



Avaliação do Comportamento Dinâmico de Passarelas Submetidas a Atividades Humanas

Maria Clara da P. Ribeiro¹, Cássio Marques Rodrigues Gaspar¹, Daniel Carlos Taissum Cardoso¹

¹Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro /Departamento de Engenharia Civil e Ambiental /
maria.clararibeiro@hotmail.com / cassiogaspar@esp.puc-rio.br / dctcardoso@puc-rio.br

Resumo

O avanço das diferentes áreas do conhecimento, sobretudo no que diz respeito a Engenharia Civil, é de imediata constatação, com projetos desafiadores e inovadores os quais demandam soluções que contemplem a arquitetura almejada, estabilidade e segurança. Como evidenciado, o progresso na ciência e tecnologia dos materiais propicia a construção de estruturas que se apresentam mais leves, esbeltas e com maiores vãos, sendo assim mais flexíveis. Consequentemente, estes sistemas estruturais – aliados ao seu baixo amortecimento intrínseco – se tornam mais susceptíveis a efeitos de vibrações excessivas oriundas de carregamentos dinâmicos. Nesse sentido, as crescentes demandas por avaliações de estruturas que representem as diferentes situações da realidade nas quais tais construções estão submetidas tornam-se um fator atrativo para a avaliação de seu comportamento dinâmico – uma vez que a análise através de uma abordagem exclusivamente estática pela observação dos deslocamentos limites recomendados pelas normas brasileiras não representa a real natureza deste problema. Desse modo, o principal objetivo deste estudo é avaliar numericamente, através do programa computacional SAP2000, o conforto humano de uma passarela mista (aço-concreto), localizada no Terminal Centro Olímpico da cidade do Rio de Janeiro – RJ, submetida a atividades humanas de saltar e caminhar. Os estudos de casos avaliados contemplam a análise das frequências e modos de vibração do sistema estrutural bem como a sua resposta dinâmica em termos de acelerações. Finalmente, com base em normas e guias de projetos internacionais, os resultados indicaram situações de vibrações excessivas e indução de ressonância em que os limites normativos de acelerações foram ultrapassados.

Palavras-chave

Análise dinâmica; passarelas; modelos de carregamento dinâmico; conforto humano; vibrações excessivas.

Introdução

A maior suscetibilidade de estruturas a vibrações relaciona-se, entre outros fatores, aos desdobramentos decorridos da evolução da ciência dos materiais, os quais contribuem para a modificação/criação de materiais empregados na construção. Como referido, tais avanços têm por consequências novas métricas, formas e concepções de projetos que, no geral, apresentam uma estrutura mais leve, flexível e esbelta, estando sujeitas a efeitos mais perceptíveis da ação dinâmica. Deste modo, as análises outrora feitas exclusivamente sob a perspectiva estática, passam a não corresponder a um conhecimento mais preciso e completo acerca da resposta da estrutura as ações sob as quais está submetida. Sendo assim, as crescentes demandas por avaliações de estruturas que representem as diferentes situações da realidade nas quais tais construções estão submetidas tornam-se um fator atrativo para o desenvolvimento da temática – uma vez que a perspectiva exclusivamente estática não contempla a amplitude de casos que condizem com as condições de interação entre estrutura, meio e uso.

Soma-se a estes fatores os casos referidos na literatura os quais corroboram a relevância do estudo e avaliação de comportamentos dinâmicos das estruturas, visto que, além da questão de conforto, a segurança dos usuários



durante a utilização das mesmas está relacionada a tais comportamentos. Tais casos relacionam-se, sobretudo, a problemas decorrentes de vibrações excessivas de estruturas.

O caso ocorrido na Millennium Bridge, em Londres, no qual a interdição da estrutura ocorreu após o evento de inauguração devido a ocorrência de vibrações excessivas perceptíveis durante o momento da travessia, repercute visto que a inovação proposta da estrutura como símbolo dos avanços tecnológicos/construtivos conflitou com os problemas dinâmicos não avaliados (DALLARD et al., 2001). Caso semelhante ocorreu na Toda Park, no Japão, a qual após grande concentração de pessoas durante a travessia de expectadores de um evento esportivo apresentou deslocamentos de seus elementos estruturais, os quais levaram os pedestres a busca de apoio para continuidade do percurso (NAKAMURA; FUJINO, 2002).

Dentre as diferentes concepções estruturais, as passarelas são recorrentemente solicitadas por ações de âmbito estático e dinâmico. Além disso, durante o transcorrer dos anos a forma como estas são utilizadas sofre variações – rotina de uso, frequências de uso da estrutura, comportamento do usuário, entre outras. Pensando-se nestas variações, na segurança e conforto dos usuários, o entendimento mais amplo da estrutura torna-se, de fato, relevante, ou seja, uma análise estática acompanhada de uma avaliação dinâmica complementa-se no entendimento amplo da estrutura – corroborando a uma solução de projeto que seja conciliatória aos diferentes fatores.

