ligação	ANSYS (Hz)	ARTEMIS (Hz)	Diferença (%)
01	Soldada	102,130	143,564	28,86
02	Parafusada com espaçador de madeira	109,570	125,031	12,37
03	Parafusada	108,200	129,064	16,17

Fonte: Autor (2026).

A partir dos valores apresentados na Tabela 2, verifica-se que a concordância entre as frequências obtidas pelos dois métodos varia conforme a configuração de ligação adotada. O Modelo 02 apresentou a menor diferença percentual, correspondente a 12,37%, seguido pelo Modelo 03, com 16,17%, enquanto o Modelo 01 apresentou a maior diferença, de 28,86%. Esses resultados evidenciam que as configurações parafusadas apresentaram maior proximidade entre as frequências determinadas numericamente e experimentalmente, ao passo que a ligação soldada resultou na maior divergência entre os valores obtidos.

6 CONCLUSÃO

O presente estudo avaliou o comportamento dinâmico de vigas treliçadas bidimensionais por meio da comparação entre as análises modais experimental e numérica, considerando três configurações distintas de ligação entre os elementos estruturais. A comparação das frequências naturais e dos modos de vibração indicou a influência das condições de ligação sobre o comportamento dinâmico das estruturas. A ligação parafusada com espaçador de madeira demonstrou melhor concordância entre as respostas, enquanto na ligação soldada foi verificada a maior discrepância entre as frequências identificadas.

Esse comportamento pode estar associado às variações decorrentes da execução das soldas no protótipo, em contraste com a condição idealizada adotada no modelo numérico. Além disso, a identificação experimental ficou restrita ao primeiro modo de vibração nesse caso, limitando uma avaliação modal mais abrangente. Como continuidade da pesquisa, sugere-se ampliar a investigação sobre a representação das ligações estruturais, realizar a caracterização específica dos materiais empregados nos protótipos e desenvolver ensaios complementares com maior número de pontos de medição, visando ampliar a identificação e a representação dos modos de vibração.

REFERÊNCIAS

ARAUJO JUNIOR, A. C.; BALBONI, B. M.; MOUTINHO, V. Physical and Mechanical Characterization of *Astronium lecointei* and *Manilkara huberi* Branch Wood. *Floresta e Ambiente*, v. 27, n. 2, e20170468, 2020. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.046817>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6123:2023: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 8800:2024: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

GUAN, Y.; ZHOU, X.; YAO, X.; SHI, Y. Vibration of cold-formed steel floors with a steel form deck and gypsum-based self-leveling underlayment. *Advances in Structural Engineering*, v. 22, n. 13, p. 2741–2754, 2019. <https://doi.org/10.1177/1369433219849836>.

HE, J.; FU, Z. Modal analysis. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001.

KORTIŠ, Ján *et al.* Experimental modal test of the laboratory model of steel truss structure. *Civil and Environmental Engineering*, v. 12, n. 2, p. 116–121, 2016. <https://doi.org/10.1515/cee-2016-0016>.

XU, L. Floor vibration in lightweight cold-formed steel framing. *Advances in Structural Engineering*, v. 14, n. 4, p. 659–672, 2011. <https://doi.org/10.1260/1369-4332.14.4.659>.

ZHANG, S.; XU, L. Human-induced vibration of cold-formed steel floor systems: parametric studies. *Advances in Structural Engineering*, v.23, n.10, p. 2030-2043, 2020. <https://doi.org/10.1177/1369433220904013>.

ANEXO
DECLARAÇÃO

Declaro para os devidos fins que este Trabalho de Conclusão de Curso (Monografia/Tese/Dissertação), escrito sob minha orientação, está em versão final, de acordo com as solicitações realizadas pela banca examinadora.

Informo também que procedi à revisão final do texto, constatando que atende às especificações das normas da ABNT para apresentação de trabalhos acadêmicos da UFCA, no que diz respeito ao conteúdo e à formatação.

Data e local da assinatura eletrônica



Documento assinado digitalmente
CLEIRTON ANDRE SILVA DE FREITAS
Data: 16/09/2026 11:48:50-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>