

Recebido: 09/04/2019 Aprovado: 13/10/2020

ANÁLISE DE VIBRAÇÕES DE PASSARELA DE PEDESTRES DEVIDO À MOVIMENTAÇÃO HUMANA

GONÇALVES P.C¹, GRANATO E.C¹, SANTOS V.C^{1*}, GUIMARÃES A.G¹

Resumo: A otimização de projetos estruturas de passarelas de pedestres leva a utilização de estruturas esbeltas e flexíveis, reduzindo a rigidez e massa da estrutura. Isto acaba resultando em estruturas com baixas frequências naturais, que são mais sensíveis a carregamentos dinâmicos. Estudos dinâmicos comprovam o atendimento ou não a critérios do estado limite de serviço relativos à vibração, e não são contemplados em uma análise estática simplificada. Ações humanas comuns como caminhar, correr e pular são carregamentos aos quais uma passarela estará sujeita durante sua vida útil e devem ser considerados na etapa de projeto. O presente trabalho visa estudar o comportamento teórico de uma passarela de pedestres metálica existente no município de Itajubá-MG, sujeita a carregamentos dinâmicos que representem a movimentação de pedestres avaliando a sua performance em relação a níveis de conforto e serviço de acordo com normas brasileiras e internacionais. A passarela foi modelada no software SAP2000® e foram desenvolvidos estudos estáticos e estudos dinâmicos de vibração livre e forçada. Por meio das análises estáticas foram obtidos valores de deformação e carregamento para efeito de comparação. O estudo de vibração livre permitiu determinar o comportamento natural da passarela e suas frequências naturais. Ao submeter o carregamento dinâmico de pedestres foi obtida uma resposta em termos de vibração da passarela. Os resultados obtidos permitiram verificar que a passarela atende aos critérios de serviço propostos devido a sua elevada rigidez, oriunda de perfis robustos e estrutura treliçada. O conforto dos usuários é atendido nas situações comuns de uso e é satisfatório mesmo para caso de vandalismo.

Palavras-chave: vibração induzida pelo homem, vibração, dinâmica de estruturas, passarela.

* Corresponding author. valquiria.santos@gmail.com (SANTOS V.C).UNIFEI - Universidade Federal de Itajubá, IRN- Instituto de Recursos Naturais, Av. BPS, 1303, Bairro Pinheirinho, Itajubá – MG, Brasil.

1. INTRODUÇÃO

Na engenharia civil, as estruturas são projetadas para resistirem tipicamente a cargas estáticas. Entretanto, em algumas situações também devem ser analisadas cargas dinâmicas, em casos como: vento, sismos, explosões e movimentação de tráfego.

Há também uma tendência atualmente de reduções de materiais utilizados nas estruturas modernas, produzindo sistemas estruturais leves, esbeltos e flexíveis. Entretanto, isto pode deixá-las mais suscetíveis aos carregamentos dinâmicos, com frequências naturais mais próximas das frequências de excitação. As passarelas de pedestres, objeto de estudo neste trabalho, são estruturas particularmente sujeitas a esta natureza de carga, já que as cargas estáticas de uso são baixas, tornando a estrutura muito leve e esbelta.

É comum encontrar na literatura casos de problemas com relação aos carregamentos dinâmicos. Um caso notório em que a vibração devido à movimentação humana foi nociva a uma passarela foi o da *London Millennium Footbridge*, em Londres. No dia de sua inauguração, foram percebidas grandes movimentações laterais do tabuleiro, resultantes da movimentação dos pedestres. Dallard *et al* (2001) investigaram em seu artigo os motivos e determinam que a passarela apresentava frequência natural de vibração lateral de 1,3 Hz, coincidente com o valor comum de solicitação para casos de movimentação de pedestres.

Brownjohn *et al* (2004) avaliaram uma passarela no aeroporto de Singapura, encontrando que a adição de elementos não estruturais reduziram as frequências naturais da estrutura e também alteraram o seu valor de amortecimento, inicialmente proposto de 0,2% e definido posteriormente como 0,4%. A análise numérica em elementos finitos, confirmada posteriormente por análises experimentais, indicou que a passarela apresentava vibrações fora dos limites de serviço, sendo necessária a instalação de métodos de mitigação de vibração.

Blanco *et al* (2005) estudaram uma passarela com vão de 202m em Kortrijk, na Bélgica, encontrando valores de aceleração que excederam as recomendações do código BS 5400. Além disso, a partir da análise modal foi determinado que solicitações na região de 1,68 a 1,75 Hz causariam desconforto aos pedestres.

Pereira (2017) estudou duas passarelas com sistemas estruturais distintos, observando que o sistema treliçado apresenta vibrações de ordem inferior ao sistema pênsil, embora ambos estejam sujeitos à vibração induzida pelos pedestres.

Santos (2011) realizou uma análise de uma passarela em Brasília e fez uma análise paramétrica para a estrutura modular, observando que com o incremento do vão a passarela torna-se mais suscetível às vibrações em termos de frequências naturais. A autora também avaliou a abrangência das normas atuais e comentou sobre as normas mais antigas, que apresentam critérios mais conservadores.

Van Nimmen *et al* (2014) expuseram uma revisão dos códigos normativos atuais para avaliação da efetividade dos cenários de cálculo para a análise dinâmica e realizaram esta análise para oito diferentes passarelas. Os autores concluem que mesmo com uma análise aprofundada, é esperado que as frequências naturais apresentassem desvio de até 10% e propõe uma modificação nos parâmetros de carregamento para considerar as incertezas na definição das frequências naturais na fase de projeto.

Zivanovic (2012) apresentou análises experimentais de uma passarela e concluiu que modelos considerados para pisos rígidos não são perfeitamente adequados para representação em passarelas, e que a presença de pedestres na passarela pode afetar o amortecimento da estrutura. Assim, pode-se concluir que existem diversos parâmetros que podem ser melhorados quando se considera a análise dinâmica.

Neste contexto, verifica-se que os estudos dinâmicos aplicados às passarelas de pedestres ainda não se encontram consolidados, justificando o presente trabalho, que buscou estudar as normas nacionais e internacionais aplicadas ao tema e verificá-las para um caso real.

2. ANÁLISE DO CONFORTO E LIMITES DE UTILIZAÇÃO PARA PASSARELAS

A função da análise de conforto de um piso é garantir que as vibrações nesta estrutura apresentem baixas magnitudes. Feldmann *et al* (2009) cita, entre outros fatores, que a sensação de vibração sentida pelo usuário também varia de acordo com a frequência de excitação.

As normas e/ou códigos nacionais e internacionais procuram estabelecer parâmetros mínimos para verificar os critérios de conforto em projetos de passarelas. As recomendações identificadas nas normas brasileiras com relação às frequências em projetos estruturais estão resumidamente apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Critérios e limites recomendados pelas normas brasileiras.

