



ASSESSMENT OF THE STRUCTURAL SAFETY AND THE DYNAMIC BEHAVIOR OF A FOOTBRIDGE COMPOSED BY STEEL TUBULAR ELEMENTS.

Claudius de Sousa Barbosa

csb@usp.br

Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica, Universidade de São Paulo
Av. Prof. Almeida Prado tv.2, 83. Cidade Universitária. 05508-070. São Paulo-SP. Brasil.

Petrus Gorgônio Bulhões da Nóbrega

nobrega@ufrnet.br

Departamento de Arquitetura, Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Campus Universitário, Lagoa Nova. 59072-970. Natal-RN. Brasil

Alex Sander Clemente de Souza

alex@ufscar.br

Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos
Rodovia Washington Luís (SP-310), km 235. 13565-905. São Carlos-SP. Brasil

Abstract. *Structures with steel tubular profile elements, especially those with circular hollow sections, have always been used in civil construction for buildings, bridges or footbridges. In case of temporary structures, or for scaffold or falsework systems, tubular elements are the great majority, due to its easy of assembly, storage and transport, beyond the possibility to be reused several times. In addition, steel tubular structures may have fast connections to assembly and disassembly and have been adopted to build bleachers, sport arenas and footbridges. This paper presents the safety and performance analyses of a tridimensional tubular structure. Experimental dynamic tests were carried out to evaluate the structural safety when the modal parameters were obtained to calibrate a FEM numerical model. Then stress, strain, efforts and displacements were calculated. On the other hand, human comfort was evaluated by means of velocity, acceleration and structure natural frequencies. The paper concludes that the adopted methodology is suitable and the structure is in accordance to codes parameters of safety and performance.*

Keywords: *FEM model, Dynamic analysis, Footbridge, Tubular structure.*

1 INTRODUÇÃO

A construção civil sempre busca a racionalização de suas atividades, privilegiando aspectos como qualidade, facilidade, rapidez na montagem e menor custo, e evitando os processos que incorrem em desperdício e retrabalho. Neste contexto, como é amplamente conhecido, o uso da estrutura metálica tem um papel importante por meio da utilização de elementos processados industrialmente.

Nas estruturas metálicas, os elementos com perfis tubulares sempre foram utilizados na construção de edifícios, pontes e passarelas. O pilar (“a coluna”) de ferro fundido foi o primeiro material de construção produzido por métodos fabris desenvolvidos pela Revolução Industrial. Neste caso, o principal perfil tubular utilizado foi o de seção circular (Wardenier et al, 2010).

Na verdade, a própria natureza mostra que o uso dos perfis tubulares não é empregado apenas como tubos para transmissão de fluidos, mas também por suas excelentes propriedades de resistência, aos mais diversos esforços. Estas vantagens foram percebidas desde a antiguidade, quando o bambu tornou-se tanto um elemento de transmissão de água, como também um elemento estrutural utilizado na construção de diversas edificações da época. Modernamente as estruturas metálicas com seções tubulares tem sido bastante utilizada na construção de coberturas, pontes e viadutos, existindo diversos exemplos desta utilização em Wardenier et al. (2010). Por sua vez, Packer e Henderson (1992) apresentam um guia de projeto que inspirou diferentes normas técnicas ao redor do mundo.

Mais recentemente, percebe-se um aumento significativo no uso e aplicação dos perfis tubulares como elementos estruturais, os quais podem ter três geometrias diferentes principais: a circular (“circular hollow section”), a retangular (“rectangular hollow section”) e a quadrada (“square hollow section”). Suas geometrias implicam em sua principal vantagem, pois a seção fechada proporciona alta eficiência estrutural. Gerken (2003) apresenta um panorama do emprego de perfis tubulares, bem como aspectos arquitetônicos, das estruturas tubulares no Brasil.

