

MODELAGEM E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DINÂMICO DE UMA PASSARELA LOCALIZADA EM JOÃO PESSOA

MODELING AND DYNAMIC PERFORMANCE EVALUATION OF A FOOTBRIDGE LOCATED IN JOÃO PESSOA

Darcy H. Falcão^a, Andrea Brasiliano^b

^a*Aluna do curso de graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal da Paraíba, Campus I, João Pessoa, Paraíba, Brasil, darcyhannahf@gmail.com*

^b*Professora do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal da Paraíba, Campus I, João Pessoa, Paraíba, Brasil, andreabrasiliano@gmail.com*

Palavras-chave: Passarela, Vibrações, Modelagem de Estruturas, Método dos Elementos Finitos, Análise dinâmica.

Resumo. Os carregamentos em sistemas especiais, como passarelas, caracterizam-se por ter baixas frequências que podem ser próximas às frequências naturais da estrutura, gerando desconforto aos usuários e risco à segurança. A sensibilidade às vibrações em baixas frequências contribui para a necessidade de se estudar o comportamento dinâmico desses sistemas estruturais, para que seu desempenho seja satisfatório. Nesta linha, o trabalho consiste na modelagem e análise dinâmica do modelo numérico, em elementos finitos, de uma passarela localizada na cidade de João Pessoa, utilizando simulações com alguns cenários de carregamento estimados a partir de normas a fim de avaliar o desempenho estrutural dinâmico utilizando o *software* ANSYS 14.5. Para confrontar os resultados da análise no modelo, utilizaram-se os limites normativos para frequências e acelerações. A partir dos resultados obtidos foi possível verificar que o modelo representa bem a estrutura, apresentando frequências de vibração nas direções vertical e lateral compatíveis aos limites considerados. Quanto aos resultados das simulações, verificou-se ainda que a passarela não apresenta problemas de vibrações excessivas na direção vertical para os cenários de carregamento considerados.

Keywords: Footbridge, Vibrations, Structural Modeling, Finite Element Method, Dynamic analysis.

Abstract. Loadings in special systems, such as footbridges, are characterized by low frequencies that can be close to the natural frequencies of the structure, generating discomfort and safety risk for users. Sensitivity to vibrations at low frequencies contributes to the need of studying the dynamic behavior of these structural systems in order to perform satisfactorily. The work consists of the modeling and dynamic analysis of the numerical model, in finite elements, of a footbridge located in the city of João Pessoa, using simulations with some loading scenarios estimated from standards so as to evaluate the dynamic structural performance using the ANSYS 14.5 software. In order to compare the results of the analysis in the model, normative limits of the frequencies and accelerations were used. From the obtained results it was possible to verify that the model represents the structure well, presenting vibration frequencies in the vertical and lateral direction compatible with the limits considered. As for the simulation results, it was verified that the footbridge does not present excessive vibrations problems in the vertical direction for the considered loading scenarios.

1 INTRODUÇÃO

Para realização de um estudo completo das ações solicitadas em estruturas na Engenharia Civil deve-se levar em consideração tanto o comportamento estático, que estuda a resposta da estrutura devido a ações permanentes e constantes no tempo, quanto o comportamento dinâmico, que são respostas que variam com o tempo. As cargas aplicadas na estrutura devido ao andar dos pedestres, por exemplo, não possuem um comportamento estático, variando constantemente ao longo do tempo e espaço. (Peña, 2015)

Apesar disso, o estudo dinâmico nas estruturas era bastante desprezado em seus dimensionamentos, especialmente em passarelas, uma vez que os projetistas recorriam apenas às análises estáticas. Isto pelo fato principalmente da não existência de recursos mais modernos que pudessem calcular as respostas dinâmicas, ou da grande dificuldade em se obter os cálculos necessários para o estudo. Como resultado disso obtinham-se soluções pouco realistas e antieconômicas, resultando em maiores custos e pouco detalhamento do seu comportamento real.

