

Avaliação do Comportamento Dinâmico para uma Ponte Metálica Destinada a um Sistema de Adutoras e de Uso Conjunto como Passarela de Pedestres

Carlos Alberto Medeiros¹, Hudson Chagas dos Santos²

¹ UMC / PCA ENGENHARIA / carlosmedeiros@umc.br / pcaengenharia@ymail.com

² IFPI / UFPI / PCA ENGENHARIA / hudson@ifpi.edu.br / pcaengenharia@ymail.com

Resumo

Uma ponte metálica em arcos com 200 metros de comprimento e 7,9 metros de largura foi projetada para atender a um sistema de adutoras e também ser usada como passarela de pedestres. No desenvolvimento de projetos estruturais para passarelas de pedestres é de primordial importância garantir que a estrutura atenda aos Estados Limites de Serviço de Vibração Excessiva conforme prescrito no item 4.1.2.1 da norma NBR 8661 - Ações e segurança nas estruturas. Ou seja, avaliar o comportamento dinâmico da passarela de modo que esta não apresente vibração desconfortável aos usuários quando do movimento de pessoas sobre a estrutura. O presente trabalho realiza uma análise dinâmica modal e transiente de elementos finitos, utilizando o programa ANSYS, para uma ponte metálica destinada a um sistema de adutoras e de uso conjunto como passarela de pedestre com o objetivo de avaliar o comportamento dinâmico da ponte quanto ao critério de vibração desconfortável. Da análise dinâmica modal será buscada a frequência natural de vibração crítica da estrutura da ponte na direção vertical. Essa frequência natural de vibração será avaliada se coincide com a frequência de vibração devido ao ato de caminhar em um piso que é entorno de 2 Hz. Em seguida é realizada uma análise dinâmica transiente, considerando um modelo de carregamento que represente uma caminhada ao longo de uma passarela, com o intuito de determinar o valor da máxima aceleração na direção vertical da estrutura. Então, a verificação ao atendimento aos Estados Limites de Serviço de Vibração Excessiva para a ponte em questão é realizada por comparar o resultado da máxima aceleração vertical, obtido da análise dinâmica de elementos finitos, com valores prescritos por normas internacionais.

Palavras-chave

Ponte metálica; Comportamento dinâmico; Análise dinâmica de elementos finitos.

Introdução

Uma ponte metálica em arcos com 200 metros de comprimento, sendo 4 arcos de 50 metros, e com 7,9 metros de largura, como ilustrada na Figura 1, foi projetada para atender a um sistema de adutoras e também ser usada como passarela de pedestres.

Como a ponte também vai servir como passarela de pedestres e ao se caminhar na passarela podem ser produzidas excitações dinâmicas elevadas e que venham a ocasionar vibrações excessivas e, por conseguinte, produzir pânico aos pedestres. Deve-se assim realizar uma avaliação do comportamento dinâmico da estrutura, ou seja, garantir que a ponte não ofereça desconforto ao usuário.



Figura 1 – Ponte metálica em arcos para a um sistema de adutoras e com uso conjunto de passarela de pedestre.

O presente trabalho realiza uma avaliação do comportamento dinâmico de uma ponte metálica destinada a um sistema de adutoras e de uso conjunto como passarela de pedestre, por comparar o resultado da máxima aceleração na direção vertical da ponte e obtido por meio de análises dinâmicas de elementos finitos com valores de acelerações limites prescritos por normas internacionais.

Descrição do Sistema Estrutural da Ponte metálica

O sistema estrutural da ponte é composto por arcos metálicos em perfis tubulares retangulares de seção $1000 \times 300 \times 22 \times 22$ mm e com elementos de diagonais, montantes e travamentos transversais em tubos circulares metálicos de seção $219,1 \times 10$ mm. O tabuleiro da ponte é formado por uma laje de concreto com espessura de 18 cm, com vigas longarinas em perfil I de seção $500 \times 350 \times 9,5$ mm e com vigas transversinas em perfil I de seção $300 \times 200 \times 7,9$ mm.

