



Análise de Vibrações em Passarelas Treliçadas Mistas de Aço e Concreto

Isabela Sena de Oliveira Cabral¹, Emerson Figueiredo dos Santos²

¹ Universidade Federal de Sergipe / Departamento de Engenharia Civil / isabelacbrl@hotmail.com

² Universidade Federal de Sergipe / Departamento de Engenharia Civil / emfsantos@academico.ufs.br

Resumo

As passarelas desempenham um papel primordial no que diz respeito à segurança de pessoas quando da travessia de um obstáculo natural ou artificial. Em rodovias e avenidas de tráfego intenso, onde se presenciam grandes larguras, o uso de passarela treliçada mista de aço e concreto se apresenta como uma solução bastante viável, uma vez que podem vencer vãos relativamente grandes. Ainda assim, vibrações induzidas pelo caminhar de pessoas podem ocorrer, ocasionando desconforto ao usuário, além de uma possível amplificação de esforços. Neste sentido, o presente trabalho objetiva realizar uma análise dinâmica a fim de compreender o comportamento dessas estruturas sob ação de caminhar com até duas pessoas, simulado por meio de uma ferramenta computacional de Análise Estática e Dinâmica, desenvolvido por Silva (2022), que utiliza um modelo biodinâmico com um Grau de Liberdade (1GL) com função de interação que simula o impacto do calcanhar. Nesta ferramenta computacional, foram modeladas as passarelas treliçadas mistas de aço e concreto com vãos de 30 m e 35 m, disponibilizadas pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT). Os valores de pico das respostas dinâmicas em termos de aceleração no domínio do tempo foram comparados não apenas com os limites indicados pela NBR7187:2021, mas também pelo ábaco sensorial da *American Institute of Steel Construction (AISC)* (MURRAY et al., 1997). O valor de aceleração, calculado pela NBR7187:2021, foi inferior ao valor de pico do histograma de acelerações da ferramenta computacional, embora, para ambos, a estrutura foi considerada como de máximo conforto. As máximas amplitudes de acelerações produzidas por duas pessoas apresentaram-se muito próximas ao limite de aceleração recomendado pela AISC.

Palavras-chave

Dinâmica estrutural; passarela; caminhar; modelo biodinâmico; conforto.

Introdução

A análise dinâmica, outrora considerada como preciosismo na Engenharia Civil, hoje, com os avanços tecnológicos dos materiais, somados à concepção estrutural voltada para estruturas mais esbeltas e com grandes vãos, constitui-se em elaborações de projetos mais suscetíveis a vibrações, que indicam a necessidade de avaliar essas estruturas no contexto dinâmico.

Isso ocorre, pois as características geométricas contribuem para a presença de vibrações, atreladas a uma capacidade reduzida de dissipação de energia dos materiais, causando desconforto aos usuários (SORIANO, 2014).

No que tange à presença de vibrações indesejáveis, estruturas submetidas a carregamentos que variam rapidamente no tempo, ou seja, carregamentos dinâmicos, tendem a se deslocar em torno do seu ponto de equilíbrio estático. Portanto, estão sujeitas a variações de velocidade e, conseqüentemente, acelerações. Baseado no Princípio Fundamental da Dinâmica ($F = M \cdot a$), a combinação de massa e aceleração resulta em forças inerciais que são desconsideradas na análise estática.

Já em relação a reduzida capacidade de dissipação de energia, na maioria dos sólidos, o principal modo de assimilação de energia térmica é pelo aumento da energia vibracional dos átomos. Estes estão constantemente vibrando em frequências muito altas e com amplitudes relativamente pequenas. Em vez de serem independentes uns dos outros, as vibrações dos átomos adjacentes são acopladas devido as ligações atômicas. Materiais frágeis e com alta resistência, dificultam essa oscilação devido as ligações interatômicas serem relativamente fortes, resultando em menor dissipação de energia em forma de calor, que diminui a capacidade de amortecimento da estrutura (CALLISTER; RETHWISCH, 2009).

Neste sentido, passarelas esbeltas mistas de aço-concreto podem estar susceptíveis a vibrações causadas pelo tráfego de pessoas. Para este trabalho, será analisado o efeito dinâmico da interação pessoa-estrutura em passarelas sob a ação de caminhar.

Metodologia

a) Modelagem computacional

Os desenhos e memória de cálculo das passarelas, foram obtidos através do órgão responsável no portal oficial do governo federal (DNIT, 2022) (Figura 1). As passarelas são constituídas por uma superestrutura de aço em treliça espacial do tipo Warren, com vãos de 30 m (P30) e 35 m (P35) e com a seção transversal típica de dimensões 2,5 m x 2,5 m (Figura 2); com piso em concreto armado tipo steel deck com espessura de 150 mm (Figura 3). O apoio da estrutura de aço nos acessos, em concreto armado, é formado por viga console juntamente com o pórtico, que fornecem estabilidade vertical e lateral.

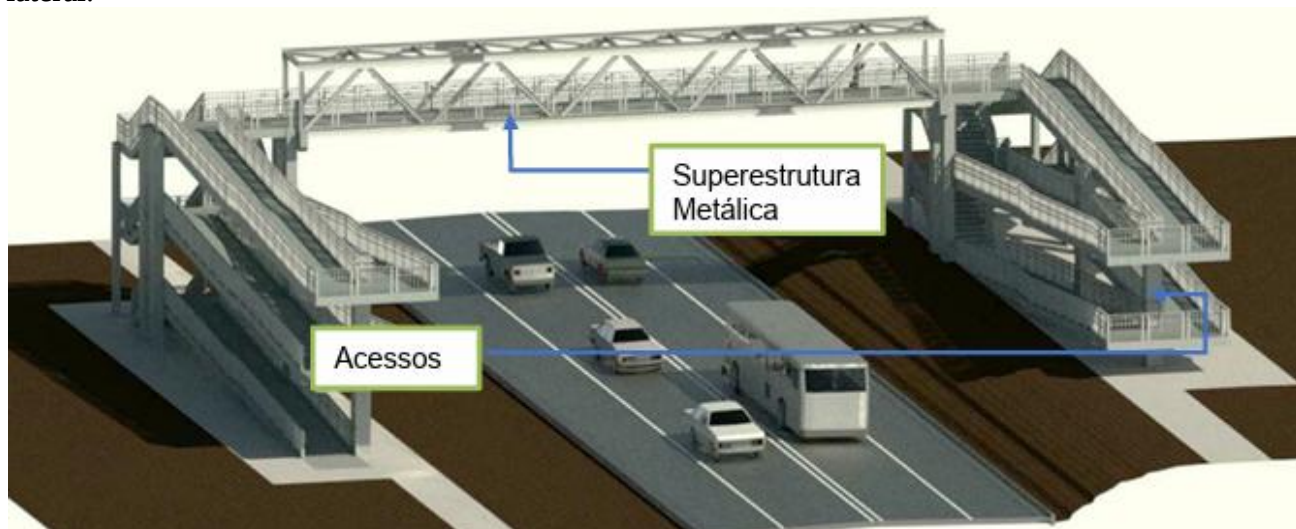


Figura 1 – Maquete eletrônica da passarela-tipo.