Norma	Frequências Limites
ABNT NBR 8800:2008 – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios	Pessoas caminhando regularmente: $f_0 \geq 4 \text{ Hz}$ Pessoas pulando ou dançando: $f_0 \geq 6 \text{ Hz}$ Para qualquer caso: $f_0 \geq 3 \text{ Hz}$
ABNT NBR 7190:1997 – Projeto de estrutura de madeira	Frequência limite para vibrações em pisos sob caminhar naturalmente de pessoas: $f_0 \geq 4 \text{ Hz}$
ABNT NBR 7188:2013 – Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas.	Não apresenta critérios para limites de vibrações. Trata das cargas móveis em passarelas com natureza estática, por meio de duas classes de cargas.
ABNT NBR 6118:2014 – Projeto de estruturas de concreto – Procedimento	Frequência natural superior à frequência crítica: $f > 1,2 f_{crit}$, com f_{crit} , estimado em 4,5 Hz.

Destaca-se que nenhuma norma brasileira apresenta os critérios de conforto do pedestre em passarelas, entendendo ser uma deficiência em termos de análise dinâmica, especialmente para estudos de vibração em casos de movimentação de passantes.

Então, com o propósito de fundamentar de maneira mais adequada o estudo dos critérios de segurança e conforto de pedestre em passarelas, o presente trabalho investigou também os limites recomendados em normas internacionais, os quais são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Critérios e limites recomendados pelas normas internacionais

Norma (Origem)	Limites
Bro2004 (Suíça)	Frequência crítica: $\leq 3,5 \text{ Hz}$
AASHTO:2009 – Guide specification for design of pedestrian bridges (Estados Unidos da América)	Carga dinâmica representada com simplificação estática. Frequência natural como limitação de vibrações críticas: Vertical: $f_{0,v} = 3 \text{ Hz}$ Horizontal: $f_{0,h} = 1,3 \text{ Hz}$
Eurocode - EN1991:2003 – Actions on structures – Part 2: Traffic loads on bridges (União Europeia)	Carga dinâmica representada com simplificação estática. Intervalos de frequência limite: Vibração: 1 a 3 Hz Vibração horizontal: 0,5 a 1,5 Hz

Como é possível perceber, vários códigos colocam critérios de segurança e limite de serviço das passarelas apenas estabelecendo faixas de risco a serem evitadas em termos de

frequência, porém, é importante uma análise criteriosa no sentido de avaliar as acelerações nas diversas faixas de frequência quando submetida à movimentação humana.

A norma europeia (EN1990, 2002) recomenda valores de aceleração máxima em qualquer parte do tabuleiro, para o caso de 8 a 15 pessoas caminhando sobre a passarela em situação normal, conforme Tabela 3.

Tabela 3 – Aceleração máxima em passarelas no Eurocode (2002)

Tipo de Vibração	Aceleração Limite
Vertical	0,7 m/s ²
Horizontal para uso normal	0,2 m/s ²
Horizontal para multidão	0,4 m/s ²

Haukson (2005) apresentou um estudo comparativo entre códigos europeus das faixas de risco para acelerações verticais nas passarelas em função da frequência, cujos resultados são mostrados Figura 1.

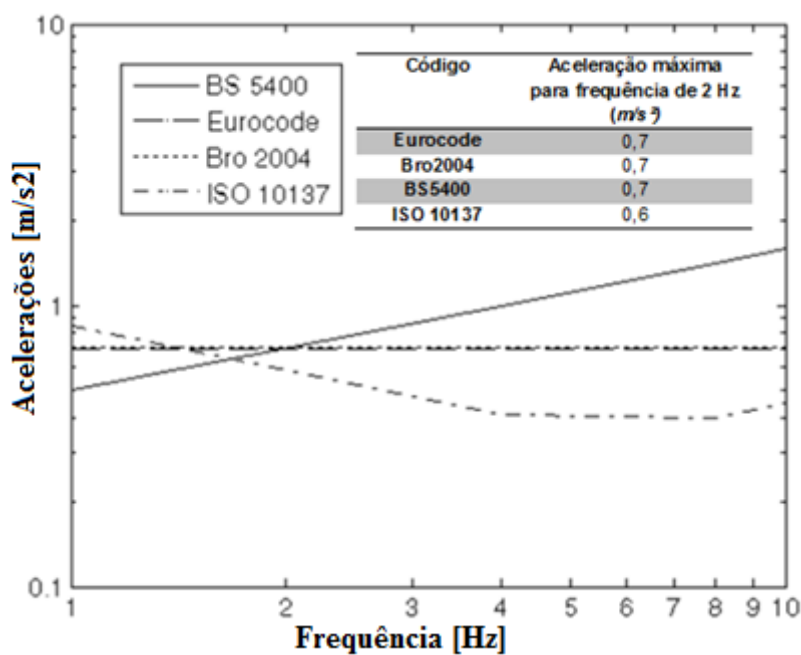


Figura 1 – Acelerações verticais nas passarelas (modificado de Haukson, 2005)

Para as normas Eurocode e Bro2004 o valor limite da aceleração é independente da frequência, sendo o recomendado igual a 0,7 m/s². Já para a ISO 10137, o valor máximo

ocorre a baixas frequências. Para frequência de 1 *Hz* o valor seria de aproximadamente 0,81 *m/s*². O BS5400 tem um valor que aumenta com a frequência, logo para o valor de 10 *Hz* a aceleração seria de 1,7 *m/s*².

3. ESTUDO DE CASO – PASSARELA DE ITAJUBÁ/MG

Com o objetivo de investigar os critérios estabelecidos nas normas nacionais e internacionais, o presente trabalho analisou o comportamento da estrutura de uma passarela existente na cidade de Itajubá/MG quanto ao seu desempenho em relação aos níveis de conforto e serviço, por meio de análise estática e dinâmica.

Para isso, foi realizada a modelagem numérica a partir do projeto executivo fornecido pela Prefeitura Municipal de Itajubá, o qual pode ser acessado pelo link: bit.ly/Projeto_Passarela. Além disso, foi executada uma criteriosa inspeção in loco na passarela para averiguação da geometria dos elementos utilizados na estrutura (Tabela 4). A passarela estudada liga as ruas Aurílio Lopes Ramos e Padre José Joaquim Santana, transpondo o rio Sapucaí, no centro da cidade de Itajubá/MG (Figura 2).



Figura 2 – Vista da passarela a partir da Rua Aurílio Lopes Ramos.

