

ANÁLISE DINÂMICA DE PASSARELAS DE PEDESTRES PARA ATENDIMENTO DE CRITÉRIOS DE CONFORTO HUMANO

Ricardo de Oliveira (aluno IC), Alfonso Pappalardo Jr. (Orientador)

Apoio: PIBIC Mackenzie

RESUMO

Estudo da resposta dinâmica de estruturas de passarelas de pedestres, situadas nas rotas de acesso de arenas esportivas, sujeitas a ação de multidão de pessoas. Esta ação é representada por um carregamento dinâmico tipicamente utilizado em projetos de arquibancadas permanentes. A partir da resposta dinâmica da estrutura de concreto armado, pode-se verificar o seu desempenho dinâmico quanto à ocorrência de vibrações excessivas que levem a níveis de desconforto humano dos usuários da mesma, segundo normas internacionais específicas. O projeto padrão de passarelas de pedestres adotado neste estudo foi fornecido pelo Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo. Neste sentido, foram realizadas análises dinâmicas modais e transientes pelo Método dos Elementos Finitos, utilizando-se a versão acadêmica do Programa SAP2000, para a obtenção dos históricos dos deslocamentos e das acelerações para o cenário de carregamento dinâmico produzido pela multidão de pessoas. Além das verificações normativas para evitar deslocamentos e acelerações excessivas, é avaliado um parâmetro adimensional para caracterizar a tendência da estrutura a apresentar excitações autoinduzidas por interação dinâmica entre a multidão de pessoas e a estrutura da passarela, que leva a amplificação das oscilações laterais da estrutura. A seção transversal originalmente analisada não atendeu os critérios de desempenho dinâmico, incorrendo no aumento da seção de forma a satisfazer os critérios propostos neste trabalho. Vale destacar que este estudo permite conferir à estrutura controle maior da sua resposta dinâmica refletindo em níveis de conforto humano aceitáveis.

Palavras-chave: Passarelas de pedestres. Vibrações. Amortecimento.

ABSTRACT

Study of the dynamic response of structures of pedestrian footbridges, located in the access routes of sports arenas, subject to crowd action. This action is represented by a dynamic load typically used for permanent grandstands design. The dynamic response of the structure is used to verify its dynamic performance regarding the occurrence of excessive vibrations that lead to levels of human discomfort, according to international specialized standards. The standard footbridges design adopted for this study was provided by the São Paulo State Department of Roads. In this sense, modal and transient dynamic analysis were carried out by the Finite Element Method, using the academic version of the SAP2000 Program, to obtain the time-history response for displacements and accelerations for dynamic crowd loading. In addition to the normative verifications to avoid excessive displacements and accelerations, the Pedestrian Scruton Number was evaluated to characterize the tendency of the structure to present self-excited oscillations by pedestrian-footbridge interaction, which leads to the amplification of the lateral oscillations of the structure. The cross section originally analyzed didn't meet the dynamic performance requirements, leading to the increase of the section in order to satisfy the criteria proposed in this work. It should be noted that this study allows to capacitate the structure in a greater control of its dynamic response reflecting in acceptable levels of human comfort.

Keywords: Footbridges. Vibrations. Damping.

1. INTRODUÇÃO

Recentemente, tem-se observado que o número de acidentes envolvendo pontes, viadutos e, especialmente, passarelas e ciclovias tem aumentado significativamente. Avalanches de lama de rejeitos, desabamentos de encostas, abalroamentos produzidos por impacto de caçambas e de veículos rodoviários de carga, colapsos por falha do sistema estrutural ou das fundações, explosões e incêndios devidos à queda de aeronaves são exemplos de acidentes raros que ocorreram nos últimos cinco anos envolvendo obras de arte especiais. Tal fato deve exigir um corpo técnico de engenheiros de pontes muito bem preparado para as tomadas de decisão em prazo de horas.

A revisão da norma NBR 9452 (ABNT, 2016) trouxe novidades para a gestão da manutenção de pontes, viadutos e passarelas de concreto. Tornou mais objetiva a avaliação de obras de arte de concreto, definindo inspeções rotineiras anuais e uma inspeção especial a cada cinco anos e a forma de apresentação dos resultados destas inspeções. Esta revisão revela a emergente necessidade de instauração de programas de inspeção e de manutenção periódicas para as obras de arte especiais, pois já estão atingindo o prazo de vida útil reduzido por falta de manutenção.

Um caso de grande notoriedade internacional foi o comportamento dinâmico não previsto da estrutura da London Millennium Footbridge que levou à sua interdição no dia da sua inauguração (NEWLAND, 2003a) . A empresa inglesa de engenharia ARUP GROUP LIMITED, uma das maiores empresas do mundo no setor, foi a responsável pelo projeto estrutural da passarela do milênio. O problema foi identificado e pelos engenheiros projetistas e em 48 horas restabeleceram o fluxo, embora restrito, de pedestres. O estudo aprofundado do fenômeno de vibrações autoexcitadas realizado pelos engenheiros da ARUP, levou-os à criação de um critério de projeto preconizado baseado num parâmetro adimensional. Deve-se lembrar que os desafios estruturais enfrentados em projetos de estruturas inovadoras e especiais exigem sistemas de simulação computacional CAD/CAE eficientes e robustos dotados de recursos gráficos de última geração.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

O carregamento dinâmico causado pela movimentação de pedestres sobre a uma passarela produz vibrações verticais e laterais. O fenômeno da sincronização ocorre quando as pessoas respondem naturalmente às oscilações de uma passarela quando esta apresenta frequências naturais próximas àquelas devidas às atividades humanas de caminhar, correr ou pular (BACHMANN, 1995; DALLARD, 2001).

