



Análise Dinâmica de uma Passarela Metálica Submetida ao Carregamento Humano de Caminhada

Isabel Kristiner¹, Emerson Sena Almeida², Patrick de Oliveira Batista da Costa³

¹ UFRGS/PPGEC/isabelkristiner@gmail.com

² UFRGS/PPGEC/emerson.sena.almeida@gmail.com

³ UFRGS/PPGEC/ecivilpatrick@yahoo.com

Resumo

Vibrações mecânicas surgem quando um sistema se afasta de sua posição de equilíbrio, criando a necessidade de entender como essas vibrações afetam a estrutura e o conforto dos usuários. Assim, o foco deste estudo é a análise dinâmica de uma passarela metálica submetida ao carregamento humano de caminhada. Um algoritmo de programação em *Python* foi desenvolvido para analisar a passarela. O objetivo é determinar as três primeiras frequências naturais, os modos de vibração e os valores de aceleração e deslocamento no nó central da passarela sob carregamento dinâmico. A estrutura de passarela é modelada como uma treliça plana e verificada em estudo anterior. Um estudo de caso é apresentado para a análise dinâmica. Os resultados deste estudo revelam que a aceleração vertical na passarela excedeu os limites considerados adequados para o conforto dos pedestres. Isso destaca a importância de implementar medidas corretivas, como a introdução de amortecedores ou a revisão da disposição dos elementos da estrutura. A pesquisa demonstra a relevância da análise dinâmica na avaliação do comportamento de passarelas metálicas sujeitas a carregamento humano. O algoritmo desenvolvido em *Python* se mostrou eficaz na obtenção de resultados significativos. Este estudo contribui para o campo da engenharia estrutural ao enfatizar a importância de considerar as vibrações em projetos de passarelas e estruturas similares.

Palavras-chave

Excitação humana; Caminhada; Análise dinâmica; Vibrações excessivas.

Introdução

As vibrações mecânicas ocorrem com o deslocamento de um sistema de sua posição de equilíbrio estável. O sistema tende a retornar a sua posição inicial sob a ação de forças restauradoras, porém, durante o movimento, este adquire certa velocidade que acaba o levando além da posição original. Conforme o processo permanece em repetição de forma indefinida, o sistema mantém-se em movimento oscilatório ao redor de sua posição de equilíbrio (BEER et al., 2019). A ocorrência de vibrações em estruturas é relacionada com diversos fatores, dentre os mais estudados: vento, sismos, impactos e tráfegos de veículos e pedestres.

Soriano (2009) comenta sobre a pertinência da análise do comportamento dinâmico em situações em que é possível o desenvolvimento de vibrações que causem danos à estrutura ou impliquem em problemas de uso, como desconforto humano ou interferência no funcionamento de equipamentos. Entre estes sistemas, estão as passarelas metálicas, instaladas em zonas urbanas, com o objetivo de criar rotas para o tráfego de pedestres. Este tipo de estrutura busca vencer grandes vãos, adotando sistemas unidirecionais, sendo sua forma uma importante definição de projeto. A escolha de treliças para este tipo de projeto é embasada na eficiência em cobrir grandes vãos ao mesmo tempo em que utilizam o material de maneira econômica e racional, além de funcionarem como principal componente estrutural e arquitetônico. Há uma ampla variedade de desenhos de treliças consolidados na literatura, tais qual: Warren, Pratt, Howe, Fink e treliças belgas (CHING et al., 2015).

Através de programas e rotinas computacionais é possível realizar análises do comportamento de praticamente qualquer sistema físico, permitindo constante evolução e aprimoração em projetos de engenharia. A utilização de algoritmos de programação na resolução de métodos de análise matricial viabiliza a simulação do comportamento de estruturas reais através de modelos computacionais formados por vários elementos. Com isso, o presente trabalho apresenta a análise dinâmica de uma passarela metálica submetida à excitação humana através da implantação de um algoritmo de programação na linguagem *Python*. Os resultados obtidos são as três primeiras frequências e modos de vibração da estrutura, e os valores de aceleração, deslocamento e velocidade no nó central da passarela com aplicação do carregamento. A resolução da equação diferencial de equilíbrio dinâmico será pelo Método de Newmark.

