



Análise Dinâmica de Passarelas Excitadas por Pedestres

Victor Casulli de Oliveira¹, Reyolando M. L. R. F. Brasil², Marcelo Araujo Da Silva³

¹ Universidade de São Paulo / victorcasulli@gmail.com

² Universidade de São Paulo / reyolando.brasil@gmail.com

³ Universidade Federal Do ABC / marcelo.silva@ufabc.edu.br

Resumo

Neste trabalho, será discutida a análise dinâmica de duas passarelas a serem instaladas junto à estação Santo Amaro do metrô de São Paulo, as Passarela Norte e Passarela Sul, ambas com 111 metros de vão. Em especial, será estudado o Estado Limite de Serviço (E.L.S.) de vibrações excessivas excitadas pelo movimento de pedestres nas direções vertical e lateral.

Na primeira parte deste trabalho serão apresentados os conceitos necessários para o desenvolvimento do mesmo. Posteriormente será apresentado o modelo utilizado assim como seus resultados, soluções e conclusão.

A estrutura foi modelada utilizando o software de análise estrutural STRAP. Os perfis utilizados foram fornecidos pelos autores dos projetos arquitetônico e estrutural, sendo típicos dessas estruturas. A literatura sobre passarelas fornece um modelo determinístico para o carregamento dinâmico devido ao caminhar das pessoas.

Quando a frequência natural da estrutura é próxima do caminhar das pessoas pode gerar um desconforto muito elevado e até mesmo a sensação de falta de segurança. Além disso, pode diminuir a vida útil da estrutura devido a fadiga do material, sendo necessário uma maior manutenção.

O processamento sugere a presença de acelerações acima do desejado ou previsto por diversas normas internacionais sobre o tema. Para mitigação das mesmas, é proposto controle passivo por Absorvedores de Vibrações (TMD's), para vibrações verticais e laterais.

Palavras-chave

Passarela; Vibração; TMD's

Introdução

Passarelas são estruturas utilizadas para que as pessoas possam atravessar rios ou estradas, sem atrapalhar o trânsito e correr riscos pessoais. No passado, essas estruturas eram construídas principalmente de pedra ou madeira. Com a evolução dos materiais para a construção, hoje são construídas de concreto armado ou protendido (moldado in loco ou pré-fabricado) e estruturas metálicas.

Devido à praticidade do uso de estruturas metálicas, é a solução estrutural mais utilizada, pela sua alta resistência e o seu peso relativamente baixo. Entretanto, sua pequena rigidez e consequentes baixas primeiras frequências naturais, permite que a estrutura possa sofrer excitação de esforços dinâmicos nessa faixa (Živanović, S., Pavić, A. and Reynolds, P., 2005). Vibrações podem causar problemas de estado limite de serviço (ELS), ao causar desconforto por vezes inaceitável às pessoas. Em casos raros podem levar a problemas de segurança e danos à estrutura (Bachmann & Ammann, 1987).

De acordo com (Bachmann & Ammann, 1987), carregamentos dinâmicos em pontes e passarelas são devidos a:

- Movimentos do corpo humano;
- Rotação, oscilação e impacto de máquinas;
- Fluxo de vento;
- Tráfego de veículos, trens e trabalhos de construção.

Com relação às passarelas, o principal carregamento dinâmico é dado pela movimentação do corpo humano. Essa movimentação pode ser devida ao caminhar, correr, pular e dançar. Por motivos de utilização da estrutura, a principal ação é dada pelo caminhar, podendo provocar vibrações verticais, devido a pisada, e vibrações horizontais, devido ao equilibrar das pessoas.

Caso a frequência do caminhar seja próxima à frequência natural da estrutura, mesmo com uma carga pequena, este efeito pode ser amplificado. O pior caso seria uma multidão caminhando com a mesma passada sobre a passarela, como, por exemplo a marcha sincronizada de um exército.

Ao longo deste trabalho serão apresentados exemplos de estruturas em ressonância com o carregamento, resultando grandes amplitudes verticais e horizontais. Com isso, será mostrado como dimensionar um TMD, para ambas as direções dos deslocamentos, e como os seus efeitos afetam o comportamento estrutural e mitigam os efeitos proporcionados pelo carregamento.

Será apresentado também o procedimento de cálculo utilizado para determinar as acelerações, verticais e horizontais da passarela devido ao carregamento dinâmico. Assim como os carregamentos que foram considerados e como funciona o processo de montagem das matrizes de massa e rigidez do modelo.

