



A: XXXIX-0000

AVALIAÇÃO DA FREQUÊNCIA NATURAL DE VIGAS ESTRUTURAIS EM MADEIRA LAMELADA COLADA POR SMARTPHONES

NATURAL FREQUENCY EVALUATION OF GLUED LAMINATED TIMBER STRUCTURAL BEAMS BY SMARTPHONES

Jéssica M. Bresolin (P) (1); Zacarias M. C. Pravia (2)

(1) Me., Engenheira Civil, Passo Fundo, Brasil.

(2) Dr. Prof., Universidade de Passo Fundo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Passo Fundo, Brasil.

Endereço para correspondência: jessica.mbresolin@gmail.com; (A) Apresentador

Área temática: Métodos experimentais

Resumo

Com tendências inovadoras na Construção Civil, especialmente quanto a arranjos arquitetônicos que prezam por vãos mais longos com elementos esbeltos e mais leves, os pisos de madeira passaram por significativas mudanças, como a implementação de elementos de Madeira Lamelada Colada, dadas suas aprimoradas propriedades mecânicas. Posto que a madeira é um material de baixa densidade, os pisos de longo alcance passaram a manifestar desempenho insatisfatório para os ocupantes, devido aos consideráveis aumentos de deflexão e aparentes reduções de isolamento a vibrações. Sendo o comportamento dinâmico das estruturas abordado por documentos normativos através de táticas embasadas em verificações simplistas e empíricas para pisos com dimensões e concepções específicas, denota-se a necessidade pela ampliação de pesquisas acerca de métodos práticos de determinação das propriedades dinâmicas das inovadoras concepções de pisos longos em madeira. Isso posto, o objetivo da presente pesquisa visa aferir o parâmetro dinâmico da frequência fundamental de oito vigas de Madeira Lamelada Colada, confeccionadas com madeira de Pinus e material adesivo monocomponente de poliuretano, por metodologia experimental com aplicação de dispositivos de Smartphones, bem como por previsão numérica pelo Software ANSYS e previsão analítica.

Palavras-chave: Madeira Lamelada Colada. Frequência natural. Smartphones.

Abstract

Innovative trends in the Civil Construction, especially regarding architectural arrangements that focus on longer spans with slender and lighter elements, the wooden floors have undergone significant changes, such as implementing Glued Laminated Timber (Glulam) elements, in view of their improved mechanical properties. Since wood is a low density material, long span floors began to manifest unsatisfactory performance for occupants, due to considerable increases in deflection and apparent reductions in vibration isolation. As the dynamic behavior of structures is approached in normative documents through tactics based on simplistic and empirical verifications for floors with specific dimensions and designs, the expansion of research on practical methods for determining the dynamic properties of innovative designs of long wooden floors is required. Therefore, the goal of this research aims to measure the dynamic parameter of the fundamental frequency of eight glued laminated timber beams manufactured with Pinus and single-component polyurethane adhesive material, by experimental methodology with the application of Smartphone devices, as well as by numerical prediction by the software ANSYS and analytical prediction.

Keywords: Glued laminated timber. Natural frequency. Smartphones.



1. INTRODUÇÃO

No cenário construtivo das últimas décadas, devido ao constante desenvolvimento da indústria da Construção Civil, o arranjo estrutural dos pisos tradicionais à base de madeira passou por mudanças significativas (Ebadi, Doudak e Smith 2018). Transformações dos pisos de edificações urbanas residenciais, comerciais e industriais, bem como, de suas técnicas construtivas passaram a ocorrer em virtude das tendências arquitetônicas inovadoras do mercado, associadas ao aprimoramento das propriedades mecânicas dos materiais.

Esta transição está diretamente associada à implementação de sistemas estruturais de pisos cada vez mais leves, com vãos mais longos e elementos estruturais de geometria mais esbelta, com o intuito de minimizar o consumo de material e contemplar uma flexibilidade arquitetônica para plantas abertas, dada a consideração do menor número possível de elementos verticais (Chen, Li e Racic 2016; Muhammad et al. 2018). Para contemplar essa demanda do mercado global, a aplicação da madeira em sistemas de pisos, é difundida em largas escalas, dadas as propriedades de alta relação resistência-peso e baixa densidade atribuídas à mesma (Ramage et al. 2017).