O aumento da vibração lateral da passarela produzido pela multidão de pessoas pode ser explicado da seguinte forma: inicialmente, percebe-se um pequeno deslocamento lateral da estrutura induzido pelas forças laterais aleatórias devidas ao deslocamento humano. Diante deste fato, alguns pedestres sincronizam o passo com o movimento lateral da estrutura. Uma vez que estas forças ressonantes agem na passarela, produzem um aumento das oscilações laterais da estrutura, que serão sentidas por um público maior. Isto posto, um número cada vez maior de pedestres sincroniza o passo com o movimento lateral da estrutura, aumentando seu deslocamento lateral. Esta vibração, de origem autoexcitada, deve-se à natureza adaptativa do ser humano. Estes movimentos laterais significativos não crescerão indefinidamente, tendendo a um valor estacionário. Este fenômeno constitui um fator importante para o aumento da severidade do carregamento. É possível prever qual amortecimento mínimo deverá ser conferido à estrutura, por meio de dispositivos mecânicos específicos, para impedir que o fenômeno da sincronização produza vibrações indesejáveis (NEWLAND, 2003b).

Este fenômeno foi identificado na Ponte do Milênio, mostrada na Figura 1, que é uma ponte suspensa de aço sobre o Rio Tâmisa, em Londres. Projetada para as comemorações da passagem do milênio, a construção teve início em 1998 e foi inaugurada em junho de 2000. Na data da abertura da passarela ao público, centenas de pessoas que transitaram na passarela perceberam uma oscilação lateral alarmante que levou a sua interdição no mesmo dia, sendo liberada após dois dias com acesso limitado. As obras de readequação da estrutura levaram dois anos, foi reaberta em fevereiro de 2002, período este que foram realizadas diversas modificações para eliminar o comportamento anômalo da estrutura.



Figura 1 London Millennium Footbridge

Fonte: <https://www.surrey.ac.uk/postgraduate/bridge-engineering-msc-2019>

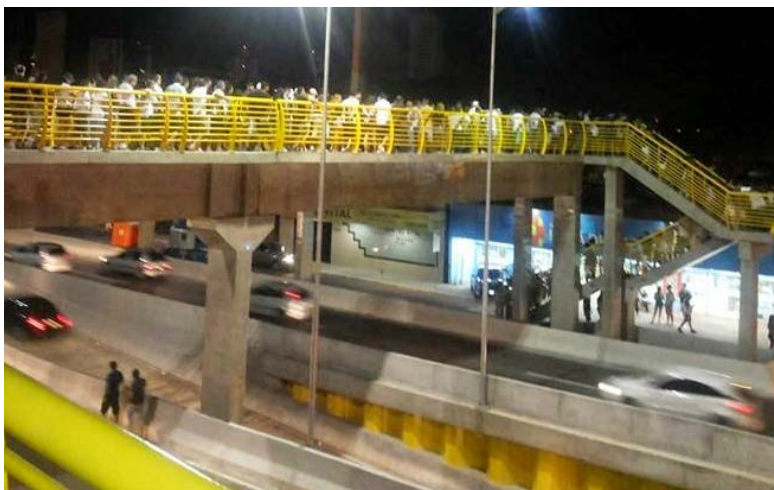


Figura 2 Passarela de acesso ao Estádio Arena das Dunas, em Natal

A Figura 2 mostra um número bastante elevado de pessoas atravessando a passarela em dia de jogo e, principalmente com instrumentos musicais de percussão e os torcedores embalados no ritmo da batida eleva bastante o risco de causar incômodo aos usuários.

3. METODOLOGIA

Inicialmente, adotou-se a metodologia utilizada pela Norma Brasileira NBR6118 (ABNT, 2014) para assegurar o comportamento satisfatório da estrutura para o atendimento simultâneo do estado-limite de serviço de vibrações excessivas e do estado-limite último para evitar o risco colapso estrutural por fadiga dos materiais. Esta norma baseia-se na simples comparação entre a frequência natural da estrutura, obtida por análise modal, e a frequência de excitação vertical em passarelas de pedestres submetidas à movimentação de multidão de pessoas que, na falta de valores determinados experimentalmente, prescreve o valor conservador de 9,6 Hz (majorado). Neste caso, diante da inviabilidade técnica para atendimento desta prescrição normativa, recorreu-se à norma do Instituto de Engenharia Estrutural de Londres (ISE, 2008) que prescreve o valor experimental da frequência crítica de excitação igual a 6 Hz.

Um indicador usualmente utilizado para a avaliação da tolerância humana aos movimentos vibratórios é o valor RMS (*Root Mean Square*) da resposta dinâmica analisada, sendo definido por:

$$\text{RMS}(x, t, T) = \left[\frac{1}{T} \int_t^{t+T} x^2 dt \right]^{1/2}$$

Uma segunda metodologia proposta pela norma inglesa (ISE, 2008) baseia-se na descrição do comportamento estrutural por meio de análise dinâmica transiente. Esta análise foi realizada utilizando-se a versão acadêmica do Programa SAP2000, baseado no

Método dos Elementos Finitos, para a obtenção do histórico dos deslocamentos e das acelerações, sendo que a partir destes, calcula-se os valores RMS dos deslocamentos e das acelerações. As verificações dos níveis de conforto humano baseiam-se nas quantidades calculadas anteriormente devem ser inferiores a 7mm e a $0,75 \text{ m/s}^2$, respectivamente (ISE, 2008).

Adicionalmente, verifica-se o parâmetro Pedestrian Scruton Number (PSN), desenvolvido por McROBIE (2002), que representa a susceptibilidade da estrutura a desenvolver vibrações transientes auto-induzidas provocadas pela movimentação da multidão de pessoas (NEULAND, 2003b). O parâmetro PSN constitui um indicador analítico, simples e robusto. Tal parâmetro pode ser interpretado fisicamente como sendo a relação entre massas relacionadas aos pedestres e massas estruturais participantes, afetadas pela taxa de amortecimento estrutural.