Objetivo

Realizar uma análise dinâmica sobre duas passarelas, com vãos de 111 metros, que serão executadas no metro Santo Amaro, em São Paulo.

Base teórica

Um sistema de equações de movimento de um sistema discretizado pode ser descrito como:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = P(t) \quad (1)$$

onde $[M]$ é a matriz de massa do sistema, $[C]$ a matriz de amortecimento do sistema, $[K]$ a matriz de rigidez do sistema, $\{u\}$ o vetor deslocamento generalizado em função do tempo, tendo suas derivadas, o vetor velocidade e o vetor aceleração, indicados por pontos sobrepostos, e P o vetor carregamento.

Para um sistema de vibrações livres não amortecidas, podemos considerar a matriz de amortecimento e o vetor carregamento nulos. Sendo as condições iniciais do sistema, deslocamento e/ou velocidades, não nulos temos a equação do movimento homogênea:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = 0 \quad (2)$$

De acordo com (Brasil & Silva, 2015), a solução de u são \hat{u} chamadas modos de vibração livre não amortecidos, cuja coordenadas dos sistemas variam harmonicamente no tempo, em mesma fase. Isso nos dá a Eq. 3:

$$u = \hat{u} \cos(\omega t - \theta) \quad (3)$$

Ao derivarmos essa solução duas vezes no tempo e substituirmos na equação do movimento (2), cancelando a função harmônica, temos o seguinte sistema de equações algébricas homogêneas:

$$[K - \lambda M]\hat{u} = 0 \quad (4)$$

Para que existam soluções não triviais, o determinante da matriz entre colchetes deve ser nulo.

$$\det[K - \lambda M] = 0 \quad (5)$$

onde o λ são os autovalores, quadrados das frequências conhecidas como frequências naturais do sistema, sempre reais e positivas, dadas pela Eq. 6.

$$\omega_i = \sqrt{\lambda_i} \quad (6)$$

Substituindo λ na Eq. 5, um de cada vez, e atribuindo um valor unitário a primeira componente dos vetores modais correspondentes, é possível determinar a matriz modal $[\Phi]$, onde as colunas são os modos normais para cada frequência natural.

Com isso podemos determinar as matrizes modais de massa, rigidez e carregamento, sendo elas, respectivamente Eq. 7, Eq. 8 e Eq.9.

$$M_i = \Phi_i^T M \Phi_i \quad (7)$$

$$K_i = \Phi_i^T K \Phi_i \quad (8)$$

$$P_i = \Phi_i^T P \quad (9)$$

Escrevendo as equações de movimento desacopladas, para cada modo “i”, temos:

$$\ddot{y}_i + 2\xi_i \omega_i \dot{y}_i + \omega_i^2 y_i = \frac{P_i}{M_i} \quad (10)$$

onde ξ_i é a taxa de amortecimento modal para o i-ésimo modo, calculada como:

$$\xi_i = \frac{C_i}{2M_i \omega_i} \quad (11)$$

Conhecidas as condições iniciais dos deslocamentos ou das velocidades, podemos encontrar os vetores deslocamentos e velocidades modais iniciais do sistema sendo:

$$y_i(0) = \frac{\Phi_i^T M u_0}{M_i} \quad (12)$$

$$\dot{y}_i(0) = \frac{\Phi_i^T M \dot{u}_0}{M_i} \quad (13)$$

E por fim, para transformarmos os deslocamentos modais nas coordenadas físicas do problema original, fazendo a superposição modal.

$$u(t) = \sum_{i=1}^n \phi_i y_i(t) = \Phi y(t) \quad (14)$$



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

$$\dot{u}(t) = \sum_{i=1}^n \phi_i \dot{y}_i(t) = \Phi \dot{y}(t) \quad (15)$$

Estrutura analisada

As estruturas que serão analisadas são duas passarelas que serão construídas na estação do metrô Santo Amaro. São chamadas de Passarela Norte e Passarela Sul, ambas com 111 metros de vão sobre o rio Jurubatuba.

