

Análise Dinâmica de uma Passarela

Mailson de Macedo Queiroz¹
Silvio de Souza Lima²
Hampshire de Carvalho Santos³

Resumo

A evolução normativa com relação aos coeficientes de segurança aliada às melhorias das propriedades dos materiais de construção tem propiciado a concepção de estruturas mais esbeltas e leves. Esse progresso, embora interessante no ponto de vista econômico e estético, pode resultar na adoção de soluções estruturais com baixa rigidez e com frequências naturais próximas às frequências de excitação provenientes das atividades humanas.

As passarelas, por exemplo, são comumente relacionadas a tal condição. Esse tipo estrutura, apesar de já estar relacionado a problemas vibratórios desde 1831 por ocasião do desabamento da ponte inglesa de Broughton, tem seu comportamento dinâmico agravado pelos recursos industriais e técnicos disponíveis, como é o caso do uso de contraflechas, estais, lajes mistas dentre outros. Esse contraponto do comportamento dinâmico conflita, portanto, com a necessidade econômica e ambiental de se construir fazendo melhor uso dos recursos naturais. O presente trabalho visa apresentar as duas recomendações técnicas mais bem conceituadas atualmente, as do HIVOSS e do SÉTRA. Faz-se também o estudo de uma passarela metálica (de longarinas treliçadas compostas por perfis deformados a frio), de acordo com essas recomendações, com vistas à simplicidade de fabricação, transporte, montagem e baixo consumo de material, mas atendendo aos requisitos relativos ao comportamento dinâmico exigidos, de conforto humano e segurança.

Palavras-chave: Dinâmica estrutural; Análise de conforto; Recomendações normativas de conforto dinâmico; Controle passivo.

1 Introdução

Segundo CASTRO (1997), mudanças na filosofia de cálculo de tensões admissíveis para estados limites e aplicações de técnicas de confiabilidade estrutural para a determinação de coeficientes de segurança tem possibilitado consideráveis reduções de massa nas estruturas, uma vez que essas alterações permitem o uso de fatores mais adequados e seções estruturais mais bem aproveitadas e esbeltas, ou como pode ser também dito, mais leves e menos rígidas. Somado a isso, CASTRO (1977) revela também que houve nos últimos anos um considerável aumento das tensões de escoamento dos aços mais utilizados.

Como exemplo prático dessa situação, será apresentado o comportamento dinâmico de uma passarela concebida para privilegiar a simplicidade do processo fabril e construtivo, além do baixo

consumo de aço. Essa passarela, embora tivesse sido projetada segundo as recomendações normativas nacionais vigentes, apresentou problemas vibratórios consideráveis de acordo com os manuais mais modernos tais como o HIVOSS e SÉTRA, indicando a necessidade de intervenção em sua concepção para se enquadrar a níveis de confortos adequados.

2 Prescrições normativas

Responsável por propor cargas móveis em pontes rodoviária se ações em passarelas de pedestres, a NBR 7188 (1982) prescreve que as passarelas devem ser dimensionadas para resistir um carregamento acidental de 5kN/m², sem fazer qualquer recomendação relativa ao comportamento dinâmico dessas estruturas. Enquanto isso a NBR 8800 (2008) recomenda que,

1 Universidade Federal do Rio de Janeiro / Departamento de Estruturas / mailson.queiroz@poli.ufrj.br

2 Universidade Federal do Rio de Janeiro / Departamento de Estruturas / sdesouzalima@gmail.com

3 Universidade Federal do Rio de Janeiro / Departamento de Estruturas / sergiohampshire@gmail.com

em pisos de residência e escritórios, a frequência natural não deva ser inferior a 4 Hz, porém, também não estabelece qualquer recomendação relativa a critérios destinados ao comportamento dinâmico de passarelas.

Essas lacunas, presentes também em normas europeias, instigaram o grupo de pesquisa HIVOSS e o departamento de transporte francês SÉTRA, a propor dois manuais técnicos contendo, de maneira detalhada, metodologias de análise dinâmica de passarelas, baseados em diversos estudos desenvolvidos na Europa.