2.1 Descrição do Modelo de Cálculo

Utilizou-se o projeto-padrão de passarelas de pedestre do Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo. A seção transversal típica da longarina de concreto armado da passarela é mostrada na Figura 2. É uma seção tipo T com largura da mesa colaborante $b_f=260 \text{ cm}$, largura variável da viga trapezoidal de $b_{w1}=45 \text{ cm}$ (junto a mesa superior) a $b_{w2}=30 \text{ cm}$ (junto a base), altura $h=110 \text{ cm}$, totalizando uma área $A=0,714 \text{ m}^2$. Para o comprimento do vão de 34 metros sobre a rodovia, o volume de concreto utilizado para a longarina é de $V=24,3 \text{ m}^3$. Especifica-se o concreto classe C35, com peso específico $\gamma=25 \text{ kN/m}^3$, módulo de elasticidade $E=28 \text{ GPa}$ e coeficiente de Poisson $\nu=0,2$.

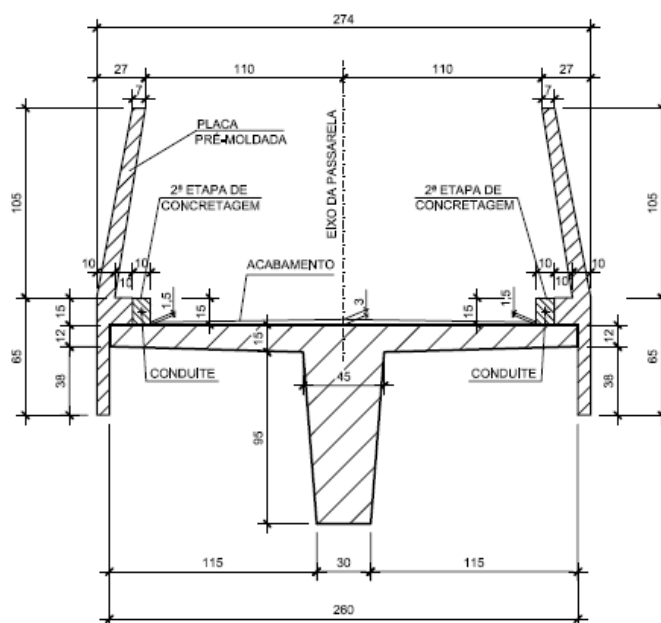


Figura 3 Seção típica da passarela DER
Fonte: www.der.sp.gov.br

3.2 Carregamento dinâmico

3.2.1 Carregamento dinâmico vertical

Segundo a norma inglesa (ISE, 2008), define-se um carregamento harmônico com três termos. A Tabela 2.2 da referida norma apresenta os fatores de carregamento, ajustados por meio de ensaios específicos, que compõem o carregamento dinâmico vertical dado por:

$$P_z(t) = 1,0 \cdot 5000 \cdot ((0,188 \cdot \cos(2\pi \cdot 2t)) + (0,047 \cdot \cos(2\pi \cdot 4t)) + (0,013 \cdot \cos(2\pi \cdot 6t)))$$

3.2.2 Carregamento dinâmico horizontal

O carregamento dinâmico aplicado na direção horizontal (lateral) corresponde a 7,5% do carregamento vertical, conforme sugerido na norma inglesa (ISE, 2008), sendo dado por:

$$P_y(t) = 0,075 \cdot 5000 \cdot ((0,188 \cdot \cos(2\pi \cdot 2t)) + (0,047 \cdot \cos(2\pi \cdot 4t)) + (0,013 \cdot \cos(2\pi \cdot 6t)))$$

A norma inglesa (ISE, 2008) prescreve a ação horizontal para simular a transmissão de esforços laterais na estrutura decorrentes do balanço rítmico do caminhar humano. Pela magnitude do esforço lateral aplicado, este caso corresponde a uma ação secundária. Apesar da magnitude inferior, a influência deste carregamento lateral deve ser verificada pois, dependendo da resposta dinâmica da estrutura, poderá atingir deslocamentos de grande magnitude.

Na composição dos carregamentos adotou-se a carga estática móvel distribuída de $q=5\text{kN/m}^2$ segundo a norma brasileira que prescreve carga móvel de pedestres em passarelas (ABNT, 2013).

3.3 Análises Estruturais

Foram realizados quatro tipos de análise: (i) análise estática elástica-linear devida ao peso próprio da estrutura; (ii) análise estática elástica-linear devida ao carregamento de multidão de pessoas, distribuídos na vertical 11 kN/m (5 kN/m^2 na largura efetiva de $2,2\text{ m}$) e na lateral 1 kN/m ($7,5\%$ do carregamento vertical de 5 kN/m^2 na largura efetiva de $2,2\text{ m}$); (iii) análise modal para obtenção das frequências naturais e dos modos de vibração da estrutura. Na resolução da equação de autovalores e autovetores, que representa o problema de vibrações livres não amortecidas, foram extraídos os dez primeiros modos de vibração e frequências naturais pelo Método de Ritz; (iv) análise dinâmica transiente, considerando os carregamentos harmônicos devidos a atividades humanas (caminhar, correr, pular) descritos na Seção 3.2. Foi utilizado o Método da Superposição Modal para a descrição do comportamento dinâmico da estrutura com incremento de tempo $\Delta t = 0,02\text{ s}$, para estabilidade numérica do método adotado, totalizando um tempo total de análise de 20 segundos. Foi adotada a taxa de amortecimento $\zeta=0,05$, com base no estudo a seguir.