No caso dos sistemas provisórios de escoramento, ou cimbramento, os elementos tubulares metálicos são a grande maioria, normalmente de seção circular, em função de sua facilidade de montagem, capacidade de suportar elevados carregamentos e a possibilidade de reaproveitamento das peças. O sistema de cimbramento pode ser definido como o conjunto de elementos-suporte que garantem o apoio resistente e estável das cargas de peso próprio do concreto e das formas, inclusive aquelas decorrentes da movimentação operacional, de modo a garantir total segurança durante as operações de concretagem dos sistemas estruturais. A Fig. 1 ilustra alguns sistemas típicos de cimbramento.



Figura 1. Sistemas típicos de cimbramento

O uso de estruturas tubulares amplia consideravelmente o leque de utilização dos cimbramentos para além da função de escoramento e, em contrapartida, exige análises e investigações mais detalhada sobre o seu comportamento. Soeiro (2012) e Costa et al. (2012) apontam como uma das principais causas de acidentes em obras as falhas no sistema de cimbramento e apresentam uma metodologia de análise baseada no Método dos Elementos Finitos para torres metálicas de escoramento de lajes de concreto armado.

Os escoramentos devem ser suficientemente bem apoiados, fixados, encunhados e contraventados, a fim de garantir sua capacidade portante e evitar deslocamentos inadmissíveis, sendo fundamental que apresentem adequada resistência, estabilidade e rigidez. Seus componentes são diversos, como montantes, diagonais, travamentos, escoras, tubos, dispositivos vinculares, braçadeiras, passadiços operacionais para trânsito e transporte de materiais, além de acessos, dentre outros vários.

As estruturas tubulares metálicas são também as preferidas nos casos das edificações temporárias, muitas vezes construídas com os próprios elementos dos sistemas de cimbramento. Exemplos relevantes de estruturas temporárias são as arquibancadas ou coberturas, as quais às vezes suportam ou abrigam algumas dezenas de milhares de pessoas, em eventos esportivos ou artísticos. A Fig. 2 apresenta uma arquibancada temporária típica.



Figura 2. Arquibancada temporária construída com sistemas de cimbramento

Acerca destas estruturas, destaca-se o ocorrido no Brasil nos recentes anos de 2014, no evento da Copa do Mundo FIFA, e de 2016, nos Jogos Olímpicos do Rio de Janeiro, quando

diversas arquibancadas eram provisórias, sendo desmontadas após seu uso. A Fig. 3 ilustra a grande arquibancada provisória da Arena Corinthians.



Figura 3. Arquibancada temporária da Arena Corinthians

Conforme já comentado, pode-se ter ainda uma estrutura de cobertura, ou outra qualquer, constituída por elementos dos sistemas de escoramento. Este artigo objetiva descrever as análises experimentais e numérico-computacionais de uma estrutura temporária de passarela que possui 4 vãos de até 20 m cada, constituída por tubos de aço conectados que formam diversas treliças planas e espaciais, como um sistema de cimbramento, com o intuito de proporcionar a mobilidade das pessoas superando alguns obstáculos urbanos.

Após a construção da passarela, realizaram-se ensaios dinâmicos experimentais visando à determinação dos parâmetros modais a fim de se calibrar o modelo numérico-computacional em elementos finitos. A partir do modelo numérico calibrado, foram realizadas diversas análises estáticas, para as combinações de carregamento especificadas em normas técnicas, além de análises dinâmicas considerando a excitação provocada pelas pessoas. Destas análises estáticas e dinâmicas computacionais compararam-se os níveis de tensões solicitantes, com as capacidades resistentes definidas pelas normas, além de terem sido investigados os parâmetros de conforto humano, como aceleração e velocidade máximas, que são diretamente influenciados pelas frequências naturais da estrutura.