Fonte: DNIT, 2022

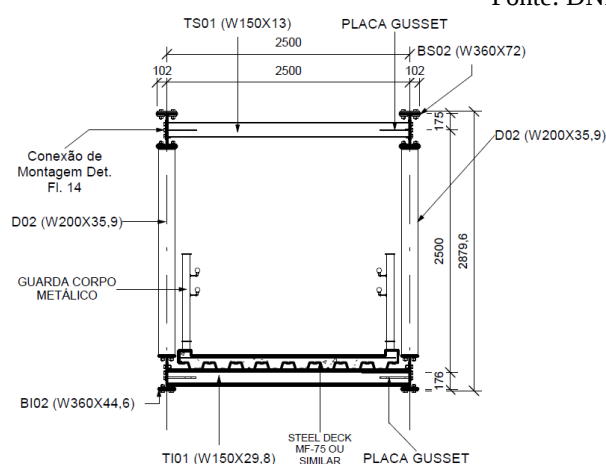


Figura 2 – Seção transversal típica.

Fonte: DNIT, 2022

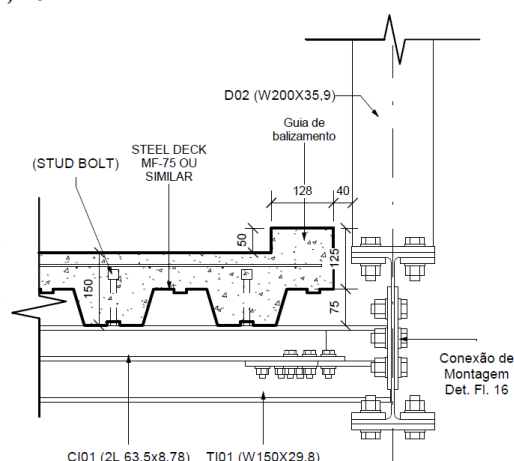


Figura 3 – Detalhe steel deck.

Fonte: DNIT, 2022

Para aplicação da análise dinâmica, foi utilizada uma ferramenta computacional desenvolvida em linguagem Python, que faz uso do Método dos Elementos Finitos aplicado a elementos de barra na condição tridimensional. Por meio de algoritmo matricial, esta ferramenta está habilitada a fornecer resultados não apenas relacionados a parte estática, como também a parte dinâmica, tais como: frequências naturais e formas modais de vibração; respostas dinâmicas no domínio no tempo para o caminhar humano representado por um modelo biodinâmico de um grau de liberdade (1GL).

Assim, as passarelas em questão foram modeladas utilizando a ferramenta computacional proposta. Nos modelos foram empregados elementos de barra representativos dos elementos da treliça, bem como o piso em steel deck, representado por elemento único, mas que conserva a geometria e massa definido em projeto. Como não há informações experimentais, as estruturas também foram modeladas

no Autodesk ROBOT (AUTODESK, 2024), com objetivo de realizar uma comparação das frequências naturais e validar a modelagem.

A Figura 4 e a Figura 5 apresentam vistas isométricas dos modelos computacionais elaborados pelo Algoritmo e pelo Autodesk ROBOT, donde verificam-se as semelhanças entre os referidos modelos.

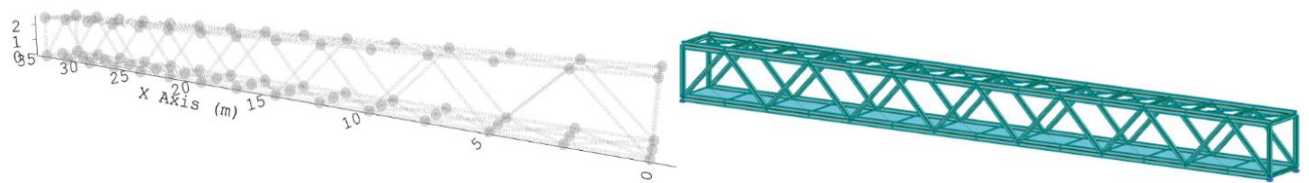


Figura 4 – Vista isométrica 30 m (Algoritmo x Robot).

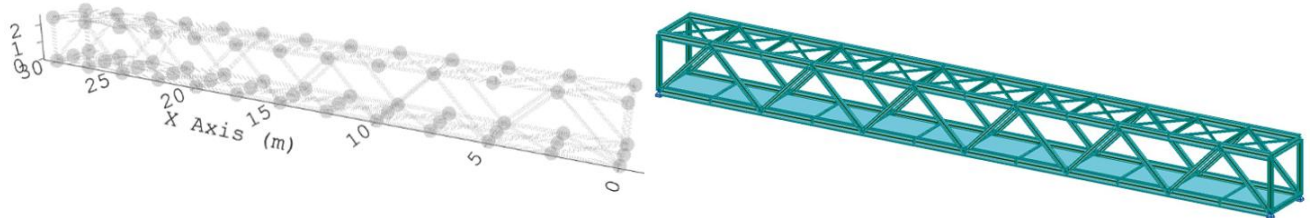


Figura 5 – Vista isométrica 35 m (Algoritmo x Robot).

b) Características dinâmicas do modelo

As características dinâmicas, como a frequência natural e modo fundamental, foram determinadas tanto pela ferramenta computacional (Algoritmo) quanto pelo Autodesk ROBOT para as passarelas com vão de 30 m e de 35 m. Os resultados estão apresentados na Tabela 1 e na Tabela 2, enquanto as formas modais de vibração são ilustradas nas Figuras 6 a 11.

Tabela 1 – Frequências naturais (em Hz) da passarela P30.

Descrição	Modo de vibração		
	1º modo	2º modo	3º modo
Algoritmo	5,70	10,29	11,81
Robot	5,73	10,56	12,49
Percentual relativo [%]	0,52	2,46	5,44

Tabela 2 – Frequências naturais (em Hz) da passarela P35.