Metodologia

O algoritmo para análise dinâmica é desenvolvido na linguagem de programação *Python*, tendo em vista esta ser uma linguagem de alto nível, de livre acesso e mantida de forma colaborativa, fatos que contribuem para a melhor execução do algoritmo e solução de possíveis problemas. A modelagem da passarela é o primeiro passo realizado, sendo definida a estrutura do tipo treliça plana para a discretização do problema. A primeira verificação do algoritmo foi realizada conforme o trabalho de Miguel (2014), considerando resultados das três primeiras frequências naturais, deslocamento e aceleração no nó central da treliça presente no estudo de referência.

Em seguida, uma treliça hipotética para passarela metálica destinada a travessia de pedestres é proposta para o estudo de caso. A Figura 1 apresenta o modelo de treliça, do tipo Pratt. Nesta configuração de estrutura, os montantes trabalham à compressão e barras diagonais, à tração. A estrutura possui 22 nós e 41 elementos de barra, conforme indicado na imagem. Os nós das extremidades (1 e 11) possuem restrições de deslocamento nos planos x e y.

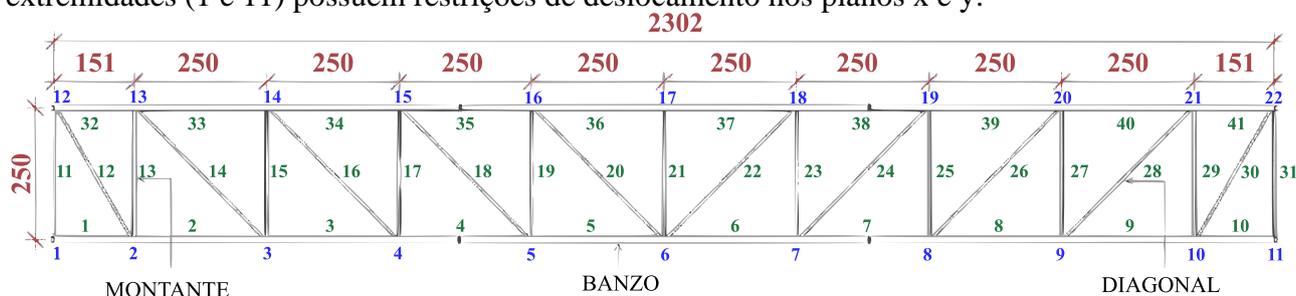


Figura 1 – Treliça hipotética para passarela metálica

A Tabela 01 indica o tipo de perfil da treliça e área considerada para cada seção conforme informações do catálogo de fabricante dos perfis MSH tubulares (TUBES, 2002). O módulo de Young de 200 GPa e peso específico do aço de 7850 kg/m³ são adotados.

Tabela 1 – Tipos de perfis e áreas das seções da treliça

Tipo de Barra	Perfil Tubular	Área da seção [mm ²]
Banzo Inferior	MSH 120 x 80 x 4,5	0,001700
Banzo Superior	MSH 100 x 80 x 5,6	0,001860
Montante Externo	MSH 60 x 60 x 6,3	0,001060
Montante Interno	MSH 60 x 60 x 4,5	0,000977
Diagonais	MSH 50 x 50 x 3,2	0,000588



A simulação da excitação causada pela circulação de pedestres na passarela é inserida segundo o estudo de Bachmann e Ammann (1987). A força induzida pelas ações humanas de caminhada é caracterizada nas direções vertical e horizontal.

Formulação do Problema

Resposta dinâmica

A equação diferencial apresentada na Equação 1 descreve o equilíbrio dinâmico de um sistema linear com n graus de liberdade. As frequências naturais são definidas quando amortecimento e força são iguais a zero, por meio da análise modal. A resolução da equação apresentada fornece velocidade, aceleração e deslocamento em função do tempo.

$$\mathbf{M}\ddot{\vec{x}}(t) + \mathbf{C}\dot{\vec{x}}(t) + \mathbf{K}\vec{x}(t) = \vec{F}(t) \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

M: representa a matriz de massa do sistema;

C: representa a matriz de amortecimento do sistema;

K: representa a matriz de rigidez do sistema;

t : variável tempo;

$\ddot{\vec{x}}(t)$: vetor de aceleração do sistema, em função do tempo;

$\dot{\vec{x}}(t)$: vetor de velocidade do sistema, em função do tempo;

$\vec{x}(t)$: vetor de deslocamento do sistema, em função do tempo;

$\vec{F}(t)$: vetor de forças atuantes na estrutura, variando com o tempo.