Atualmente, o avanço tecnológico permite a construção de estruturas com maiores dimensões, menor consumo de material, melhor otimização dos custos, materiais de alta resistência, tornando-as mais flexíveis e esbeltas. Essas modificações tornam essencial o estudo dinâmico na avaliação das passarelas, visto que ocasionam menores frequências naturais de vibração, que podem se aproximar da frequência de passo humano e favorecer ao fenômeno de ressonância, tornando-se mais susceptíveis a sofrerem danos pela vibração excessiva, causando desconforto e insegurança aos usuários. Já quanto ao acompanhamento da evolução do comportamento estrutural, a análise dinâmica é fundamental para caracterizar convenientemente alguns dos fenômenos que originam as ações dinâmicas como a ocorrência de abalos sísmicos que vêm provocando danos estruturais em edifícios, pontes, viadutos. (Mendes, 2012)

Dessa forma, foram obtidos a partir do modelo computacional de uma passarela, os valores característicos das frequências naturais, tanto lateral quanto vertical, e suas acelerações quando submetidas às ações de carregamentos induzidas por pedestres, estimadas pelas normas. Através da obtenção desses parâmetros, foi possível a realização da análise dinâmica, avaliando os resultados com os métodos e limites estabelecidos nas normas em vigor, verificando sua viabilidade e segurança aos usuários.

2 DESCRIÇÃO DO MODELO DA PASSARELA

O sistema estrutural escolhido para a realização do estudo se encontra localizado na Av. Pedro II, em João Pessoa-PB, conforme Figura 1.



Figura 1 - Passarela de pedestres escolhida para o estudo.

Esse modelo consiste em uma passarela mista composta de tabuleiro e coberta de concreto armado apoiado lateralmente em duas vigas treliçadas metálicas. As vigas treliçadas metálicas têm como função principal transferir as cargas aplicadas no tabuleiro para os apoios, formando um sistema misto de interação e se apoiam em quatro pilares, de oito que sustentam a estrutura, por meio de uma borracha de Neoprene fretado e quatro chapas de aço. Já nos outros quatro pilares, além do aparelho de apoio de borracha e aço, há uma viga de seção I. As características geométricas e dos materiais utilizadas foram baseadas no projeto da estrutura, obtido junto à empresa que realizou o projeto.

3 FERRAMENTA COMPUTACIONAL

Para a discretização do modelo computacional tridimensional da passarela e realização das análises dinâmicas necessárias para o estudo, foi utilizado o programa de análise estrutural ANSYS 14.5. O modelo é composto por vigas, tabuleiros, pilares e aparelhos de apoio conforme os tipos de elementos disponíveis no *software*, respeitando suas geometrias e propriedades. O *software* ANSYS se baseia principalmente no método dos elementos finitos, em que o domínio de integração é dividido em sub-regiões, ou elementos finitos, que por discretizar o modelo em partes menores, torna as análises mais precisas, além de permitir a utilização de vários tipos de materiais com inclusão de não-linearidades, diferentes tipos de carregamentos e condições de contorno.

3.1 Construção do modelo

Para a estrutura, foram considerados quatro tipos de elementos para descrever cada componente da passarela. As barras treliçadas de aço da passarela foram representadas por elementos finitos de viga tridimensionais BEAM188. As vigas de apoio entre os aparelhos de Neoprene fretado e alguns pilares também foram representados por esse elemento. Porém, foram utilizadas as características geométricas da seção I, conforme [Figura 2](#).

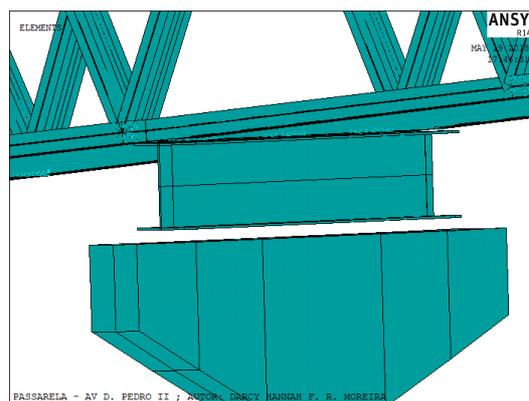


Figura 2 - Detalhe da viga de apoio (viga I) entre o pilar e a estrutura da passarela.