A Figura 2 ilustra uma vista lateral e outra transversal de um trecho de 50 m da ponte.

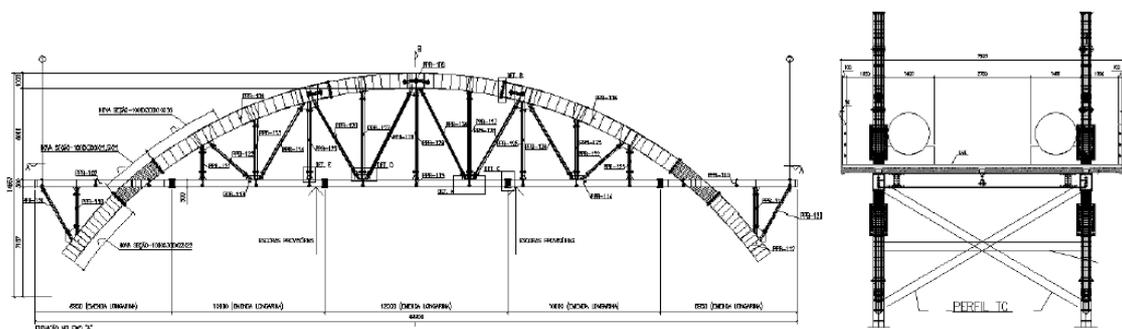


Figura 2 – Sistema estrutural da ponte metálica.

Modelo Computacional de Elementos Finitos para a Ponte Metálica

Para a avaliação do comportamento dinâmico aqui estudado para a ponte metálica foi elaborado um modelo computacional de elementos finitos com o programa ANSYS (2018) versão educacional 19.0.

Na modelagem da ponte foram empregados os elementos do programa ANSYS, SHELL181 para modelar a estrutura da laje do tabuleiro da ponte e encontros, e o elemento BEAM188 para modelar as estruturas dos elementos dos arcos, vigas longarinas, vigas transversinas e estacas da fundação. A interação solo-estrutura foi simulada considerando o elemento COMBIN14 e com valores de coeficiente de mola estabelecidos a partir de resultados de sondagem do solo. Os tubos das adutoras, elementos de dormentes de apoio dos tubos da adutora e guarda corpo não foram modelados.

A Figura 3 apresenta uma vista geral do modelo de elementos finitos (14868 nós e 17074 elementos) elaborado para as análises dinâmicas da ponte metálica do sistema de adutoras e de uso conjunto como passarela de pedestre.

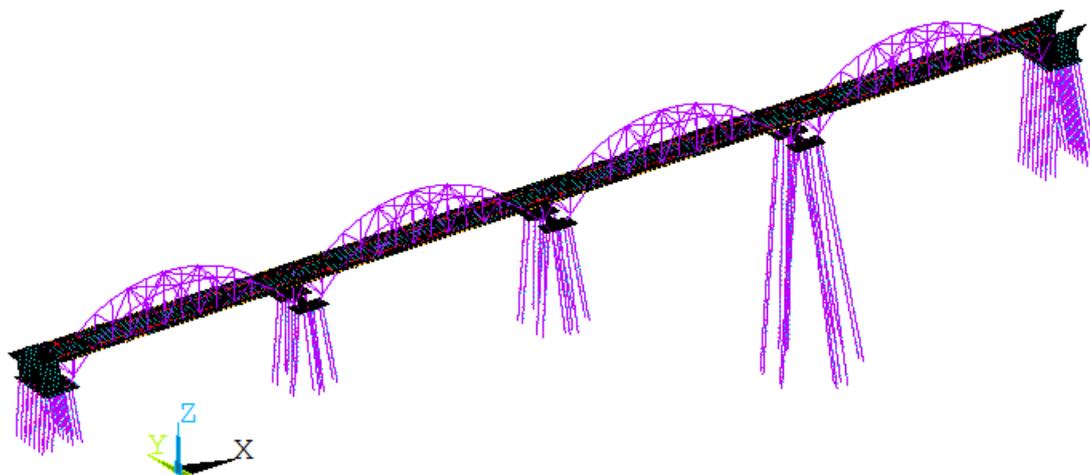


Figura 3 – Modelo de elementos finitos para a ponte metálica.