Para realizar a modelagem em elementos finitos temos alguns passos a serem seguidos para minimizar os erros. Primeiramente é necessário definir a geometria da estrutura. Isso consiste em definir os perfis, ou seções, quantidades de nós, barras, material, elementos de apoio e molas do sistema. Ambas as passarelas são estruturas metálicas; a Passarela Norte é constituída de 73 perfis diferentes e a Passarela Sul 56 perfis. Esses perfis metálicos são tubulares e quadrados vazados. O projeto estrutural foi fornecido por um escritório de cálculos estruturais, com base em um projeto arquitetônico. Nas figuras a seguir temos ambas as estruturas modeladas geometricamente e renderizadas no software STRAP. Nos modelos foram considerados apoios fixos.

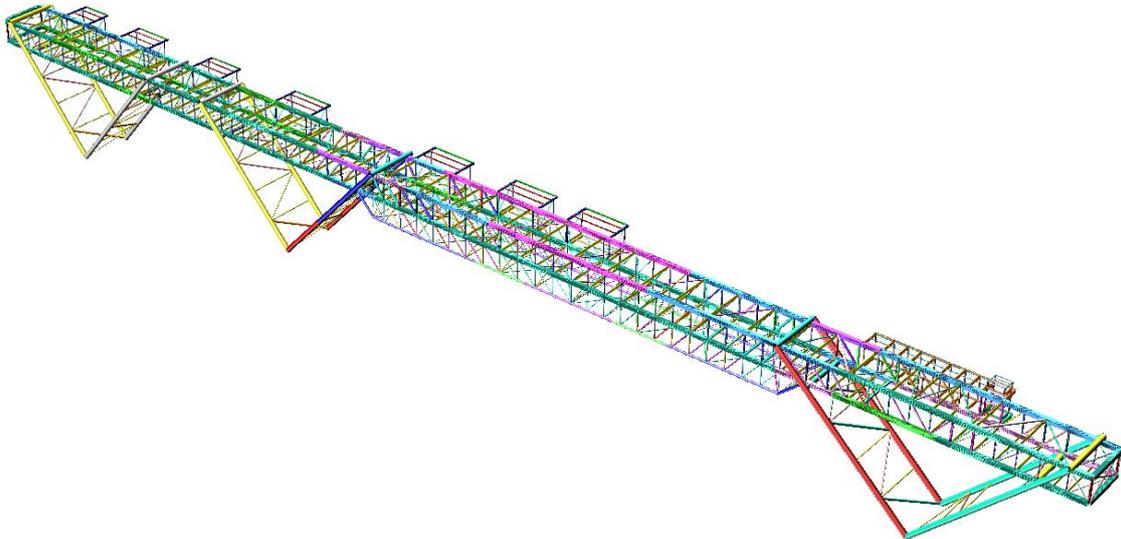


Figura 1 – Passarela Sul renderizada

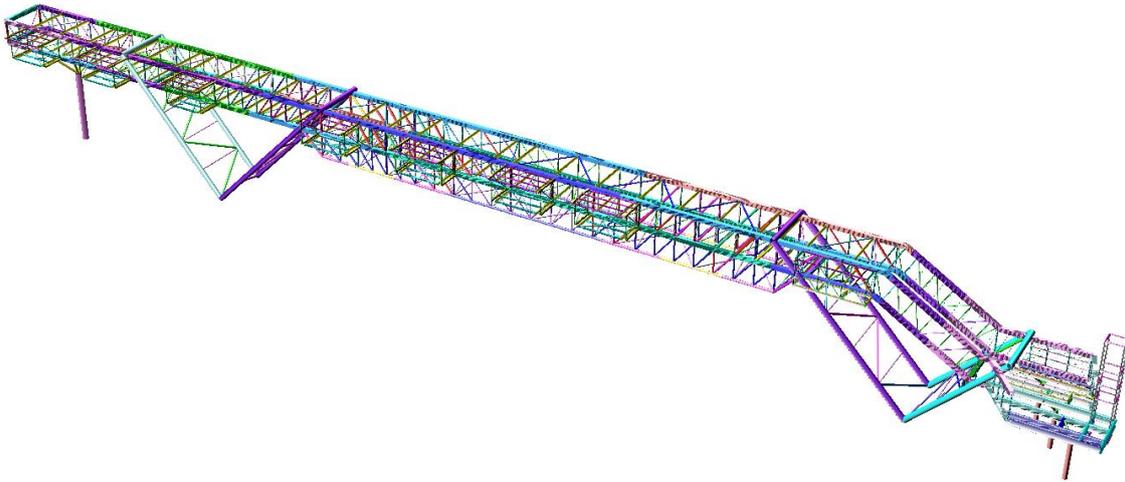


Figura 2 – Passarela Norte renderizada

Após a definição da geometria é introduzido ao software o carregamento estático. Nesse modelo foi considerado o peso próprio da estrutura, peso devido ao fechamento lateral, cobertura e piso, sobrecarga vertical e horizontal devida à carga de multidão. Esses carregamentos foram fornecidos pela empresa responsável pelo projeto estrutural. Com isso podemos resolver o modelo, montando as combinações desejadas dos carregamentos e com os resultados, verificar se a estrutura metálica atende as normas para o E.L.U. Para fins deste trabalho, essa verificação não é feita, uma vez que a empresa fornecedora do projeto já se encarregou disso.