A laje e a cobertura de concreto foram simuladas por meio de elementos de casca SHELL181. A [Figura 3](#) apresenta o detalhe da modelagem das vigas e das placas de concreto por meio dos elementos SHELL181 e BEAM188.

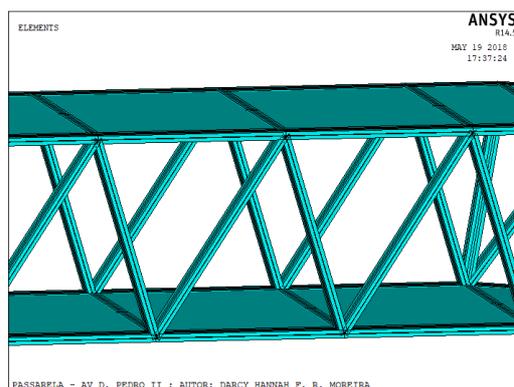


Figura 3 - Discretização de parte da estrutura treliçada, por meio do elemento de viga BEAM188 e placas de cobertura e piso, com o elemento de casca SHELL181.

Para a criação dos pilares, em virtude da variação não uniforme da seção transversal, ficou inviável a utilização do elemento de superfície SHELL 181, já que esse tipo de elemento só admite seção uniforme. Dessa forma, utilizou-se o elemento finito SOLID 185, que representa a modelagem de estruturas sólidas em 3 dimensões, bastante conveniente na representação do pilar e foi considerado o engastamento total da base desses elementos, simulando a fundação da estrutura.

Já para a simulação da semirrigidez das ligações laje-coluna e laje-viga de Neoprene foi empregado o elemento COMBIN14. Esse elemento funciona como uma mola-amortecedor uniaxial com capacidade de torção, conforme ilustrado na Figura 4.

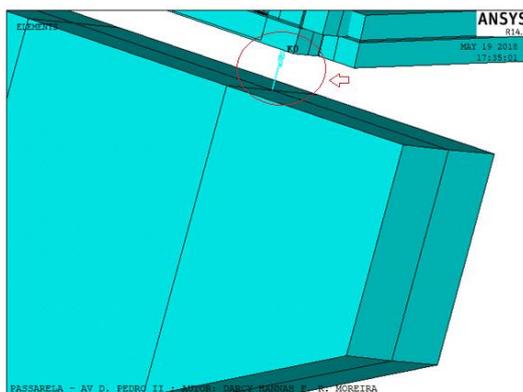


Figura 4 - Detalhe da indicação da conexão entre o ponto do pilar, discretizado como o elemento SOLID 185, e o ponto da estrutura ligados pelo elemento de mola COMBIN14.

3.2 Tipos de análise

Por meio do *software* ANSYS 14.5 foram utilizadas as análises modal e dinâmica transiente para a estrutura.

A partir da análise modal, foram determinadas as características dinâmicas da estrutura (frequências naturais e os modos de vibrações). Os modos de vibrações são configurações do sistema segundo o qual este pode oscilar, mantendo-se constante a relação entre os deslocamentos dos diversos pontos da estrutura. (Clough e Penzien, 1993)

Já a análise dinâmica transiente é uma técnica utilizada para determinar a resposta dinâmica de uma estrutura sob ação de carregamento modificado em função do tempo (cargas móveis). Através desta análise, podem-se determinar os deslocamentos, tensões, deformações e acelerações dependentes do tempo de acordo com a variação da carga móvel ao qual foi

submetida a estrutura. Esta análise pode ser linear ou não-linear, diferentemente da análise modal. Optou-se por utilizar a análise linear nesse trabalho, já que a análise modal também foi feita dessa forma.