Descrição	Modo de vibração		
	1º modo	2º modo	3º modo
Algoritmo	4,46	9,15	11,41
Robot	4,46	9,21	11,75
Percentual relativo [%]	0,00	0,65	2,86

Em termos de frequência natural, observou-se proximidade satisfatória entre os resultados obtidos dos modelos confeccionados, o que assegura a confiabilidade da modelagem. Além disso, conforme o esperado, as frequências naturais da passarela de 30 m foram superiores às da passarela de 35 m, devido ao menor vão daquela, o que resulta em maior rigidez.

Tal proximidade também se fez presente nas formas modais de vibração. Vale ressaltar que o deslocamento de uma forma modal é um parâmetro adimensional. Para um mesmo perfil modal, existem inúmeras configurações deformados que o definem, ora mais próximo, ora mais distante da posição de equilíbrio. Dessa forma, a amplitude dependerá do valor inicial arbitrado para um dos graus de liberdade em cada programa, em que os demais decorrerão em função deste (SORIANO, 2005).

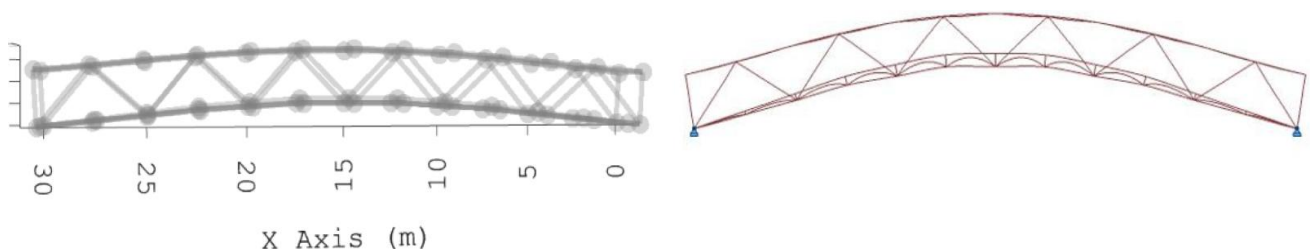


Figura 6 – 1º modo de vibração da passarela P30 (Algoritmo x Robot).

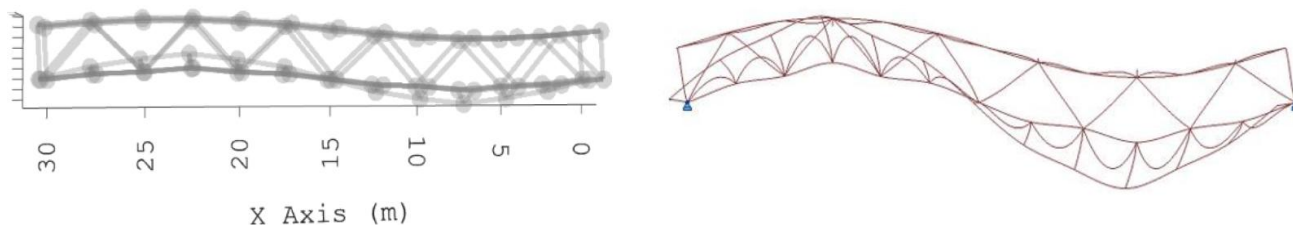


Figura 7 – 2º modo de vibração da passarela P30 (Algoritmo x Robot).

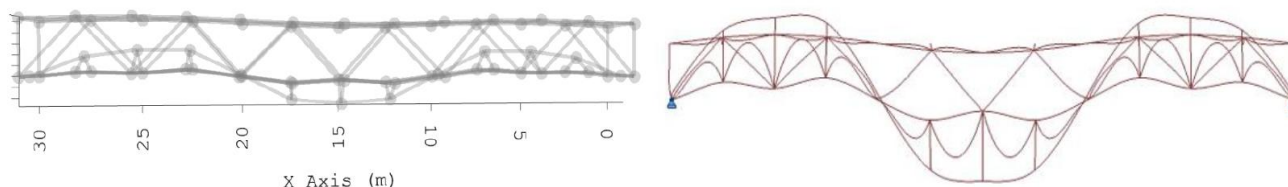


Figura 8 – 3º modo de vibração da passarela P30 (Algoritmo x Robot).

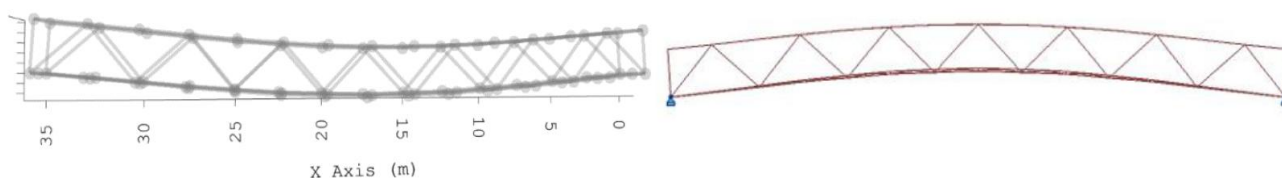


Figura 9 – 1º modo de vibração da passarela P35 (Algoritmo x Robot).

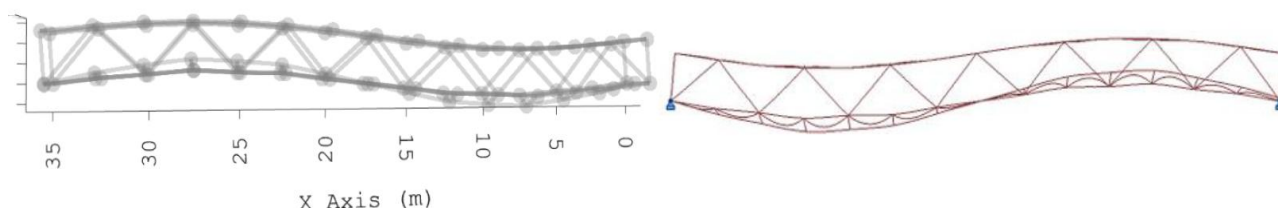


Figura 10 – 2º modo de vibração da passarela P35 (Algoritmo x Robot).