Após as verificações estáticas do modelo, passamos para a análise dinâmica. Para montarmos a matriz de massa do sistema é necessário definir as massas nodais. Ao inserir os carregamentos, anteriormente mostrados, como massas no modelo, o software distribui a massas, lineares e por área, nos nós. Como a rigidez da estrutura é devido a sua geometria, já pré-determinada para a verificação do E.L.U., é possível definir os modos de vibração da estrutura utilizando a Eq. 5, encontrando seus auto valores. As frequências são dadas pela Eq. 5 anteriormente mostrada e, para obter a frequência em Hz, tem-se que:

$$f_i = \frac{\omega_i}{2\pi} \quad (16)$$

O sistema dinâmico para a as duas passarelas é dado por:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = f_{fl}(t) \quad (17)$$

A seguir, descreve-se como adotar o carregamento dinâmico $f_{fl}(t)$.

De acordo com (Bachmann & Ammann, 1987) e (Brasil & Silva, 2015), uma vez que o movimento de pessoas sobre estrutura é admitido como periódico, a modelagem desse carregamento dinâmico pode ser uma expressão do tipo Fourier na forma:

$$f_{fl}(t) = G \sum_{k=1}^2 \alpha_k \sin(2k\pi f_p t - \varphi_k) \quad (18)$$

onde

G: peso dos pedestres por m², em situação de serviço, adotado 800 N/m²

f_p : frequência fundamental do carregamento, adotada 2 Hz

α_k : coeficiente de Fourier de cada harmônico, segundo literatura citada. (vibrações verticais: $\alpha_1 = 0,4$ e $\alpha_{2/3} = 0,1$; vibrações laterais: $\alpha_{1/2} = 0,1$)

φ_k : fase do harmônico, segundo literatura citada.

Foi considerado um amortecimento de 2% para ambos os sistemas, considerando o amortecimento interno das estruturas metálicas parafusadas como pisos de concreto, cobertura e interação com as fundações.

Resultados

As frequências naturais das passarelas Norte e Sul fornecidas pelo STRAP são:

MODOS : Frequências naturais					
Modo	Autovalor	Frequência		Translação Máx.	Massa Modal
N.º	(Omega**2)	Natural (Hz)	Período (s)	Nó-GDL	(t)
1	33,073	0,915	1,093	1-2	414,069
2	37,331	0,972	1,028	2-2	148,065
3	42,525	1,038	0,964	714-1	1080,056
4	78,055	1,406	0,711	923-3	65,562
5	103,524	1,619	0,618	121-2	325,783
6	128,109	1,801	0,555	338-2	39,485
7	138,417	1,873	0,534	398-3	21,380

Figura 3 – Frequências naturais da Passarela Norte

MODOS : Frequências naturais					
Modo	Autovalor	Frequência		Translação Máx.	Massa Modal
N.º	(Omega**2)	Natural (Hz)	Período (s)	Nó-GDL	(t)
1	32,380	0,906	1,104	1986-2	349,320
2	47,689	1,099	0,910	1874-1	824,199
3	69,078	1,323	0,756	673-3	91,384
4	72,049	1,351	0,740	673-3	288,262
5	104,163	1,624	0,616	2-2	270,297
6	132,551	1,832	0,546	593-2	147,012
7	156,941	1,994	0,502	673-3	25,051

Figura 4 – Frequências naturais da Passarela Sul

Onde a primeira coluna indica qual é o modo de vibração, a segunda coluna indica os autovalores encontrados no sistema, a terceira coluna as frequências em Hz, quarta coluna o período da vibração, a quinta coluna indica qual é o nó que sofreu o maior deslocamento juntamente com a sua direção (onde 1 é na horizontal na longitudinal, 2 é na horizontal na transversal e 3 é na vertical) e na última coluna temos a massa modal.