A equação básica do movimento resolvida pelo *software* durante a análise transiente está representada pela Eq. (1).

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

Onde $[M]$, $[C]$ e $[K]$ representam as matrizes de massa, amortecimento e rigidez, respectivamente, $\{\ddot{u}\}$, $\{\dot{u}\}$ e $\{u\}$ representam os vetores aceleração, velocidade e deslocamento nodais e $\{F(t)\}$ representa o vetor de carregamento da estrutura em função do tempo.

Para aplicação do carregamento foi necessário dividir as funções representativas antes de inseri-las, que foram definidas com base nas normas utilizadas. A Figura 5 exemplifica como essa divisão foi feita: cada número (1, 2, 3, 4, 5) corresponde a um par ordenado (tempo, carga) que deve ser um “passo de carga” a ser definido para a função.

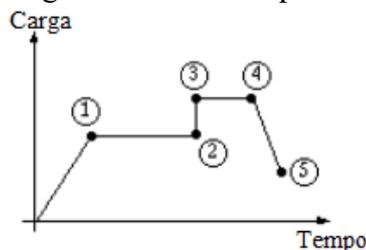


Figura 5 - Esquema dos “passos de carga” que devem ser definidos na função de carregamento no tempo.

Após a definição da função, aplica-se o carregamento em cada nó (foram escolhidos os nós centrais longitudinais) e é feita a análise, podendo-se extrair as acelerações e os deslocamentos nos nós desejados.

4 CENÁRIOS DE CARREGAMENTO

Para os três cenários de carregamento considerados, o caminhar do pedestre na estrutura foi simulado no trecho do vão central da passarela, que totaliza 26,42 metros, por ser o maior vão e por apresentar respostas mais significativas em termos de vibrações.

Com a finalidade de simular o estado de ressonância, levou-se em consideração o primeiro modo de vibração vertical, com frequência natural de 5,77 Hz, estimando a frequência de passo em 1,9 Hz, que de acordo com Bachmann (1987) corresponde a uma caminhada de lenta a normal.

4.1 Primeiro cenário – Guia Sétra (2006)

O primeiro cenário de carregamento foi estimado pelo guia Sétra (2006). A carga deste modelo foi aplicada durante 20 segundos, levando em consideração a frequência de passo atribuída de 1,9 Hz e a velocidade média em caminhada normal do pedestre de 1,5 m/s, de acordo com Bachmann (1987), sobre toda a superfície trafegável, nas três direções propostas pelo Guia (vertical, horizontal-longitudinal e horizontal-transversal). Não houve variação espacial no decorrer do tempo, a fim de simular várias pessoas caminhando juntas, correspondendo ao efeito de multidão. Como sugerido, cada carga correspondente à sua respectiva direção foi aplicada individualmente, sem superposição de efeitos. As Eq. (2), (3) e (4) descrevem as representações do carregamento, $F(t)$, em função do tempo, t , para as

direções vertical, horizontal-longitudinal e horizontal-transversal, respectivamente.

$$F(t)_v=4,2845.\cos(30,16.t) \quad (2)$$

$$F(t)_L=1,947.\cos(15,08.t) \quad (3)$$

$$F(t)_T=0,494 .\cos(30,16.t) \quad (4)$$

4.2 Segundo e terceiro cenários de carregamento - ISO 10137 (2007)

Para o segundo e terceiro cenários de carregamento, as ações de pedestres foram representadas através de séries de Fourier propostas pela ISO 10137 (2007), considerando os três primeiros harmônicos da série.

Foram utilizadas uma frequência de passo de 1,9 Hz e uma velocidade de passo de 1,5 m/s), estimando uma caminhada de lenta a normal, conforme recomendado por [Bachmann \(1987\)](#) e estabelecendo o estado de ressonância no terceiro harmônico (5,7Hz). Além disso, considerou-se o peso do pedestre de 800 N e o tempo total de travessia de 17,78 segundos, estimado para a travessia completa dos pedestres pelo vão central da passarela em função da frequência e velocidade de passo adotadas. A função de carga está apresentada na Eq. (5).

