



Avaliação do Desempenho Estrutural de Passarelas de Aço: Modelagem Computacional e Ensaios Dinâmicos *in Loco*

Eliel Hudson Carneiro Maciel¹, Iálysson da Silva Medeiros², Italo Sílvio dos Santos da Silva³, Douglas Mateus de Lima⁴

¹ UFPE – Universidade Federal de Pernambuco / Centro Acadêmico do Agreste / Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental / eliel.hudson@ufpe.com

² UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro / Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia / Programa de Engenharia Civil / ialysson.medeiros@coc.ufrj.br

³ UFPE – Universidade Federal de Pernambuco / Centro Acadêmico do Agreste / Núcleo de Tecnologia / italo.silvio@ufpe.br

⁴ UFPE – Universidade Federal de Pernambuco / Centro Acadêmico do Agreste / Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental / douglas.mlima@ufpe.br

Resumo

As passarelas de aço do Centro Acadêmico do Agreste da Universidade Federal de Pernambuco (CAA-UFPE) são essenciais para a mobilidade e acessibilidade de estudantes e professores e funcionários entre os prédios de salas e escritórios do campus. Estruturas como estas demandam atenção especial em projeto, execução e manutenção, especialmente quanto aos efeitos dinâmicos como os oriundos do tráfego de pedestres, o qual é a forma principal de utilização da estrutura. Diante disso identificou-se a necessidade de avaliar o desempenho do sistema estrutural empregado nessas estruturas. Nessa avaliação foram contempladas as verificações estruturais dos elementos que compõem a passarela, análise dinâmica experimental e análise modal numérica. O *software* de análise estrutural via Método dos Elementos Finitos, SCIA Engineer v25.0, foi utilizado para criação do modelo numérico e verificação de desempenho estrutural, contemplando análises estática e modal. Paralelamente, foram realizados ensaios experimentais *in loco*, utilizando *smartphones* equipados com acelerômetros *micro-electro-mechanical systems* (MEMS). Os dados de aceleração foram colhidos através do aplicativo myFrequency v2.2 e processados em algoritmo Python de autoria da equipe de pesquisa para obtenção dos parâmetros dinâmicos, a saber, frequência fundamental, razão de amortecimento, RMS e valores máximos da aceleração. Os resultados indicam que as passarelas apresentam desempenho estrutural adequado quanto aos Estados Limites Últimos (ELU), atendendo aos critérios normativos da ABNT NBR 8800 (2024) e ABNT NBR 14762 (2010). A análise modal revelou frequências naturais a partir de 6,21 Hz, com o valor de 10,70 Hz associado ao primeiro modo vertical, o qual foi avaliado na análise experimental. Esta apresentou frequência média de 9,42 Hz e razão de amortecimento média de 2,85%. Apesar da frequência natural estar em conformidade com os parâmetros normativos, durante os ensaios foram registrados valores de aceleração de até 9,67 m/s² e RMS 3,03 m/s², revelando um baixo desempenho dinâmico em situações comuns de utilização.

Palavras-chave

Passarelas; análise estrutural; desempenho estrutural; análise modal.

Introdução

O desenvolvimento da teoria de dinâmica em engenharia começou com o estudo do comportamento de equipamentos mecânicos através de modelos simples, evoluindo gradualmente para análises dinâmicas estruturais mais complexas. Essas análises tornaram-se essenciais na engenharia civil moderna devido às mudanças nos processos construtivos e ao uso de materiais com alta resistência mecânica, que permitem estruturas mais leves e com vãos maiores. Embora esses avanços tenham trazido benefícios associados à sustentabilidade, como eficiência e economia de recursos, também aumentaram a suscetibilidade das construções a fenômenos vibratórios, especialmente em estruturas que têm como propósito primário suportar atividades humanas como caminhar, correr e pular (Soriano, 2014).

Construções mais leves e com vãos mais extensos tendem a apresentar frequências naturais mais baixas, que se aproximam das faixas de frequência das excitações produzidas por atividades humanas. Isso torna essas estruturas mais suscetíveis a vibrações, potencializando efeitos de ressonância que podem gerar desconforto, afetar a usabilidade e, em casos extremos, comprometer a segurança estrutural (Soriano, 2014). Živanović; Pavic; Reynolds (2004) destacaram que esse cenário é particularmente relevante em passarelas de pedestres, onde a interação direta entre as vibrações estruturais e a percepção humana pode resultar em desconforto significativo, afetando a experiência dos usuários.