2 ESTRUTURA ANALISADA

O objeto de estudo é a estrutura de uma passarela provisória, cuja função é permitir a passagem de pessoas sobre alguns obstáculos urbanos. Ela é constituída por um conjunto de tubos de aço conectados que formam treliças planas e espaciais, sendo os perfis tubulares verticais apoiados em calços de madeira ou blocos de concreto que transmitem os esforços para a via de pedestres. A passarela possui altura aproximada de 10 m e é composta por 4 vãos (o maior deles chegando a quase 20 m). A Fig. 4 apresenta a visão geral da estrutura e a Fig. 5 ilustra as treliças que a compõem.



Figura 4. Visão geral da estrutura da passarela



Figura 5. Detalhes das treliças da estrutura da passarela

3 ENSAIO DINÂMICO EXPERIMENTAL

3.1 Excitação e monitoramento dinâmicos

O monitoramento dinâmico de estruturas é uma técnica não destrutiva que permite a obtenção de parâmetros modais importantes para a análise estrutural (como a frequência natural, os modos de vibração e o amortecimento) e a avaliação da integridade estrutural. Mostra-se também muito útil para a calibração de modelos numérico-computacionais, possibilitando a precisa representação da estrutura real por um modelo computacional.

Para a realização deste ensaio é necessário excitar a estrutura proporcionando sua vibração. A excitação pode ser obtida com o emprego de uma força mecânica (atuante por certo período de tempo, ou uma ação de impacto de curtíssima duração) ou oriunda da força ambiente (ação do vento na estrutura, atividades humanas, tráfego de veículos, dentre outras cargas “operacionais”). Na passarela em questão a excitação da estrutura foi realizada por meio de impactos nas direções vertical, transversal e longitudinal, acessórios manuais, além da ação humana de pulos e corridas sobre o tabuleiro.

Para a medição das vibrações foram utilizados transdutores de aceleração do tipo capacitivo, que atuam adequadamente em uma faixa de baixa frequência. Estes acelerômetros conectavam-se a um sistema de aquisição de dados com canais amplificadores e filtros

“passa-baixo” de 2ª ordem, sendo os dados registrados por um computador portátil a uma taxa de aquisição de 1000 Hz. A Fig. 6 ilustra o monitoramento do ensaio dinâmico experimental.

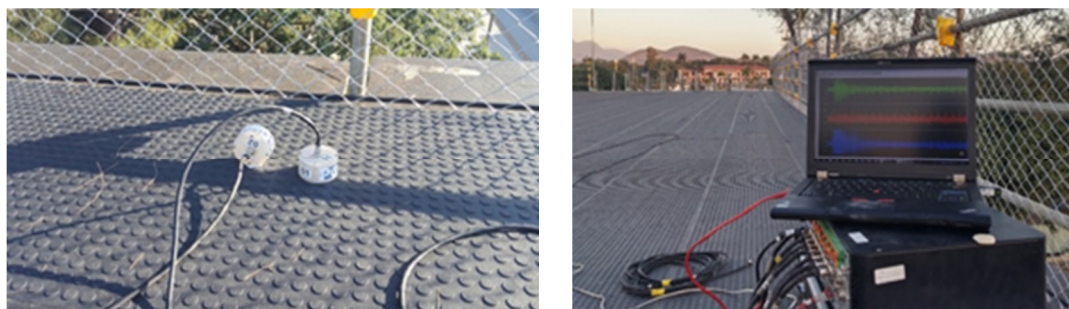


Figura 6. Detalhes do ensaio dinâmico experimental: acelerômetros e sistema de aquisição

3.2 Análise dos resultados

As provas de carga dinâmicas geram como resultados gráficos de aceleração ao longo do tempo. Todos os vãos da estrutura foram instrumentados, obtendo-se esse comportamento para as três direções principais. Destes dados é possível o cálculo dos espectros de potência, onde determinam-se as principais frequências naturais da estrutura, as quais serão utilizadas na calibração e validação do modelo numérico. A Fig. 7 apresenta exemplos de gráficos da aceleração ao longo do tempo, podendo-se perceber que os picos (de aceleração) estão associados aos instantes de excitação da estrutura.