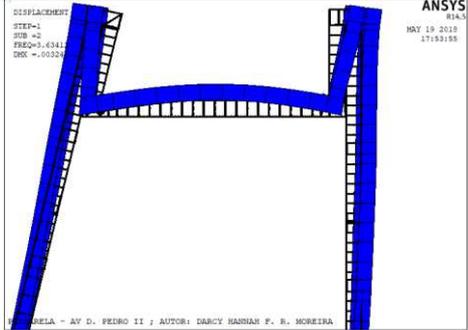
$$F(t) = 800.(1+(0.33.\text{sen}(2.\pi.1,9.t)+ (0,1.\text{sen}(2.\pi.3,4.t - \pi/2))+ (0.06.\text{sen}(2.\pi.5,7.t - \pi/2)))(5)$$

A variação do carregamento foi estimada com a aplicação do carregamento $F(t)$ na estrutura com uma velocidade constante, variando no tempo e no espaço. À medida que os pedestres vão caminhando ao longo da passarela, diversas cargas vão sendo aplicadas e desaplicadas, até que os mesmos terminem o trajeto. O modelo foi aplicado no segundo cenário simulando o caminhar de 1 pedestre e no terceiro cenário estimando 3 pedestres trafegando lado a lado sobre todo o vão central, movendo-se ao longo da passarela. Segundo [Peña \(2015\)](#), este representa o pior caso de carregamento a ser analisado, tal como o mais suscetível de ocorrer em uma estrutura destinada a receber pedestres.

Assim, após aplicar os modelos descritos, pôde-se extrair os resultados de acelerações e deslocamentos da passarela.

5 RESULTADOS

Após a construção do modelo, foram extraídos o primeiro modo de vibração lateral e os dois primeiros modos de vibração vertical, conforme apresentados na [Tabela 1](#).

Modo de vibração	Frequências obtidas na análise modal (Hz)	Configuração deformada da estrutura (em azul)
Primeiro modo de vibração lateral	3,634	 <p>Vista superior</p>

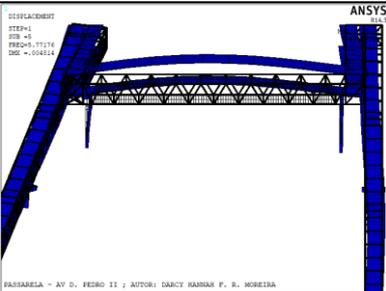
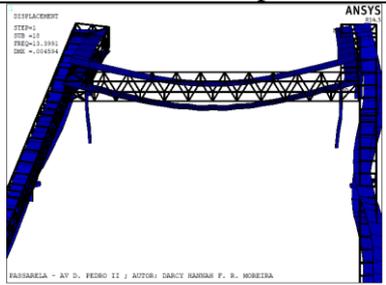
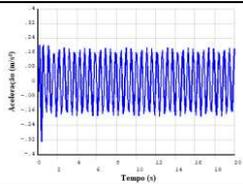
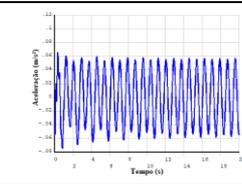
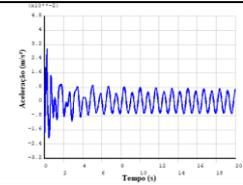
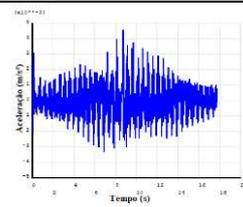
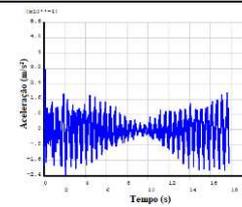
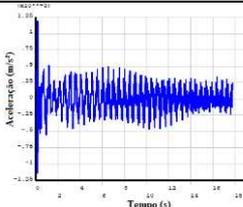
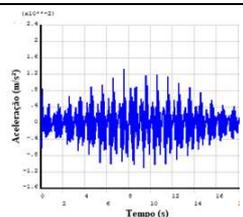
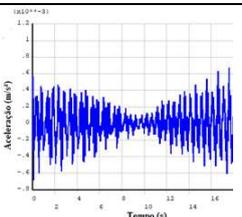
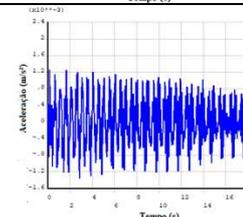
<p>Primeiro modo de vibração vertical</p>	<p>5,772</p>	 <p>Vista frontal-superior</p>
<p>Segundo modo de vibração vertical</p>	<p>13,39</p>	 <p>Vista frontal-superior</p>