Para compreender e mitigar esses efeitos, Ewins (2009) destaca que a análise teórica das vibrações estruturais deve seguir três etapas fundamentais: a modelagem espacial, que descreve as características físicas da estrutura, como massa, rigidez e amortecimento; a análise modal, que expressa o comportamento dinâmico em termos de modos de vibração; e a análise do movimento e amplitude das vibrações sob excitações específicas. Com o avanço tecnológico, análises experimentais tornaram-se mais acessíveis, principalmente com o uso de *smartphones* equipados com sensores MEMS, os quais, como demonstrado por Lima *et al.* (2025), Medeiros *et al.* (2024) e Lima *et al.* (2024) permitem medir frequências naturais e razões de amortecimento com alta precisão. Isso possibilita uma avaliação detalhada da integridade estrutural e do conforto humano, promovendo análises dinâmicas rigorosas e eficazes.

Diante deste cenário, tem-se como objetivo deste estudo avaliar experimental, numérica e analiticamente o comportamento estrutural dinâmico de uma passarela de pedestres, construída em estrutura de aço, a qual compõe a infraestrutura do Centro Acadêmico do Agreste da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE – CAA), determinando suas frequências naturais e razões de amortecimento e desempenho dinâmico sob atividades humanas como caminhar e correr. Para isso, foi adotada uma abordagem multidisciplinar, incluindo ensaios experimentais com acelerômetros MEMS, presentes em *smartphones* (Figura 1) e simulações numéricas via Método dos Elementos Finitos (Figura 2). Além disso, a passarela foi analisada em relação aos critérios normativos vigentes, visando verificar a segurança estrutural.

O Centro Acadêmico do Agreste da UFPE, localizado em Caruaru, desempenha um papel fundamental na interiorização do ensino superior no estado, promovendo desenvolvimento regional e disseminação do conhecimento científico. Entre suas infraestruturas essenciais, passarelas de aço interligam os edifícios acadêmicos e são submetidas diariamente a um intenso fluxo de pedestres, incluindo alunos, professores e funcionários. Os recorrentes relatos de vibrações excessivas nessas estruturas indicam a necessidade de uma investigação detalhada sobre seu comportamento dinâmico, visto que tais vibrações podem comprometer o conforto e até a percepção de segurança dos usuários (Murray *et al.*, 2016).

Este estudo avalia a segurança e o comportamento estrutural dinâmico de uma passarela de aço construída no Centro Acadêmico do Agreste da Universidade Federal de Pernambuco, abordando um problema prático de grande relevância. Além de contribuir para a segurança e conforto dos usuários, a pesquisa busca fornecer subsídios para o aprimoramento de projetos e dimensionamentos de passarelas e outras estruturas esbeltas. O trabalho reforça a importância do monitoramento dinâmico estrutural, destacando a aplicabilidade de sensores MEMS no contexto da engenharia civil. Dessa forma, os resultados esperados poderão apoiar futuras diretrizes para projetos mais eficientes e sustentáveis, alinhados às necessidades acadêmicas e normativas.



Figura 1 – Ensaio experimental usando smartphones com MEMS.



Figura 2 – Modelagem numérica via software SCIA Engineer v.25.0.

Metodologia

A fim de alcançar o objetivo proposto, adotou-se para este trabalho uma metodologia multidisciplinar com 3 frentes principais: verificações de segurança em estado limite último; análises dinâmicas modais e experimentais. Essas análises foram realizadas somente após um minucioso levantamento das características geométricas e elastomecânicas da estrutura da passarela. Para garantir a fidelidade do modelo computacional e minimizar a possibilidade de incongruências nos resultados, é essencial a realização dessa etapa preliminar com alto critério de detalhes. O completo procedimento metodológico utilizado neste trabalho é detalhado no fluxograma apresentado na Figura 3. As verificações de segurança dos perfis de aço que compõem a estrutura da passarela foram realizadas sob as normativas ABNT NBR 8800 (2024) e ABNT NBR 14762 (2010). A sobrecarga de uso e ocupação foi quantificada segundo a ABNT NBR 6120 (2019).