Tabela 4 – Características dos elementos da estrutura da passarela

Elemento		Descrição perfil
Pilares		CS 250 x 63 mm
Estrutura treliçada	Banzos superior	W 150 x 18 mm
	Banzos inferior	W 200 x 19 mm
	Montantes e diagonais	I 76,2 x 8,45
Contraventamento piso		2 L ½" x ¼"
Barra dos estaios		Tubo 76 x 4,76 mm
Placa de base da fundação		Esp.# 30mm
Perfis laminados classe ASTM A 572 Grau 50		

3.1 Modelagem Numérica

As informações obtidas no projeto estrutural e na vistoria da passarela permitiram a modelagem da estrutura no software SAP2000® (Figura 3). Na discretização do modelo empregaram-se elementos de barra (Tipo Frame) para os pilares de apoio e para os perfis metálicos que compõem a estrutura treliçada. O piso da passarela, composto por chapa tipo xadrez, foi modelado com elemento tipo casca (Thin Shell). Para reproduzir a passarela da forma mais fiel quanto possível, as ligações entre as barras da treliça da estrutura principal e da treliça com os pilares de apoio foram consideradas contínuas e rígidas.

O piso da passarela foi discretizado com uma malha de elementos finitos de lados iguais de 3,18mm, apoiado em seu contorno pelos banzos inferiores da treliça e pelas barras transversais ligadas rigidamente aos banzos inferiores. Os banzos inferiores das treliças foram considerados apoiados rigidamente em pilaretes localizados nas extremidades dos lances da passarela. A estrutura do vão central da passarela foi considerada apoiada por duas torres estaiadas. Os cabos das estruturas estaiadas foram considerados com ligação articuladas nas extremidades, submetidos apenas a esforços axiais de tração. As ligações dos pilares das torres e dos pilaretes foram considerados rígidas com as placas de base na fundação, visto que na visita in loco constatou-se que a ligação da estrutura na base da fundação foi feita por chapas de mesa e de alma parafusada.

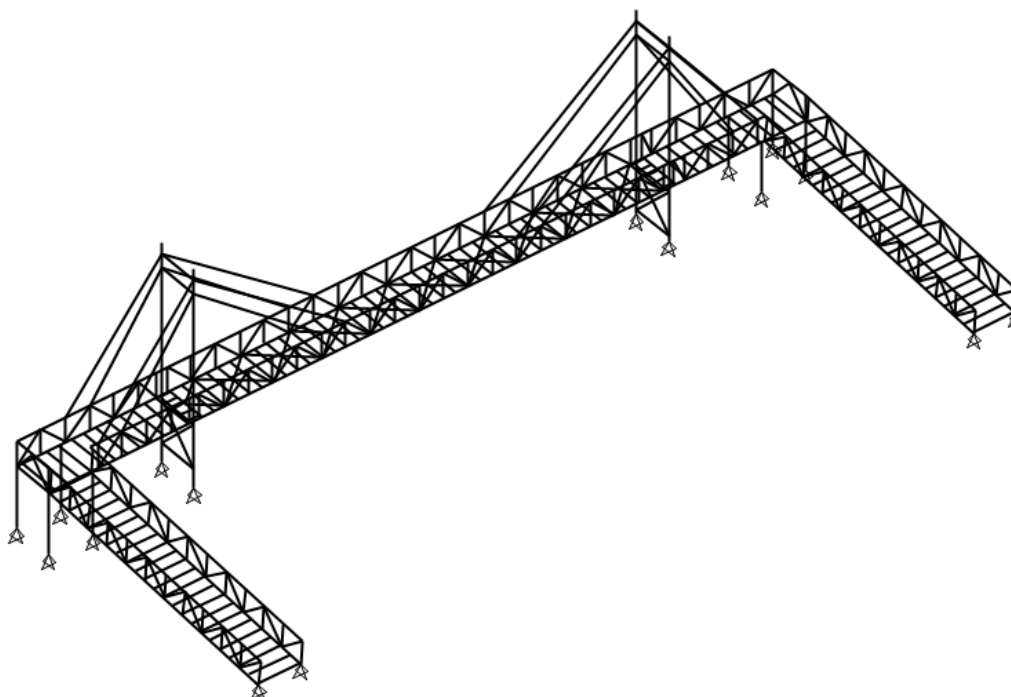


Figura 3 – Modelo unifilar tridimensional da passarela.

3.2 Descrição Analítica do Carregamento Dinâmico

A análise dinâmica da passarela considerou a movimentação humana a partir dos estudos de Bachmann e Ammann (1987). Segundo estes autores, a função que correlaciona a carga em função do tempo na ação de caminhar é dada pela Equação (1).

$$F_p(t) = G + \Delta G_1 \cdot \text{sen}(2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot t) + \Delta G_2 \cdot \text{sen}(4 \cdot \pi \cdot f_s \cdot t - \varphi_2) + \Delta G_3 \cdot \text{sen}(6 \cdot \pi \cdot f_s \cdot t - \varphi_3) \quad (1)$$

Onde: G o peso do indivíduo (usualmente 800N); ΔG_1 componente do carregamento no primeiro harmônico; ΔG_2 componente do carregamento no segundo harmônico; ΔG_3 componente do carregamento no terceiro harmônico; f_s a frequência de passada; φ_2 o ângulo de fase do segundo harmônico relativo ao primeiro e φ_3 o ângulo de fase do terceiro harmônico relativo ao primeiro.

Do mesmo modo, pode-se descrever a ação de correr ou pular a partir da Equação (2).

$$F_p(t) = G + \sum_{n=0}^{\infty} \Delta G_n \cdot \cos \left[2\pi \cdot n \cdot f_s \cdot \left(\frac{t - t_p}{2n} \right) \right] \quad (2)$$

Sendo: G o peso da pessoa; ΔG_n a amplitude do n ésimo harmônico; n o número do harmônico; f_s a frequência da passada e t_p a duração do contato.

Utilizando as Equações (1) e (2) para determinação do fator de impacto dinâmico para as movimentações humanas (caminhar, correr e pular) e esboçando-as em função do tempo, tem-se a Figura 4.