Como supracitado, a principal questão a ser analisada relaciona-se as vibrações, as quais, por sua vez, ocorrem a partir da interação entre ações/perturbações, variantes ao longo do tempo, e as propriedades de inércia do meio afetado. Tais ações podem ser descritas por forças ou funções de deslocamentos impostas sobre um meio. Além disso, o entendimento desta problemática envolve a análise de três pontos fundamentais: (a) fonte de vibração; (b) caminho de transmissão; (c) receptor (ISO 10137, 2007).

Ressalta-se que a consideração em projeto das forças dinâmicas requer que estas sejam modeladas analiticamente – a modelagem pode ser no domínio do tempo ou da frequência. Contudo, esta tarefa apresenta certo grau de complexidade tendo em vista: (a) a existência de diferentes forças induzidas pelo homem que podem além de serem variáveis no tempo, variam no espaço; (b) as forças relacionam-se a uma diversidade de parâmetros; (c) a força dinâmica induzida por uma pessoa não é um processo simples e compreendido plenamente sendo de difícil modelagem; (d) quando as ações referem-se a grupos de pessoas, o número de participantes, assim como o grau de sincronização entre eles são variáveis de difícil correlação; (e) há indícios de que as forças são diferentes quando o movimento é percebido e quando este não é perceptível, visto que o comportamento dos usuários em ambas as situações difere (ŽIVANOVIĆ et al., 2005).

Modelo estrutural e modelagem computacional da passarela mista (aço-concreto) investigada

O estudo de caso apresentado refere-se a passarela do Terminal Centro Olímpico - RJ, construída em 2015, como parte da obra de integração entre o complexo Olímpico – destinado a grandes eventos esportivos ou musicais, como os Jogos Olímpicos e o Rock in Rio – e o terminal do sistema de transporte público BRT (*Bus Rapid Transit*) – ônibus de trânsito rápido. A passarela apresenta uma estrutura considerada mista, ou seja, aço-concreto, com aproximadamente 210 m, sendo dividida em 4 trechos, os quais são contados no sentido do início da travessia a partir da proximidade do complexo Olímpico em direção ao terminal de BRT de acordo com as Figuras 1 e 2.

A motivação para o estudo desta passarela deu-se ao fato que, após sua inauguração, diferentemente do previsto, a quantidade de usuários da estrutura apresentou-se de modo reduzido relativo ao esperado. Sendo posteriormente investigado o motivo do uso reduzido, os pedestres relataram o desconforto durante o momento da travessia uma vez que a estrutura apresenta vibrações que geram sensação de insegurança. Outro fator mencionado foi a vibração da passarela a qual se torna perceptível em condições adversas – tais como ventos e chuvas fortes (DIAS; SOUZA, 2017). Desse modo, destaca-se a importância do estudo do comportamento dinâmico deste sistema estrutural por estar sujeito a um elevado fluxo de pedestres durante a realização de eventos.



Figura 1 – Vista aérea da Passarela Terminal Centro Olímpico: Trechos 1 - 4 [Fonte: Google Earth].



a) Vista dos trechos 2 e 3

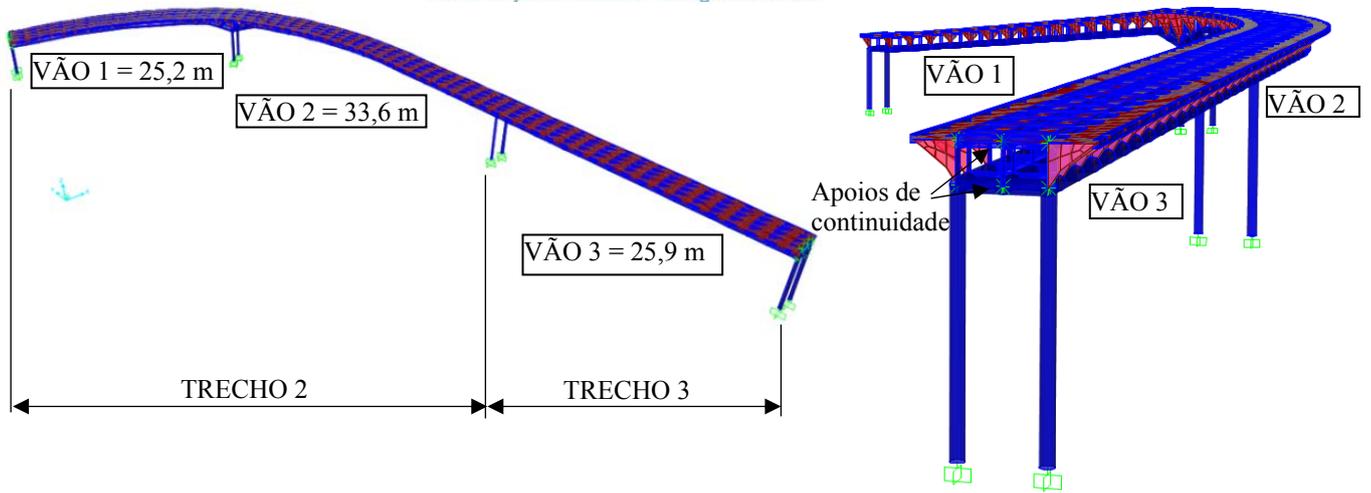


b) Detalhe das longarinas e transversinas metálicas

Figura 2 – Passarela Terminal Centro Olímpico (DIAS; SOUZA, 2017).