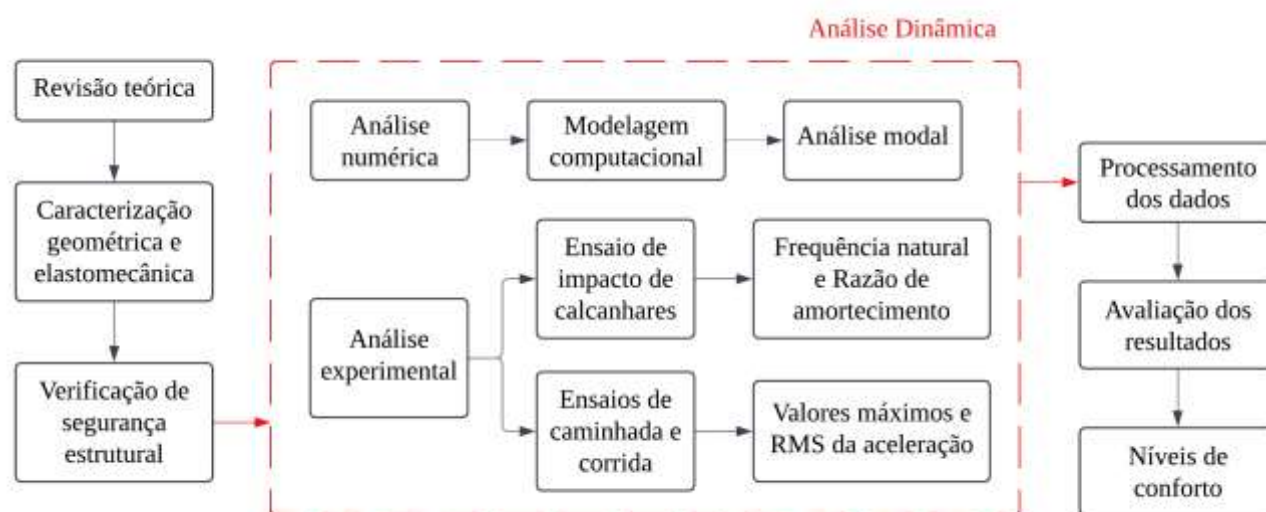


Figura 3 – Fluxograma da metodologia.

Caracterização geométrica

Com comprimento de 8,55 m, largura de 2,44 m e pé direito da cobertura de 2,20 m, a estrutura da passarela que interliga o primeiro andar dos edifícios de salas 1 e 2 da UFPE – CAA é constituída primariamente de perfis I laminados, com duas longarinas principais dando suporte à estrutura do piso e à estrutura superior, da cobertura. Perfis formados a frio foram adotados apenas como terças da cobertura, apoiando telhas trapezoidais de aço galvanizado. O piso é composto por chapas xadrez apoiadas em transversinas, as quais transmitem os carregamentos do piso às longarinas. Estas não estão ligadas diretamente às estruturas de concreto armado dos edifícios, antes, esta ancoragem acontece através de vigas travessas, como é possível observar na Figura 2. A descrição de geometria e material de cada elemento da passarela é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Materiais e seções dos elementos estruturais.

Elemento	Seção/Espessura	Material
Viga travessa	W 310 x 28,3 kg/m	ASTM A572
Longarina	W 310 x 28,3 kg/m	ASTM A572
Transversinas	W 150 x 13 kg/m	ASTM A572
Vigas superiores	W 150 x 13 kg/m	ASTM A572
Pilares	W 150 x 13 kg/m	ASTM A572
Chapa xadrez	Espessura 1/4"	ASTM A36
Terças	U 100 x 50 x 3,75 x 5,52 kg/m	CF-24

À exceção das ligações entre as longarinas e as vigas travessas, as quais foram executadas como ligação-cantoneira-solda-parafuso (LCSP), como apresenta na Figura 5, todas as demais ligações entre os perfis de aço que compõem a passarela foram realizadas com solda por todo o perímetro (Figura 4).