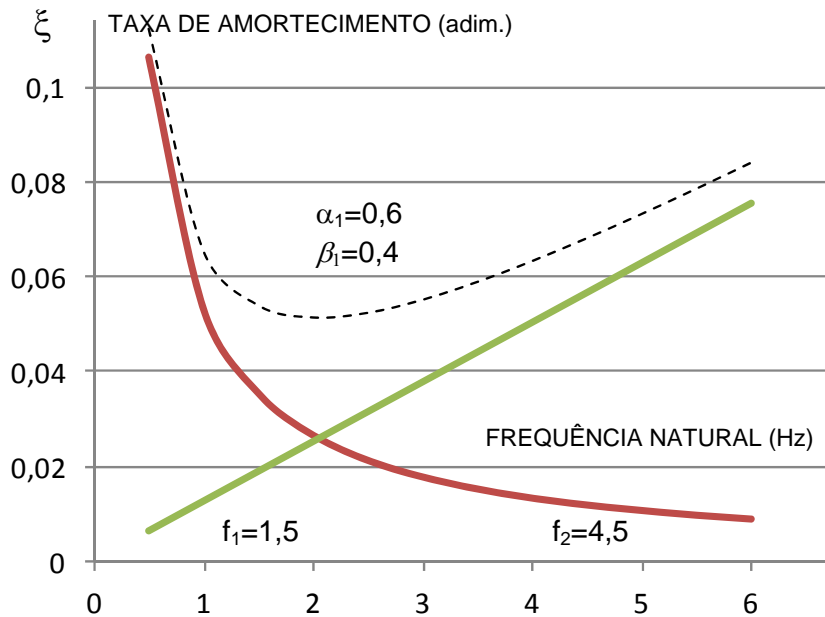


Gráfico 1 Taxa de amortecimento

Na prática, a Matriz de Amortecimento C pode ser escrita, aproximadamente, como uma fração da Matriz de Massa M (amortecimento inercial) e outra, da Matriz de Rigidez K (amortecimento estrutural). O coeficiente de amortecimento modal ζ_i é a relação entre o amortecimento atual e o amortecimento crítico para um particular modo de vibração i , ou seja:

$$\zeta_i = \frac{\alpha_1}{4\pi f_i} + \beta_1 \cdot \pi f_i$$

Os valores de α_1 e β_1 considerados para uma faixa de frequências variando entre f_1 e f_2 são obtidos por meio da resolução do sistema de equações lineares, escrito a partir da expressão anterior:

$$\begin{cases} \frac{\alpha_1}{4\pi f_1} + \beta_1 \cdot \pi f_1 = \zeta \\ \frac{\alpha_1}{4\pi f_2} + \beta_1 \cdot \pi f_2 = \zeta \end{cases}$$

A partir da análise do Gráfico 1, assumindo-se $\alpha_1=0,6$, $\beta_1=0,4$ e o intervalo entre $f_1=1,5\text{Hz}$ e $f_2=4,5\text{Hz}$ pode-se adotar a taxa de amortecimento mínimo $\zeta=0,05$.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Seção Original

As análises estáticas apontaram os deslocamentos verticais máximos iguais a 14 cm e 9 cm, respectivamente, para os casos de carregamento devidos ao peso próprio e à multidão de pessoas. Os resultados obtidos a partir da análise modal são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 Frequências naturais e fatores de participação modal

MODO	FREQUÊNCIA NATURAL (Hz)	FATORES DE PARTICIPAÇÃO MODAL		
		UX (FRONTAL)	UY (LATERAL)	UZ (VERTICAL)
1	1,47	0	0	0,819
2	5,19	0	0,703	0
3	5,83	0	0	0
4	13,00	0	0	0,091
5	26,48	0	0,140	0
6	35,05	0	0	0,033
7	63,19	0	0,051	0,001
8	66,56	0	0,005	0,015
9	108,71	0	0,002	0,012
10	222,92	0	0	0,019
ACUMULADO		0%	90%	99%

A partir da observação dos resultados da análise modal, constata-se que a primeira frequência natural, que corresponde ao modo de vibração vertical, é igual a 1,47 Hz que está aquém dos valores mínimos para frequências naturais, sendo igual a 9,6 Hz para a norma brasileira (ABNT, 2014) e 6 Hz para a norma inglesa (ISE, 2008). Neste caso, para a metodologia adotada neste estudo, recomenda-se realizar a análise dinâmica transiente com os carregamentos dinâmicos apresentados na Seção 3.2, de modo a se obter o histórico dos deslocamentos e das acelerações para uma análise comparativa com os valores limites normativos destas quantidades (ISE, 2008). O segundo modo de vibração é predominantemente lateral, de grande energia associada. O número de modos estipulado está satisfatório, pois se pôde representar mais que 90% de energia associada ao modo de vibração lateral e 99% na direção vertical. A massa modal participante na direção vertical associada ao primeiro modo $m_1 = 0,819$ (81,9%) e na direção lateral associada ao segundo modo $m_2 = 0,703$ (70,3%).