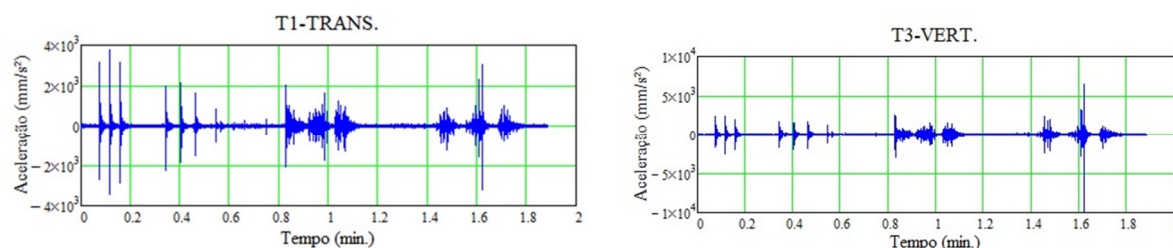


Figura 7. Exemplos de gráficos de aceleração ao longo do tempo

Com base nestes dados de aceleração ao longo do tempo calculam-se os diagramas de espectro de potência, dos quais são verificadas as principais frequências naturais da estrutura. A Fig. 8 apresenta exemplos destes gráficos, com os picos indicando exatamente tais frequências naturais. A Tab. 1 apresenta a lista das primeiras frequências naturais da estrutura obtidas desta análise.

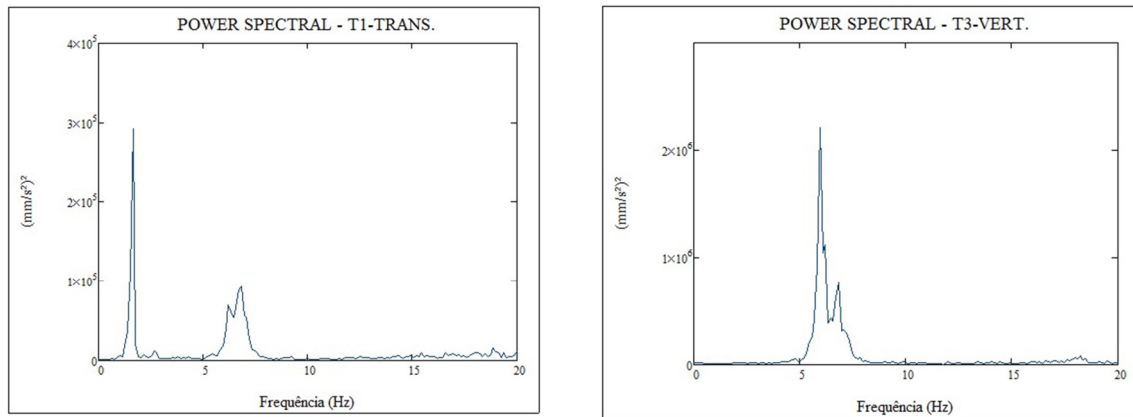


Figura 8. Exemplos de gráficos de espectro de potência

Tabela 1. Frequências naturais e modos de vibração associados

Frequência natural (Hz)	Modo de vibração
1,64	Movimento transversal
1,89	Movimento longitudinal
5,94	Movimento vertical (flexão)
6,83	Movimento vertical (torção)

4 MODELO NUMÉRICO-COMPUTACIONAL

Para a construção do modelo numérico computacional utilizou-se o programa computacional SAP 2000. A estrutura metálica da passarela, perfis tubulares e treliças foram representados por elementos finitos de barra. Os pisos da passarela e das escadas foram modelados com elementos finitos de casca. A Fig. 9 ilustra o modelo computacional, o qual resultou em 20290 elementos de barra, 1694 elementos planos e 8432 nós.