A Tabela 1 lista as propriedades materiais adotadas para o modelo de elementos finitos.

Tabela 1 – Propriedades Materiais.

Propriedade Material	Material	
	Aço	Concreto Armado
Módulo de Young (MPa)	205000	23800
Coefficiente de Poisson	0,3	0,2
Peso específico (kN/m ³)	78,5	25

Carregamentos

Para a realização da análise dinâmica modal de elementos finitos foi adotado um carregamento consistindo de:

- Ações permanentes de peso próprio da estrutura e dos elementos permanentes fixos (tubos de aço das adutoras, dormentes e estrutura de guarda-corpos);
- E de ações variáveis devido:
 - Carga de pedestres, com densidade de pedestres de $0,08 \text{ tf/m}^2$ (1,0 pessoa de 80 kgf por metro quadrado), distribuída na laje do tabuleiro da ponte;
 - Peso próprio da água, representando a condição de adutora cheia.

A Figura 4 ilustra o carregamento aplicado na estrutura da ponte metálica para a realização da análise dinâmica modal.

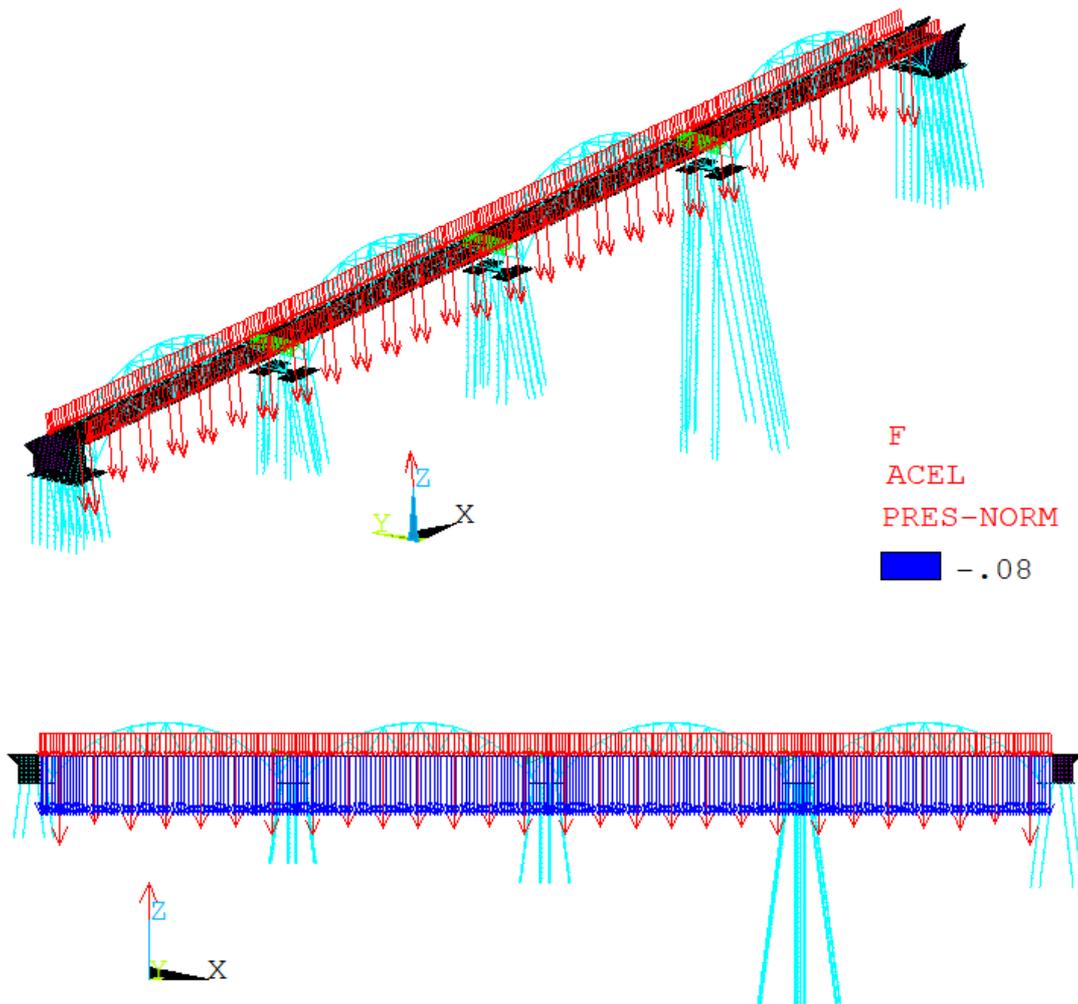


Figura 4 – Carregamento para a análise dinâmica modal.

O carregamento adotado para a representação de uma caminhada ao longo da ponte metálica foi baseado no modelo II de carregamentos conforme apresentado em FIGUEIREDO (2005).

Nessa representação de carregamento dinâmico é considerada uma parcela referente a carga estática, correspondente ao peso de uma pessoa, e uma combinação de harmônicos associados à frequência de excitação, sendo obtido pela Equação (1).

$$F(t) = P \left[1 + \sum \alpha_i \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot i \cdot f_s \cdot t + \phi_i) \right] \quad (1)$$