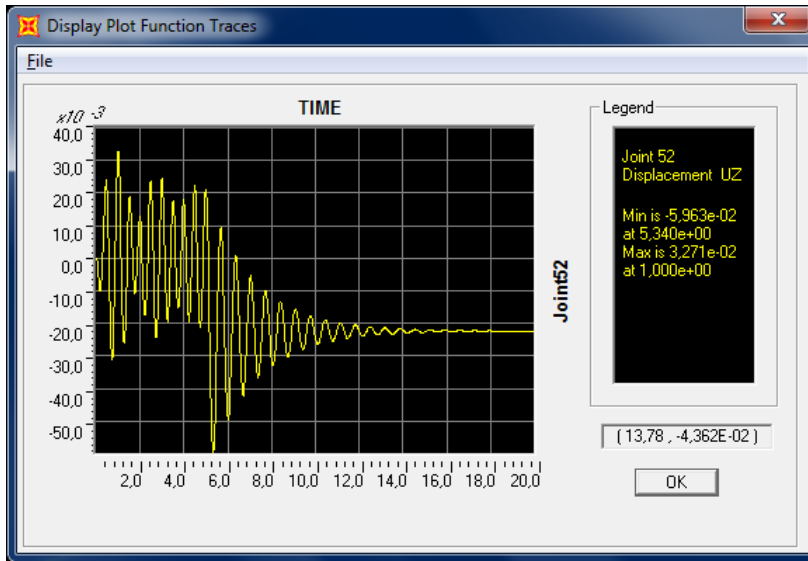


Figura 4 Histórico do deslocamento vertical no meio do vão

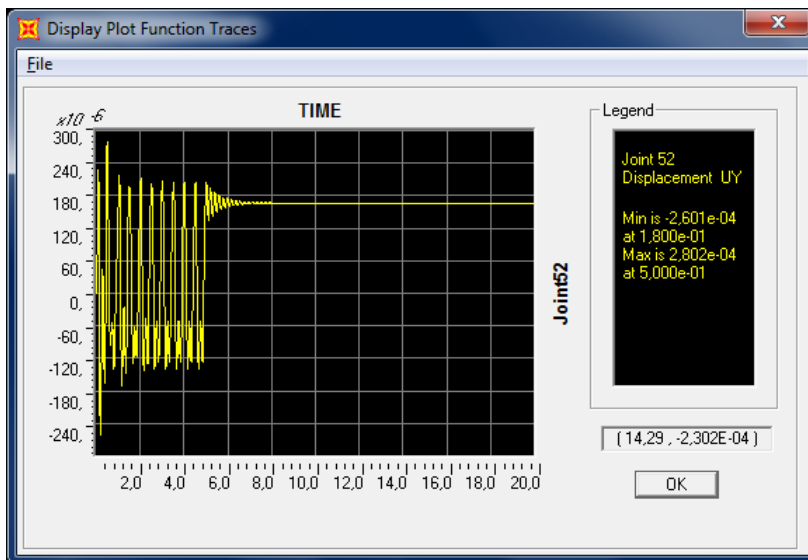


Figura 5 Histórico do deslocamento lateral no meio do vão

O valor RMS do deslocamento vertical no meio do vão é igual a 22 mm, obtido a partir da série temporal mostrada na Figura 3, sendo maior que o deslocamento-limite de 7 mm, prescrito na norma inglesa (ISE, 2008). Por outro lado, o valor RMS do deslocamento lateral no meio do vão é igual a 0,2 mm, obtido a partir da série temporal mostrada na Figura 4, cuja magnitude está aceitável em termos de conforto humano para deslocamentos laterais.