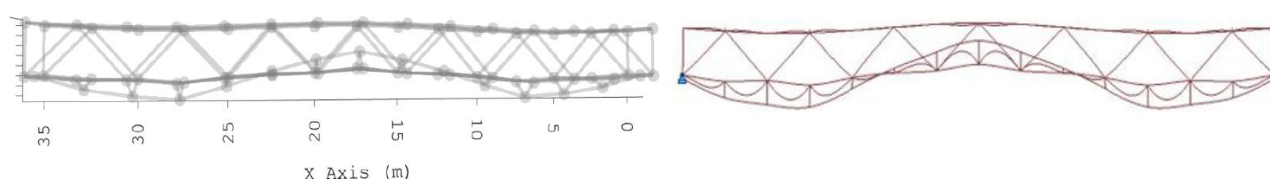


Figura 11 – 3º modo de vibração da passarela P35 (Algoritmo x Robot).

c) Aplicação do modelo biodinâmico

Para a aplicação do modelo biodinâmico, o Algoritmo de análise dinâmica, considera um sistema massa-mola-amortecedor com um grau de liberdade (1GL), representativo de uma pessoa, acoplado à estrutura. A interação pessoa-estrutura decorre do deslocamento relativo entre a pessoa (u_p) e a estrutura (u_e), inferindo uma interdependência entre as equações de movimento que regem o sistema. O movimento relativo é atualizado a cada passo de tempo, fazendo com que as forças elásticas, inerciais e de amortecimento apresentem uma variação no tempo. Além disso, o algoritmo computacional utiliza uma função de interação que caracteriza o impacto na superfície de contato, decorrente do efeito do calcanhar ao pisar, fator que, segundo Varela (2004), influencia significativamente as vibrações no piso.

Cabe ressaltar que, a ferramenta computacional foi desenvolvida para o trânsito de apenas uma pessoa. Além disso, o Algoritmo de análise dinâmica, foi utilizado por Silva (2022) numa correlação teórico-

experimental em um piso de madeira, onde se obteve uma proximidade satisfatória entre as respostas dinâmicas teórica e experimental em termos de aceleração.

Para isso, foi necessário definir os parâmetros dinâmicos da pessoa, como rigidez (k_p), massa (m_p) e amortecimento (c_p). Embora essas características variem conforme a particularidade de cada ser humano, ensaios experimentais apontam intervalos típicos para tais valores. Com base nos estudos de Caprani et al. (2011), apud Costa (2019), foram estabelecidos intervalos de referência para essas variáveis. Esses valores estão apresentados na Tabela 3, onde são comparados com os parâmetros adotados neste estudo. Para efeito de variação paramétrica, foram utilizadas massas de 65kg, 75kg e 85kg, representativos de pessoas diferentes. Adicionalmente, serão utilizadas duas pessoas caminhando lado a lado e de forma sincronizada, utilizando, massas de 130 kg, 140 kg e 150 kg indicados na Tabela 3. Além disso, considerou-se que o pedestre desenvolve uma velocidade constante, com um comprimento de passo de 0,66 m, numa travessia que ocorre em linha reta sobre o eixo longitudinal das passarelas.

No que se refere à estrutura, a literatura aponta uma taxa de amortecimento entre 1% e 5% para estruturas de aço (MURRAY et al., 1997). Para o presente estudo, foi utilizado o valor de 1,5%.

Tabela 3 – Características dinâmicas das pessoas.

Parâmetro	Referência	Adotado
Massa [kg]	30 a 130	65, 75, 85, 130, 140 e 150
Taxa de amortecimento [%]	10 a 30	27
Rigidez [kN/m]	10 a 35	22

O período de simulação adotado mostrou-se suficiente para a realização de duas travessias consecutivas, permitindo a obtenção das respostas subseqüentes ao movimento, em conjunto com outro indivíduo percorrendo o mesmo trajeto isoladamente.

d) Respostas dinâmicas no domínio do tempo

Com a implementação desse modelo no Algoritmo de interação pessoa-estrutura, foram obtidas as respostas dinâmicas em termos de aceleração e deslocamento no meio do vão de cada passarela de acordo com a massa da pessoa. A título de apresentação, as respostas em termos de aceleração e de deslocamento verticais, no meio do vão das passarelas P30 e P35, para uma e duas pessoas com massa de 75kg, são apresentadas nas Figuras 12 a 19. A Tabela 4 ilustra os picos de aceleração - associados ao percentual da aceleração da gravidade - e deslocamento vertical para o intervalo de tempo analisado.

Tabela 4 – Respostas dinâmicas no domínio do tempo.

Massa [kg]	Aceleração [m/s^2]		Deslocamento [mm]	
	P30	P35	P30	P35
65	0,131 (1,3%G)	0,248 (2,5%G)	-0,0854	-0,166
75	0,137 (1,4%G)	0,254 (2,6%G)	-0,0899	-0,174
85	0,143 (1,5%G)	0,260 (2,7%G)	-0,0944	-0,182
130	0,170 (1,7%G)	0,317 (3,2%G)	-0,114	-0,217
140	0,176 (1,8%G)	0,332 (3,3%G)	-0,119	-0,225
150	0,182 (1,9%G)	0,346 (3,5%G)	-0,123	-0,233

De acordo com a Tabela 4, verifica-se que os deslocamentos e acelerações aumentam quando há aumento da massa do pedestre. Isso também ocorre com relação ao vão da passarela, onde a estrutura com maior vão apresenta maiores amplitudes de deslocamentos e acelerações.

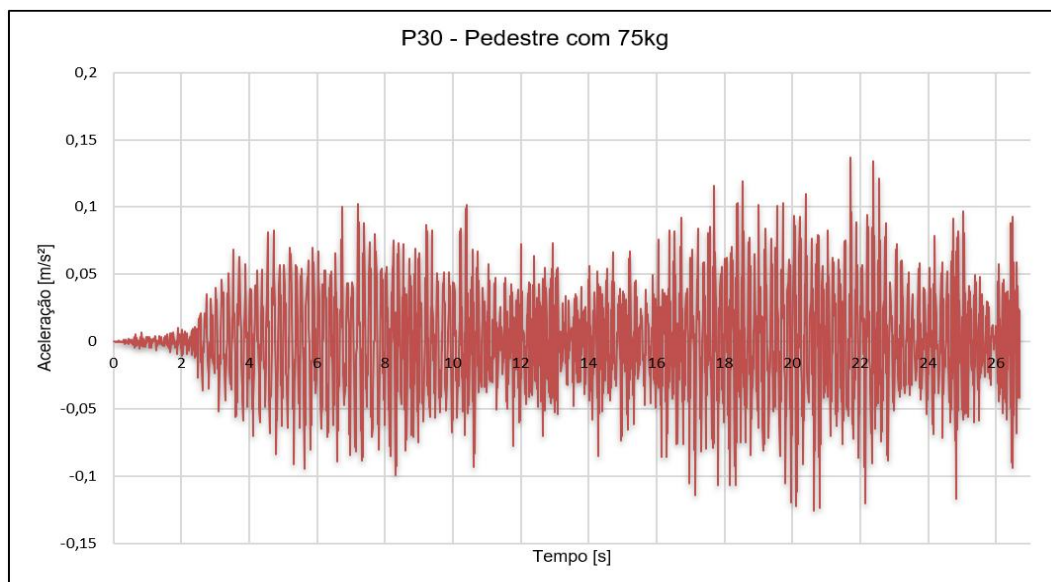


Figura 12 – Resposta dinâmica em termos de aceleração vertical devido a travessia de um pedestre.