onde P é o peso de uma pessoa igual a 800 N; α_i é o coeficiente dinâmico para a força harmônica; i é o múltiplo harmônico (1, 2, 3...); f_s é a frequência do passo da atividade; t é o tempo e ϕ_i é o ângulo de fase para o harmônico.

A Tabela 2 lista os valores dos coeficientes dinâmicos α_i , e dos ângulos de fase ϕ , utilizados na Equação (1) para gerar a função F(t) de carregamento de representação do caminhar humano.

Tabela 2 – Parâmetros utilizados para gerar a função de carregamento.

Número do harmônico	Caminhar		
	f_s (Hz)	α_i	Φ
1	1,6 – 2,2	0,5	0
2	3,2 – 4,4	0,2	$\pi/2$
3	4,8 – 6,6	0,1	$\pi/2$
4	6,4 – 8,8	0,05	$\pi/2$

Ressalta-se que a carga F(t) será aplicada no ponto nodal do modelo de elementos finitos da estrutura da laje do tabuleiro e referente a maior amplitude modal da estrutura. Esse carregamento dinâmico será adotado para o processamento da análise transiente, não apresentando variação espacial da carga no decorrer do tempo e sua frequência natural varia conforme a frequência fundamental da estrutura.

Para processamento da análise transiente foi adotado o amortecimento de 1% e utilizou-se a matriz de amortecimento do tipo proporcional ou de Rayleigh, como explicado em BRASIL (2013). Foi adotado um intervalo de tempo para integração utilizando o algoritmo de Newmark igual a 10^{-2} s ($\Delta t = 0,01$ s).

Crítérios de Projeto para Excitações Provocadas por Caminhadas

No presente trabalho foi adotado o critério de projeto prescrito pela norma inglesa BS 5400 e apresentado em BACHMANN (1995), e que fornece um limite de aceleração dado pela equação abaixo:

$$a_{lim} = 0,5 \times f_i^{0,5} \quad (2)$$

onde a_{lim} é a aceleração limite, dada em m/s^2 e f_i é a frequência fundamental da estrutura, dada em Hz, para valores menores que 5 Hz.