Em consequência da propriedade de baixa densidade da madeira, os pisos de longo alcance passaram a manifestar desempenho insatisfatório aos ocupantes, devido aos consideráveis aumentos de deflexão e aparentes reduções de isolamento a vibrações (Ebadi, Doudak e Smith 2016). Esse cenário ocorre, em efeito à suscetibilidade dessas estruturas ao fenômeno da ressonância, estado onde amplitudes de movimentação oscilatória são acentuadas, principalmente, quando os estímulos externos apresentam frequências próximas das faixas de frequência de excitação dinâmica dos pisos de madeira (Weckendorf et al. 2016), como os impulsos dinâmicos oriundos da prática de atividades cotidianas do próprio ser humano, como caminhar, correr, dançar e pular (Casagrande et al. 2018).

Denota-se que a problemática acerca de vibrações excessivas em pisos longos de madeira, comporta-se como uma propriedade decisiva e relevante a ser controlada por estratégias de projeto, diretamente interligadas ao atendimento dos requisitos mínimos de desempenho vibracional do Estado Limite de Serviço, descritos por distintos códigos vigentes.

Muitos critérios abordados em normas para determinação das propriedades dinâmicas, são considerados como táticas de remediação para uma gama de possíveis problemas de desempenho insatisfatório e referem-se a procedimentos simplistas e empíricos, admitindo propriedades mecânicas e dinâmicas de pavimentos com dimensões e concepções específicas (Casagrande et al. 2018). Logo, a previsão das características dinâmicas ainda representa uma dificuldade entre os projetistas, dado que variadas metodologias são sensíveis a muitos parâmetros de entrada baseados em concepções que não correspondem a estrutura real, de forma a direcionar as verificações divergentes entre os parâmetros dinâmicos reais e calculados.

Para tanto, esse cenário demonstra a necessidade pela ampliação de pesquisas acerca das características dinâmicas de pisos de longo alcance. As investigações desse quesito, em virtude do crescente advento da indústria tecnológica, podem crescer exponencialmente com a aplicabilidade de técnicas e equipamentos simplificados, tais como dispositivos Smartphones, os quais apresentam alta capacidade de armazenamento e leitura instantânea de dados, bem como com baixo custo para implementação e minimização de tempo destinado à coleta e leitura dos dados.

Dadas as considerações apontadas, a presente pesquisa tem por objetivo principal, a avaliação do parâmetro dinâmico da frequência fundamental de oito vigas de Madeira Lamelada Colada (MLC) em Pinus, por intermédio da aplicação de metodologias de ordem experimental,



modelagem numérica pelo Software ANSYS e previsão analítica, visando apresentar a efetividade de medições de alta precisão, realizadas por dispositivos de Smartphones.

2. METODOLOGIA

2.1 Materiais

O desenvolvimento da pesquisa contemplou a manufatura de oito vigas de Madeira Lamelada Colada (MLC) de 4,0 metros de comprimento, nas dependências do Laboratório de Ensaio em Sistemas Estruturais – LESE, na Universidade de Passo Fundo – UPF, Passo Fundo/RS, onde a seção transversal de cada qual, era composta por oito lamelas de madeira com dimensões nominais de 2,0 cm de espessura, 7,0 cm de largura e 400,0 cm de comprimento, essas classificadas visualmente, de forma a serem selecionadas somente as lâminas que não apresentavam defeitos de nós e inclinações excessivas das fibras da madeira.

Para a manufatura das vigas, aplicou-se o material adesivo monocomponente de poliuretano, e em consequência da variabilidade de espécies arbóreas disponíveis no mercado da Construção Civil e da alta disponibilidade comercial na região sul do Brasil, estabeleceu-se o emprego da madeira de *Pinus*. Desse modo, a madeira empregada na confecção das vigas fora caracterizada quanto ao parâmetro físico da densidade, ao passo que as vigas foram caracterizadas quanto ao parâmetro elástico do Módulo de elasticidade (*MOE*), ambos parâmetros necessários à metodologia implementada na presente pesquisa.

A densidade trata-se de um dos parâmetros de ordem física de maior relevância à Engenharia Estrutural. Por intermédio de sua definição, associada a um determinado teor de umidade, estipulam-se quais são as melhores aplicabilidades dos elementos de madeira, de acordo com suas espécies arbóreas. Assim sendo, a densidade básica (ρ_{bas}) do lote de lamelas empregado, fora estabelecida em conformidade com os requisitos da NBR 7190:1997 – Projetos de estruturas de madeira, para um conjunto de nove corpos-de-prova, o mesmo qualificado por uma densidade básica representativa de 791,04 Kg/m³.