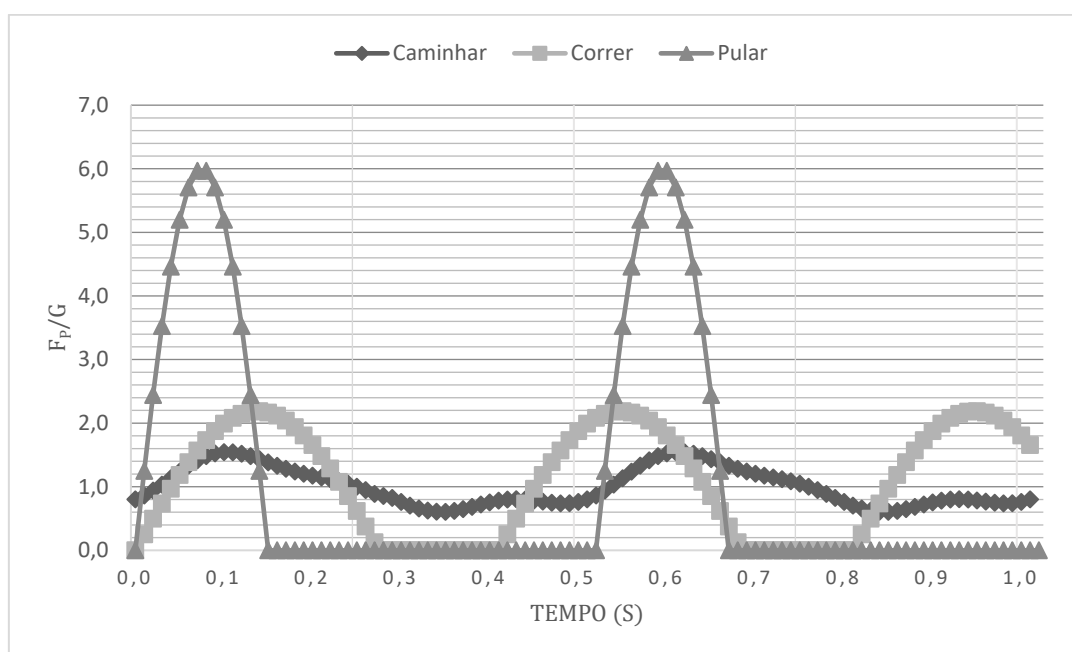


Figura 4 – Comparativo entre os fatores de impacto dinâmico

4. RESULTADOS

4.1 Análise Estática

A análise estática permitiu a verificação da estabilidade estrutural da passarela para efeitos de primeira ordem. Foram considerados nesta análise o peso próprio das estruturas e

sobrecarga de utilização prevista pela NBR 7188:2013, cujo valor é fixado em 5,0 kN/m². Empregando o Estado Limite de Serviço (E.L.S.), de acordo com as prescrições da NBR 8800:2008, verificou-se uma faixa de deformação máxima vertical de 8mm no vão central da passarela (Figura 5), indicando uma estrutura de comportamento suficientemente rígida ao carregamento estático.

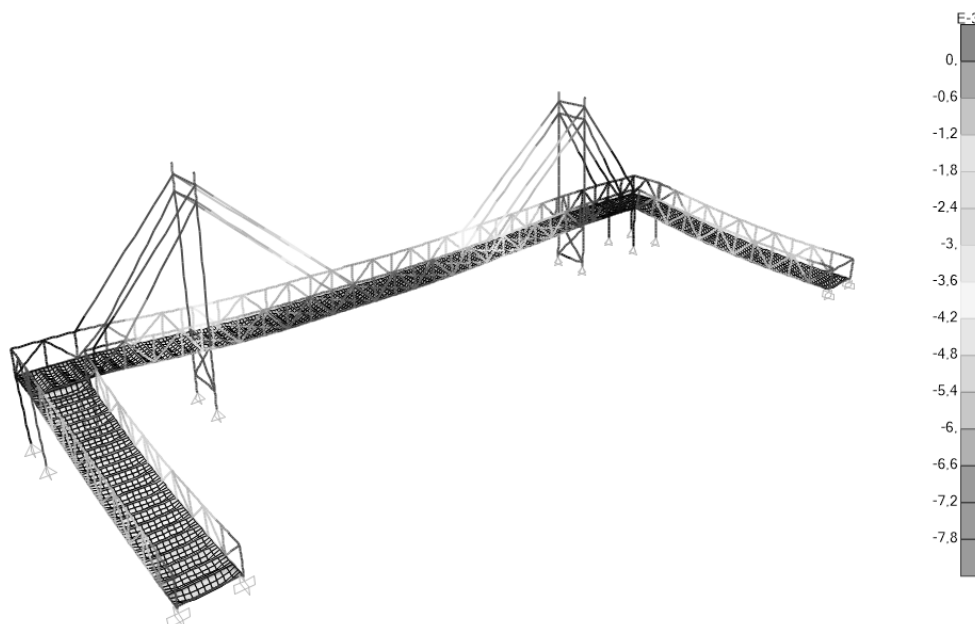
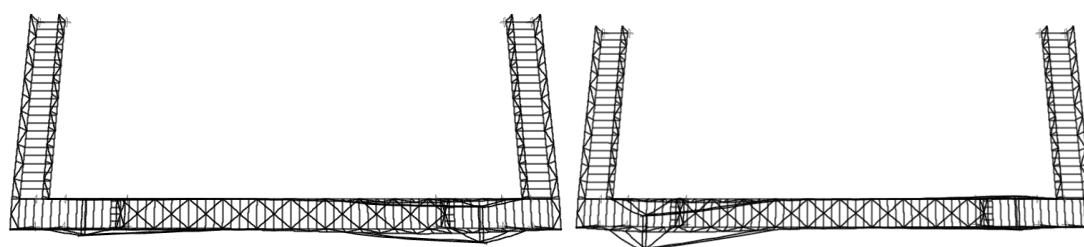


Figura 5 – Valores de deformações verticais para análise estática (mm)

4.2 Análise Dinâmica

4.2.1 Vibrações livres

A análise de vibrações livres utilizou a metodologia de autovetores. Esta análise determina as frequências nas quais o sistema oscila livremente. Os modos de frequência mais críticos são aqueles relacionados ao efeito de flexão lateral na região dos pilares das torres, como ilustrado na Figura 6.

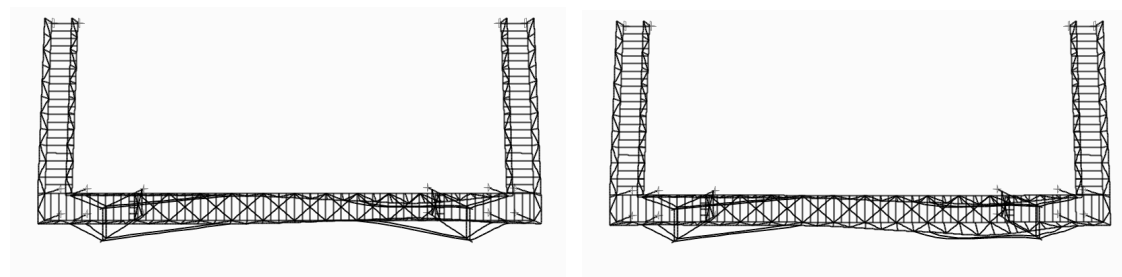


Modo I. Frequência: 3,04 Hz

Modo II. Frequência: 3,132 Hz

Figura 6 – Frequência natural – Modos I e II

Como também, são críticas às vibrações que provocam efeitos de flexão lateral com torção em todo vão central, conforme Figura 7.



Modo III. Frequência: 3,49 Hz

Modo IV. Frequência: 3,52 Hz

Figura 7 – Frequência natural – Modos III e IV

Conforme se pode observar nas Figuras 6 e 7, os primeiros modos de vibração não são verticais, predominando a flexão lateral, principalmente na região das torres dos pilares. Portanto, entende-se que os efeitos das vibrações devidos a flexão vertical configuram um modo secundário ao plano crítico.