Tabela 1 - Freqüências e configurações deformadas para cada modo de vibração extraídos através da análise modal da estrutura.

Já com relação à análise transiente, adotou-se um intervalo de tempo para a integração das equações de movimento igual a 10^{-3} segundos ($\Delta t = 0,001$ segundos). Este valor corresponderá ao passo de tempo adotado no método de integração de Newmark aplicado pelo *software* para a resolução das equações de movimento.

Para os cenários considerados foram obtidas as respostas de acelerações e deslocamentos para cada direção analisada apresentadas na Tabela 2. As respostas foram extraídas no nó central da passarela, por ser o mais vulnerável aos efeitos de deslocamentos e acelerações uma vez que está localizado no meio do vão.

	Cenário	Direção vertical	Direção horizontal-longitudinal	Direção horizontal-transversal
<p>Acelerações</p>	<p>1</p>			
	<p>2</p>			
	<p>3</p>			

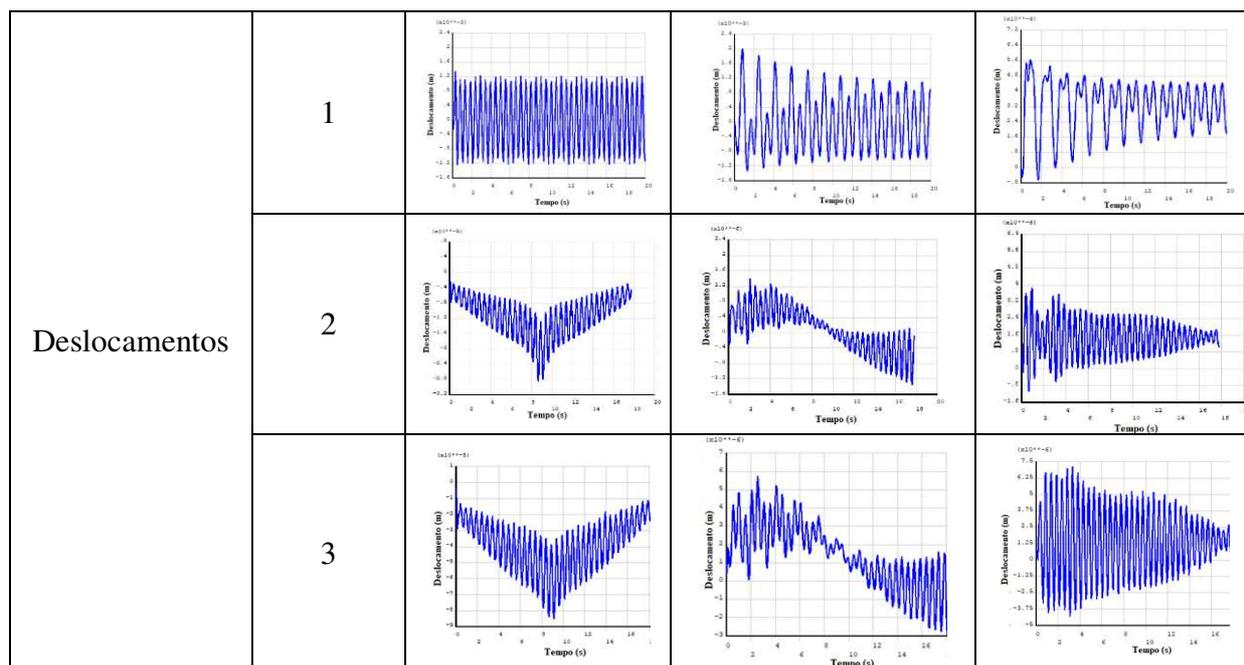


Tabela 2 - Respostas de acelerações e deslocamentos para cada direção analisada referentes aos três cenários estudados

6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Com relação à etapa da análise modal, os resultados obtidos mostraram que a passarela atende aos critérios relativos à frequência natural mínima na direção vertical, conforme estabelecem algumas normas, de acordo com a [Figura 6](#).

Na direção horizontal, a passarela apresentou frequência no primeiro modo de vibração de 3,63 Hz, também superior ao mínimo estabelecido na [EUROCODE 1 \(2005\)](#) e [EUROCODE 5/2\(2004\)](#) de 2,5 Hz. Dentre as normas analisadas, essas foram as únicas que mencionaram valores para a frequência horizontal.

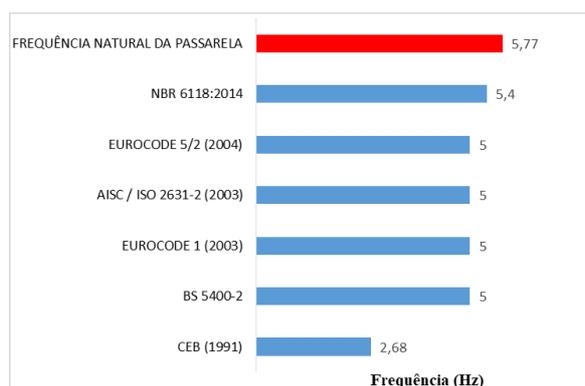