Figura 4 – Ligação LCSP.



Figura 5 – Ligação soldada.

Verificação de segurança estrutural

A verificação da segurança estrutural foi realizada analiticamente no *software* Mathcad Prime v7.0 para o Estado Limite Último (ELU) de resistência, adotando a combinação última normal de carregamentos, conforme a ABNT NBR 8800 (2024). Como sobrecarga de utilização foi adotado o valor de 3 kN/m² estabelecido na ABNT NBR 6120 (2019) para passarelas em edifícios. Estes parâmetros foram inseridos no modelo numérico construído no *software* SCIA Engineer v.25 e, por análise linear elástica, foram obtidas as mais desfavoráveis combinações de cargas e seus respectivos valores máximos de tensões experimentados por cada elemento da passarela.

Modelagem numérica e análise modal

A análise modal foi realizada por meio da modelagem numérica computacional das passarelas no *software* SCIA Engineer v.25, que emprega o Método dos Elementos Finitos (FEM) para a discretização e análise da estrutura (Figura 2). A estrutura da passarela foi modelada utilizando elementos finitos de barra (1D), representativos dos perfis de aço laminado e conformado a frio, e elementos de placa (2D), representativos da chapa de aço laminado do piso. Para mais, foram consideradas as diferentes naturezas de ligações entre os elementos estruturais, a fim de simular com maior precisão as condições de apoio identificadas *in loco*.

Análise experimental

A análise experimental foi conduzida com o objetivo de verificar a congruência dos resultados obtidos através do modelo numérico computacional e obter parâmetros reais do comportamento dinâmico das passarelas em diferentes situações de uso. Para isso, foram realizados na passarela ensaios de impacto, caminhada e corrida. A passarela foi instrumentada utilizando *smartphones* da marca Motorola equipados com acelerômetros MEMS modelo Ism6dso, produzido pela STMicro, com taxa de aquisição máxima de 415 Hz e sensibilidade de 4,785 mm/s² para a medição das respostas vibratórias (Figura 1). Para garantir a confiabilidade dos resultados, as medições foram realizadas simultaneamente por dois *smartphones*, fixados simetricamente no ponto médio da mesa inferior de cada longarina com fita dupla face da marca 3M. Os registros de aceleração foram extraídos através do aplicativo myFrequency v.2.2 e processados em algoritmo Python de autoria própria.

O ensaio de impacto foi executado por meio da queda de calcanhares, gerando uma vibração livre amortecida, como descrito por Murray *et al.* (2016). Esta excitação impulsiva possibilita a determinação da frequência natural da estrutura pela transformada de Fourier e da razão de amortecimento pelo método do decremento logarítmico. O impacto de calcanhares foi repetido 3 vezes a fim de obter-se consistência estatística dos dados registrados.

Os ensaios de caminhada e corrida foram realizados com 1, 2 e 4 participantes, desta forma, simulando condições reais de uso e possibilitando a aferição dos níveis de aceleração experimentados diariamente pelos usuários. Visto que a proposta deste ensaio foi de simular situações cotidianas, os passos dos ensaístas não foram forçadamente sincronizados.

Verificação da segurança estrutural

A verificação da segurança constatou que todos os elementos estruturais apresentam ampla margem de segurança frente à norma em vigor. As combinações críticas de cada elemento e seu desempenho são relacionadas na Tabela 3. Constatou-se, por meio destas verificações, que o comportamento global da estrutura da passarela assemelha-se à uma treliça do tipo Vierendeel, sem diagonais, visto que as vigas superiores, da cobertura, estão sofrendo compressão e as longarinas estão sob tração. Adicionalmente, os pilares centrais resistem também a esforços de tração, trabalhando como tirantes.

Tabela 3 – Aproveitamento de resistência dos elementos estruturais.