As ligações entre as barras verticais e o solo foram consideradas como sendo apoios simples, pelas próprias disposições construtivas. A estrutura da passarela era composta por barras de seção circular $\phi 48 \times 30\text{mm}$ e $\phi 37 \times 2,65\text{mm}$ em aço com resistência ao escoamento nominal de 250 MPa. Além disso, em elementos de transição e/ou de apoio do piso foram utilizadas vigas metálicas em seção tipo U. As características geométricas das estruturas e seus elementos, bem como as condições de ligações entre barras e entre a estrutura e o solo foram avaliadas no local e confirmou-se que seguiam o especificado em projeto. As conexões entre os elementos foram consideradas como articuladas, já que foram utilizadas abraçadeiras de encaixe simples e os elementos estruturais em seção tubular apresentam rigidez a flexão insuficiente para transmissão de momentos nos nós.

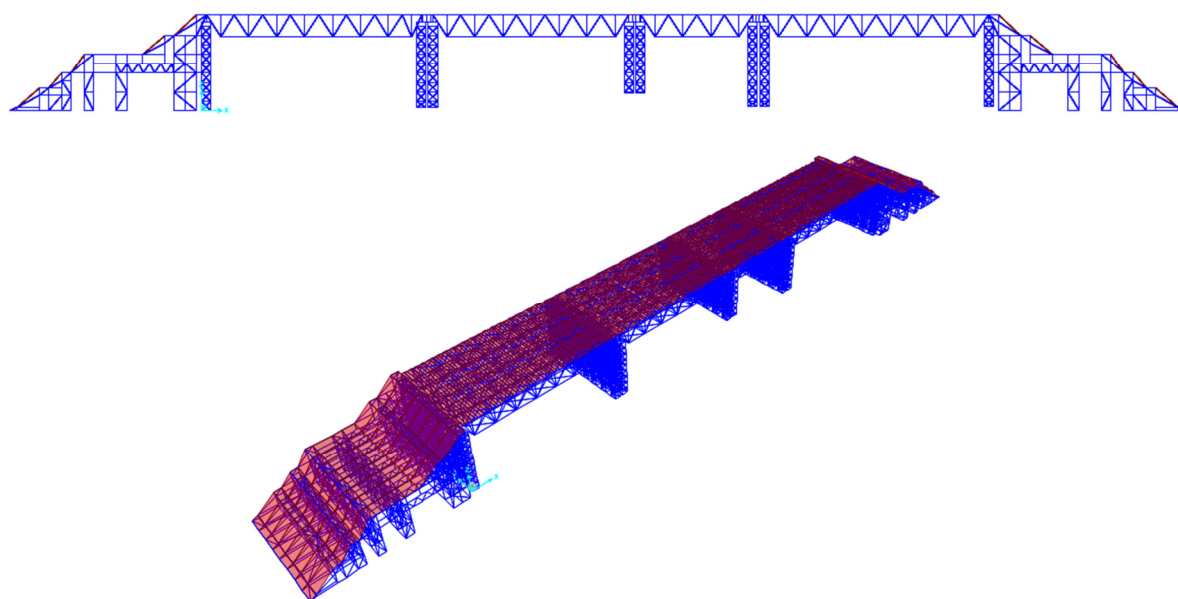


Figura 9. Modelo numérico-computacional em elementos finitos

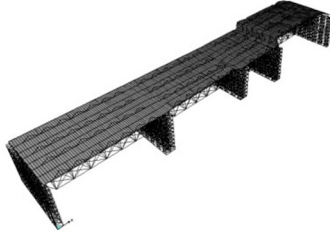
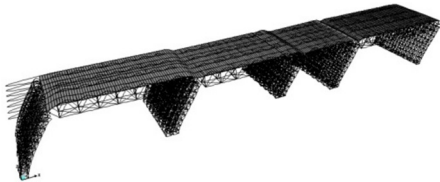
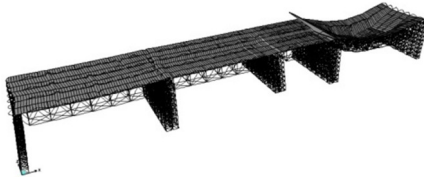
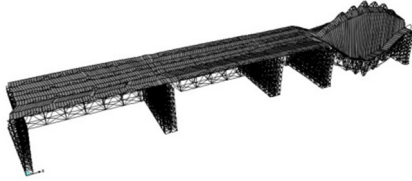
Conforme já citado anteriormente, este modelo deve ser “calibrado” com os resultados experimentais obtidos, a fim de avaliar a representatividade do modelo computacional em relação à estrutura real. Após um inevitável processo de correção das propriedades materiais, condições de vínculo, dentre outros dados, obteve-se uma aderência entre os resultados numéricos e computacionais da frequência natural, evidentemente relacionados ao mesmo modo de vibração, apresentados na Tab. 2.

Observa-se que, com exceção do terceiro modo de vibração – movimento de flexão –, os valores das frequências naturais experimentais são maiores ou praticamente igual às obtidas na análise numérica, indicando que o modelo computacional é um pouco mais flexível que o modelo real. Essa situação indica uma diferença a favor da segurança. Particularmente, para o terceiro modo de vibração, houve a maior discrepância entre os valores experimental e teórico, o que pode ser atribuído a uma falha na caracterização da rigidez das ligações, já que elas estão presentes em um número significativo na estrutura, tornando essa caracterização detalhada muito complexa em função das diversas possibilidades de alternativas.