Figura 6 - Comparação entre os limites de serviço e as frequências naturais de excitação vertical da estrutura.

Com relação à etapa da análise transiente, os resultados mais significativos de acelerações ocorreram no cenário de carregamento 1, quando a estrutura foi submetida à carga de multidão, apresentando aceleração máxima na direção vertical de $0,327 \text{ m/s}^2$. Além disso, é possível verificar que a passarela apresentou níveis mais elevados de aceleração para a direção vertical, conforme resultados da [Tabela 3](#), o que reflete que as vibrações mais perceptíveis estão presentes nessa direção.

Parâmetro	Direção	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Aceleração máxima (m/s ²)	Vertical	0,327	$4,5 \times 10^{-3}$	$1,32 \times 10^{-2}$
	Longitudinal	$7,5 \times 10^{-2}$	$3,2 \times 10^{-4}$	$6,7 \times 10^{-4}$
	Transversal	$2,96 \times 10^{-2}$	$1,2 \times 10^{-3}$	$1,26 \times 10^{-3}$
Deslocamento máximo (mm)	Vertical	1,345	$2,87 \times 10^{-2}$	$8,9 \times 10^{-2}$
	Longitudinal	2,00	$3,85 \times 10^{-3}$	$2,96 \times 10^{-3}$
	Transversal	0,56	$1,39 \times 10^{-3}$	$4,29 \times 10^{-3}$

Tabela 3 – Valores máximos para as acelerações e deslocamentos em cada direção considerada referente aos três cenários analisados.

Comparando os resultados com alguns critérios de normas e guias de projetos, as acelerações verticais e horizontais obtidas se enquadraram aos limites estabelecidos em todos os cenários de carregamento. Com relação às acelerações nas direções horizontais, os valores encontrados foram da ordem de 10^{-2} e 10^{-4} , pouco significativos frente aos limites normativos que apresentavam valores bastantes superiores, entre 0,2 e 0,5 m/s².