A matriz de amortecimento C é escrita como uma combinação linear das matrizes de massa e rigidez, denominada como amortecimento de Rayleigh, conforme apresentado na Equação 2.

$$\mathbf{C} = \alpha\mathbf{M} + \beta\mathbf{K} \quad \text{Equação 2}$$

Onde α é o coeficiente de amortecimento proporcional à massa (Equação 3), e β , coeficiente de amortecimento proporcional à rigidez (Equação 4).

$$\alpha = \zeta \frac{2\omega_i\omega_j}{\omega_i + \omega_j} \quad \text{Equação 3}$$

$$\beta = \zeta \frac{2}{\omega_i + \omega_j} \quad \text{Equação 4}$$

Onde ω_i e ω_j são as frequências naturais, respectivamente, do i -ésimo e j -ésimo modos de vibração do sistema. A razão de amortecimento ζ para o material é definida como 0,004 (SORIANO, 2009).

Treliça plana

A treliça plana é discretizada como um elemento bidimensional de barras. Estes sistemas são considerados reticulados, quando a interação e transmissão de forças entre os elementos de barra ocorre somente nos nós. A junta entre os nós é do tipo articulada, assim, são transmitidas apenas forças axiais de tração ou compressão. Não são considerados esforços provenientes da ação de momentos fletores, torsões e forças cortantes. Por consequência, a treliça considera apenas a rigidez axial dos membros estruturais, possuindo dois graus de liberdade por nó.

Desta maneira, o modelo de cálculo matemático é concebido através da aplicação das equações de equilíbrio nos pontos nodais juntamente com a condição de compatibilidade de deslocamentos, onde os elementos devem permanecer conectados após a deformação da estrutura (ALVES FILHO, 2013). A Figura 2 ilustra um elemento de barra qualquer de treliça plana bi apoiada, ilustrando a relação entre o sistema de coordenadas global da estrutura e local do elemento. As variáveis u_1, v_1, u_2, v_2 , representam os deslocamentos horizontais e verticais em cada nó.

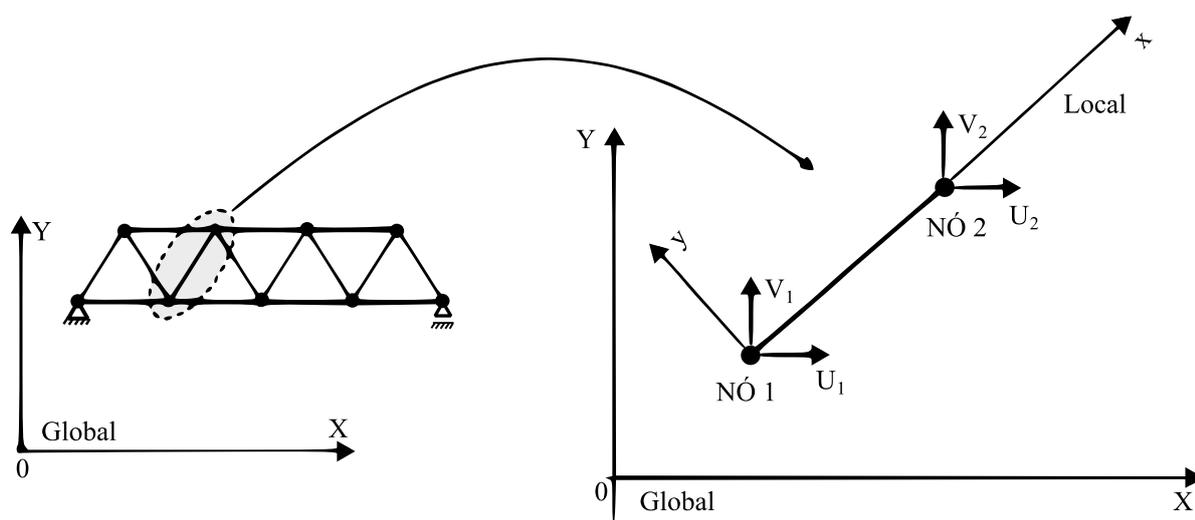


Figura 2 – Elemento de barra de treliça no sistema de coordenadas local e global (ALVES FILHO, 2013)