Esses manuais apresentam diversas similaridades, principalmente na sequência de análise, porém, apresentam algumas particularidades no que diz respeito às margens adotadas nas faixas de frequência e de aceleração, além de indicarem diferentes maneiras de definir os fluxos de pedestres bem como a forma de adoção das ações.

3 Técnicas de controle

No caso da análise dinâmica indicar altos níveis de acelerações, a literatura propõe uma enorme gama de técnicas de controle, como mostra MOUTINHO (2007). Tais técnicas são classificadas de maneira geral como passivas, ativas, semi-ativas ou híbridas. A utilização de cada uma delas depende da complexidade da estrutura, da confiabilidade e da robustez que se deseja obter no sistema, ou mesmo do custo do investimento que se pretende fazer.

Entre as soluções possíveis, as técnicas de controle passivo são aquelas que não fazem uso de uma fonte externa de energia para atuar no sistema. Como principais exemplos dessa técnica, citam-se o ajuste de massa e/ou rigidez, ou aquelas que fazem a inserção de aparelho do tipo atenuador dinâmico sintonizado.

4 A passarela em estudo

A passarela em estudo se propõe a ser um produto padronizado e industrializado destinado fazer travessias de rodovias com duas pistas em diferentes regiões do Brasil. Para tal, sua concepção privilegiou a simplicidade de toda sua cadeia produtiva (fabricação, transporte e montagem) além do baixo consumo de aço. Nessa estrutura foi utilizada a largura de 3,5 m e um vão central de 15 m. A altura livre da passarela com relação no nível acabado da pista é de 7 m enquanto que o pé-direito interno das estruturas é de 2,8 m.

Nas longarinas foram utilizadas treliças composta por perfis formados a frio, que propiciam o melhor consumo da sua chapa de origem, ou seja, o seu desenvolvimento linear evita o surgimento de

sobras durante o seu processo fabril. Como tabuleiro, foram utilizadas chapas xadrez enrijecidas com perfis formados a frio para se criar um painel modulado de fácil transporte e montagem.

Os pórticos transversais e longitudinais das passarelas são compostos por perfis laminados ou perfis soldados, sendo adotados em cada caso aqueles que se apresentam mais econômicos no cômputo do custo global entre matéria-prima e fabricação. Além disso, foram concebidos nos pórticos transversais inclinações de queda de água para a drenagem do telhado. A Figura 1 ilustra essa passarela.



Figura 1 – Passarela analisada.

4.1 Análise dinâmica da passarela

A análise dinâmica foi desenvolvida por meio do *software* comercial STRAP (2012). As chapas e suportes de pisos não foram modelados matematicamente, uma vez que os mesmos não são adequadamente fixados à passarela e dessa forma não contribuem consideravelmente para a rigidez da estrutura, muito embora seu peso seja considerado na análise.

Na análise dinâmica 100% das ações variáveis foram consideradas como massas participativas, juntamente com as massas provenientes do peso próprio. Essa consideração é conservadora e segue as recomendações dos manuais HIVOSS e SÉTRA, uma vez que a massa modal associada aos pedestres é superior a 5% da massa modal do tabuleiro. Foi utilizado ainda um fator de amortecimento de 0,4%, em consonância com as recomendações dos manuais SÉTRA e HIVOSS.

Com essas considerações foram determinadas as características modais da passarelas, e foram selecionados os modos que apresentavam risco de coincidir com os harmônicos da excitação, segundo os manuais da HIVOSS e SÉTRA. A Tabela 1 exhibe as características modais da passarela. Nessa tabela constam também as faixas de risco de ressonância segundo os critérios do SÉTRA.

Após a classificação das passarelas a partir do risco de ressonância, são definidos os casos de carga a serem aplicados, segundo os critérios da HIVOSS e

SÉTRA. Com a aplicação dessas ações são analisadas as acelerações em pontos ao longo do tabuleiro. Os pontos de análise foram escolhidos por serem os que apresentam as maiores componentes modais ao longo do tabuleiro da passarela.

Após a determinação dessas acelerações, as mesmas são comparadas com os limites recomendados de acordo com cada referência. Um resumo dos resultados é apresentado na Tabela 2.