Já as propriedades mecânicas elásticas, determinam o parâmetro de rigidez dos materiais, caracterizando a capacidade desses, em retornar ao seu formato inicial, em termos de dimensões de seção transversal e de comprimento, após a remoção de uma determinada carga de solicitação, sem apresentar deformações permanentes e ruptura. Em vista disso, para elementos em madeira, a propriedade mecânica do *MOE*, é de grande relevância.

Para tanto, as vigas de MLC foram caracterizadas quanto ao *MOE*, através do ensaio experimental não destrutivo de rigidez à flexão, dado pela Figura 1. As vigas foram submetidas a uma determinada carga concentrada (*P*) atuante no meio do vão livre, para condições de suporte biapoiada, visando que o dado referente ao deslocamento vertical no meio do vão (deflexão – δ), seja obtido. Admitiu-se como critério de parada do ensaio, o deslocamento máximo pré-estabelecido, de acordo com a Equação 1.

$$\delta_{m\acute{a}x} = \frac{l}{250} \quad 1$$

Onde:

$\delta_{m\acute{a}x}$ – Deslocamento vertical máximo, em milímetros;

l – Vão livre considerado para a estrutura, em milímetros.

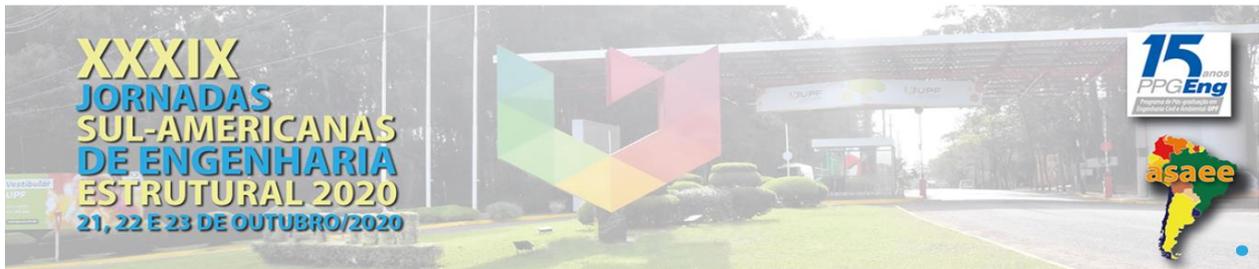


Figura 1. Ensaio de rigidez á flexão das vigas de MLC.

Em virtude da configuração de esforço de flexão, através da Equação 2 o deslocamento vertical (δ) é determinado. Ao passo que, os deslocamentos verticais tratam-se dos dados coletados experimentalmente e o parâmetro de rigidez das peças é desconhecido, reescrevendo-se a equação inicial para a Equação 3, o Módulo de Elasticidade dos elementos pode ser estabelecido.

$$\delta = \frac{P * L^3}{48 * MOE * I} \quad 2$$

$$MOE = \frac{P * L^3}{48 * \delta * I} \quad 3$$

Onde:

δ – Deformação do elemento, em metros;

P – Carga concentrada aplicada, em kN ;

L – Vão livre, em metros;

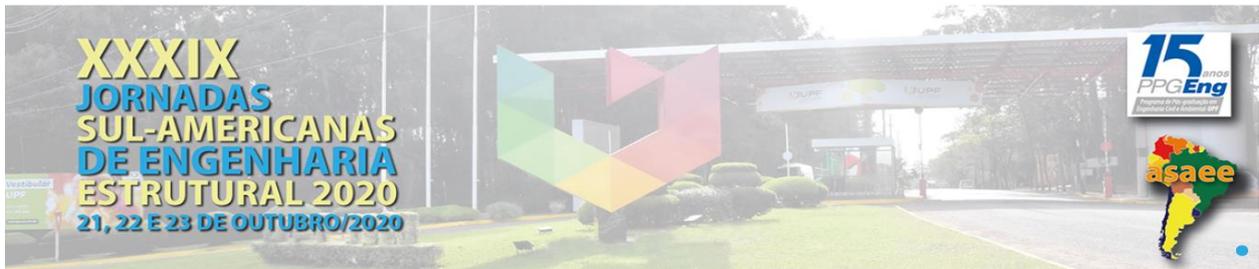
I – Momento de inércia da seção transversal do elemento, em m^4 ;

MOE – Módulo de elasticidade, em kN/m^2 .