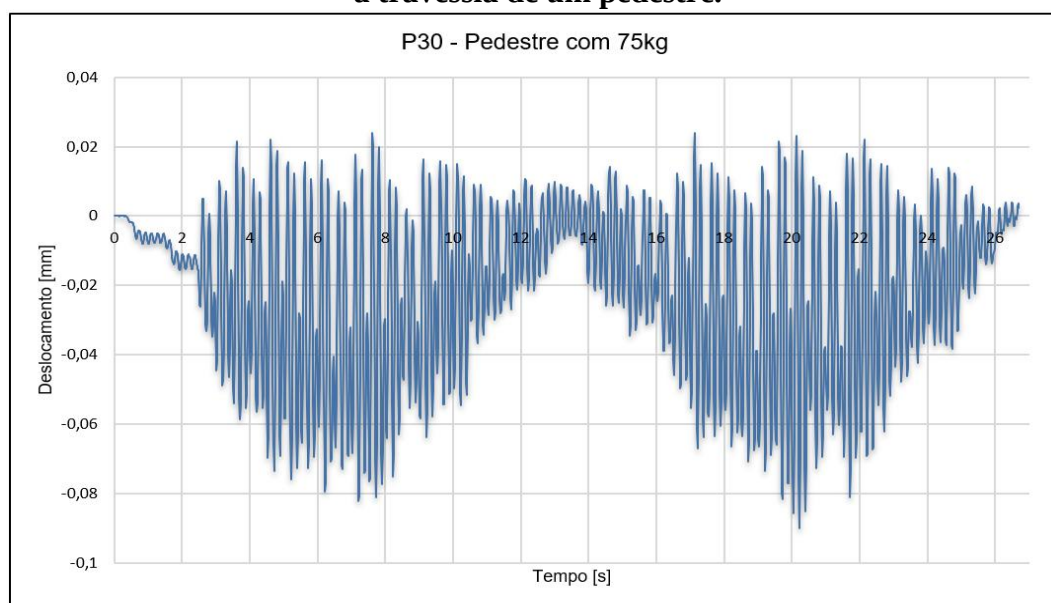


Figura 13 – Resposta dinâmica em termos de deslocamento vertical devido a travessia de um pedestre.

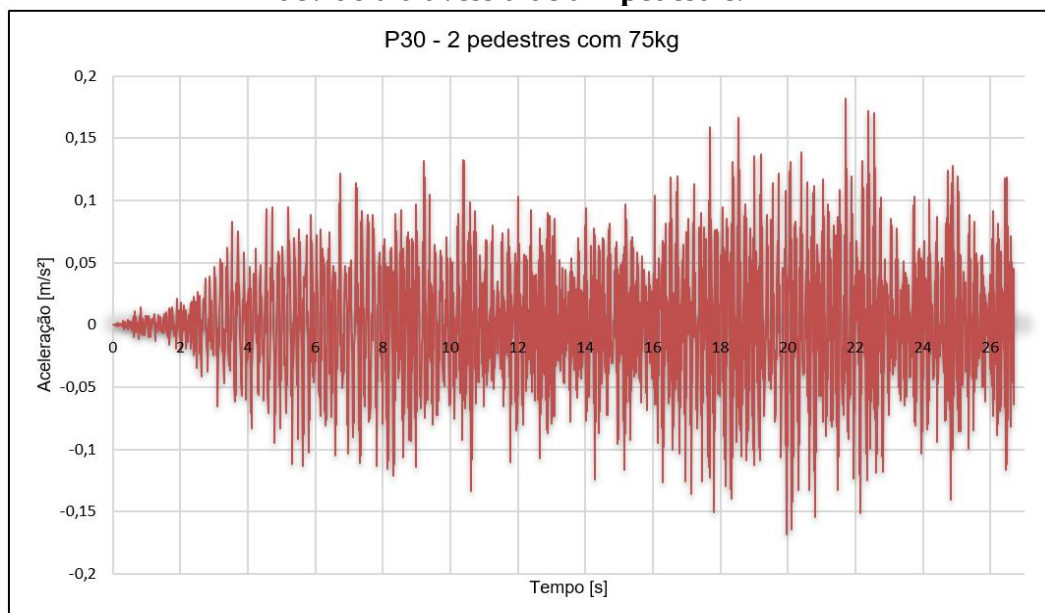


Figura 14 – Resposta dinâmica em termos de aceleração vertical devido a travessia de dois pedestres.

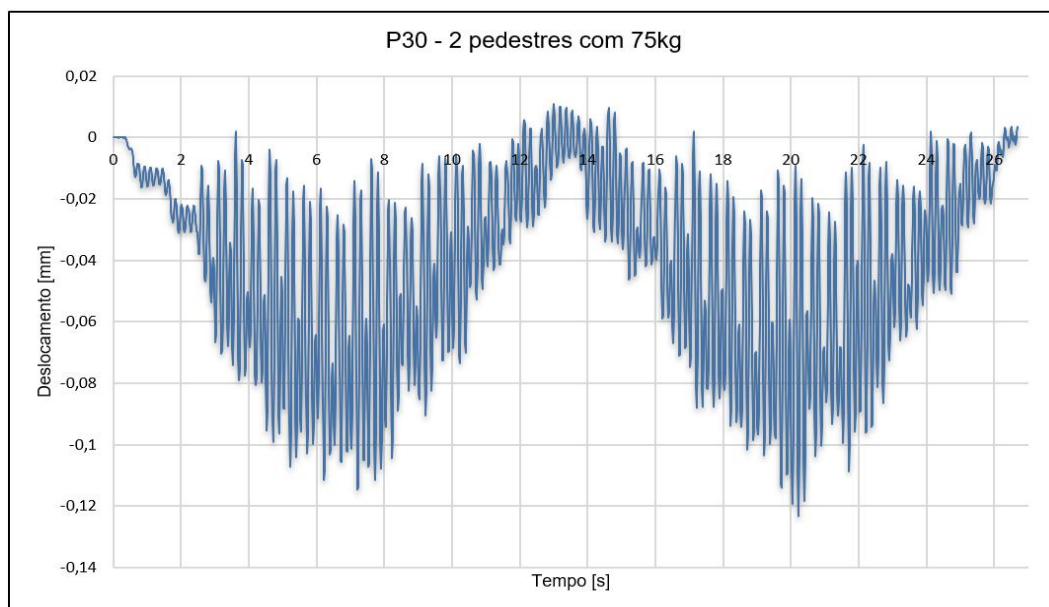


Figura 15 – Resposta dinâmica em termos de deslocamento vertical devido a travessia de dois pedestres.