O tabuleiro da estrutura é de concreto sendo apoiado em chapas metálicas. A passarela apresenta três longarinas metálicas tubulares circulares interligadas por chapas metálicas – em cada eixo, há enrijecedores laterais ligados às longarinas e cantoneiras extremas da seção transversal (ver Figura 2b). A mesoestrutura da passarela é composta por pilares metálicos tubulares circulares conectados por transversinas tubulares circulares – os quais ocorrem em pares para os trechos 2 e 3; contudo, nos Trechos 1 e 4 há disposições diferentes.

A Figura 3 apresenta o modelo numérico 3D desenvolvido no programa computacional SAP 2000. Neste estudo, modelaram-se os trechos 2 e 3, uma vez que são de maior interesse para a análise dinâmica da passarela, apresentando vãos livres de 25,2 m; 33,6 m e 25,9 m, respectivamente. O material adotado para os elementos corresponde ao aço AR350 com propriedades: tensão de escoamento (f_y) de 370 MPa; módulo de elasticidade (E) de 200 GPa e massa específica (γ) igual a 7850 kg/m³. Considerou-se que o tabuleiro da seção corresponde a uma seção composta de aço-concreto, sendo adotada na modelagem uma seção única de aço determinada por meio do cálculo de seção equivalente – tal consideração é adotada a partir das hipóteses de que os materiais trabalham de modo conjunto (DIAS; SOUZA, 2017).



a) Vista geral

b) Detalhe da seção transversal

Figura 3 – Modelo numérico desenvolvido no SAP 2000 (adaptado de DIAS e SOUZA, 2017).

No que se refere as condições de contorno, conforme a Figura 3b, os pilares foram engastados enquanto nas regiões extremas dos trechos consideraram-se apoios de segundo gênero a fim de assegurar-se a continuidade da estrutura em relação aos demais vãos não modelados. Salienta-se que informações detalhadas pertinentes ao modelo estrutural e numérico são expostas em Dias e Souza (2017) e Ribeiro (2020). Ressalta-se também que não serão contempladas, neste estudo, alterações da estrutura *in loco* posteriores à construção.

Análise das frequências naturais e modos de vibração do sistema estrutural

A análise dinâmica de passarelas pode seguir uma metodologia composta pelas etapas descritas na Figura 4. Segundo as classes apresentadas pelo guia de projeto SÉTRA (2006) em função do tráfego de pedestres, a passarela estudada pode ser classificada como de Classe III, ou seja, estrutura de uso padrão que ocasionalmente pode ser atravessada por grandes grupos de pessoas, mas não sendo carregadas em toda a sua área de rolamento. Sendo assim, são necessárias as etapas posteriores de avaliação dinâmica compreendendo a análise modal (obtenção das frequências naturais e modos de vibração da estrutura) e a análise transiente, através da qual podem ser determinadas as acelerações do sistema estrutural submetido ao carregamento dinâmico. Em seguida, tais respostas dinâmicas são comparadas com os limites de aceleração relativos ao conforto dos pedestres.

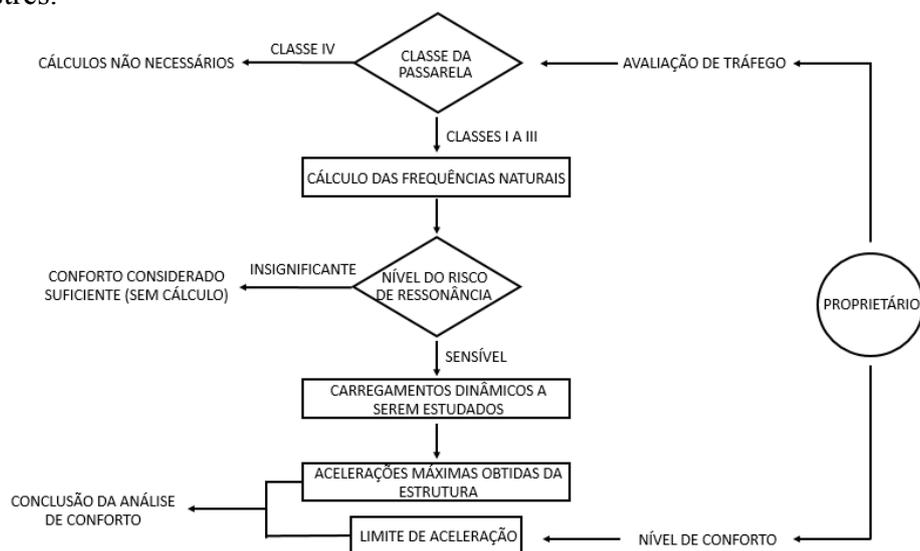


Figura 4 – Metodologia para análise dinâmica de passarelas [Adaptado: SÉTRA (2006)].