Foram analisados apenas os 7 primeiros modos pois verificou-se que os demais não eram relevantes para os resultados, pois apresentavam deslocamentos localizados em nós com baixa rigidez. Nas figuras a seguir é possível visualizar o comportamento de cada modo.

Com isso, utilizando a superposição modal, temos as acelerações relacionadas ao nó 73 (aproximadamente no meio do vão principal da Passarela Sul) e nó 83 (aproximadamente no meio do vão principal da Passarela Norte) para ambas as estruturas.



XII CBPE 2021

XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

Acelerações de combinação 1, no Nó 87

X2 Acelerações

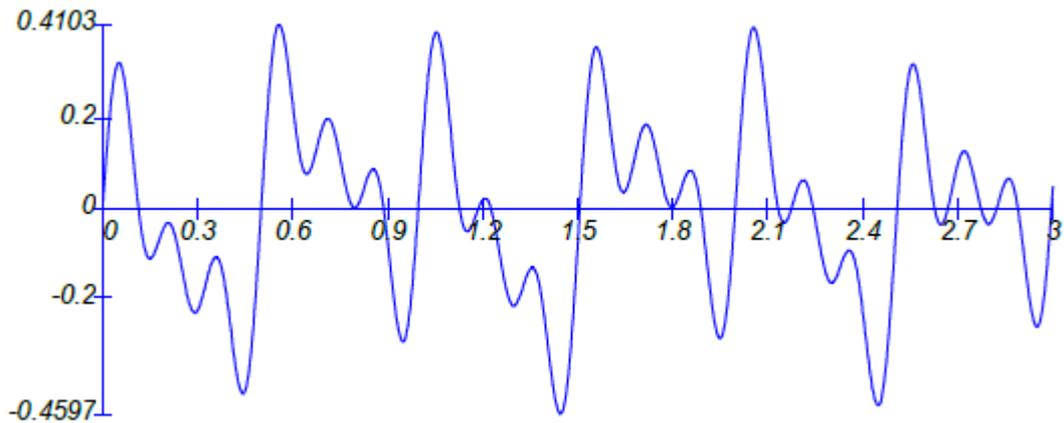


Figura 5 – Aceleração horizontal transversal – Passarela Norte

Acelerações de combinação 2, no Nó 87

X3 Acelerações

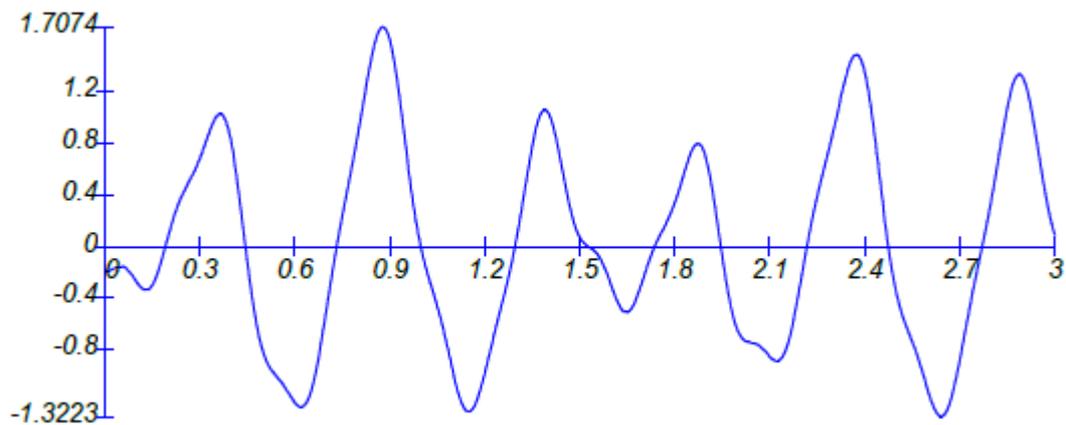


Figura 6 – Aceleração vertical – Passarela Norte



XII CBPE 2021

XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

Acelerações de combinação 3, no Nó 87

X3 Acelerações

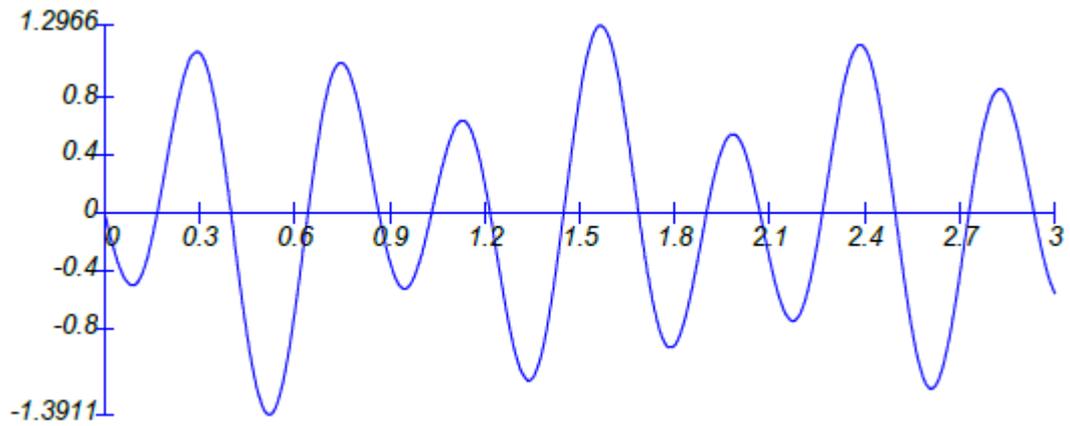


Figura 7 – Aceleração vertical – Passarela Norte

Acelerações de combinação 1, no Nó 73

X2 Acelerações

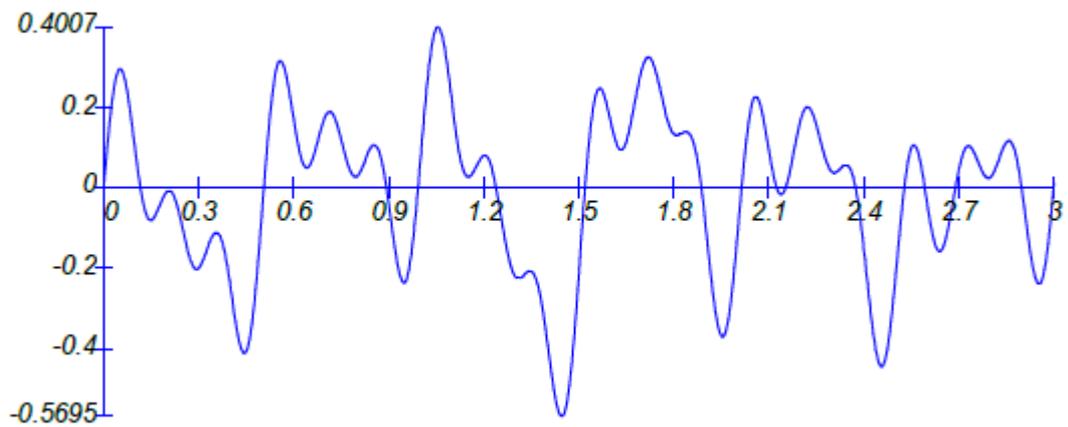