De todo modo, o comportamento global da estrutura é muito próximo quando considerados os resultados teóricos e experimentais, principalmente pela pequena diferença das frequências naturais em três distintos modos de vibração: o primeiro, o segundo e o quarto.

Assim, a partir de um modelo calibrado, sendo considerado validado e confiável, é possível considerar as diferentes hipóteses de projeto avaliando o comportamento e o desempenho estrutural em análise estática e dinâmica para os carregamentos e combinações de carregamento possíveis, de acordo com as normas técnicas NBR 7188 (2013), NBR 6123 (1988), NBR 8800 (2008) e NBR 8681 (2003).

Tabela 2. Comparação entre as frequências experimental e computacional

Frequência natural (Hz)		Modo de vibração
Experimental	Computacional	
1,64	1,56	 Movimento transversal
1,89	1,90	 Movimento longitudinal
5,94	6,48	 Movimento de flexão
6,83	6,57	 Movimento de torção

5 ANÁLISE ESTÁTICA

Para as análises estáticas foram consideradas, basicamente, três ações: (a) peso próprio, considerado simplesmente pelo produto das seções transversais dos elementos pelo peso específico dos materiais; (b) pedestres, conforme prescrição da NBR 7188 (2013), o que resulta numa carga de 5,0 kN/m²; (c) vento, conforme prescrição da NBR 6123 (1988).

Para estruturas metálicas, os coeficientes de majoração dos esforços e os coeficientes de simultaneidade adotados, conforme a NBR 8681 (2003), são os apresentados na Tab. 3.

Tabela 3 – Coeficientes de segurança – NBR 8681 (2003)

Carregamento	γ_f	ψ_0
Peso próprio	1,25	1,0
Pedestres	1,50	0,7
Vento	1,40	0,6

Processadas as análises para cada um dos carregamentos, todos os elementos estruturais (sejam eles os perfis tubulares, montantes das torres ou perfis das treliças) foram verificados quanto à capacidade resistente de acordo com a NBR 8800 (2008). Todos os elementos apresentaram capacidade resistente adequada às solicitações de cálculo.