A implementação de análise para a determinação dos modos de vibração natural da estrutura foi executada no software SAP2000 v.20, levando-se em conta as matrizes de rigidez e a massa do modelo numérico. Salienta-se que o amortecimento estrutural não é considerado nesta análise. Em decorrência do interesse na determinação de modos de vibração mais importantes que podem ser excitados pela atividade do caminhar ou saltos, estipulou-se inicialmente a determinação dos 20 primeiros modos naturais de vibração da estrutura, variando de 1,99 Hz a 14,24 Hz de acordo com a Tabela 1. Ressalta-se que estes modos apresentam um comportamento predominantemente de flexo-torção do tabuleiro, conforme apresentado na Figura 5.

Portanto, a análise modal evidencia resultados os quais expõem a sensibilidade da estrutura a situações de ressonância. Isto porque:

- (i) De acordo com os resultados dos Modos 1 a 5 (ver Tabela 1), as frequências encontram-se abaixo do limite estabelecido pela NBR 6118 (2014), a qual para situações de passarelas a frequência crítica corresponde a 4,5 Hz, sendo recomendado valor de, pelo menos, 20% superior a este, ou seja, uma frequência da estrutura de 5,4 Hz.
- (ii) Segundo o guia AISC (2016), deve-se evitar que as frequências naturais de pisos e passarelas se encontrem abaixo de 3,0 Hz. Ou seja, o Modo 1 ($f=1,998$ Hz) está abaixo desse limite, implicando assim em uma situação de risco ocorrência de ressonância – sobretudo para situações de excitação deliberada como vandalismo (*vandal loads*).
- (iii) Quanto às faixas apresentadas pelo SÉTRA (2006), o Modo 1 apresenta resultados na faixa de risco máximo de ressonância – 1,7 Hz a 2,1 Hz enquanto os modos 2, 3 e 4 se enquadram na categoria de baixo risco para situações típicas de caminhada. Além disso, para frequências acima de 5 Hz, este risco torna-se insignificante segundo este guia.

Desse modo, verifica-se que a estrutura apresenta sensibilidade quanto ao risco da ocorrência de ressonância primordialmente até o 4º modo de vibração. Portanto, faz-se necessária a análise dos diferentes casos de carregamentos dinâmicos induzidos por atividade humana aos quais a estrutura está submetida. Por outro lado, cabe salientar que situações de ressonância podem ocorrer até 9 Hz com os harmônicos mais elevados da atividade humana. Para frequências acima de 9 Hz, o guia AISC (2016) menciona que a resposta dinâmica é dominada por impactos transientes, não havendo, portanto, a ocorrência de ressonância. Contudo, Mohammed et al. (2018) sugerem que situações de ressonância podem ocorrer até 14 Hz.

Tabela 1 – Frequências naturais da passarela.

Modo de vibração	Frequência (Hz)	Modo de vibração	Frequência (Hz)
1º	1,998	11º	9,110
2º	3,312	12º	9,670
3º	3,680	13º	10,200
4º	3,913	14º	10,340
5º	5,125	15º	10,902
6º	5,840	16º	11,746
7º	6,112	17º	12,978
8º	6,952	18º	13,640
9º	8,304	19º	13,953
10º	8,531	20º	14,243