Resultados das Análises de Dinâmicas de Elementos Finitos para a Ponte Metálica

A partir da análise modal foi determinada a frequência natural crítica da estrutura da ponte metálica para a direção vertical e que foi de 1,73 Hz e com o respectivo modo de vibração como mostrado na Figura 5.

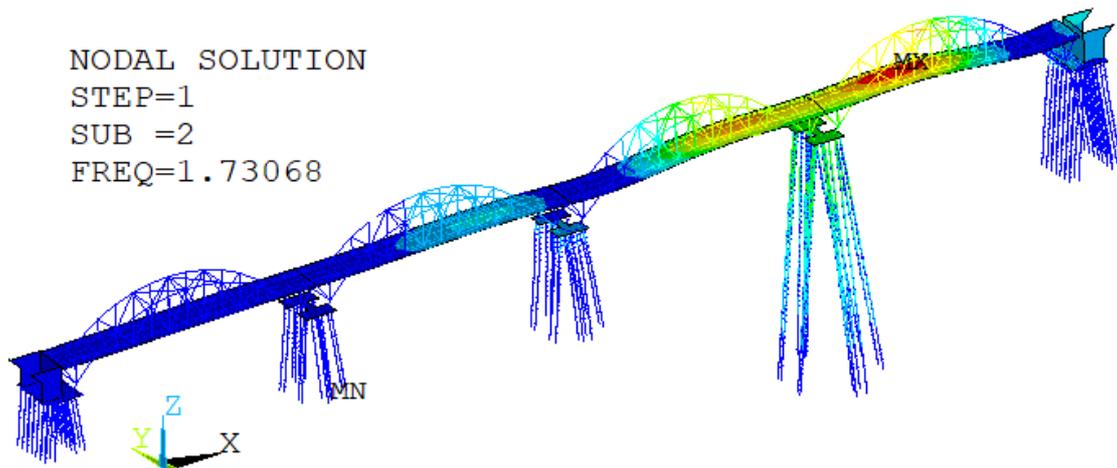


Figura 5 – Frequência natural crítica da estrutura na direção vertical – 1,73 Hz.

Como a frequência natural na direção vertical de valor de 1,73 Hz fica próxima da frequência de excitação de caminhar que é em torno de 2 Hz, é necessário realizar uma análise dinâmica transiente para avaliar o nível da aceleração máxima na direção vertical da estrutura do tabuleiro da ponte.

No processamento da análise dinâmica transiente foi aplicado no modelo de elementos finitos da ponte metálica o carregamento representativo do ato de caminhar da Equação (1) no tabuleiro da ponte e no ponto de máxima amplitude modal, como ilustrado na Figura 6.

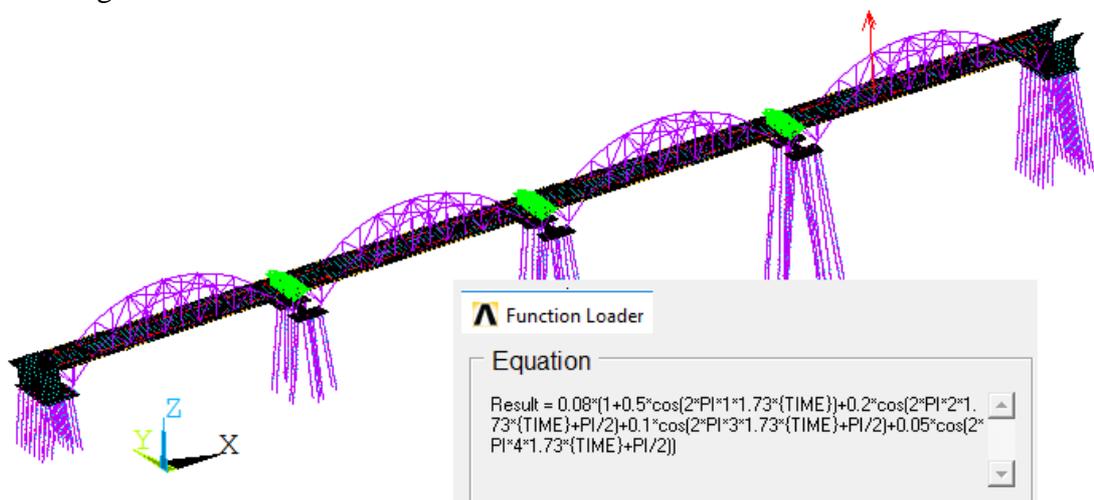


Figura 6 – Aplicação do carregamento dinâmico para processamento da análise dinâmica transiente.