6 ANÁLISE DINÂMICA

As passarelas são comumente susceptíveis a níveis de vibrações intensos, oriundos de movimentos sincronizados dos pedestres durante sua travessia, do tráfego de veículos próximos a sua base, do vento, etc. Diversas normas e recomendações técnicas apresentam diretrizes para garantir que o desempenho da estrutura seja adequado e não gere desconforto aos seus usuários. Comprimento máximo de vãos, frequências naturais e valores de aceleração, velocidade e deslocamento são prescritos de maneira a garantir este desempenho satisfatório. Por exemplo, de acordo com os limites prescritos por Sétra (2006) em "Footbridges - Assessment of vibrational behaviour of footbridges under pedestrian loading - Practical Guidelines", para garantir o conforto dos usuários, as acelerações verticais máximas não deverão ultrapassar 2500 mm/s², enquanto as acelerações horizontais não podem superar os 800 mm/s². Contudo, a simulação computacional, considerando o carregamento estático e sua parcela dinâmica é a ferramenta mais eficiente para a previsão dos níveis de vibração, comparando-os com os limites recomendados para o conforto dos usuários e segurança estrutural.

As solicitações dinâmicas correspondentes às atividades das pessoas na passarela foram determinadas por meio do modelo numérico calibrado, ao qual foi aplicado um carregamento de 80 kgf/m² (uma pessoa por m²), referente a uma distância entre pessoas suficiente para o movimento sincronizado de caminhar. Considerou-se o peso médio de 80 kgf/pessoa.

Diferentemente da análise estática apresentada no item anterior, a análise dinâmica deve considerar o movimento das pessoas (além da parcela estática, em si). Dessa maneira, o carregamento dinâmico foi aplicado na estrutura de modo a coincidir com as frequências naturais da estrutura, respeitando a faixa de frequências da atividade humana determinada. A atividade escolhida para esta análise foi o ato de caminhar que Bachmann et al (1995) define como "walking".

A faixa de frequência desta atividade varia entre 1,6 e 2,4 Hz e a excitação dinâmica foi avaliada considerando-se o sincronismo da atividade durante 5 segundos e o coeficiente de amortecimento, para todos os modos de vibração, de 5%.

Os carregamentos estáticos e dinâmicos são representados pela Eq. (1).

$$F = G + \sum_{i=1}^n G \cdot \alpha_i \cdot \sin(2\pi i f_p t - \phi_i) \quad (1)$$

onde:

G = peso das pessoas (valor médio adotado = 80 kgf/pessoa);

α_i = coeficiente de Fourier do i -ésimo harmônico;

i = número do i -ésimo harmônico;

f_p = frequência da atividade;

t = tempo de sincronia da atividade;

ϕ_i = ângulo de fase entre o i -ésimo e o primeiro harmônico.

Os valores utilizados para avaliação das situações estão apresentados na Tab. 4. Procurou-se coincidir as frequências naturais com as frequências das atividades ou algum de seus harmônicos, de forma a tornar mais intenso o efeito dinâmico na estrutura, gerando uma situação crítica. Como a estrutura apresentou modos de vibração próximos, optou-se por avaliar toda a faixa de frequência da atividade, variando a frequência entre 1,6 até 2,4 Hz com variações a cada 0,1 Hz.

Tabela 4 – Coeficiente de Fourier utilizados para a atividade de caminhar

f_p (Hz)	α_1	α_2	α_3	ϕ_2	ϕ_3
1,6	0,3	0,1	0,1	$\pi/2$	$\pi/2$
1,7	0,3	0,1	0,1	$\pi/2$	$\pi/2$
1,8	0,4	0,1	0,1	$\pi/2$	$\pi/2$
1,9	0,4	0,1	0,1	$\pi/2$	$\pi/2$
2,0	0,4	0,1	0,1	$\pi/2$	$\pi/2$
2,1	0,4	0,1	0,1	$\pi/2$	$\pi/2$
2,2	0,5	0,1	0,1	$\pi/2$	$\pi/2$
2,3	0,5	0,1	0,1	$\pi/2$	$\pi/2$
2,4	0,5	0,1	0,1	$\pi/2$	$\pi/2$

Das análises computacionais observa-se que os valores máximos de aceleração resultam significativamente abaixo dos 2500 mm/s², para a direção vertical, ou inferior aos 800 mm/s², para a direção lateral ou radial, assegurando o conforto dos usuários. O nível de velocidade máximo é da ordem de 70 mm/s e o deslocamento máximo da componente dinâmica em RMS foi de 6,1 mm.