Assim observa-se que as acelerações obtidas apresentam valores superiores aos recomendados. Desta forma deve ser aplicada alguma intervenção no sistema estrutural para que esse se enquadre em uma faixa de conforto adequada, na qual as acelerações sejam pouco perceptíveis.

O controle das acelerações apresentadas será realizado por meio de quatro estudos de caso, como apresentado a seguir:

- 1º estudo de caso – alteração na rigidez estrutural através do enrijecimento dos pilares;
- 2º estudo de caso – alteração na rigidez estrutural através de pórticos e contra-ventamento;
- 3º estudo de caso – alteração da massa modal;
- 4º estudo de caso – inserção de atenuadores dinâmicos sintonizados.

Tabela 1 – Características modais da passarela.

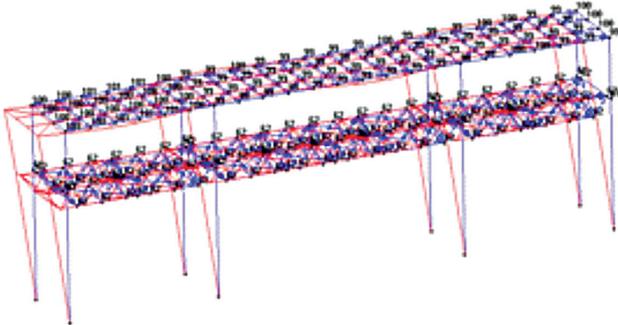
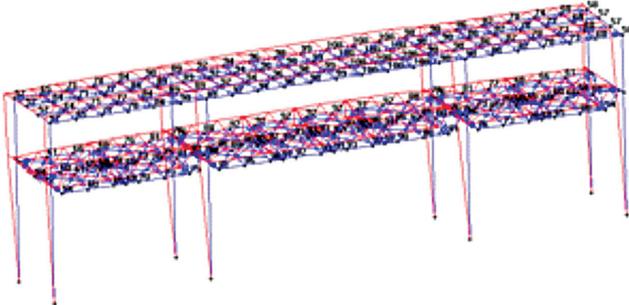
Modo	Frequência	Forma modal	Faixa de risco
1º	1,44	 <p style="text-align: center;">Longitudinal</p>	Médio
2º	1,94	 <p style="text-align: center;">Transversal</p>	Mínimo

Tabela 2 – Classificação do conforto segundo as recomendações da SÉTRA e HIVOSS.

Modo	Descrição	Aceleração SÉTRA	Aceleração HIVOSS	Conforto	
				SÉTRA	HIVOSS
1	Translação longitudinal	4,14	2,81	Inaceitável	Inaceitável
2	Translação transversal	0,50	-	Mínimo	-

4.1.1 1º e 2º Estudos de caso

Como forma de se avaliar as consequências do incremento na rigidez em ambas as soluções, foram lançadas, a cada proposta de enrijecimento, cargas pontuais no topo da passarela e medidos seus deslocamentos. A divisão da força aplicada pelo deslocamento obtido dará a informação sobre o quanto a estrutura está sendo enrijecida.

Dessa forma, a Figura 2 e a Figura 3 ilustram os resultados do primeiro estudo de caso, relacionando a mudança da aceleração com o aumento relativo da rigidez da estrutura (rigidez normalizada com relação à rigidez da solução estática). A Figura 4 apresenta a mesma correlação para o segundo estudo de caso.

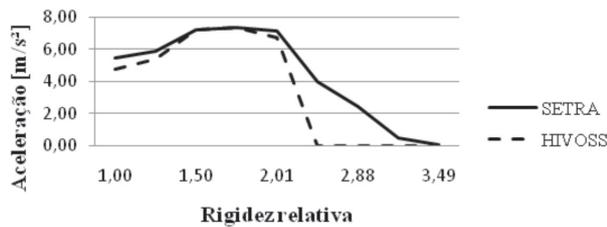


Figura 2 – Aceleração longitudinal versus aumento relativo da rigidez, 1º Estudo de caso.