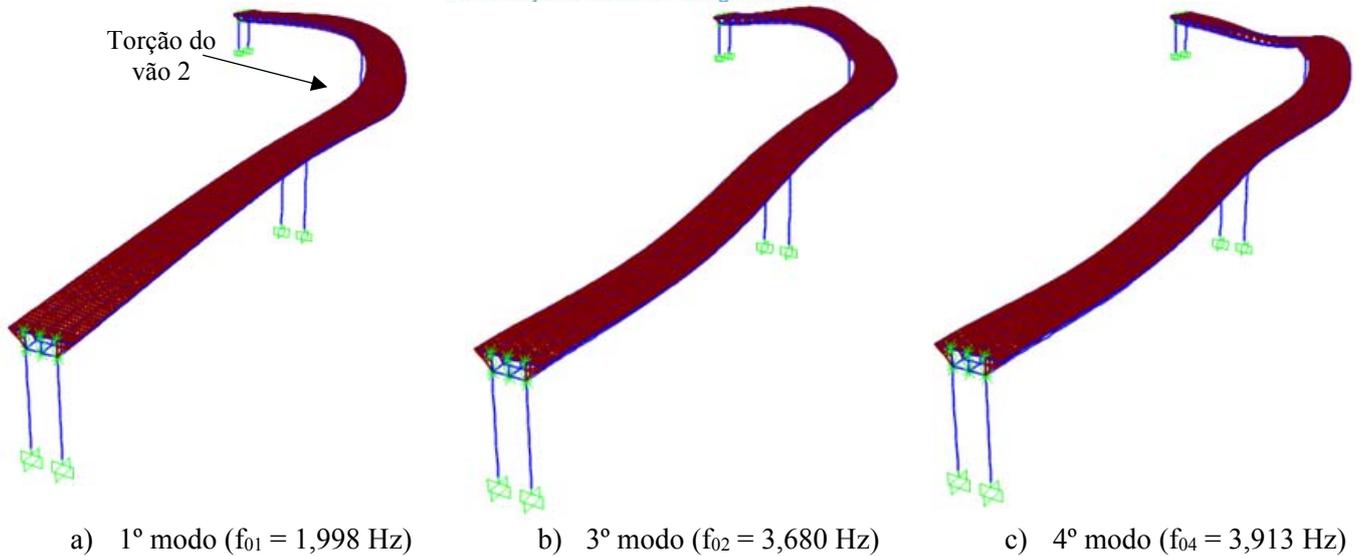


Figura 5 – Modos de vibração vertical da passarela com risco de ressonância.

Avaliação do conforto humano segundo normas e guias de projeto

A seguir, mediante a avaliação da resposta observada na análise modal, tem-se a implementação dos estudos de casos, conforme a Tabela 2, referentes aos carregamentos induzidos (vibração forçada) por atividades humanas como saltos e caminhada, considerando as faixas de frequências coincidentes aos modos de vibração da estrutura e bem como os locais onde ocorrem as maiores amplitudes modais. Dessa forma, estuda-se a ocorrência de ressonância e identificam-se as respostas de acelerações para avaliação do conforto humano.

Tabela 2 – Estudo de casos considerando a análise transiente (vibração forçada).

Estudo de Caso	Tipo de atividade	Número de pessoas	Guia/Norma	Frequência de excitação do passo (Hz)	Posicionamento do carregamento
1	saltos	1	AISC (2016)	2,00 (1º harmônico)	Meio do vão 2 (canto do tabuleiro)
2		1	ISO 10137 (2007)		
3		16	AISC (2016)		
4		16	ISO 10137 (2007)		
5	caminhada	1	AISC (2016)		
6		1	SÉTRA (2006)		

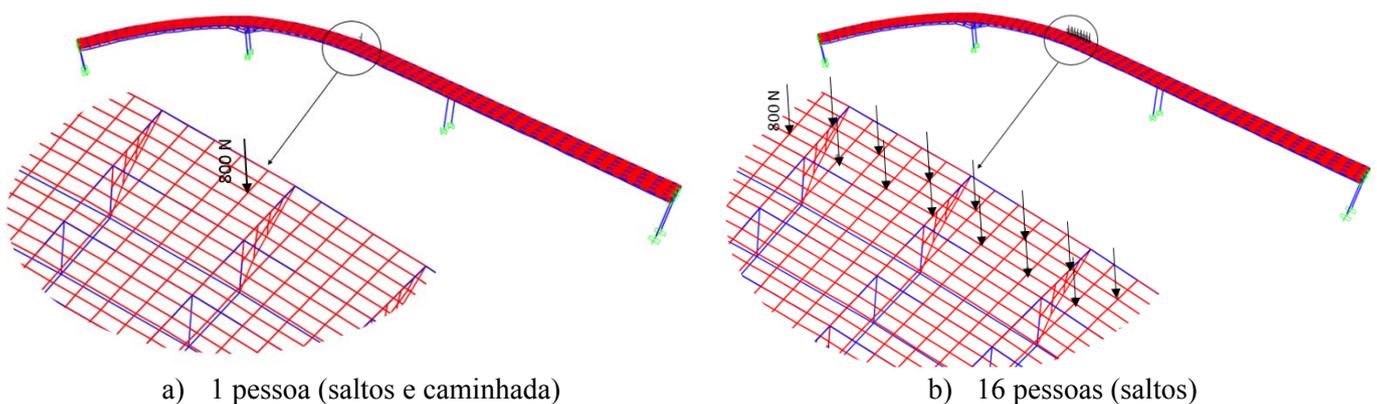
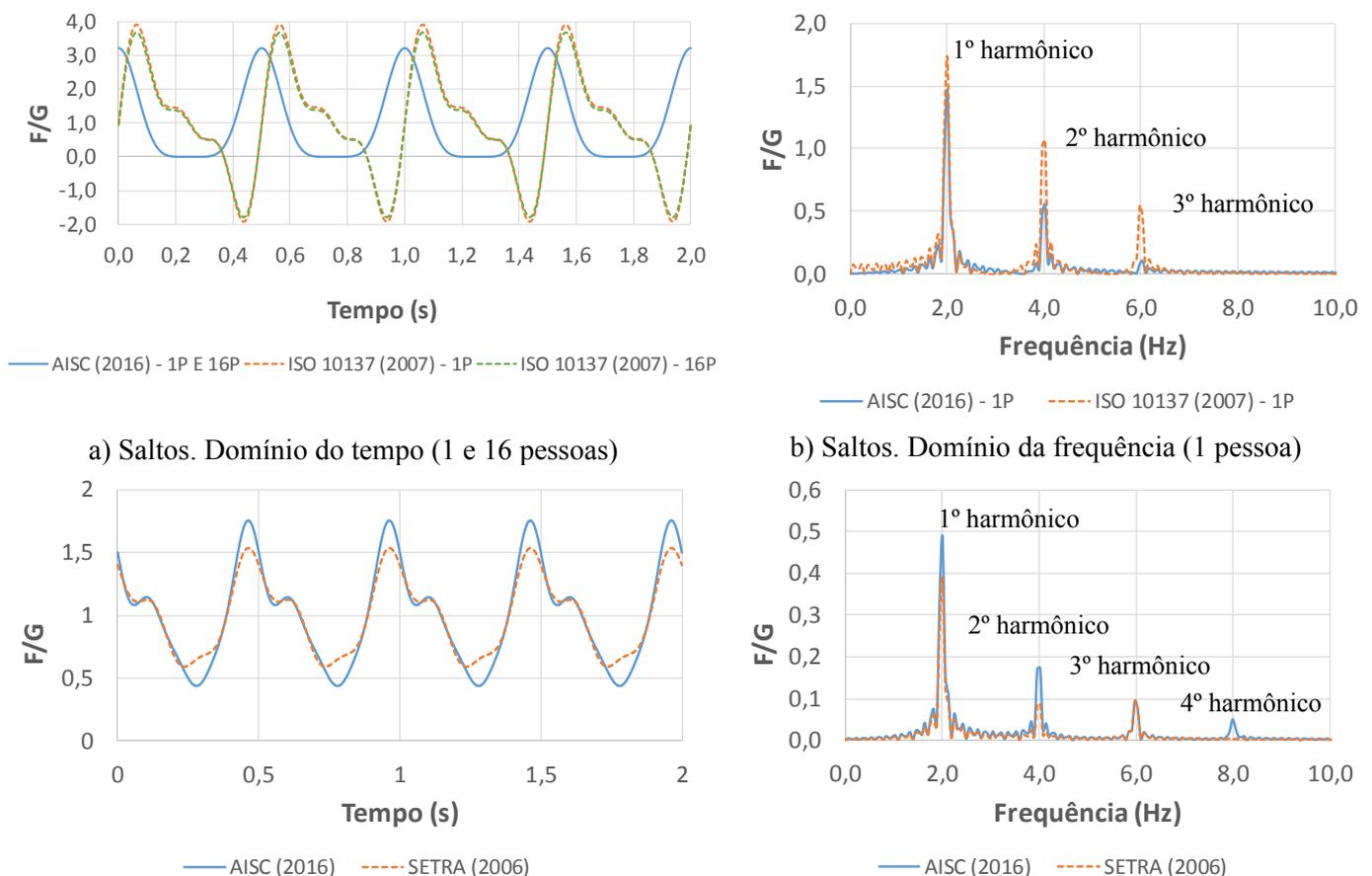