No desenvolvimento do ensaio de rigidez à flexão, considerou-se para todas as vigas, condições de suporte simplesmente apoiadas em ambas as extremidades e vão livre de 3,47 metros, dadas as condições limites de espaçamento entre apoios do pórtico empregado. Para a aplicação da carga concentrada (P) no meio do vão, fora empregado um macaco hidráulico, associado a uma célula de carga com capacidade máxima de 5,0 toneladas, na qual um leitor digital era acoplado para o registro da magnitude do carregamento aplicado, ao passo que o deslocamento vertical (δ), assim provocado, era mensurado por um relógio comparador com cursor de 0,50 mm instalado por uma base magnética logo abaixo da face inferior das vigas.

Os dados dimensionais necessários à determinação experimental do MOE , foram coletados por meio de cinco pontos de medição na seção transversal das vigas, ao longo de todo o comprimento dessas, de modo a se operar com medidas dimensionais médias da largura e altura.

Cada viga de MLC fora submetida a três repetições do ensaio de rigidez à flexão, visando a obtenção do valor médio do MOE . A carga concentrada fora aplicada em cada repetição do



ensaio até a magnitude onde o deslocamento máximo pré-estabelecido fosse atingido, visando manter a integridade dos elementos estruturais, em razão do comportamento reológico da madeira, onde deformações instantâneas ocorrem logo após a aplicação de uma determinada carga, bem como deformações permanentes para cargas atuantes por elevados períodos de tempo.

2.2 Métodos

Visando investigar a efetividade de medições realizadas por dispositivos de Smartphones, as vigas de MLC foram avaliadas quanto à propriedade dinâmica da frequência fundamental, taxa de oscilação por unidade de tempo, a vibração de um determinado elemento estrutural é favorável.

2.2.1 Método experimental

As vigas de MLC foram dispostas nas condições de esforço de flexão e com ambas extremidades simplesmente apoiadas (condição de suporte biapoiadas), configurando vão livre de 3,47 metros. Sendo estimuladas dinamicamente pela batida de um martelo de borracha, em um ponto próximo do meio do vão livre considerado, como apresentado pela Figura 2, foram realizadas três medições do sinal vibratório ao longo de vinte segundos, para a obtenção da frequência natural média representativa de cada viga analisada.



Figura 2. Frequência fundamental das vigas, medida com Smartphone.

As medições foram realizadas por um dispositivo de Smartphone, posicionado próximo ao ponto central das peças, região cuja movimentação oscilatória vertical é maior. O dispositivo, munido do aplicativo *myFrequency*, desenvolvido pela APPtodate para sistemas Android, e por um sensor de aceleração K2HH Accelerometer, apresentava 100,0 Hz como a máxima taxa de aquisição de dados do espectro de frequência, registrando cem amostras por segundo, com tempo de aquisição de 0,01 segundos para cada.

2.2.2 Método de Elementos Finitos

Empregando os dados dimensionais e as propriedades de densidade e Módulo de Elasticidade, todos obtidos experimentalmente, juntamente com a consideração da condição de



suporte biapoiada admitida, as oito vigas de MLC foram modeladas numericamente, aplicando-se o Método dos Elementos Finitos (MEF). Para tanto, empregou-se a extensão *Mechanical APDL* do Software comercial ANSYS, versão 2022 R1, através da consideração de elementos de barra com aplicação do elemento finito BEAM189, sendo o parâmetro de frequência fundamental dos referidos elementos, obtidas por uma análise de ordem modal.

2.2.3 Método analítico

A previsão analítica da frequência natural, em virtude da condição de suporte biapoiada e cenário de esforço de flexão, fora dada pela proposição analítica da Teoria Clássica de Vigas, conforme a Equação 4 (Soriano 2014). Salienta-se que, para os parâmetros dimensionais e de densidade admitiu-se os dados coletados experimentalmente.

$$f = \frac{\pi^2}{2\pi} * \sqrt{\frac{MOE * I}{m * l^4}} \quad 4$$

Onde:

MOE – Módulo de elasticidade, em $Kg * cm / s^2$;

I – Momento de inércia da seção do elemento estrutural, em cm^4 ;

m – Massa do elemento estrutural, em Kg / cm ;

l – Vão livre considerado, em centímetros.