As matrizes de rigidez K e massa consistente M montadas a partir da análise da treliça plana estão apresentadas nas Equação 5 e Equação 6.

$$K^e = \frac{AE}{L} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{Equação 5}$$

$$M^e = \frac{\rho AL}{6} \begin{bmatrix} 2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad \text{Equação 6}$$

Onde,

A : Área da seção do elemento, em m^2 ;

E : Módulo de Young;

L : comprimento do elemento, em m ;

ρ : massa específica do material do elemento.

Carregamento gerado pela atividade humana

Entre os tipos de cargas periódicas podemos citar como principais as que resultam de movimentos humanos, como a caminhada, a corrida, o pulo e a dança. Já as cargas transitórias resultam principalmente de um movimento de solavanco, decorrente de um impulso único em ações como salto de uma plataforma de mergulho ou aterrissagem em um piso após saltar de uma posição elevada.



No presente trabalho foi adotada a excitação gerada pela caminhada normal, pois trata-se da ocorrência mais comum em passarelas metálicas para trânsito de pessoas. Bachmann e Ammann (1987) definem que a velocidade de propagação de pedestres (v_s) é associada à taxa de frequência (f_s) ao longo do comprimento da passada (l_s). Naturalmente, pessoas diferentes podem ter comprimentos de passada e ritmos bastante distintos para a mesma velocidade de avanço. A definição da forma do carregamento é modelada pela Equação 7. São considerados apenas os três primeiros harmônicos.

$$F_p(t) = G + \Delta G_1 \text{sen}(2\pi f_s t) + \Delta G_2 \text{sen}(4\pi f_s t - \varphi_2) + \Delta G_3 \text{sen}(6\pi f_s t - \varphi_3) \quad \text{Equação 7}$$

Onde,

G : peso de uma pessoa (800 N);

ΔG_1 : amplitude da componente de carga do primeiro harmônico;

ΔG_2 : amplitude da componente de carga do segundo harmônico;

ΔG_3 : amplitude da componente de carga do terceiro harmônico;

f_s : frequência do passo (Hz);

φ_2 : ângulo de fase do segundo harmônico em relação ao primeiro;

φ_3 : ângulo de fase do terceiro harmônico em relação ao primeiro.

Resultados e discussão

Verificação numérica

Com o objetivo de verificar os procedimentos numéricos adotados para o presente estudo, a treliça presente em Miguel (2014) foi implementada. Trata-se de uma passarela treliçada de 39 m de comprimento e 4 m de altura, como mostra a Figura 3. O nó implementado para a verificação foi o nó central 22, considerando todas as demais propriedades e especificações da passarela em questão.

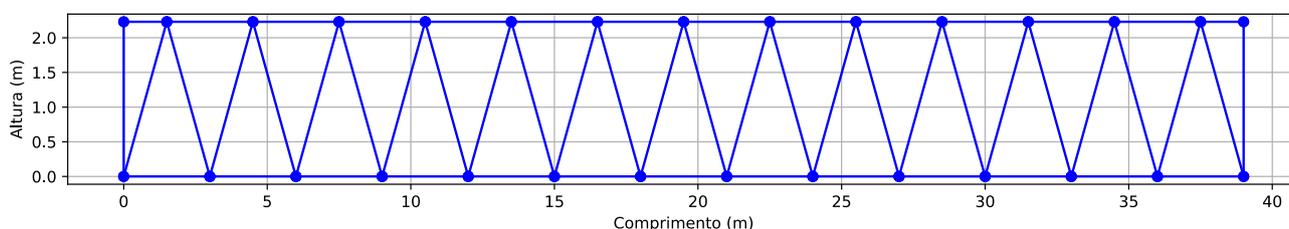


Figura 3 – Treliça de verificação (Adaptado de Miguel, 2014)

A partir da definição da treliça nos procedimentos numéricos foi possível a obtenção dos resultados para as frequências naturais dos três primeiros modos de vibração da estrutura, além dos picos máximos de deslocamento e aceleração do nó verificado, presentes na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados de verificação para o nó 22