Elemento	Aproveitamento	Verificação
Travessas	48,17%	Compressão + Flexão + Torção
Longarinas	42,77%	Tração + Flexão
Transversinas	23,06%	Tração + Flexão
Vigas superiores	55,27%	Compressão + Flexão
Pilares de canto	53,85%	Compressão + Flexão
Pilares centrais	4,52%	Tração + Flexão
Terças	3,56%	Flexão
Chapa Xadrez	49,12%	Flexão

Resultados da modelagem computacional

Resultantes da análise modal sobre a modelagem construída no *software* Scia Engineer v.25, são apresentados na Figura 6, os 12 primeiros modos de vibração natural da estrutura e seus respectivos valores de frequência. O primeiro modo associado ao deslocamento vertical apareceu como quarto modo global, com frequência de 10,70 Hz.

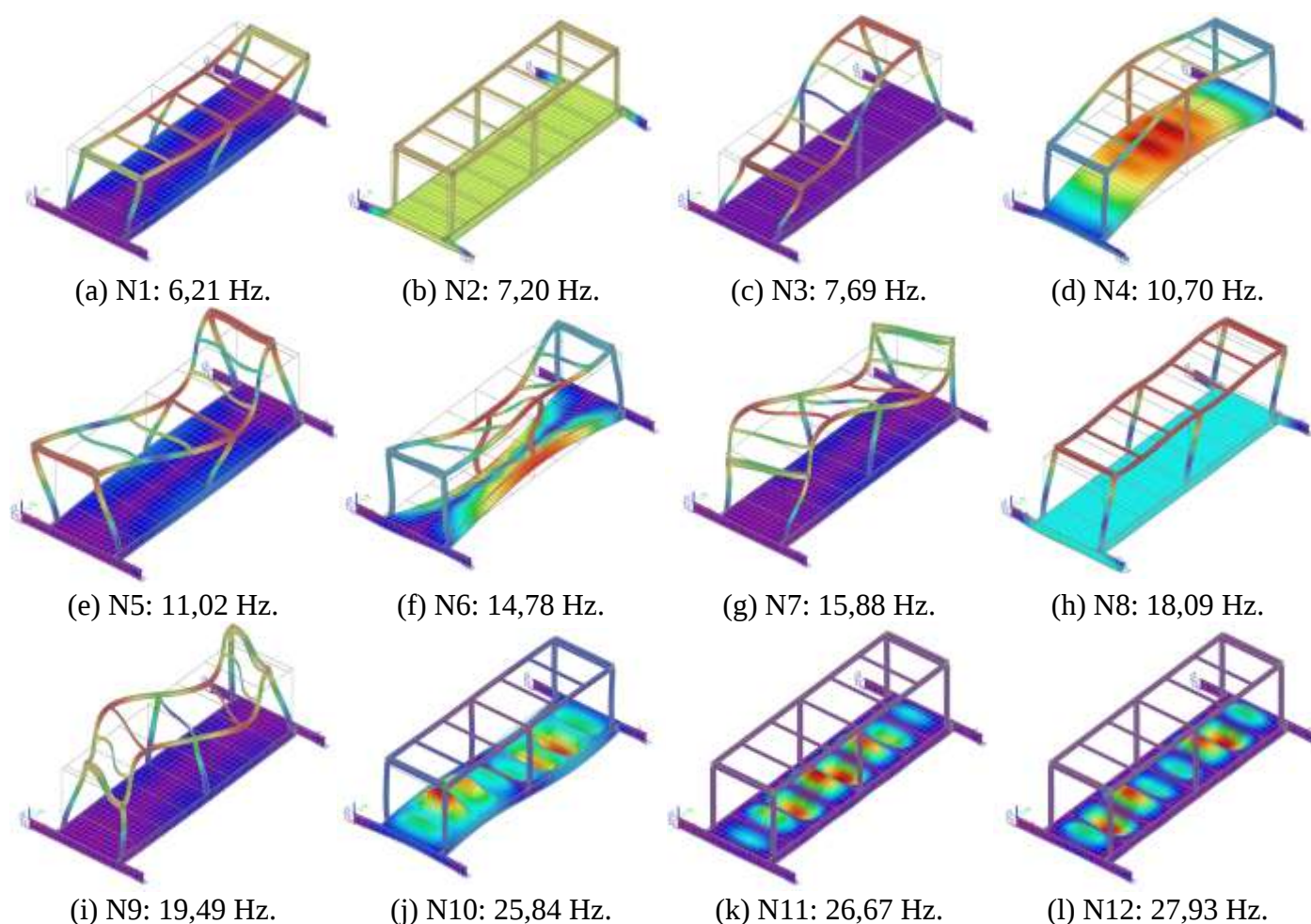


Figura 6 – Respostas da análise modal.