Já em termos de aceleração na direção vertical, o cenário 1 foi o mais expressivo e apesar de se tratar de um cenário pouco provável, visto que a passarela usualmente não apresenta carregamentos de multidão, a aceleração obtida de 0,327 m/s² esteve em consonância com os limites analisados. Da mesma forma, os cenários 2 e 3 não apresentaram acelerações significativas que possam causar desconforto ou comprometa a segurança dos usuários, pois seus valores foram muito inferiores aos limites, conforme [Figura 7](#).

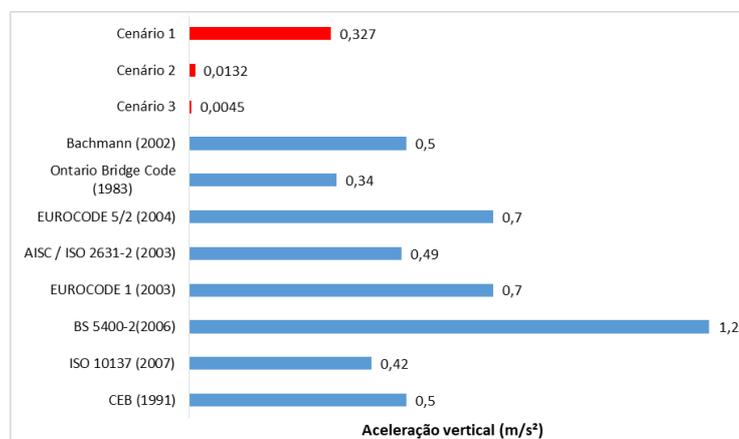


Figura 7 - Comparação entre os limites de serviço e as acelerações da estrutura obtidas a partir do *software*.

7 CONCLUSÕES

A partir do modelo da passarela localizada em João Pessoa desenvolvido no *software* ANSYS 14.5 puderam-se obter os parâmetros modais (frequências e modos de vibração correspondentes), e as respostas de aceleração e deslocamento durante a análise dinâmica. A estrutura analisada mostrou ter um funcionamento satisfatório quanto ao conforto e segurança dos usuários em virtude dos baixos níveis de vibração e aceleração apresentados, que atenderam aos critérios estabelecidos nas normas avaliadas, mesmo quando submetidas a situações extremas e pouco prováveis, como o carregamento simulando multidão (Cenário 1).

Foram encontrados resultados para as frequências naturais, tanto na direção vertical (5,77 Hz) quanto na horizontal (3,63 Hz), superiores aos valores críticos de perigo de ressonância, que correspondem aos valores abaixo de 5 Hz para a direção vertical e 2,5 Hz para a direção

horizontal, conforme sugerido na literatura. Este fato corrobora sua rigidez, por se tratar de uma estrutura pesada, devido à composição de seus materiais, como a coberta e o piso compostos de concreto, que a torna robusta, apresentando conforto e segurança para os usuários.

REFERÊNCIAS

- Bachmann, H., and Ammann, W., Vibrations in structures induced by man and machines. *IABSE Structural Engineering Document 3E, International Association for Bridges and Structural Engineering*, 1987.
- Clough, R. W., and Penzien, J., Dynamics of structures. *Civil Engineering* (p. 752), 2003.
- EUROCODE 1, Actions on Structures – Part 2: Traffic Loads on Bridges. *European Standard*, 2003.
- EUROCODE 5, Design of Timber Structures – Part 1-2: Bridges. *European Standard*, 2004.
- ISO 10137, Bases for Design of Structures – Serviceability of buildings and walkways against vibrations, 2007.
- Mendes, P., Dinâmica das Estruturas. *Instituto Superior de Engenharia de Lisboa – Área Departamental de Engenharia Civil*, 2012.
- Peña, W. D. L., Modelagem do caminhar humano e avaliação do conforto humano de passarelas de pedestres. *Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Estado do Rio de Janeiro*, 2015.
- Sétra/AFCG, Footbridges – Assessment of vibrational behavior of footbridges under pedestrian loading – Practical Guidelines. *França*, 2006.