3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para as metodologias abordadas pela presente pesquisa, a Figura 3 apresenta os resultados obtidos de frequência fundamental das vigas de Madeira Lamelada Colada manufaturadas em Pinus, respectivamente, para os métodos experimental, numérico analítico. Dado o principal objetivo da presente pesquisa ser aferir a aplicabilidade de dispositivos de Smartphones em medições de frequências fundamentais de elementos estruturais de madeira, uma análise de variância ANOVA associada à aplicação do Teste Tukey fora desenvolvida, sendo os resultados apontados pela Figura 4.

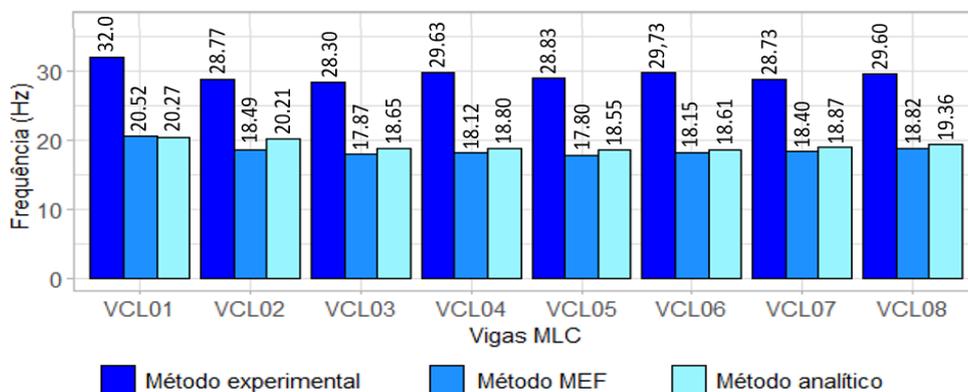


Figura 3. Frequências naturais das vigas de MLC.

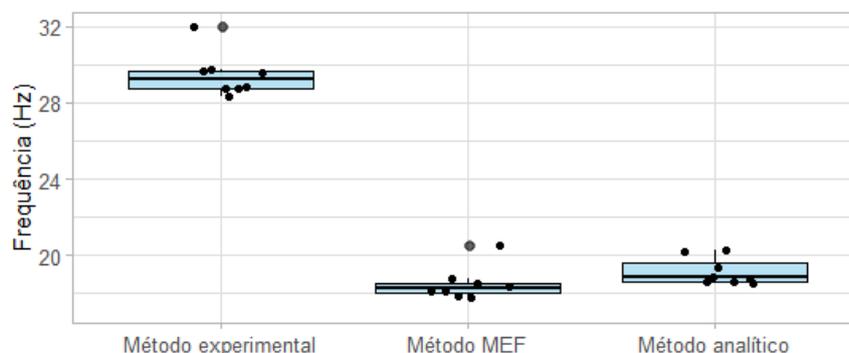


Figura 4. Resultado da análise das vigas de MLC.

A partir das representações gráficas apresentadas e das inferências desenvolvidas, constatou-se a um nível de significância de 5%, a equivalência estatística entre o conjunto de dados obtidos pelas medições de cunho analítico e modelagem numérica pelo Software ANSYS, dado que em ambos cenários de medições, as médias representativas dos conjuntos das frequências naturais, são respectivamente, 18,52 Hz e 19,16 Hz. Ao passo que os referidos métodos são correlacionados com o experimental aplicado, destaca-se que a equivalência estatística não é verificada, posto que sua média representativa de 29,45 Hz é respectivamente, 59,02% e 54,17% superior às médias dos conjuntos de valores numérico e analítico.

Dada a superioridade dos valores obtidos por intermédio das medições experimentais da frequência natural das vigas, em relação aos demais métodos aplicados, salienta-se que tanto a previsão de ordem analítica e de ordem numérica não consideram a interação entre o material adesivo e as lamelas de madeira para a composição das vigas de MLC bem como os efeitos provocados pela técnica da laminação nas propriedades mecânicas e dinâmicas das mesmas.