Figura 8 – Aceleração horizontal transversal – Passarela Sul



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

Acelerações de combinação 2, no Nó 73

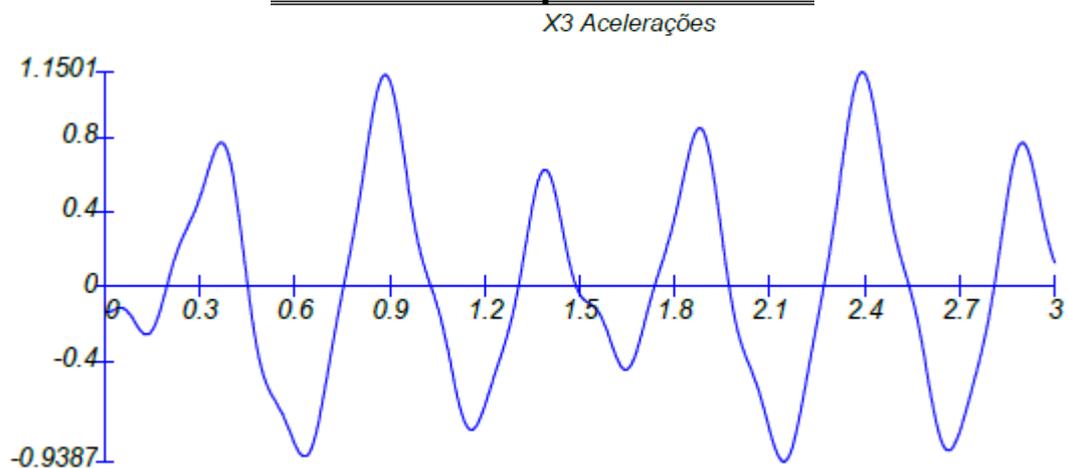


Figura 9 – Aceleração vertical – Passarela Norte

Acelerações de combinação 3, no Nó 73

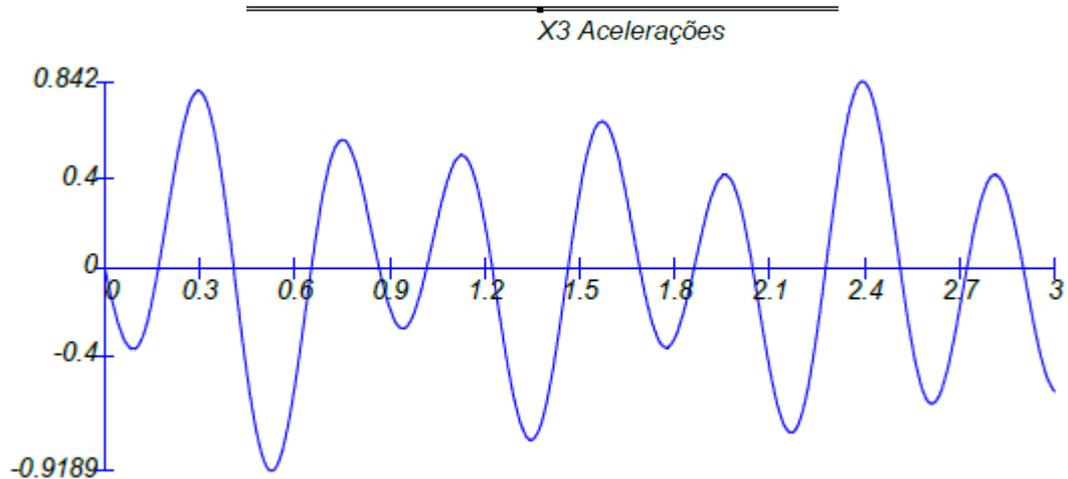


Figura 10 – Aceleração vertical – Passarela Norte

Observa-se que o maior valor RMS (Root Mean Square), (Živanović, S., Pavić, A. and Reynolds, P., 2005), de aceleração vertical é da ordem de $1,2 \text{ m/s}^2$, enquanto a máxima RMS na horizontal é de $0,4 \text{ m/s}^2$.



Conclusão

Como mencionado na seção anterior, os valores máximos RMS das acelerações vertical e horizontal são 1,2 e 0,4 m/s^2 , respectivamente. Os limites superiores de acelerações aceitáveis para o conforto máximo, para as vibrações verticais na frequência de excitação padrão de 2 Hz, para o movimento de pedestre sobre a estrutura, variam conforme a Norma consultada. O British Standard BS 5400:1988 recomenda 0,7 m/s^2 para essa frequência. A ISSO 1037:2007 recomenda 0,79 m/s^2 . Bachmann & Ammann (1987) recomendam adotar 0,5 m/s^2 . Na direção lateral, para o conforto entre nível médio e máximo, recomenda-se a faixa de 0,1 a 0,3 m/s^2 . Acelerações acima do tolerável podem inibir as pessoas de utilizarem as estruturas e assim, fazendo com que estas percam a sua função. Observou-se então que as acelerações obtidas no presente trabalho, tanto vertical, quanto horizontal estão acima dos valores tolerados indicados pela literatura.

Com essas normas e referências como base, fica evidente a necessidade de absorvedores de vibração TMD's, verticais e horizontais, para mitigar os efeitos causados pelo caminhar das pessoas.

Referências Bibliográficas

- (1) Živanović, S., Pavić, A. and Reynolds, P. (2005) Vibration serviceability of footbridges under human-induced excitation: a literature review. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 279, No. 1-2, pp. 1-74.
- (2) Bachmann & Ammann (1987) *Vibration Problems in Structures*, BIRKHAUSER VERLAG, Basel.
- (3) Brasil & Silva (2015) *Introdução à Dinâmica das Estruturas para a Engenharia Civil*, Segunda Edição. Editora Edgard Blucher, São Paulo.
- (4) SÉTRA/AFGC *Assessment of vibrational behavior of footbridges under pedestrian loading – Practical guidelines*. 2006.