Resultados das análises experimentais

A partir do ensaio de impacto de calcanhares obteve-se, pelo registro de aceleração dos *smartphones* simetricamente posicionados, os valores de 9,41 Hz e 9,43 Hz, resultando em um valor médio de 9,42 Hz para a frequência natural associada ao primeiro modo de vibração vertical, excitado pelo impacto ao centro da passarela. Ainda pelo processamento dos dados dos acelerômetros, foram calculados os valores de razão de amortecimento em 3,15% e 2,52%, resultando em uma média de 2,83%. Os gráficos de histórico da aceleração durante o ensaio, domínio da frequência pela transformada de Fourier e decaimento logarítmico, referentes a um dos acelerômetros são apresentados nas Figuras 7, 8 e 9 respectivamente.

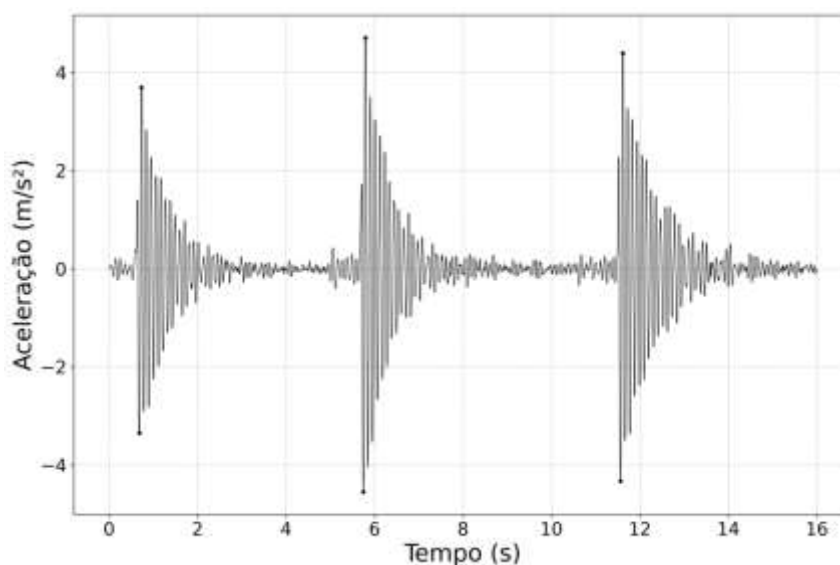


Figura 7 – Impactos de calcanhares.

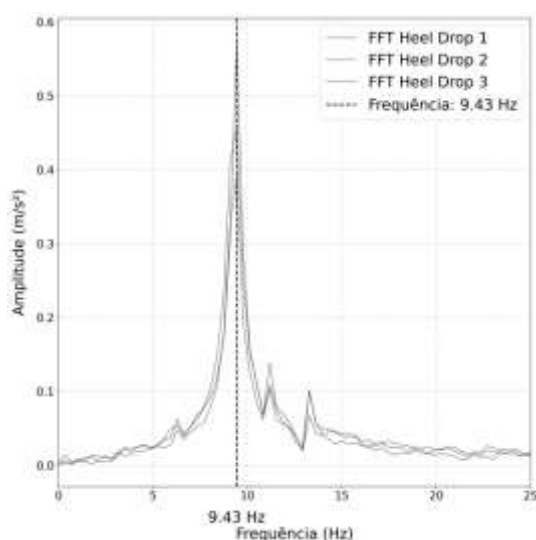


Figura 8 – Domínio da frequência.