	Miguel (2014)	Autores
Deslocamento (m)	0,0074	0,008
Aceleração (m/s ²)	1,15	1,22
1 ^a Frequência natural (Hz)	5,996	5,996
2 ^a Frequência natural (Hz)	16,036	16,036
3 ^a Frequência natural (Hz)	33,916	33,916

É possível observar que os valores obtidos no presente trabalho são coerentes com os obtidos no estudo de referência, principalmente ao se observar os valores das frequências para os três primeiros modos. A diferença existente para os valores de deslocamento e aceleração para o nó em questão



podem ser referentes à diferença na modelagem e aplicação da carga proveniente da excitação humana, que apesar de representarem os mesmos aspectos em ambos os estudos, a diferença na implementação pode ocasionar resultados distintos, porém aceitáveis.

Estudo de Caso

Na sequência, foi inserida a treliça que representa uma passarela metálica hipotética para a realização do estudo de consideração da carga humana. Os primeiros resultados obtidos são as três frequências naturais e modos de vibração da estrutura, as quais, de acordo com Bachmann e Ammann (1987) são as mais afetadas pelo movimento de pedestres. As frequências obtidas no algoritmo *Python* estão apresentadas na Tabela 3. A Figura 4 apresenta os modos de vibração plotados via algoritmo.

Tabela 3 – Frequências naturais

1 ^a Frequência natural (Hz)	13,16585
2 ^a Frequência natural (Hz)	32,66999
3 ^a Frequência natural (Hz)	52,38666