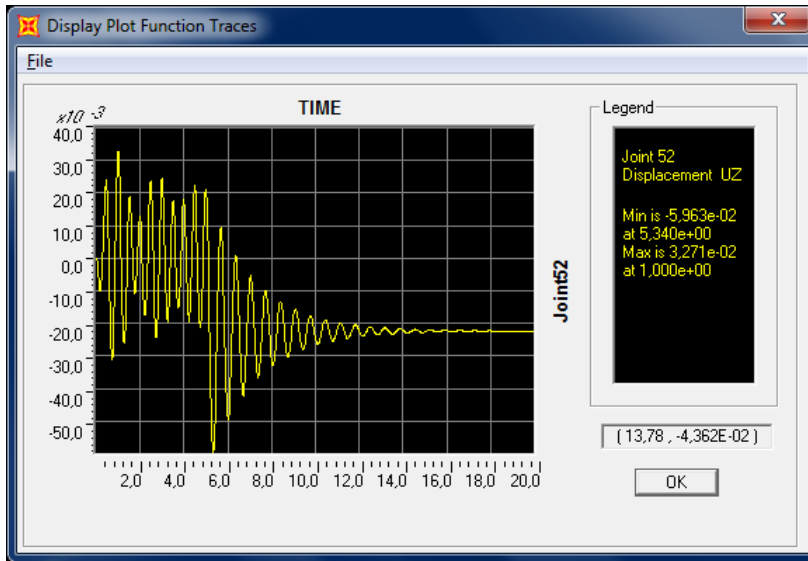


Figura 6 Histórico da aceleração vertical no meio do vão

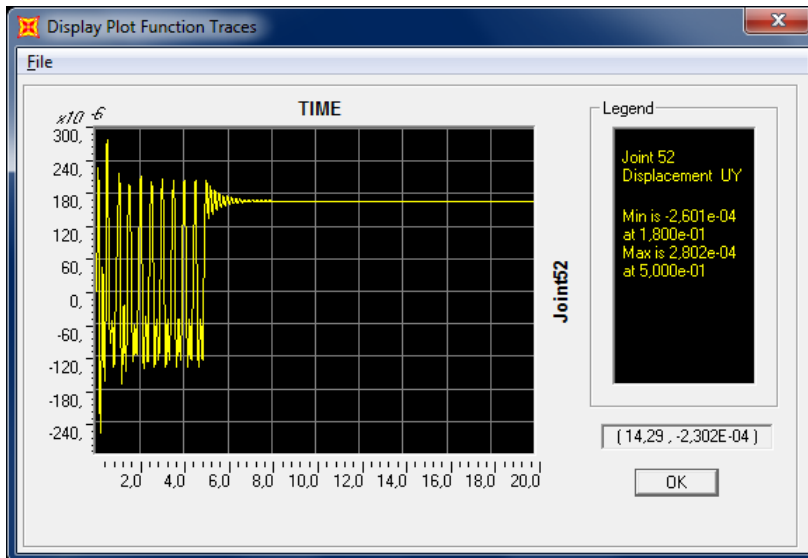


Figura 7 Histórico da aceleração lateral no meio do vão

O valor RMS da aceleração vertical no meio do vão é igual a $1,28 \text{ m/s}^2$, obtido a partir da série temporal mostrada na Figura 5, sendo maior que a aceleração-limite de $0,75 \text{ m/s}^2$, conforme prescrito na norma inglesa (ISE, 2008). Por outro lado, o valor RMS da aceleração lateral no meio do vão é igual a $0,03 \text{ m/s}^2$, obtido a partir da série temporal mostrada na Figura 6, cuja magnitude está aceitável em termos de conforto humano para deslocamentos laterais.

Nestes termos, observa-se que os usuários da passarela sentirão uma incomodidade, devida à excitação vertical produzida pelos carregamentos dinâmicos, quando estiverem posicionados no meio do vão.

Os valores RMS dos deslocamentos vertical e lateral no quarto do vão são, respectivamente, iguais a 3 mm e 0,08 mm, sendo menores que o deslocamento-limite de 7 mm, prescrito na norma inglesa (ISE, 2008). Os valores RMS das acelerações vertical e lateral no quarto do vão são, respectivamente, iguais a 0,49 m/s² e a 0,023 m/s², sendo menores que a aceleração-limite de 0,75 m/s², conforme prescrito na norma inglesa (ISE, 2008). Os usuários da passarela não sofrerão os efeitos das vibrações verticais e laterais quando estiverem posicionados no quarto do vão.

O mecanismo de vibrações laterais induzidas pela movimentação da multidão de pessoas sobre o sistema estrutural, que caracteriza a tendência à vibração lateral da passarela, está relacionado ao parâmetro PSN, um adimensional de excitação transiente.

O parâmetro PSN mantém correlação entre a taxa de amortecimento ζ e a razão entre as massas estruturais M e as massas equivalentes devidas à multidão de pessoas denominada m , ou seja:

$$\text{PSN} = \frac{2\zeta M}{m} > \alpha \cdot \beta = \frac{2}{3} \cdot 0,4 = 0,26$$

Notando-se que as massas são tomadas por unidade de comprimento e os parâmetros α e β são empiricamente determinados e se associam à amplitude de movimentação lateral das pessoas e a tendência à oscilação sincronizada com a vibração natural da estrutura da passarela. Neste trabalho serão adotados os valores $a = 2/3$ e $b = 0,4$ (NEWLAND, 2003b). Se o parâmetro PSN for menor do que o valor recomendado, as amplitudes de oscilações tendem a divergir da faixa de amortecimento crítico e a entrar na faixa de vibrações autoexcitadas e amplificadas. São desejáveis valores altos parâmetro PSN.

Para a avaliação do parâmetro PSN, considerando-se a participação modal para o primeiro modo de vibração vertical igual a 0,819 (Tabela 1), a massa da estrutura por unidade de comprimento $M = 2500 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,714 \text{ m}^2 \cdot 0,819 = 1462 \text{ kg/m}$, a massa devida à multidão de pessoas $m = 500 \text{ kg/m}^2 \cdot 2,20 \text{ m}^2 = 1100 \text{ kg/m}$ e a taxa de amortecimento $\zeta = 0,05$, chega-se a:

$$\text{PSN} = \frac{2\zeta M}{m} = \frac{2 \cdot 0,05 \cdot 1462}{1100} = 0,13 < \alpha \cdot \beta = \frac{2}{3} \cdot 0,4 = 0,26$$

3.2 Seção Aumentada

A solução de engenharia estrutural adotada para atender os atuais critérios de conforto de usuários de passarelas implica no aumento da seção transversal de forma a reduzir o desconforto observado. Deste modo, aumentando-se a altura da seção transversal

de 1,1 m para 2,3 m, a largura de 0,3 m para 0,35 m e a espessura da mesa superior de 0,12 m para 0,20 m, tem-se uma área de seção transversal igual a $A = 1,51 \text{ m}^2$.

Procedendo-se análises modal, considerando-se o aumento da seção transversal, chega-se ao valor da primeira frequência natural da estrutura igual a 2,80 Hz, que sendo menor que 6 Hz, deve-se proceder a análise dinâmica transiente.

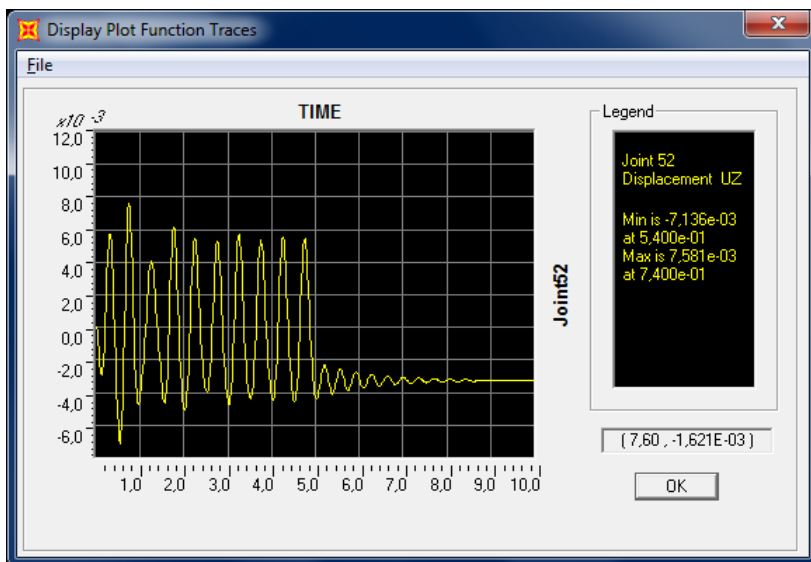


Figura 8 Histórico do deslocamento vertical no meio do vão para a seção aumentada