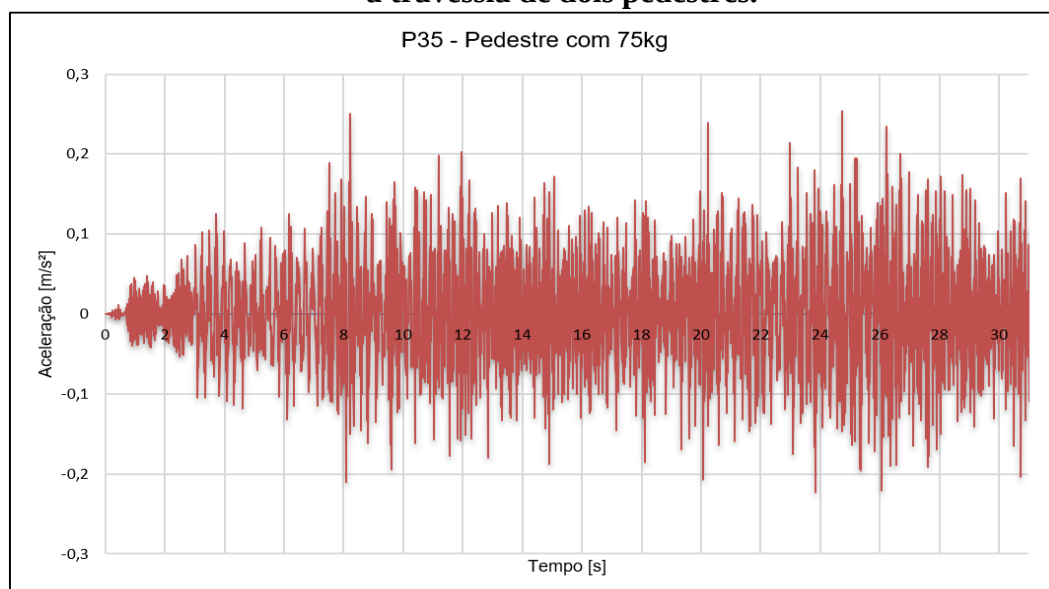


Figura 16 – Resposta dinâmica em termos de aceleração vertical devido a travessia de um pedestre.

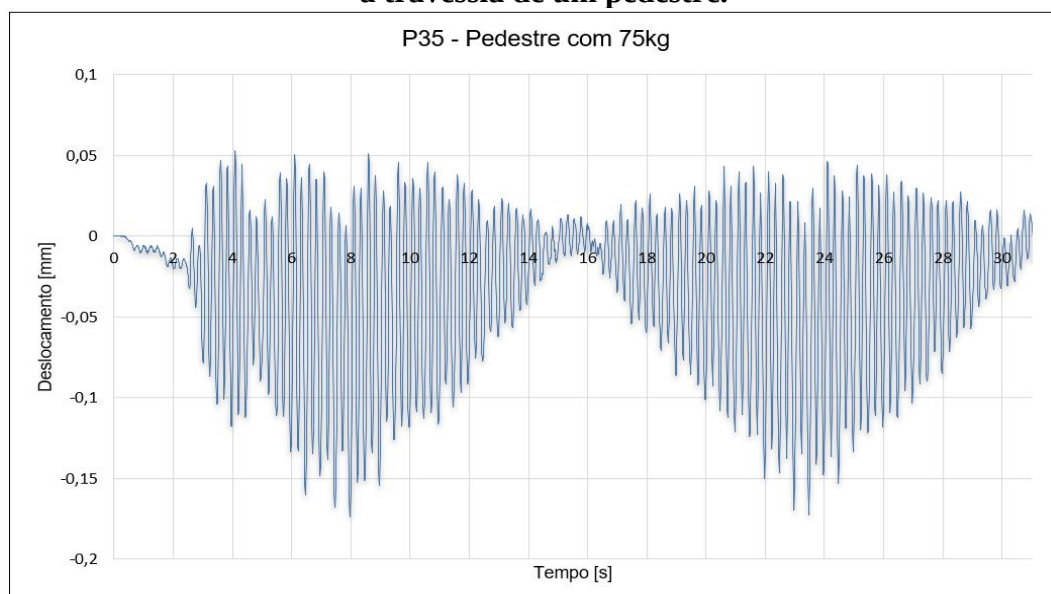


Figura 17 – Resposta dinâmica em termos de deslocamento vertical devido a travessia de um pedestre.