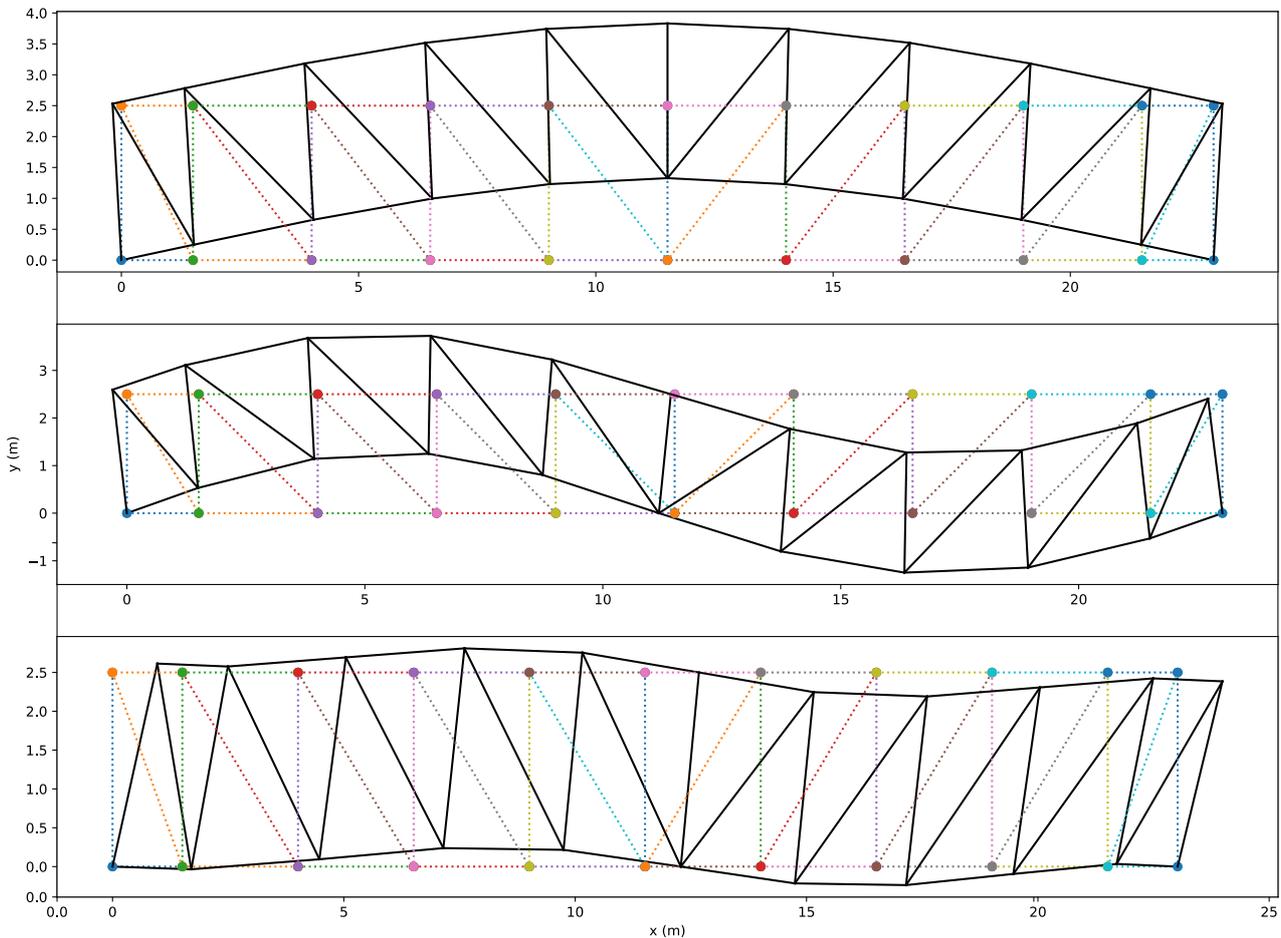


Figura 4 – Três primeiros modos de vibração da passarela.

O deslocamento ao longo do tempo atribuído ao carregamento oriundo da caminhada de um pedestre referente ao nó 6 da estrutura é apresentado na Figura 5, com valor máximo de 0,0019 m. A Figura 6 apresenta a resposta de aceleração ao longo do tempo para o mesmo nó, com valor máximo de 9,3 m/s². O deslocamento obtido a partir da rotina tem a influência do amortecimento considerado no método de resolução.