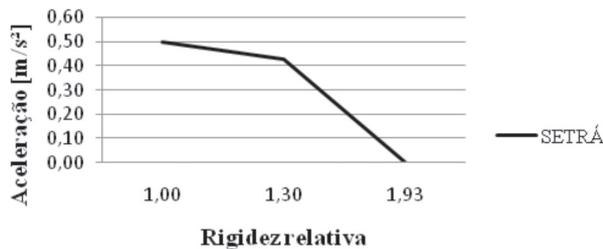


Figura 3 – Aceleração transversal versus aumento relativo da rigidez, 1º Estudo de caso.

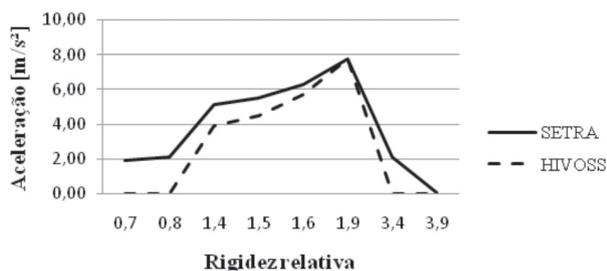


Figura 4 – Aceleração longitudinal versus aumento relativo da rigidez, 2º Estudo de caso.

O segundo modo de vibração no segundo estudo de caso teve sua aceleração reduzida a níveis satisfatórios, com a introdução de cantoneiras opostas pelo vértice de abas iguais de 3"x1/4", locadas em forma de X nos pórticos transversais.

4.1.2 Estudo de caso 3

Como a redução da frequência natural com a diminuição da rigidez estrutural não era viável, devido às limitações de deformações laterais impostas pela NBR 8800, o acréscimo de massas se torna interessante, pois permite a redução da frequência natural sem alterar a rigidez estrutural e por consequência aumentar os deslocamentos laterais.

Porém o aumento da massa em certos níveis pode também exigir o uso de reforços estruturais. Dessa forma, nas análises que se seguem, são inseridas massas pontuais à medida que é verificado o dimensionamento estático dos elementos. A Figura 5 e Figura 6 exibem, respectivamente, a redução das acelerações longitudinais e transversais em função do acréscimo de massa normalizada, ou seja, os valores exibidos no eixo das abcissas foram normalizados com relação a massa total inicial.

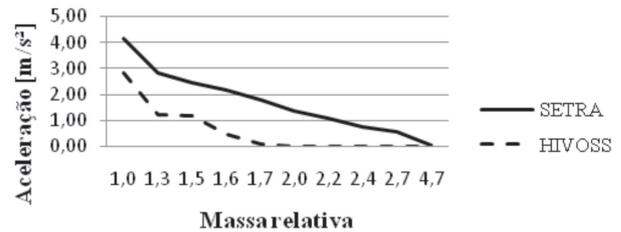


Figura 5 – Redução da aceleração longitudinal em função do aumento relativo da massa total da estrutura.

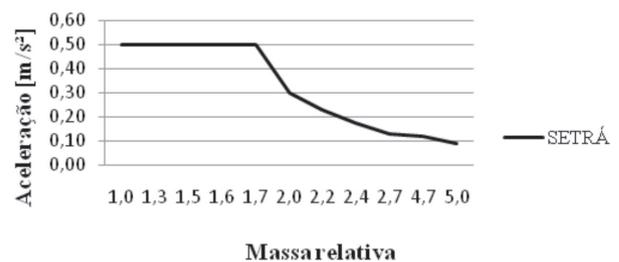


Figura 6 – Redução da aceleração transversal em função do aumento relativo da massa total da estrutura.

4.1.3 Estudo de caso 4

A inserção de um absorvedor de vibração adiciona um grau de liberdade a mais na idealização do sistema massa-mola do modo de vibração. Se o absorvedor for simplesmente inserido diretamente sobre a estrutura inicial, ou seja, sobre a solução estrutural antes da análise dinâmica, a estrutura ficaria com dois picos dentro da faixa de ressonância. Assim, antes de ser inserido o ADS, a estrutura necessita de um

ajuste na sua rigidez para permitir que, ao ser inserido o aparelho, os dois modos saiam igualmente da faixa de risco.

Além disso, devem ser atribuídos incrementos na massa do aparelho e novos valores de rigidez até que sejam atingidos valores de acelerações aceitáveis nos dois modos. Durante as iterações eventuais ajustes na rigidez estrutural devem ser efetuados para permitir que os dois modos permaneçam fora da faixa de risco de ressonância.