A partir da análise dinâmica transiente são apresentados na Figura 7 os resultados do histórico das acelerações verticais no domínio do tempo para a ponte metálica. Observa-se que o máximo valor da aceleração vertical é em torno de $0,03 \text{ m/s}^2$.

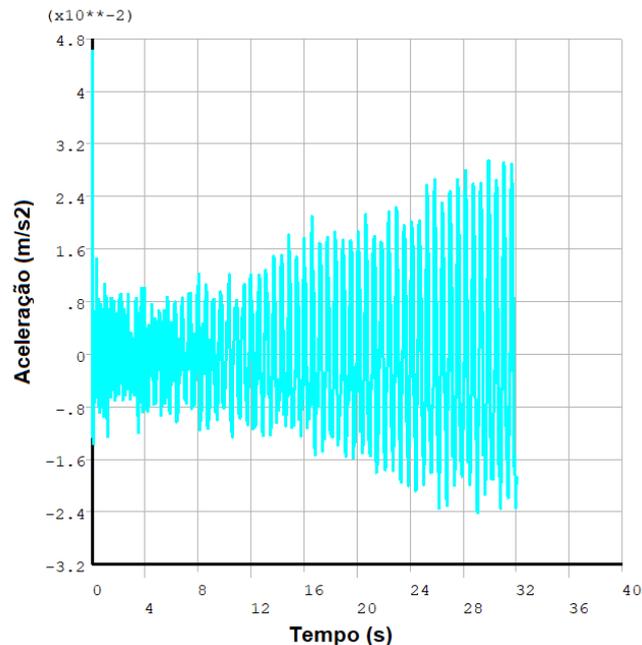


Figura 7 – Histórico das acelerações no tempo para a ponte metálica.

Outro resultado interessante para o estudo aqui realizado é a determinação do fator de amplificação dinâmica para os esforços atuantes na estrutura da ponte metálica para a situação que ela vibra em ressonância. Esse fator foi estimado por meio de uma análise dinâmica harmônica de elementos finitos conforme apresentada a seguir.

A Figura 8 mostra os resultados da análise harmônica no domínio da frequência. Observa-se que para a frequência de 1,73 Hz, tem-se uma amplificação dos resultados dos esforços para um fator de amplificação dinâmica em torno de 5,6.