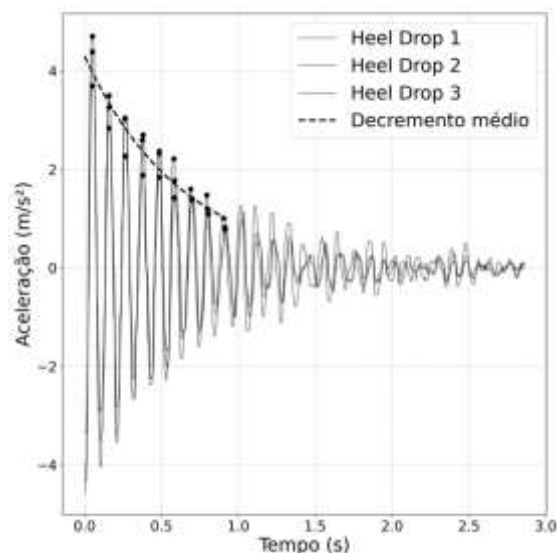


Figura 9 – Decaimento da vibração.

Durante os ensaios de caminhada e corrida foram registrados valores médios de aceleração vertical de até 9,67 m/s^2 e RMS de 3,03 m/s^2 (4 participantes correndo) entre as duas medições simétricas. O ensaio com um único participante caminhando sobre a passarela gerou aceleração de até 2,90 m/s^2 . Os valores médios entre os registros dos 2 acelerômetros posicionados simetricamente estão relacionados na Tabela 4. Na Tabela 5 são resumidos os resultados de frequência natural obtidos através dos dois métodos juntamente ao coeficiente de variação encontrado.

Tabela 4 – Aceleração vertical máxima e RMS em diferentes cenários.

Ensaio	Aceleração (m/s ²)	RMS (m/s ²)
1 pessoa caminhando	2,90	0,79
2 pessoas caminhando	2,84	0,72
4 pessoas caminhando	4,50	0,93
1 pessoa correndo	3,51	0,81
2 pessoas correndo	5,89	1,42
4 pessoas correndo	9,67	3,03

Tabela 5 – Frequências naturais (Hz) e coeficiente de variação.

Numérico	Experimental	Coeficiente de variação
10,70 (N4)	9,42	6,36%

Esta variação dos valores obtidos, em principal a menor frequência natural verificada experimentalmente ante a modelagem numérica, é condizente com o estado de degradação da estrutura por oxidação, visto que a oxidação dos perfis estruturais de aço minora sua área de seção transversal e, por conseguinte, sua inércia. Com menor rigidez (*EI*) a frequência natural da estrutura tende a ser também reduzida. Na Figura 10 é apresentado o estado de deterioração por oxidação da estrutura da passarela, o qual também é aparente nas Figuras 1 e 4.

**Figura 10 – Deterioração da estrutura.**

Avaliação de conforto estrutural

O desempenho da passarela nas situações comuns de utilização, isto é, ao sofrer os esforços de pessoas caminhando ou correndo, foi examinado sob os limites recomendados pelos guias BS 5400, ONT 83 e SÉTRA (2006) para avaliar o nível de conforto estrutural transmitido aos usuários (Bachmann e Ammann, 1987). Enquanto os dois primeiros determinam como parâmetros de conforto aos usuários limites de pico de aceleração máxima associados ao valor de frequência natural medido, o último utiliza o valor RMS da aceleração, isto é, uma média calculada entre os valores durante o intervalo de tempo da passagem dos pedestres a atravessar a passarela. São apresentados na Tabela 6 os resultados ante os limites de aceleração máxima dos códigos BS 5400 e ONT 83 para a frequência natural medida experimentalmente de 9,42 Hz.

Tabela 6 – Desempenho de conforto dinâmico sob utilização.

Código	Limite	Valor medido	Ensaio	Sobrepasseagem
BS 5400	$0,5f^{0.5} = 1,53 \text{ m/s}^2$	2,9 m/s ²	1 pessoa caminhando	189%
		9,67 m/s ²	4 pessoas correndo	651%
ONT 83	$0,25f^{0.78} = 1,43 \text{ m/s}^2$	2,9 m/s ²	1 pessoa caminhando	202%
		9,67 m/s ²	4 pessoas correndo	697%

Sob a ótica do guia SÉTRA (2006), os resultados dos ensaios com 1, 2 e 4 pessoas caminhando e 1 pessoa correndo apresentaram nível de conforto médio (com valor RMS da aceleração entre 0,5 m/s² e 1 m/s²). O

resultado obtido sob a utilização de 2 pessoas correndo apresentou nível de conforto mínimo (com valor RMS da aceleração entre 1 m/s² e 2,5 m/s²) e o último ensaio, com 4 pessoas correndo, gerou vibrações consideradas intoleráveis pelo guia (RMS acima de 2,5 m/s²).