Figura 6 – Posicionamento do carregamento dinâmico.

Os carregamentos dinâmicos foram aplicados na região lateral do 2º vão do tabuleiro para a amplificação do movimento torcional característico do primeiro modo ($f=1,998$ Hz), de acordo com a Figura 6, considerando tanto uma pessoa quanto 16 pessoas realizando saltos e uma pessoa caminhando sobre a passarela.

Adotou-se para estas análises, no caso de saltos, as equações de força dinâmica representativas do guia AISC (2016) e da norma ISO 10137 (2007). Enquanto isso, para as atividades de caminhada, os modelos referem-se aos apresentados pelo AISC (2016) e SÉTRA (2006). A Figura 7 apresenta um exemplo dessas funções de carregamento, no domínio do tempo e da frequência, considerando a força dinâmica normalizada (F/G) pelo peso estático de um pedestre ($G=800$ N) e adotando-se um valor de frequência do passo igual a 2 Hz. É interessante notar que, através da Figura 7b, os harmônicos de força da função da norma ISO 10137 (2007) são mais elevados do que aqueles da função AISC (2016). No que diz respeito à caminhada (Figura 7d), percebe-se que a função AISC (2016) apresenta harmônicos com maiores magnitudes quando comparados com a função do guia SÉTRA (2006). Comparando-se as Figuras 7b e 7d, é notável que os saltos são mais energéticos do que a caminhada, sobretudo em relação aos dois primeiros harmônicos. Dessa forma, cabe salientiar que o primeiro modo da passarela ($f=1,998$ Hz) se encontra justamente no harmônico da atividade humana que tem o maior contributo de energia de excitação.



c) Caminhada. Domínio do tempo (1 pessoa) d) Caminhada. Domínio da frequência (1 pessoa)
Figura 7 – Modelos de carregamento [força dinâmica normalizada pelo peso do indivíduo (F/G)] para atividades humanas (saltos e caminhada).