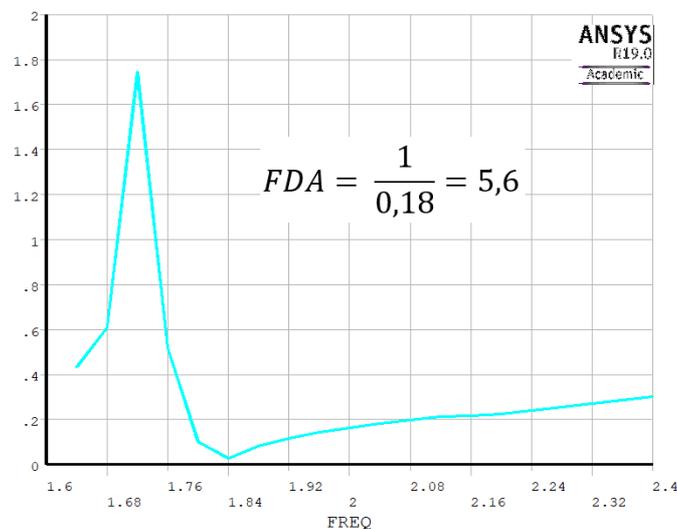
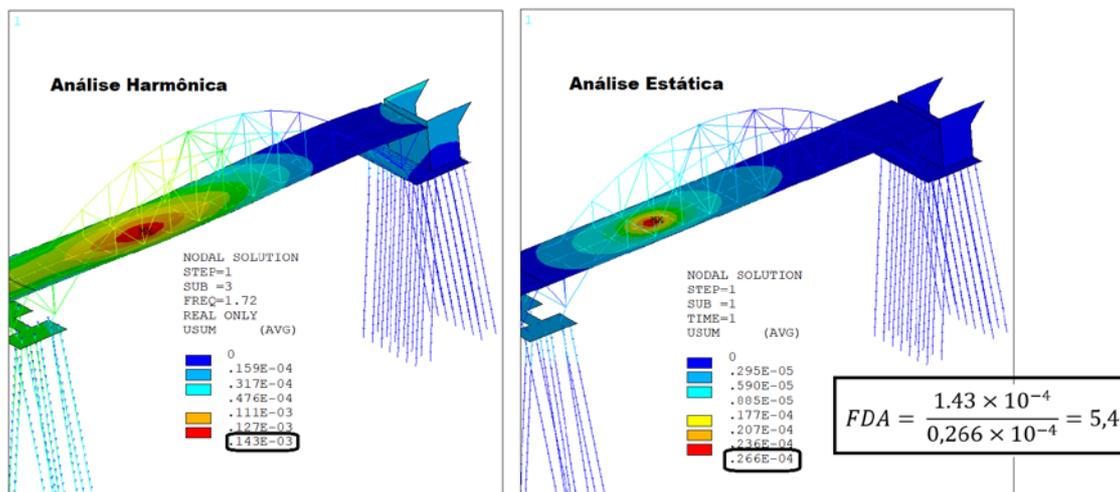


Figura 8 – Fator de amplificação dinâmica referente a frequência de 1,73 Hz.

A Figura 9 mostra os resultados de deslocamentos resultantes obtidos das análises estáticas e harmônicas para o ponto de maior amplitude modal e a comprovação do fator de amplificação dinâmica.



**Figura 9 – Análise Harmônica versus Análise Estática.
Fator de amplificação dinâmica.**

Avaliação do Comportamento Dinâmico para a Ponte Metálica

A partir dos resultados das análises dinâmicas de elementos finitos para a estrutura da ponte metálica, constatou-se que o máximo valor da aceleração vertical é de $0,03 \text{ m/s}^2$ e que é inferior ao valor limite da aceleração de $0,66 \text{ m/s}^2$ estabelecido pelo critério da norma BS 5400. Portanto, a estrutura da ponte metálica destinada a um sistema de adutoras e de uso conjunto como passarela de pedestres não apresentará vibração desconfortável ao usuário.

Referências

- ANSYS: Engineering Analysis System - Release 19, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7187 – Projeto de pontes de concreto armado e de concreto protendido. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8681 – Ações e segurança nas estruturas – Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, ABNT, 2008.
- BACHMANN, H. et al. Vibration Problem in Structures – Practical Guidelines, Institut für Baustatik und Konstruktion, 1st Ed, Basel, Birkhäuser Verlag, 1995.
- BARROS, T.P, RIOS, R.D. Análise dinâmica em passarela sujeita à movimentação humana. VI CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE PATOLOGÍA Y RECUPERACIÓN DE ESTRUCTURAS. Córdoba, Argentina, 2010.
- BRASIL, R.M.R.F., SILVA, M.A. Introdução a dinâmica das estruturas para engenharia civil. São Paulo: Blucher, 2013.
- FIGUEIREDO, F.P. Estudo do comportamento dinâmico de passarelas devido ao caminhar de pedestres. 2005. 133 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia e Ciências, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.