Percebe-se que os valores críticos de frequência natural, obtidos nas análises modais mais críticas, atendem as recomendações das normas NBR 8800 (ABNT, 2008) e AASHTO (2009), visto que valores de frequências naturais determinados são superiores a 3 Hz. A Figura 8 apresenta os resultados obtidos nos doze modos de vibração natural e a indicação do valor limite de 3 Hz, recomendado pelas normas.

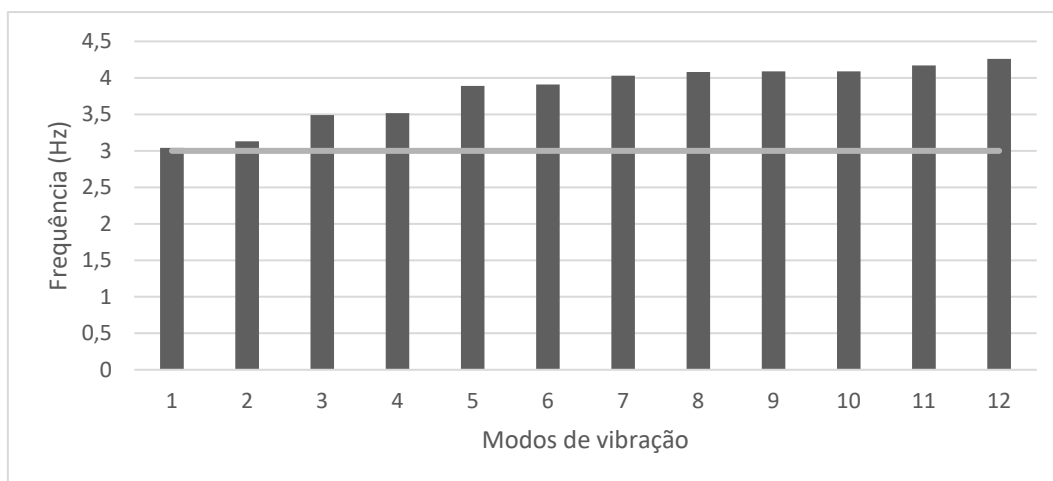


Figura 8 – Frequências para os modos de vibração natural comparados com o limite de 3Hz

4.2.2 Vibrações forçadas

Análise dinâmica com vibração forçada foi idealizada a partir da descrição da movimentação humana por meio das Equações 1 e 2. Assim, foram previstos pontos nodais no eixo dos elementos do modelo estrutural da passarela, com espaçamentos pré-determinados com base nas características do movimento humano (Bachmann e Ammann, 1987).

A Tabela 5 apresenta os dados utilizados nas equações que permitiram definir as funções tempo do modelo numérico no SAP2000®. O peso recomendado na literatura para o ser humano é de 800 N, valor utilizado para amplificar o fator de impacto dinâmico em função do tempo.

Tabela 5 – Dados adotados para movimentação humana

	Caminhar	Correr	Pular
Frequência (Hz)	2,0	2,5	2,0
Tamanho do passo (m)	0,75	1,30	-
Velocidade (m/s)	1,5	3,25	-
Número de passos	32	18	-
Tempo (s)	15,5	7,2	-

Os cenários idealizados na análise dinâmica forçada simularam: uma pessoa andando, cinco pessoas andando, uma pessoa correndo e cinco pessoas correndo. Para simular a “ação

de vândalos”, conforme preconiza algumas normas internacionais, foi considerado o cenário de uma e quatro pessoas pulando no centro do vão de forma a provocar vibrações excessivas.

A defasagem entre os pedestres foi considerada de 1s para pessoas andando e de 0,8s para pessoas correndo, sempre considerando os pedestres de modo sincronizado. Foi considerado um valor de 0,3% constante para amortecimento do sistema, conforme recomendações de HIVOSS (2008).

As análises de vibrações e deslocamentos foram realizadas estrategicamente em alguns pontos nodais na passarela, conforme ilustrado na Figura 9. De acordo com os cálculos, uma pessoa precisa de trinta e um passos para atravessar o vão central da passarela, demorando 15,5s

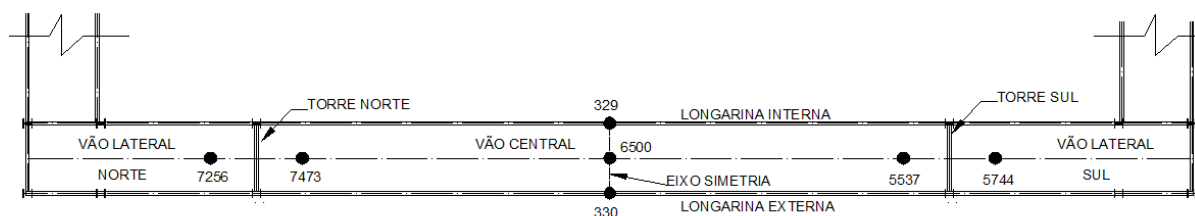


Figura 9 – Planta parcial da passarela com a localização dos pontos nodais.

Os resultados de acelerações para o cenário de uma pessoa caminhando estão apresentados na Tabela 6. Percebe-se que há considerável diferença de acelerações nos pontos nodais localizados na região das torres, cujo motivo provável deva-se a altura mais elevada dos pilares da torre sul em relação aos pilares da torre norte. Nos pontos nodais localizados no eixo de simetria, os valores de acelerações são maiores na longarinas, demonstrando serem elementos mais suscetíveis a maiores vibrações.

Tabela 6 – Valores de acelerações nos pontos nodais indicados

Pontos nodais	Localização na passarela	Aceleração Max (m/s^2)
5744	Torre Norte/Sul (Vão central)	0,153
7256		
5537	Torre Norte/Sul (Vão Lateral)	0,067
7473		
6500	Vão central - Eixo	0,156
329	Vão central - Longarinas	0,208
330		

Os efeitos de vibrações relevantes na análise do conforto de pedestres são relacionados às acelerações obtidas no piso da passarela, sendo o valor obtido no ponto nodal localizado no centro do eixo de simetria a ser confrontado com os limites estabelecidos por normas. Neste contexto, passa-se a concentrar os estudos de vibrações no ponto nodal supracitado para os demais cenários idealizados.

No caso da ação de uma pessoa caminhando, destaca-se da Tabela 6, que o valor de aceleração $0,156 \text{ m/s}^2$ é inferior ao limite de aceleração expostos nas normas internacionais de $0,7 \text{ m/s}^2$, atendendo aos níveis de conforto.