7 CONCLUSÕES

Estudou-se neste artigo o comportamento de uma passarela de pedestres (temporária) construída com estrutura metálica tubular, realizando-se análises estática e dinâmica aplicando-se uma metodologia teórico-experimental.

Realizaram-se provas de cargas dinâmicas, por meio de vibrações livres, para que fossem obtidas as propriedades modais da estrutura. Identificou-se a primeira frequência natural, da ordem de 1,6 Hz, como sendo oriunda do movimento transversal; já o movimento vertical é caracterizado pelo valor de 6,0 Hz, aproximadamente. A partir dos dados de projeto e dos valores obtidos experimentalmente, procedeu-se à calibração do modelo, que foi considerada confiável e satisfatória pela proximidade dos valores de frequência natural e modos de vibração obtidos. Ressalta-se que o terceiro modo de vibração indicou a maior diferença entre os valores de frequência natural, obtidos por meio dos ensaios e no modelo computacional, pelo que se sugere que a rigidez das ligações podem ter valores diferentes nos diferentes nós.

Por meio do carregamento estático, aplicado ao modelo computacional calibrado, foi possível observar que os elementos estruturais suportam os esforços solicitantes oriundos do carregamento de pedestres. Já quando se considera o movimento sincronizado das pessoas na passarela, pode-se concluir a adequabilidade do desempenho da estrutura, já que os valores máximos de aceleração não ultrapassam os limites recomendados pela bibliografia. Os valores de velocidade também são inferiores àqueles limitantes à segurança da estrutura. Ainda em relação à análise dinâmica, os resultados obtidos indicam “de baixo à negligenciável” a hipótese da ocorrência de ressonância na estrutura para as situações padrão de carregamento.

Por fim, destaca-se a viabilidade da metodologia empregada para análise deste tipo de estrutura, enfatizando-se que o desenvolvimento de projeto deve sempre levar em consideração, de maneira abrangente e detalhada, não apenas os carregamentos estáticos, mas também a análise dinâmica por meio de modelos computacionais confiáveis.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988. *NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações*. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003. *NBR 8681: Ações e segurança nas estruturas - Procedimento*. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008. *NBR 8800: Projeto e execução de estruturas de aço e de estruturas mistas aço-concreto de edifícios – Procedimento*. Rio de Janeiro.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013. NBR 7188: Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas. Rio de Janeiro.
- BACHMANN, H. et al., 1995. *Vibration Problems in Structures: Practical Guidelines*. Birkhäuser Basel.
- COSTA, M. H. O, SILVA, J. G. S E LIMA, L. R. O., 2012. Análise não linear de sistemas treliçados espaciais utilizados para escoramentos de estruturas de aço e mistas. *Blucher Mechanical Engineering Proceedings* 1, n. 1, p. 4366-4380.
- GERKEN, F. S., 2003. *Perfis tubulares: aspectos arquitetônicos e estruturais*. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Departamento de Engenharia Civil, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto.
- PACKER, J. A., HENDERSON, J. E., 1992. *Design guide for hollow structural section connections*. Canadian Institute of Steel Construction.
- SERVICE D'ÉTUDES TECHNIQUES DES ROUTES ET AUTOROUTES, 2006. Footbridges – Assessment of vibrational behaviour of footbridges under pedestrian loading – Technical Guide. Paris.
- SOEIRO, M. A. R., 2012. *Avaliação da segurança de torres metálicas para escoramentos de estruturas de concreto*. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- WARDENIER, J, et al., 2002. *Hollow sections in structural applications*. Bouwen met Staal.