O método adotado para a avaliação da resposta dinâmica da estrutura (análise transiente) no SAP 2000 corresponde ao da superposição modal. A abordagem proposta por este representa uma combinação linear dos modos naturais de vibração da estrutura para a obtenção de uma configuração deformada em um dado instante sob carregamento o dinâmico (AVELINO, 2008). Desse modo, para os casos de saltos rítmicos, considerou-se a aplicação das funções de carregamento por um período de 10 segundos, e, em seguida, um período 30 segundos de vibração livre, totalizando a leitura dos dados em um intervalo de 40 segundos. Para a implementação da situação de caminhada, considerou-se uma trajetória de travessia correspondente a 10,0 m no canto do tabuleiro, sendo suficiente para gerar um caso de ressonância. Considerando uma caminhada normal, o AISC (2016) menciona que esta condição é alcançada através de uma trajetória de pelo menos 4,57 m (15 pés ou 6 passos de 2,5 pés). Além disso, o fator amortecimento estrutural adotado para a solução do problema dinâmico corresponde a 0,6%, recomendado para estruturas mistas (aço-concreto) conforme a Tabela 3.

Tabela 3 – Valores recomendados do fator de amortecimento estrutural de passarelas.

Guia/Norma	Aplicação	Fator de Amortecimento (ξ)
AISC (2016)	Passarelas em geral	1,0%
ISO10137 (2007)	Estrutura de aço com revestimento asfáltico ou epóxi	0,5%
	Estrutura mista (aço/concreto)	0,6%
	Estrutura de concreto protendido ou concreto armado	0,8%
SÉTRA (2006)	Estrutura de concreto armado	1,3%
	Estrutura concreto protendido	1,0%
	Estrutura mista (aço/concreto)	0,6%
	Estrutura de aço	0,4%
	Estrutura de madeira	1,0%

A Tabela 4 apresenta os limites de aceleração relativos ao conforto humano segundo os guias SÉTRA (2006) e AISC (2016) enquanto a Tabela 5 exibe a resposta dinâmica da passarela em termos de acelerações ponderadas de pico ($\dot{a}_{w,pico}$), MTVV (máximo valor de vibração transiente – *maximum transient vibration value*) e ESPA (aceleração de pico equivalente a uma vibração sinusoidal – *equivalent sinusoidal peak acceleration*). A aceleração ponderada (a_w) é definida pela ISO 2631 (1997) de forma a contabilizar influência da frequência e da direção da vibração sob a ótica da percepção humana. Neste caso, o intervalo de maior percepção humana ocorre na faixa de 4 a 8 Hz (GASPAR, 2018). O valor MTVV (ISO 2631, 1997) se refere ao máximo do valor RMS móvel (*running RMS – root mean square*), este usualmente expresso através de uma constante de integração de 1 segundo (1s RMS). A Figura 8a e 8c mostram a aceleração ponderada e curva 1s RMS móvel, no domínio do tempo, considerando os casos 2 (saltos, 1 pessoa – ISO 10137) e 5 (caminhada, 1 pessoa – AISC), respectivamente. Em relação à aceleração ESPA, o AISC (2016) a define como sendo o valor MTVV multiplicado pela raiz quadrada de 2.

Quando as Tabelas 4 e 5 são comparadas, observa-se que as acelerações de pico ($\dot{a}_{w,pico}$) e ESPA obtidas para os dois primeiros casos (saltos), iguais a 2,603 m/s² e 2,435 m/s² e a 3,509 m/s² e 3,014 m/s², respectivamente, ultrapassam tanto o limite recomendado pelo AISC (2016), de 0,5 m/s², bem como são classificadas como desconfortáveis/inaceitáveis (>2,50 m/s²) pelo SÉTRA (2006). Isto quer dizer que apenas a ação dinâmica de uma pessoa é suficiente para gerar vibrações que comprometem o conforto dos pedestres. Em relação aos casos 3 e 4, quando são considerados os saltos de um grupo de 16 pessoas, estes valores são cerca de 15 a 14 vezes maiores, respectivamente. No entanto, vale a pena ressaltar que esta análise não considera o efeito da interação ser humano-estrutura, em que as propriedades biodinâmicas do corpo humano (massa, rigidez e amortecimento) podem contribuir benéficamente para a atenuação das vibrações (GASPAR, 2018). Portanto, a resposta dinâmica estrutural obtida sem a consideração deste efeito tende a superestimada.