Uma vez que a MLC trata-se de um material compósito constituído por lamelas de madeira e material adesivo, estratégica aplicada com o intuito de aprimorar as propriedades do material base, maiores investigações acerca do efeito do material adesivo sobre o comportamento dinâmico dos elementos estruturais de madeira podem ser realizadas, dado que as propriedades dinâmicas são sensíveis a fatores internos da própria composição do elemento estrutural bem como de fatores externos, relacionados ao ambiente circundante.

Esse contexto torna-se relevante de ser investigado, dado que na pesquisa desenvolvida por Bresolin e Pravia (2020), a frequência natural de lamelas de madeira de Pinus foi determinada de modo experimental, pela aplicação de dispositivo de Smartphone, como também pelos métodos numérico e analítico, fora constatada a equivalência estatística entre o conjunto de dados obtidos pelas medições de cunho experimental e modelagem numérica, posto que em ambos cenários de medição, as médias representativas das frequências foram mutuamente de 3,18 Hz e 3,35 Hz. Acerca da previsão analítica, a pesquisa em pauta apontou que o mesmo não exibiu equivalência estatística para com os demais métodos aplicados, visto que sua média de 2,42 Hz, fora 23,90% e 27,76% inferior às médias do conjunto de dados experimental e numérica, respectivamente.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Acerca da aferição das vigas de Madeira Lamelada Colada em Pinus, quanto ao parâmetro dinâmico da frequência natural, por intermédio da implementação de medições experimentais por dispositivo de Smartphone munido de acelerômetro, bem como de estimativas numérica pelo



Software ANSYS e estimativa analítica pela Teoria Clássica de Vigas, verificou-se que não fora obtido equivalência estatística dos resultados experimentais para com os resultados dos métodos numérico e analítico, ao passo que esses quando aferidos, apresentaram equivalência estatística.

No contexto das medições, destaca-se que variáveis relevantes consideradas ao longo do desenvolvimento da caracterização experimental da frequência natural, como o comportamento do material adesivo aplicado na manufatura das vigas de MLC bem como o efeito da técnica da laminação no comportamento mecânico e dinâmico dessas, não são devidamente abordadas pelas previsões numérica e analítica, podendo assim atuar como métodos indicativos do comportamento dos elementos estruturais, podendo esse divergir do comportamento real.

Para tanto, em virtude do constante crescimento da tecnologia, destaca-se que a aplicação de dispositivos de Smartphones para a determinação das propriedades dinâmicas de elementos estruturais deve ser instigada e aprimorada, visando-se buscar altos padrões de precisão e efetividade na definição do comportamento dinâmico das estruturas, para que se obtenha uma metodologia mais tecnológica, com facilidade de instalação e manuseio, econômica, precisa e veloz na determinação do real comportamento dinâmicos das estruturas, estando essas suscetíveis aos mais variados fatores e cenários.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1997). NBR 7190/1997: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro.

Bresolin, J. M.; Pravia, Z. M. C., (2020). Aferição de frequências fundamentais de elementos estruturais de madeira por smartphones. Proceedings of the 6th Seminário Regional de Engenharia Estrutural. Passo Fundo, Brasil, outubro.

Casagrande D. et al., (2018). Analytical, numerical and experimental assessment of vibration performance in timber floors. *Engineering Structures*, v. 168, p. 748–758.

Chen, J.; Li, G.; Racic, V., (2016). Acceleration response spectrum for predicting floor vibration due to occupants jumping. *Engineering Structures*, v. 112, p. 71–80, 1 abr.

Ebadi, M. M.; Doudak, G.; Smith, I., (2016). Dynamic characteristics of glulam beam and deck-element floors. Proceedings of the 14th World Conference on Timber Engineering, Viena, Agosto.

Ebadi, M. M.; Doudak, G.; Smith, I., (2018). Vibration responses of glulam beam-and-deck floors. *Engineering Structures*, v. 156, p. 235–242, 1 fevereiro.

Muhammad, Z. et al., (2018). Review of Pedestrian Load Models for Vibration Serviceability Assessment of Floor Structures. *Vibration*, v. 2, n. 1, p. 1–24, 25 dez.

Ramage, M. H. et al., (2017). The wood from the trees: The use of timber in construction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 68, p. 333-359.

Soriano, H. L., (2014). Introdução à dinâmica das estruturas. 1ª ed. Rio de Janeiro, Brasil.

Weckendorf, J. et al., (2016). Vibration serviceability performance of timber floors. *European Journal of Wood and Wood Products*, v. 74, n. 3, p. 353–367.