Os resultados de aceleração para a ação de cinco pessoas caminhando estão ilustrados na Figura 10. Neste cenário obteve-se aceleração máxima em torno de $0,66 \text{ m/s}^2$, atendendo também os critérios de conforto previstos nas normas.

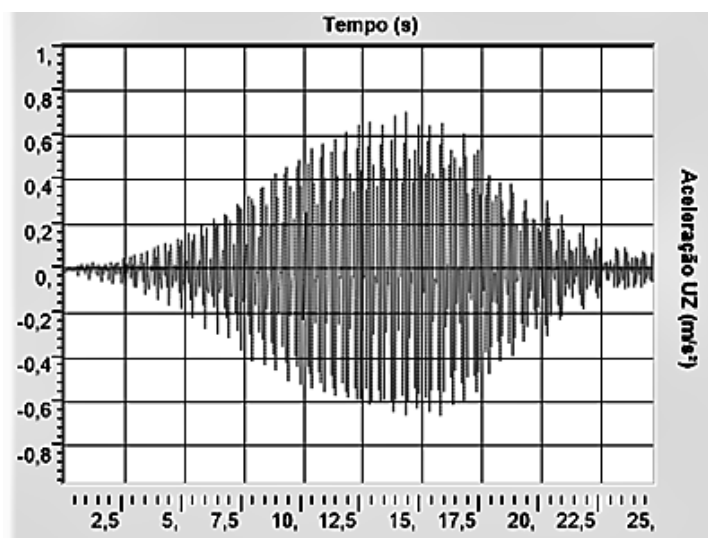


Figura 10 - Acelerações no ponto nodal 6500 devido a cinco pessoas caminhando

É importante observar que a envoltória obtida para todo o período de estudo, relativo a 30 segundos de pedestres em movimento, apresenta deformações geradas pela ação dinâmica da ordem de $0,96 \text{ mm}$. Este valor representa apenas 12% do valor de deformação máxima devido à ação estática, não considerado relevante no dimensionamento da estrutura.

A análise de vibrações para ação de cinco pessoas correndo está ilustrada na Figura 11. Neste cenário percebe-se que os valores de aceleração são consideravelmente menores que aqueles de pessoas caminhando, apresentando valor máximo em torno de $0,23 \text{ m/s}^2$.

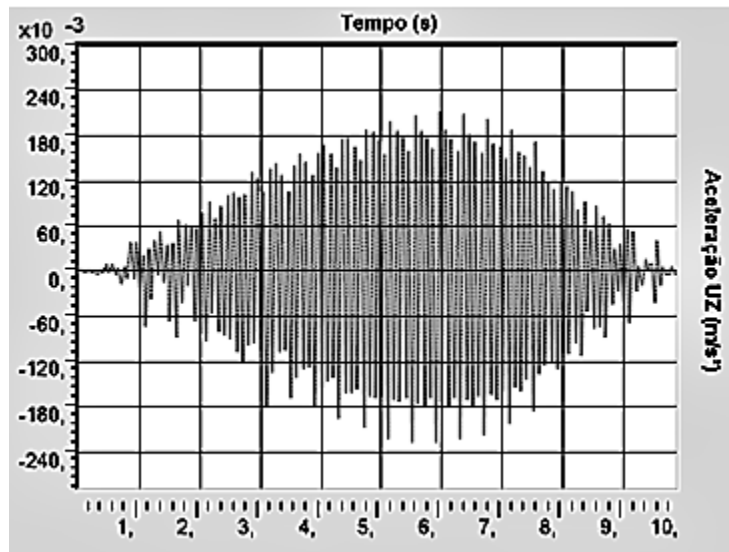


Figura 11 - Acelerações no ponto nodal 6500 devido a cinco pessoas correndo

O último cenário a ser verificado, representa a ação de vândalos (*vandal loading*), conforme recomendado em normas internacionais. Neste caso optou-se pela utilização da aproximação semi-senoidal por apresentar resultados satisfatórios, conforme demonstrado por Caetano *et al* (2005), cujo trabalho compara a análise utilizando o método semi-senoidal e métodos experimentais.

Os valores de acelerações para o caso de quatro pessoas pulando no centro do vão com frequência de 2Hz estão ilustrados na Figura 12. É possível perceber que o valor máximo de aceleração neste caso é da ordem de $0,95 \text{ m/s}^2$.

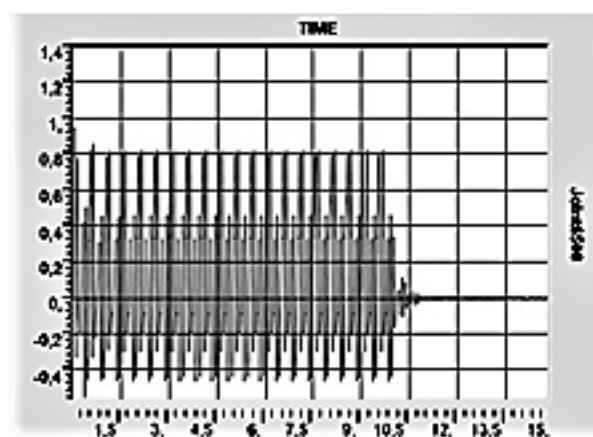


Figura 12 – Acelerações no ponto nodal 6500 devido quatro pessoas pulando a 2Hz

Importante destacar que o estudo de vibrações com excitação numa frequência 4Hz foi realizado para ação de quatro pessoas pulando no centro da passarela, obtendo valor de aceleração na ordem de $6,32 \text{ m/s}^2$ (Figura 13), consideravelmente mais elevado que o caso de frequência a 2Hz. Este estudo é relevante somente do ponto de vista do estudo da ressonância, uma vez que improvável que a frequência de pedestres pulando atinja o valor de 4 Hz.

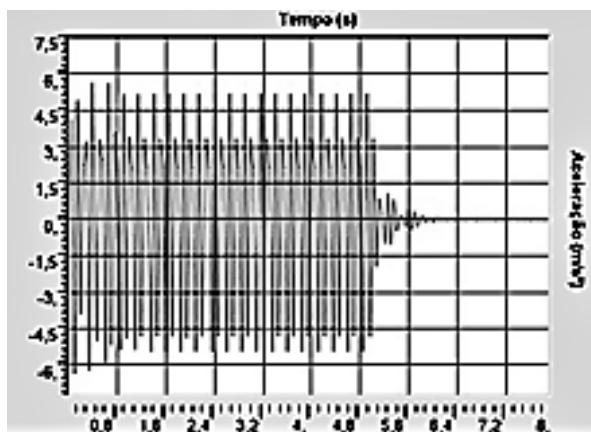


Figura 13 – Acelerações no ponto nodal 6500 devido quatro pessoas pulando a 4Hz

Sintetizando as análises de vibração forçada para os cenários propostos, a Tabela 5 apresenta os valores máximos de aceleração, velocidade e deslocamento no ponto central da passarela, sendo considerados os mais relevantes.