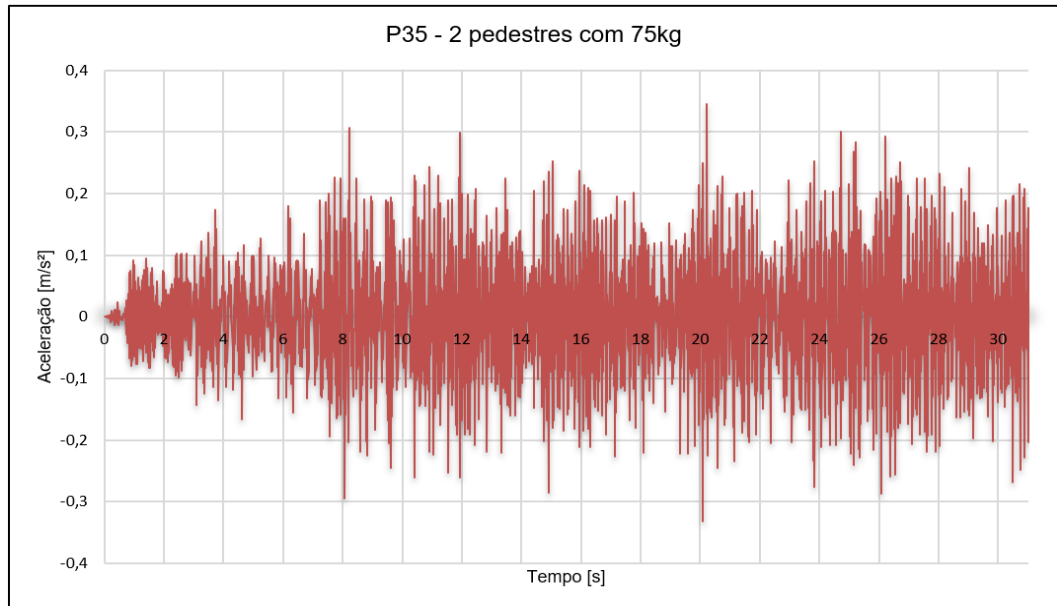


Figura 18 – Resposta dinâmica em termos de aceleração vertical devido a travessia de dois pedestres.

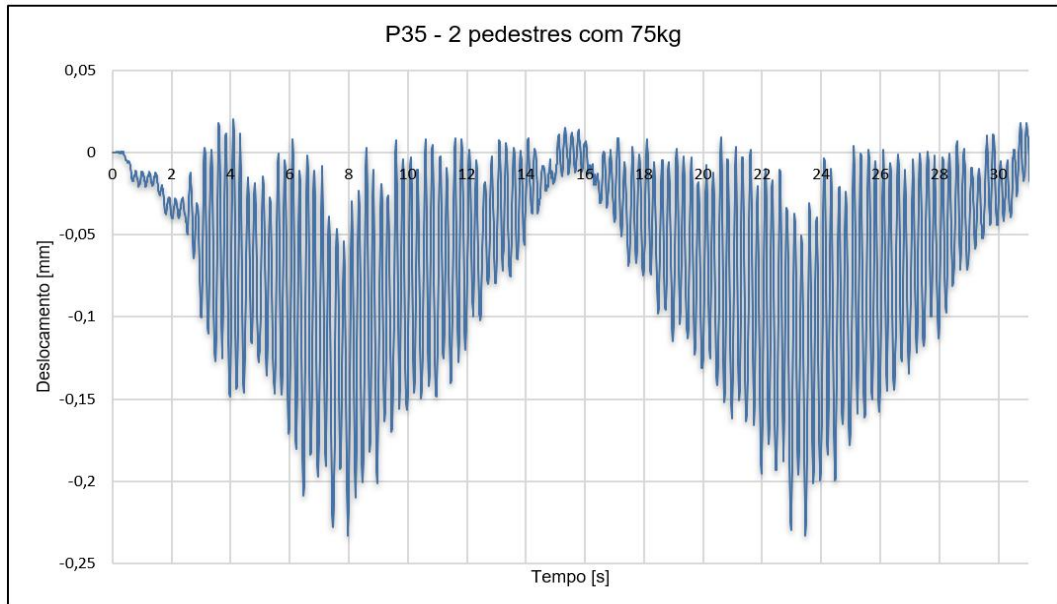


Figura 19 – Resposta dinâmica em termos de deslocamento vertical devido a travessia de dois pedestres.

Resultados e discussões

a) Comparativo entre a metodologia do Algoritmo e da NBR 7187:2021

A ABNT NBR 7187 (2021) fornece um cálculo simplificado de aceleração vertical máxima para passarelas, conforme estabelecido na Equação 1. Esse método adota uma massa média de 75 kg para o pedestre, que, para fins comparativos, será a única massa considerada a partir desta etapa.

$$a_{m\acute{a}x} = K_{a,95\%} \cdot \frac{d \cdot L \cdot b}{M_i} \cdot \sqrt{C \cdot K_f^2 \cdot K_1 \cdot \zeta^{K_2}} \quad (1)$$

$$K_1 = a_1 \cdot f_1^2 + a_2 \cdot f_1 + a_3 \quad (2)$$

$$K_2 = b_1 \cdot f_1^2 + b_2 \cdot f_1 + b_3 \quad (3)$$

$$M_i = 1/2 \cdot \mu \cdot L \quad (4)$$

Em que,

- ζ é o parâmetro de amortecimento da estrutura;
- f_1 é a frequência fundamental, em Hertz;

- $d \cdot L \cdot b$ é o número de pessoas na passarela;
- M_i é a massa modal associada ao modo i ;
- μ é a massa por metro linear, em quilogramas por metro;
- $K_{a,95\%}, K_f, C, a_1, a_2, a_3, b_1, b_2$ e b_3 são as constantes para acelerações verticais definidas pela NBR 7187:2021.

A Tabela 5 apresenta os parâmetros estruturais considerados, conforme especificado nas tabelas da norma de referência. Com base nesses parâmetros, foram obtidos os resultados descritos na Tabela 6, onde também constam os valores obtidos da ferramenta computacional (Algoritmo).

Tabela 5 – Variáveis utilizadas para o cálculo da NBR 7187:2021.

Parâmetro	Valor
K_f [N]	12,00
C	2,95
a_1	-0,070
a_2	0,60
a_3	0,075
b_1	0,0030
b_2	-0,040
b_3	-1,00
$K_{a,95\%}$	3,92
$d \cdot L \cdot b$	1,00
μ_{P30} [kg/m]	1169,40
μ_{P35} [kg/m]	1163,20

Tabela 6 – Comparação entre os resultados do algoritmo e da NBR 7187:2021.

Referência	Aceleração máxima [m/s ²]	
	P30	P35
Algoritmo	0,137	0,254
NBR 7187	0,055	0,048
Percentual relativo [%]	59,85	81,10

A ABNT NBR 7187 (2021) fornece um cálculo simplificado de aceleração vertical máxima para passarelas, cujo resultado normativo foi inferior em relação à aceleração de pico obtida pelo Algoritmo de análise dinâmica para ambas as passarelas. Apesar da diferença, os resultados se encontram abaixo de 0,5 m/s², valor limite para a condição de máximo conforto.

A diferença percentual significativa entre os resultados, pode ser atribuída à ressonância com os super-harmônicos da frequência do caminhar que pode ocasionar uma significativa amplificação dinâmica. Os super-harmônicos são frequências múltiplas de uma frequência fundamental, característicos de cargas impulsivas periódicas. Quando entram em ressonância com as frequências naturais da estrutura, podem produzir vibrações indesejáveis, comprometendo seu desempenho. Outro fator para a diferença se deve, provavelmente, às diferenças entre os métodos. O algoritmo utiliza o Método de Newmark, que resolve os sistemas de equações diferenciais de movimento por meio de integração numérica direta no domínio do tempo. Esse método considera a contribuição de todos os modos, sem realizar a decomposição em modos individuais de vibração, como ocorre, por exemplo, no Método da Superposição Modal.