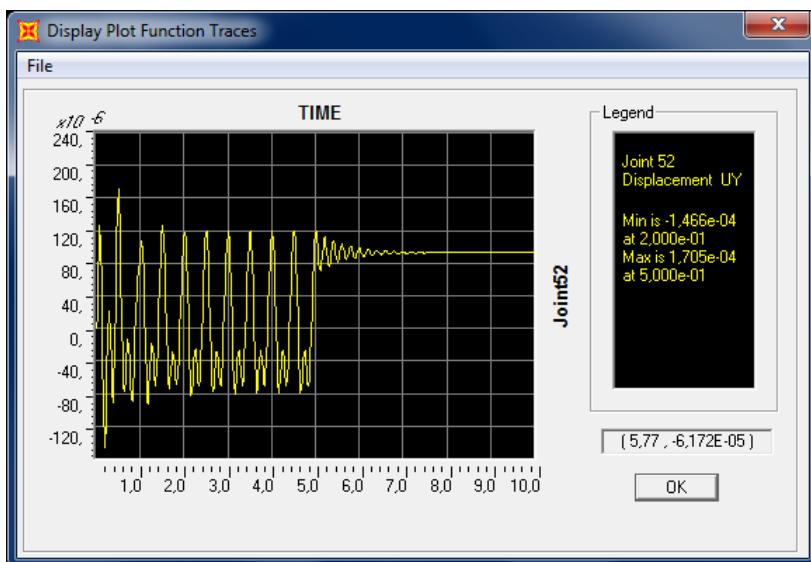


Figura 9 Histórico do deslocamento lateral no meio do vão para a seção aumentada

O valor RMS do deslocamento vertical no meio do vão é igual a 3 mm, obtido a partir da série temporal mostrada na Figura 8, sendo menor que o deslocamento-limite de 7 mm, prescrito na norma inglesa (ISE, 2008). Por outro lado, o valor RMS do deslocamento lateral no meio do vão é igual a 0,08 mm, obtido a partir da série temporal mostrada na Figura 9. Observa-se que a magnitude dos deslocamentos calculados é aceitável em termos de conforto humano para deslocamentos-limites de norma.

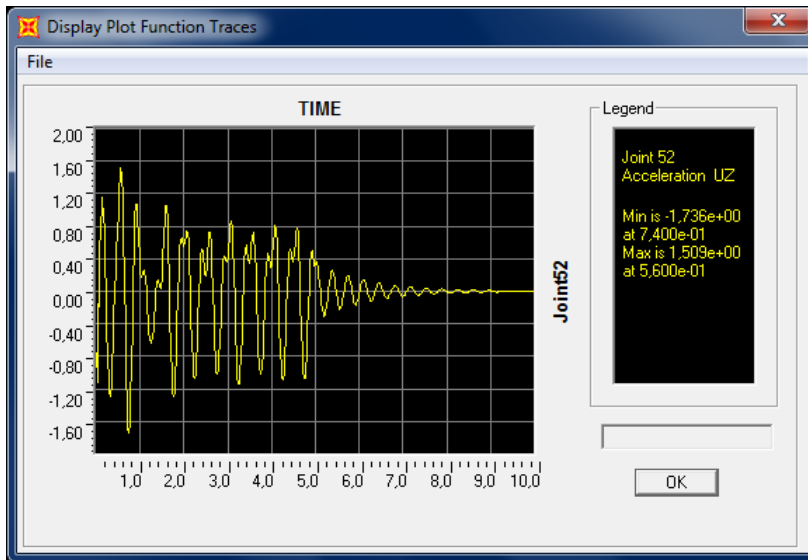


Figura 10 Histórico da aceleração vertical no meio do vão para a seção aumentada

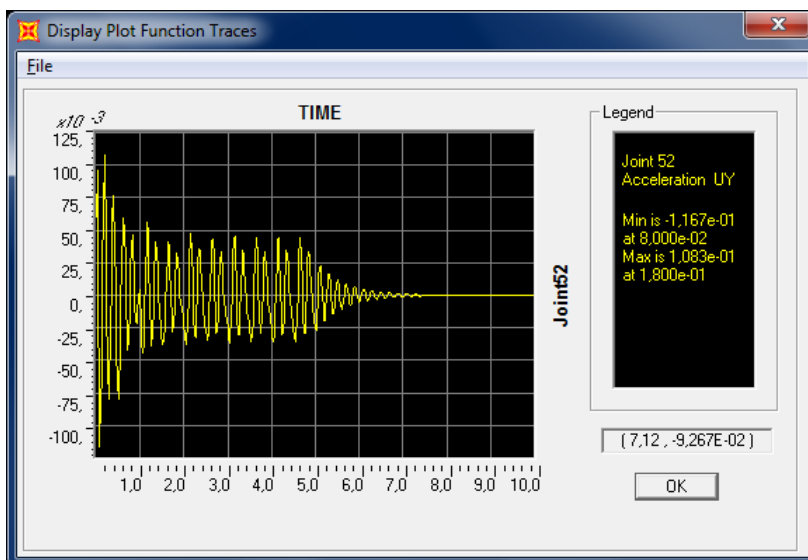


Figura 11 Histórico da aceleração lateral no meio do vão para a seção aumentada

O valor RMS da aceleração vertical no meio do vão é igual a $0,49 \text{ m/s}^2$, obtido a partir da série temporal mostrada na Figura 10, sendo menor que a aceleração-limite de $0,75 \text{ m/s}^2$, conforme prescrito na norma inglesa (ISE, 2008). Por outro lado, o valor RMS da aceleração lateral no meio do vão é igual a $0,02 \text{ m/s}^2$, obtido a partir da série temporal mostrada na Figura 11. Observa-se que a magnitude das acelerações calculadas é aceitável em termos de conforto humano para acelerações-limites de norma.