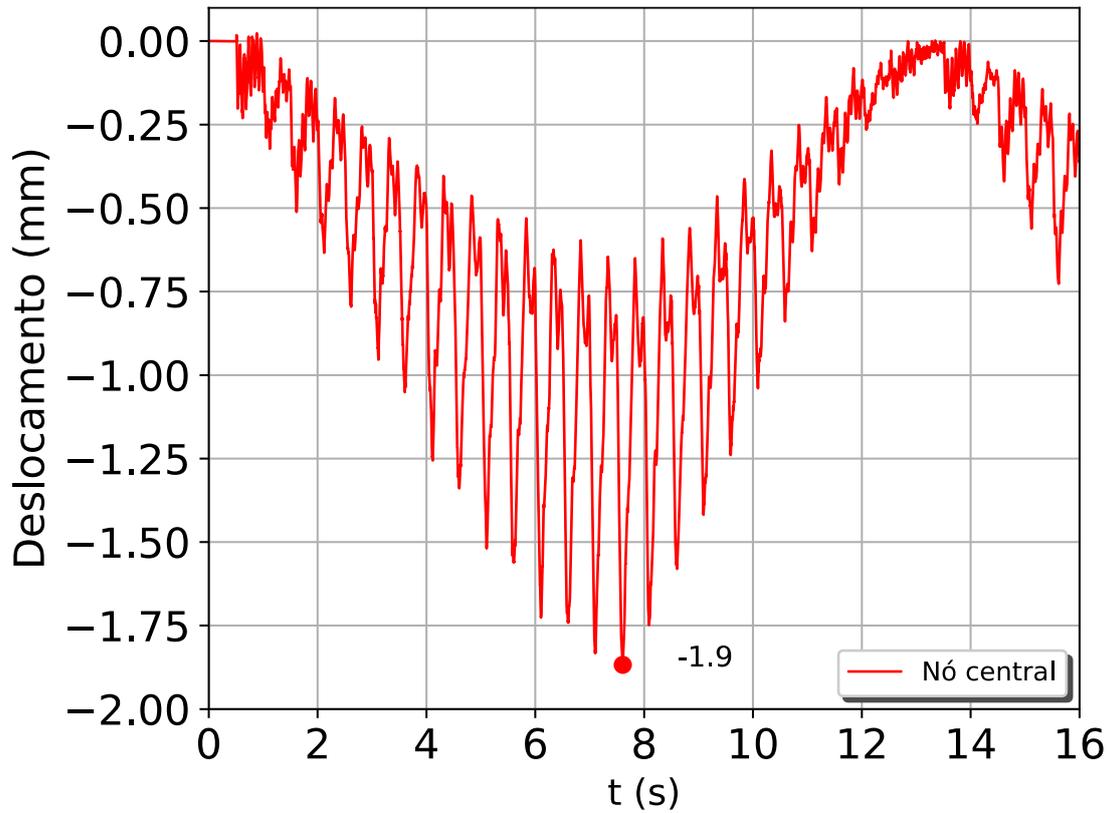


Figura 5 – Deslocamento ao longo do tempo do nó 6

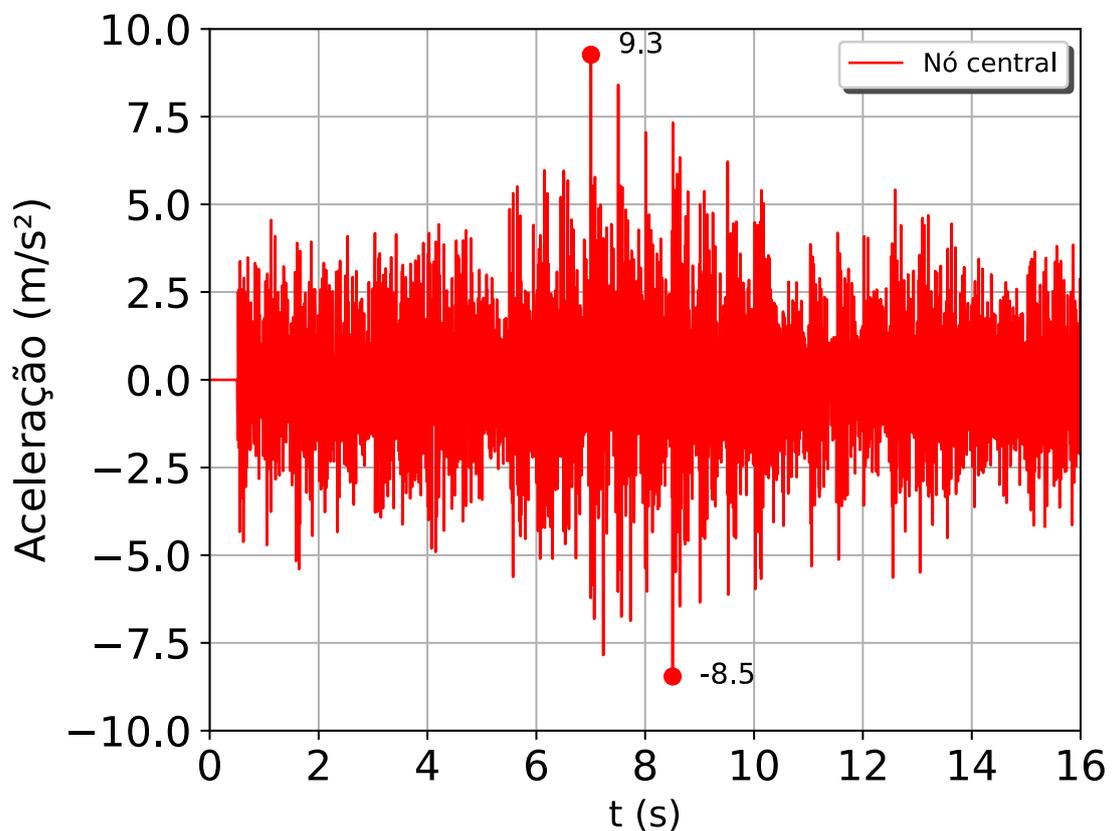


Figura 6 – Aceleração ao longo do tempo do nó 6



De acordo com a fórmula para o cálculo do fator de majoração considerando a taxa de fluxo médio igual a 1 pessoa/s, o fator de majoração m resultou no valor de 3,92. A análise do conforto para esse tipo de estrutura é de extrema importância e é uma etapa complexa em muitos casos pois depende diretamente do uso atribuído para a passarela além da sensibilidade às vibrações de quem está trafegando no momento (SARAMAGO et al., 2018).