Conclusão

Ressalta-se, portanto, a importância do estudo e análise da dinâmica das estruturas ao desenvolver projetos de passarelas de aço. Como foi constatado a partir deste estudo, mesmo estruturas com frequências naturais acima do primeiro harmônico da excitação humana podem apresentar níveis elevados de aceleração e desconforto perceptível aos usuários devido a vibrações excessivas. Esse fenômeno pode ser atribuído a fatores como a baixa razão de amortecimento e a redução da rigidez da estrutura por degradação e oxidação. O estudo evidencia a importância de metodologias complementares, combinando modelagem numérica, ensaios experimentais e utilização de acelerômetros MEMS, para uma caracterização mais precisa do comportamento estrutural. A utilização de estruturas esbeltas e leves, como as de aço, deve ser cada vez mais refinada para alinhar desempenho estrutural, economia de recursos e sustentabilidade, contribuindo para construções mais racionais e ambientalmente responsáveis.

Recomenda-se para trabalhos futuros a análise de tais estruturas utilizando uma metodologia analítica, a partir da teoria de viga contínua de Eüller-Bernoulli e a comparação entre modelagens computacionais em diferentes *softwares* de análise estrutural via Método dos Elementos Finitos (MEF).

Referências

- AASHTO. LRFD guide specifications for the design of pedestrian bridges. American Association of State Highway and Transportation Official, United States; 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NORMA BRASILEIRA. NBR 8800: Projetos de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NORMA BRASILEIRA. NBR 6120: Ações para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NORMA BRASILEIRA. NBR 14762: Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. Rio de Janeiro, 2010.
- BACHMANN, H., AMMANN, W. Vibrations in Structures Induced by Man and Machines, International Association for Bridge and Structural Engineering, IABSE, 1987
- CRAIG, R. R.; KURDILA, A. J. Fundamentals of Structural Dynamics. 2. ed. Berkeley: Wiley, 2006.
- EWINS D. J. Modal testing: theory, practice and application. John Wiley & Sons, 2009.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 10137: Bases for design of structures - Serviceability of buildings and walkways against vibrations. Switzerland, 2007.
- LIMA, D. M., GILÓ, B. M. D. S., CAVALCANTI, M. E., PEREIRA, I. D. L., DE LUCENA, S. S., GALINDO, T. A., BEZERRA, C. J. M., ALVES, I. R. M., SILVA, I. S. S., MEDEIROS, I. S. Vibration analysis of steel footbridges: Experimental investigation, numerical modeling and theoretical approach. Structures, v. 72, p. 108250, 2025.
- LIMA, H. T.; ALAS, L. E. M.; NUNES, M. N. A.; LIMA, D. M.; MEDEIROS, I. S. Experimental and numerical modal evaluation of profiled steel decking floor slabs in a container house using MEMS. Engineering Structures, v. 308, 2024.
- MEDEIROS, I. S.; LIMA, H. T.; LIMA, D. M.; ALAS, L. E. M.; LÓPEZ-YÁNEZ, P. A. Dynamic parameters in reinforced concrete one-way ribbed slabs: Theoretical approach, experimental investigation and numerical modeling. Engineering Structures, v. 314, p. 1–14, 2024.
- MURRAY, T. M.; ALLEN, D. E.; UNGAR, E. E.; DAVIS, D. B. Design Guide 11: Vibrations of Steel-Framed Structural Systems Due to Human Activity. 2. ed. United States of America, 2016.
- RAO, S. S. Vibrações Mecânicas. 4. ed. Londres: Pearson University, 2008.
- SÉTRA / AFCG “Footbridges – Assessment of vibrational behavior of footbridges under pedestrian loading – Practical Guidelines”, 2006.
- SORIANO, H. L. Introdução à dinâmica das estruturas. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.
- ŽIVANOVIĆ, S.; PAVIC, A.; REYNOLDS, P. Vibration serviceability of footbridges under human-induced excitation: a literature review. Journal of Sound and Vibration, v. 279, p. 1–74, 2005.