Para a avaliação do parâmetro PSN, considerando-se a participação modal para o primeiro modo de vibração vertical igual a 0,82, a massa da estrutura por unidade de comprimento $M=2500 \text{ kg/m}^3 \cdot 1,51 \text{ m}^2 \cdot 0,82=3096 \text{ kg/m}$, a massa devida à multidão de pessoas $m=500 \text{ kg/m}^2 \cdot 2,20 \text{ m}^2=1100 \text{ kg/m}$ e a taxa de amortecimento $\zeta = 0,05$, chega-se a:

$$\text{PSN} = \frac{2\zeta M}{m} = \frac{2 \cdot 0,05 \cdot 3096}{1100} = 0,28 > \alpha \cdot \beta = \frac{2}{3} \cdot 0,4 = 0,26$$

que é aceitável, evitando-se que as amplitudes das oscilações sejam autoexcitadas pela interação dinâmica da movimentação da multidão de pessoas e a estrutura da passarela.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Uma vez concebido o projeto e detectadas ocorrências de vibrações altas a níveis de incômodo do pedestre que utiliza a passarela, ainda é possível a adoção de medidas remediadoras: (i) utilização de atuadores dinâmicos sincronizados para o caso de passarelas que apresentem níveis de vibração não aceitáveis. Tais dispositivos representam uma solução econômica e ao mesmo tempo é tida como a mais apropriada. Seu efeito tende a diminuir a aceleração vertical provocada pela ação humana; (ii) implantação do sistema de amortecimento massa-mola, que representa uma solução de baixo custo de aquisição e instalação, porém limitada a grande variação de frequência de excitação, que não corresponde ao caso atual.

Salienta-se a importância de se avaliar a condição de vibrações transientes, não somente para as verificações de conforto humano, como também, segundo contexto da análise de riscos estruturais associados.

Além disso, deve-se observar que as análises dinâmicas numéricas de estruturas sujeitas à ação humana se caracterizam por uma considerável dispersão de resultados, em relação aos valores encontrados experimentalmente. Isto se deve tanto às incertezas intrínsecas ao tipo de carregamento estudado como aquelas ligadas às características geométricas e de materiais da estrutura como construída, não sendo incomum haver discrepâncias da ordem de 15% a 30% entre modelo e realidade (ISE, 2008).

Apesar do valor RMS do deslocamento vertical e da aceleração, assim como, o parâmetro PSN não atenderem os limites desejados para o caso da seção original (não aumentada), deve-se considerar que os torcedores, durante a travessia da passarela, dificilmente terão o mesmo comportamento quando estiverem ocupando as arquibancadas no estádio de futebol.

Vale destacar que o aumento da seção transversal permitirá um controle maior dos deslocamentos laterais e das acelerações laterais autoexcitadas, sendo esta última

responsável pelo desequilíbrio dos transeuntes da passarela, levando-os a utilizarem os corrimãos do guarda-corpo. Neste caso, os valores obtidos estão dentro dos limites de aceitabilidade e incomodidade humana.

5 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR6118: Projeto de Estruturas de Concreto – procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2014. Versão Corrigida: 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR7188: Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas**. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR9452: Inspeção de pontes, viadutos e passarelas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

BACHMANN, H.; AMMANN, W. J.; DEISCHL, F.; EISENMANN, J.; FLOEGL, I.; HIRSCH, G. H.; KLEIN, G. K.; LANDE, G. J.; MAHREHOLTZ, O.; NATKE, H. G.; NUSSBAUMER, H.; PRETLOVE, A. J.; RAINER, J. H.; SAEMANN E. U.; STEINBEISSER, L. **Vibration problems in structures: practical guidelines**. Germany: Verlag, 1995.

DALLARD, P.; FITZPATRICK, T.; FLINT, A.; LOW, A.; SMITH, R. R.; WILLFORD, M.; ROCHE, M. **London Millennium Bridge: pedestrian-induced lateral vibration**. Trans. ASCE, Journal of Bridge Engineering, 2001, 6, 412–417.

INSTITUTION OF STRUCTURAL ENGINEERS (ISE). **Dynamic performance requirements for permanent grandstands subject to crown load. Recommendations for management, design and assessment**. London: Institution of Structural Engineers, 2008.

McROBIE, A.; MORGENTHAL, G. **Risk Management for pedestrian-induced dynamics of footbridges**. In: Proceedings of the International Conference on Footbridges 2002, Paris, France, 2002.

NEWLAND, D. E. **Vibration of the London Millennium Bridge: cause and cure**. International Journal of Acoustics and Vibration, 2003a, 8(1), 9–14.

NEWLAND, D. E. **Pedestrian Excitation of Bridges: recent results**. In: Proceedings of Tenth International Congress on Sound and Vibration, Stockholm, Sweden, 2003b.

Agradecimentos

Ao Programa Institucional de Iniciação Científica PIBIC – MACKENZIE pelo apoio financeiro.

Ao engenheiro Rafael Timerman, da empresa Engeti Consultoria Engenharia, pela sugestão do tema e apoio técnico ao longo do desenvolvimento da pesquisa.

Ao Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo pelo fornecimento dos desenhos do projeto padrão da passarela.

Contatos:

ricardodeol94@gmail.com (aluno IC)

alfonso@mackenzie.br (orientador)