Bachmann et al. (1995), propõem dois limites para as acelerações verticais que está sujeita a estrutura, em função da frequência natural do modo analisado. As equações 8 e 9 apresentam este limite.

$$a_{lim} = 0,5f_1^{0,5} \quad \text{Equação 8}$$

$$a_{lim} = 0,25f_1^{0,78} \quad \text{Equação 9}$$

Para a frequência natural da estrutura de 13,16 Hz a primeira fórmula limita a aceleração vertical em 1,81 m/s², enquanto a segunda fórmula em 1,87 m/s². Os mesmos autores afirmam que a aceleração limite apropriada seria 0,5 m/s². Estes limites são calculados segundo as características da própria estrutura. Para os valores de aceleração obtidos através da rotina em *Python* verifica-se a não conformidade com os valores limites.

Conclusões

No presente estudo foi apresentada a análise dinâmica de uma passarela metálica submetida à excitação humana por meio da implantação de um algoritmo de programação na linguagem *Python*. A partir da verificação da rotina implementada foi possível a verificação dos procedimentos numéricos aplicados por meio da comparação dos resultados obtidos por Miguel (2014) em sua passarela analisada. Atestou-se uma boa concordância entre os resultados possibilitando a aplicação da metodologia no caso principal do estudo.

A partir da rotina implementada em *Python* foi possível a aplicação da metodologia de Bachmann e Ammann (1987) para o caso do carregamento obtido a partir da caminhada de pedestres, sendo os resultados da análise dinâmica adquiridos por meio da solução numérica com o Método de Newmark. Por meio das considerações de outros estudos acerca desse carregamento foi possível o cálculo dos valores máximos de aceleração e deslocamento, além dos valores limites de aceleração vertical que seriam apropriados. Observou-se para o caso em estudo que as acelerações verticais estão acima dos valores limites no que diz respeito à análise do conforto dos usuários, o que cria a necessidade de ações mitigadoras para adequar tais acelerações à valores aceitáveis a citar: amortecedores, nova disposição de elementos, etc.

Agradecimentos

Os autores deste trabalho de pesquisa agradecem ao suporte financeiro fornecido pelas agências brasileiras de fomento à pesquisa CAPES e CNPq.

Referências

ALVES FILHO, A. Elementos Finitos: a base da tecnologia CAE. 6. ed. São Paulo: Érica, 2013.



- BACHMANN, H.; AMMANN, W. Vibrations in structures induced by man and machines. IABSE Structural Engineering Document 3E, International Association for Bridges and Structural Engineering, 1987, p. 9-43.
- BACHMANN, H. et al. Vibration Problems in Structures – practical guidelines, 2ed, Birkhäusererlag, Basel, 1995.
- BEER, Ferdinand P. et al. Mecânica Vetorial para Engenheiros: dinâmica. 11. ed. Porto Alegre: AMGH, 2019. 2 v. Tradução: Nathália Bergamaschi Glasenapp e Renata Mariante Tavares.
- CHING, Francis D. et al. Sistemas estruturais ilustrados: padrões, sistemas e projeto. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.
- FARIAS, Victória Schmidt. Estudo de Caso de uma Passarela Urbana Metálica: Comparativo entre modelos computacionais. 2020. 93 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC, 2020.
- MIGUEL, Letícia Fleck Fadel; FADEL MIGUEL, Leandro Fleck; LOPEZ, Rafael Holdorf. A firefly algorithm for the design of force and placement of friction dampers for control of man-induced vibrations in footbridges. Optimization and Engineering, v. 16, p. 633-661, 2015. <https://doi.org/10.1007/s11081-014-9269-3>.
- SARAMAGO, G. A; SANTOS, S. H. C; PERLINGEIRO M. S. P. L. X CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS, 2018, Rio de Janeiro. Análise Dinâmica de Passarelas [...]. Rio de Janeiro: [s. n.], 2018.
- SILVA, Gustavo Ayres. Otimização de Parâmetros de Projeto de Amortecedores de Massa Sintonizados para Controle de Vibrações em Passarelas Metálicas. 2020. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, 2020.
- SORIANO, Humberto Lima. Elementos Finitos: formulação e aplicação na estática e na dinâmica das estruturas. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna, 2009.
- TUBES, Vallourec & Mannesmann (org.). Perfis MSH de seções circulares, quadradas e retangulares: dimensões, valores estáticos, materiais. 2002.