Nota-se que dentre as situações comuns de uso, a ação de caminhar é mais crítica que a de correr, mesmo apresentando fator dinâmico de impacto menor. Isto se deve ao modo como a força é aplicada, já que na caminhada o contato do pé dura todo o movimento, enquanto na corrida o pé apresenta contato somente em uma parte do movimento. No caso das pessoas pulando no centro do vão, os altos valores de aceleração ocorrem devido a três motivos: o alto fator de impacto dinâmico provocando uma amplificação da carga em seis vezes, a frequência crítica e o local de aplicação da carga dinâmica.

Tabela 5 – Resumo dos resultados no centro do vão.

	Caminhar 1 pessoa	Caminhar 5 pessoas	Correr 1 pessoa	Correr 5 pessoas	Pulo 2 Hz	Pulo 4 Hz
a_z (m/s ²)	0,16	0,70	0,08	0,22	0,95	6,32
v_z (cm/s)	0,28	0,92	0,14	0,14	3,60	6,39
δ (mm)	0,09	0,96	0,13	0,36	1,20	1,80

Comparando estes valores com os recomendados pelas normas estudadas, é possível definir a aceitabilidade da passarela com relação ao conforto do usuário (Figura 14). Os principais códigos apresentam valores de aceleração na faixa de 0,7 m/s², apesar de não especificarem explicitamente em quais situações de carregamento, deixando isto a cargo do projetista.

O valor máximo de aceleração para cinco pessoas caminhando chega ao valor limite de 0,7 m/s², valor considerado aceitável para diversas normas, tais como o Eurocode, os British standards, a norma sueca Bro2004 e a ISO 10137. De acordo com a classificação quanto ao conforto humano dos pedestres estabelecida pelo guia para projeto de passarela HIVOSS (2008), a passarela estudada no caso de cinco pessoas caminhando apresenta um nível de conforto médio e em outras situações analisadas, pessoas correndo ou somente uma pessoa caminhando, apresentam nível de conforto máximo.

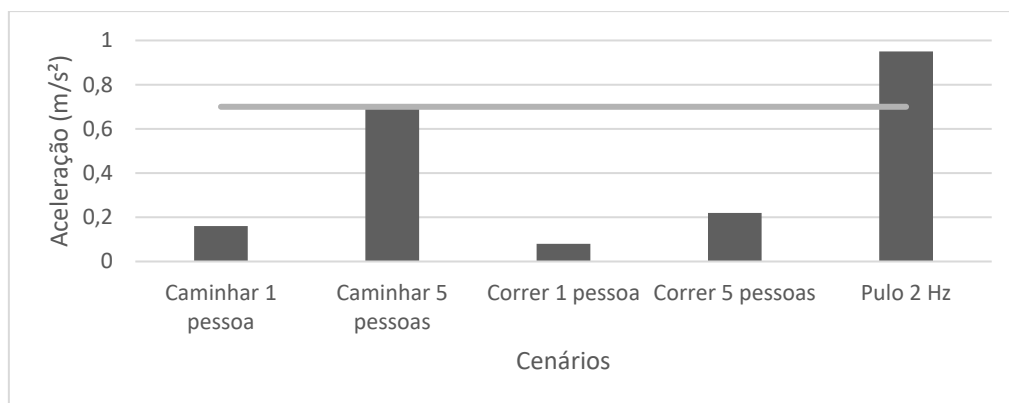


Figura 14 – Valores de aceleração máxima para os cenários analisados

A ação de pular imprime maiores acelerações à estrutura, na ordem de 0,95 m/s², o que supera as recomendações da maioria das normas. No guia para projeto de passarelas (HIVOSS, 2008), tal aceleração é considerada o limite do nível de conforto médio, tornando-

se um valor de aceleração bastante desconfortável para os usuários. Quando os saltos atingem frequência de 4 Hz, as acelerações de 6,32 m/s² se tornam inaceitáveis em termos de conforto, sendo possivelmente nocivas para a estrutura, levando a danos estruturais.

4.3 Estudo Comparativo das Deformações nos Elementos da Estrutura

O estudo de deformações provocadas pelas cargas dinâmicas é de importante relevância no contexto da análise estrutural. Os resultados obtidos da análise estática, cuja combinação de ações considera a sobrecarga de utilização de 5,0 kN/m² (prevista pela NBR 7188:2013), podem ser confrontados com os valores de deformações obtidos nas análises de vibrações forçadas. A Tabela 6 apresenta a relação entre deslocamentos verticais devidos à ação estática e ação dinâmica, para diferentes cenários.

Tabela 6 – Relação entre deslocamentos verticais dinâmicos e estáticos

	Caminhar 5 pessoas	Correr 5 pessoas	Pulo 4 Hz
$\delta_{dinamico}/\delta_{estático}$	0,069	0,025	0,129
$\delta_{dinamico}/\delta_{max}$	0,039	0,014	0,074

Pode-se observar que as deformações provocadas pelas ações dinâmicas apresentam baixas intensidades quanto comparadas com as deformações provocadas pela ação estática. Este fato resulta da alta rigidez da estrutura da passarela promovida pelo modelo treliçado com perfis laminados robustos e contraventados. Neste contexto, a análise dinâmica se resume ao estudo de vibrações e acelerações relacionadas ao conforto dos pedestres.

5. CONCLUSÕES

A avaliação precisa de uma passarela de pedestres requer a verificação da vibração dos pisos por meio de análise dinâmica levando-se em conta fatores tais como: características e natureza das excitações dinâmicas, critérios de conforto, frequência natural do piso, razão de amortecimento modal e peso próprio efetivo do piso.

No caso de atividades humanas normais, as normas brasileiras preveem uma análise simplificada para a avaliação da vibração, estabelecendo limites de frequência crítica de vibração em função do tipo de uso da estrutura. Já os códigos internacionais estabelecem também critérios relacionados à aceleração máxima e situações de projeto que podem ser facilmente verificados.

Por meio do estudo das frequências naturais da passarela sobre o rio Sapucaí em Itajubá/MG observou-se que todos os seus modos de vibração não estão contidos na faixa de frequências crítica apresentadas pelas normas técnicas. Desta forma, a estrutura estudada não pode ser facilmente excitada pelo movimento humano. Apesar de as passarelas de pedestres serem geralmente estruturas leves, esbeltas e flexíveis, a estrutura estudada neste trabalho apresentou rigidez alta e talvez não possa ser considerada flexível.

A análise desta estrutura submetida a cargas dinâmicas mostra que para carregamentos aos quais está comumente sujeita, a passarela tem boa resposta, com valores de aceleração dentro do recomendado pelas normas nacionais e internacionais. Para o caso da ação de vandalismo, a resposta também se mostrou positiva, visto que para a excitação de 2 Hz, (valor comum para este tipo de ação), as acelerações, apesar de desconfortáveis, não implicam em danos estruturais. Estes resultados eram esperados, já que a passarela apresentava alta rigidez e ausência de modos de vibração natural predominantemente vertical.