A Figura 7 apresenta a evolução das frequências de pico a medida que são atribuídos incrementos na massa do aparelho. Nessa figura é possível também observar uma mudança brusca nas curvas dos picos devido a ajustes repentinos na rigidez estrutural.

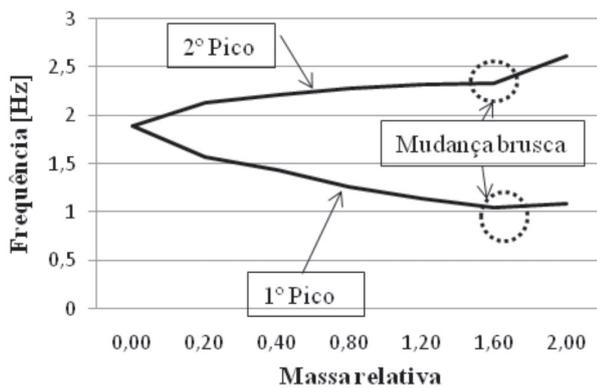


Figura 7 – Defasagem das frequências de pico em função da evolução da razão de massas do ADS.

Com relação ao modo transversal, anteriormente enquadrado em uma faixa de risco, teve sua frequência natural ajustada com a inserção da massa do aparelho. Isso permitiu que a frequência natural passasse de 1,94 Hz para 1,47 Hz, ou seja, para fora do risco de ressonância.

5 Conclusões

Após a execução das diversas propostas de controle, pode-se observar que solução por meio de ajustes de rigidez com uso de pórticos e contra-ventamentos se mostrou a mais adequada, apesar de consumir mais material. Essa conclusão se deve a que os custos envolvidos na fabricação e manufatura dos perfis soldados, adotados nas soluções no segundo estudo de caso, são aproximadamente 35% mais elevados do que a manufatura de perfis laminados utilizados nas soluções do segundo caso.

Outro fator que contribuiu para qualificar a segunda como a melhor solução a ser adotada, é o elevado valor das massas envolvidas na solução do terceiro estudo de caso, que pode chegar a até 5 vezes a massa do modo de vibração envolvido e na solução com inserção de absorvedores, que pode chegar a até 2 vezes a massa do modo de vibração.

Durante este trabalho se observou também que, apesar do dimensionamento estático seguir as recomendações da NBR 7188 com o uso de uma carga variável de 5 kN/m², a estrutura analisada apresentou problemas dinâmicos, contrariando o conceito de que passarelas dimensionadas com esse carregamento não teriam problemas vibratórios, como é alertado pelo guia de especificações de projeto para passarelas da AASHTO.

6 Referências

- AASHTO – AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. Guide specifications for design of pedestrian bridges. Nova York: American Association of State Highway and Transportation Officials, 1997.
- ABNT NBR 8800. Projeto e execução de estruturas de aço em edifícios (método dos estados limites) – Procedimento -Rio de Janeiro: ABNT, 2008.
- ABNT NBR 7188. Carga móvel em ponte rodoviária e passarela de pedestre. Rio de Janeiro: ABNT, 1983.
- BATTISTA, R. C. Redução das Vibrações Induzidas por Pessoas nas Lajes Prémoldadas de C. A. de um Edifício de Estrutura de Aço, Projeto COPPETEC PEC-2434, Parte 2, contrato da Fundação COPPETEC com a PUC-Rio, Rio de Janeiro, Abril 2002.
- CASTRO, L. A. Análise da segurança no projeto de estrutura: Método dos estados limites. Universidade Federal de São Carlos. São Paulo, p. 134. 1997.
- CASTRO, L. A. Análise da segurança no projeto de estrutura: Método dos estados limites. Universidade Federal de São Carlos. São Paulo, p. 134. 1997.
- HIVOSS. Human induced vibrations of steel structures. Porto: Hivoss, 2008.
- MOUTINHO, C. M. Controlo de vibrações em estruturas de engenharia civil. Universidade do Porto. Porto, p. 394. 2007.
- SÉTRA. Assessment of vibration behavior of footbridge under pedestrian loading. Paris: SÉTRA, 2008.