Por outro lado, a ABNT NBR 7187 (2021) utiliza a forma modal de cada modo isoladamente, dada pela expressão da Teoria Clássica de Vigas:

$$\varphi_n = \sin\left(\frac{n\pi}{L}\right) \quad (5)$$

Desconsiderando a contribuição dos demais modos que ocorrem simultaneamente. Esse comportamento pode ser observado nas Figuras 6 a 11, onde as formas modais são similares e, portanto, não exatas, à expressão acima. Nesse sentido, a ABNT NBR 7187 (2021) recomenda que, "Se necessário, podem ser usadas metodologias da dinâmica de estruturas para estudos mais detalhados" (p.39).

b) Comparativo da aceleração máxima com os limites da NBR 7187:2021 e do ábaco sensorial do AISC

Em relação a tabela de limite de aceleração da NBR7187 (2021), transcrita abaixo, os níveis de aceleração tanto da referida norma quanto do Algoritmo, estão situados na condição de máximo conforto (ver Tabela 7).

Tabela 7 – Acelerações-limite verticais.

Nível de conforto	Máxima aceleração [m/s ²]
máximo	< 0,50
médio	0,50 a 1,00
mínimo	1,00 a 2,50
inaceitável	> 2,50

Fonte: ABNT NBR 7187 (2021)

Por outro lado, ao comparar as respostas obtidas com o ábaco sensorial do *American Institute of Steel Construction* (Murray et al., 1997) (Figura 20), notou-se que o percentual da aceleração da gravidade para uma pessoa de 75 kg permanece abaixo do limite para passarelas (*Outdoor Footbridges*) para a primeira frequência natural, tanto para a passarela P30 (1,4%G) como para a P35 (2,6%G). No entanto, ao considerar duas pessoas de 75 kg na passarela de 35m (3,5%G), o percentual está próximo do limite de 5%G, indicando a importância de realizar, análises para uma quantidade maior de pessoas realizando a travessia.

Com isso, destaca-se a importância de avaliar o comportamento de sistemas sujeitos a carregamentos dinâmicos.

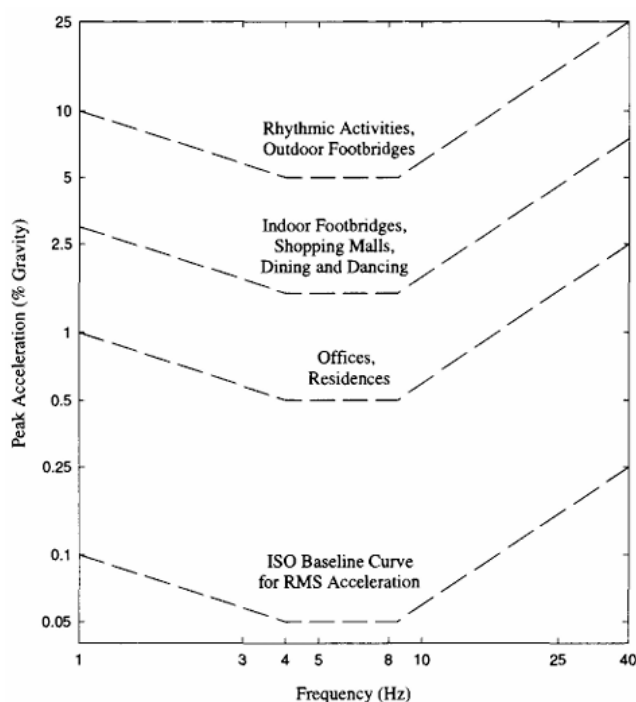


Figura 20 – Limites de aceleração recomendados pela AISC.

Fonte: Murray et al. (1997)

Conclusões

Conclui-se, assim, que as acelerações obtidas da análise dinâmica realizada pela ferramenta computacional (Algoritmo) produziram acelerações superiores à aceleração obtida pela ABNT NBR 7187 (2021) para ambas as passarelas analisadas; e que, para esta norma, os resultados foram classificados com nível de conforto máximo. Verificou-se que esta norma apresenta índices de avaliação de conforto semelhante aos da norma americana (Murray et al., 1997). Para ambas as normas, as respostas dinâmicas devido a duas pessoas andando sintonizadas produziu acelerações de pico próximas ao limite do conforto humano. Assim, a tendência do aumento de aceleração ao considerar duas pessoas caminhando de forma sincronizadas, indicam a necessidade de avaliação dinâmica considerando uma maior quantidade/densidade de pessoas.

Referências

- ABNT NBR 7187. Projeto de pontes, viadutos e passarelas de concreto. Rio de Janeiro, 2021.
- AUTODESK. Autodesk Robot Structural Analysis Professional. 2024. Disponível em: <<https://www.autodesk.com/products/robot-structural-analysis/overview>>.
- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. Materials Science and Engineering: An Introduction. 8. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2009.
- CAPRANI, C. C. et al. Characteristic vertical response of a footbridge due to crowd loading. Technological University Dublin, 2011.
- COSTA, N. d. P. A. d. Modelo biodinâmico do caminhar humano tendo em vista a interação dinâmica pessoa-estrutura. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2019.
- DNIT, D. N. de Infraestrutura de T. Publicação IPR - 748 - Álbum de projetos-tipo de passarelas para pedestres. 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/publicacao-ipr-748-album-de-projetos-tipo-de-passearelas-para-pedestres>>.
- MURRAY, T.M.; ALLEN, D.E.; UNGAR, E. E. Steel Design Guide Series 11: Floor Vibrations Due to Human Activity. Chicago, Illinois. American Institute of Steel Construction (AISC), 1997.
- SILVA, L. P. L. Análise dinâmica da interação pessoa-estrutura via modelo biodinâmico com função de interação proposta. Departamento de Engenharia Civil, São Cristóvão, 2022.
- SORIANO, H. L. Análise de estruturas - Formulação Matricial e Implementação Computacional. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna, 2005.
- SORIANO, H. L. Introdução à Dinâmica das Estruturas. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.
- VARELA, W. D. Modelo teórico-experimental para análise de vibrações induzidas por pessoas caminhando sobre lajes de edifícios. Tese (Doutorado), Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2004.