Destaca-se a importância do estudo dinâmico para as passarelas de pedestres, já que estes estudos possibilitam verificar a aceitabilidade da estrutura quanto ao conforto do usuário, considerando-se acelerações e deslocamentos, além de definir a faixa de frequências em que a estrutura é mais sensível a excitações dinâmicas.

6. REFERÊNCIAS

American Association of State Highway and Transportation Officials - AASHTO (2009). LRFD Guide Specifications for the Design of Pedestrian Bridges. 7ª edição. Estados Unidos da América.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (1997). NBR 7190 – Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (2008). NBR 8800 – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (2013). NBR 7188 – Carga móvel em ponte rodoviária e passarela de pedestre. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (2014). NBR 6118 – Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro.

Bachmann, H. e Ammann, W. (1987). *Vibration in structures: Induced by Man and Machine*. 3ª edição. Zurique, Suíça. Structural engineering documents, International association for bridge and structural engineering (IABSE). 176p.

Banverket BV Bro (2004). The Swedish rail administrations changes and addendum to the Swedish road administrations, Bro2004, edition 7. Borlänge, Suécia, 2004.

Blanco, M.C.; Bouillard, PH.; Bodarwé, E.; Ney, L. (2005). Structural Dynamic Design of a Footbridge under Pedestrian Loading. 9º SAMTECH. Users Conference.

Brownjohn, J.; Fok, P.; Rochie, M.; Omenzetter, P. (2004). Long Span Steel Pedestrian Bridge at Singapore Changi Airport – Part 1: Prediction of Vibration Serviceability Problems. The Structural Engineer.

British Standards (2005). Steel and concrete Bridges Standards committee, British Standards BS 5400. Londres, Inglaterra.

Caetano, E.; Cunha, A.; Moutinho, C. (2005). Vandal loads and induced vibrations on a footbridge. In: Footbridge 2005 – Second international conference.

Dallard, P.; Fitzpatrick, A. J.; Flint, A.; Le Bourva, S.; Low, A.; Ridsdill Smith, R. M.; Willford, M. (2001). The London millennium footbridge. *Structural Engineer*, 79(22), 17-21.

European Committee for Standardization (2002). Eurocode – Basis of structural design. EN1990:2002. Bruxelas.

European Committee for Standardization (2003). Eurocode 1 – Actions on structures. EN1991:2003. Bruxelas.

Feldmann, M.; Heinemeyer, C.; Butz, C.; Caetano, E.; Cunha, A.; Galanti, F.; Goldack, A.; Hechler, O.; Keil, A.; Lukic, M.; Obiala, R.; Schlaich, M.; Sedlacek, A.; Smith, A.; Waarts, P. (2009). Design of floor structures for human induced vibrations. JRC Scientific and technical reports. Luxemburgo.

Hauksson, F. (2005). *Dynamic behaviour of footbridges subjected to pedestrian-induced vibrations*. Division of Structural Mechanics, LTH.

Human Induced Vibrations of Steel Structures - HIVOSS (2008). Design of footbridges – guidelines. Setembro, 2008.

International Standardization Organization - ISO (2005). Bases for design of structures Serviceability of buildings and pedestrian walkways against vibration, ISO 10137. Genebra, Suíça.

Pereira, S. P. (2017). Desempenho dinâmico de sistemas estruturais de Passarelas. Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Santos, C. M. (2011). Avaliação do Comportamento Dinâmico de uma Passarela Submetida a Carregamentos Induzidos por Pedestres. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Van Nimmen, K.; Lombaert, G.; De Roeck, G.; Van den Broeck, P. (2014). Vibration serviceability of footbridges: Evaluation of the current codes of practice. *Engineering Structures*, 59, 448-461.

Zivanovic, S. (2012). Benchmark footbridge for vibration serviceability assessment under the vertical component of pedestrian load. *Journal of Structural Engineering*, 138(10), 1193-1202.

ABSTRACT EXTENDED

The optimal design for pedestrian footbridges often creates light and flexible structures, reducing the overall stiffness and structural mass. As a result, footbridges tend to have low natural frequencies and therefore susceptible to dynamic loading. Dynamic studies evaluate the structure's response to serviceability limits related to vibrations that are not contemplated in a simplified static analysis. Therefore, common human actions such as walking, running or jumping are important loadings to which a footbridge is subject during its lifespan and must be considered in the design. This paper aims to study the theoretical behaviour of a metallic footbridge built in the city of Itajubá-MG subject to dynamic loads imposed by human movement evaluating its performance in terms of serviceability limits and comfort levels recommended by Brazilian and international design codes. The footbridge was modelled using the computer software SAP2000 and was subject to static, free and forced vibrations loading. The static design was made to compare displacement and load values. The free vibration studies were made to evaluate the natural frequencies and modes of vibration. After applying the pedestrian loading the dynamic response was obtained. The results allowed to verify that the footbridge complies with the serviceability limits imposed by national and international codes due to its high stiffness and lattice shape. The comfort of the users is taken care of in the common situations of use and is satisfactory even in case of vandalism.

Keywords: human induced vibration, vibrations, structural dynamics, footbridge.

CONCLUSION

The precise pedestrian footbridges evaluation of the vibration of the floors by means of dynamic analysis taking into account factors such as: characteristics and nature of the

dynamic excitations, comfort criteria, natural frequency of the floor, modal damping ratio and effective weight of the floor.

In the case of normal human activities, the Brazilian standards provide a simplified analysis for the evaluation of vibration, establishing limits of critical frequency of vibration according to the type of use of the structure. International codes also establish criteria related to maximum acceleration and design situations that can be easily verified.

By studying the natural frequencies of the footbridge over the Sapucaí river in Itajubá/MG, it was observed that all of its modes of vibration are not contained in the critical frequency range presented by the technical standards. In this way, the structure studied can not be easily excited by human movement. Although pedestrian footbridge are usually lightweight, slender and flexible structures, the structure studied in this work presented high rigidity and may not be considered flexible.

The analysis of the structure submitted to dynamic loads is shown for loadings to a structure is commonly subject to footbridges with good response, with acceleration values within what as national and international standards recommend. In the case of vandalism, a response is also positive for a 2 Hz excitation, (common for this type of action), as accelerations, although are uncomfortable, not involved in structural damage. These results are expected, since the footbridges presents high stiffness and absence of natural vibration modes predominantly vertical.

Stands out the importance of the dynamic study for pedestrian footbridges, since these studies make it possible to verify the acceptability of the structure regarding user comfort, considering accelerations and displacements, besides defining the range of frequencies in which the structure is more sensitive to dynamic excitations.