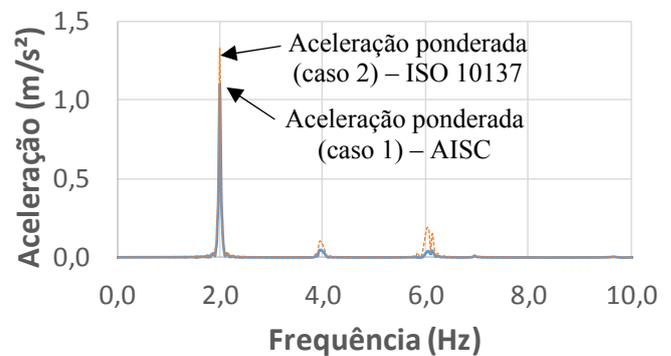
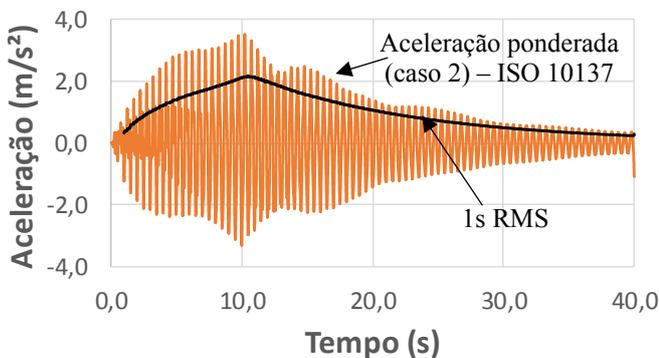
No que diz respeito à caminhada de 1 pessoa (casos 5 e 6), as acelerações de pico ($a_{w,pico}$) e ESPA, iguais a $0,772 \text{ m/s}^2$ e $0,645 \text{ m/s}^2$ e a $0,640 \text{ m/s}^2$ e $0,539 \text{ m/s}^2$, respectivamente, se encontram na faixa de conforto médio ($0,50 - 1,00 \text{ m/s}^2$) pelo SÉTRA (2006). Entretanto, estes valores ainda ultrapassam o limite de $0,5 \text{ m/s}^2$ do AISC (2016). É interessante também notar que, dependendo da função de carregamento escolhida, as respostas dinâmicas podem ser mais ou menos conservadoras (ver a Tabela 5 e as Figuras 8b e 8d). Em relação aos saltos, os casos referentes ao carregamento da ISO 10137 (2007) resultaram em acelerações maiores do que aquelas obtidas com o uso da função do AISC. No que se refere à caminhada, o modelo de carregamento do AISC (2016) conduziu a valores de aceleração maiores do que a função do SÉTRA (2006).

Tabela 4 – Critérios de conforto humano para passarelas (acelerações em m/s^2).

SÉTRA (2006)	AISC (2016)
0,00 – 0,50 (conforto máximo)	0,15 (passarelas internas)
0,50 – 1,00 (conforto médio)	
1,00 – 2,50 (conforto mínimo)	
> 2,50 (desconforto/inaceitável)	0,50 (passarelas externas)

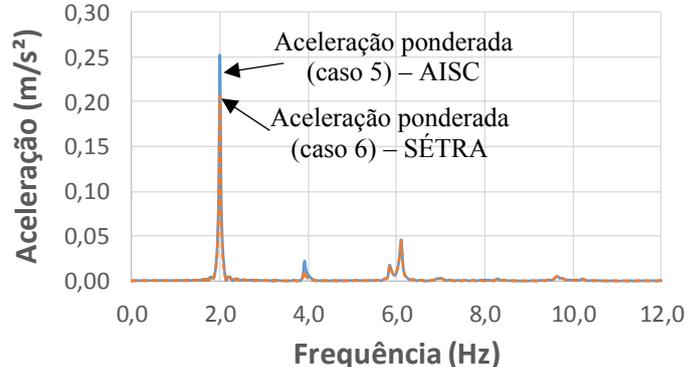
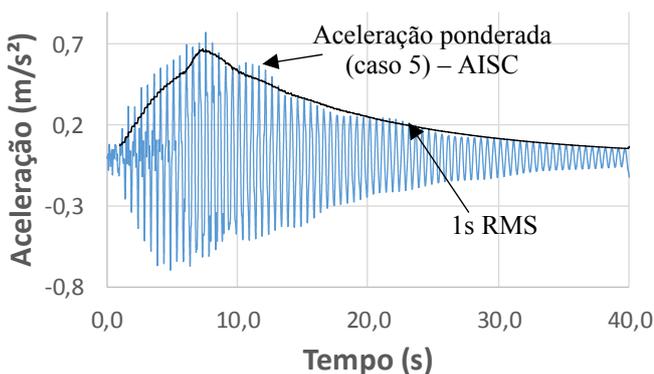
Tabela 5 – Resposta dinâmica (acelerações) da passarela submetida à vibração forçada.

Resposta dinâmica	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6
a_w (m/s^2), pico	2,603	3,509	39,373	49,802	0,772	0,640
MTVV (m/s^2)	1,722	2,131	26,020	30,270	0,456	0,381
ESPA (m/s^2)	2,435	3,014	36,798	42,808	0,645	0,539



a) Saltos. Domínio do tempo (1 pessoa)

b) Saltos. Domínio da frequência (1 pessoa)



c) Caminhada. Domínio do tempo (1 pessoa)

d) Caminhada. Domínio da frequência (1 pessoa)

Figura 8 – Resposta dinâmica da passarela em termos de acelerações.



Conclusões

Este trabalho avaliou numericamente, através do programa computacional SAP2000, o conforto humano de uma passarela mista (aço-concreto), localizada no Terminal Centro Olímpico da cidade do Rio de Janeiro – RJ, submetida a atividades humanas de saltar e caminhar. A análise das frequências e modos de vibração da passarela, variando de 1,99 Hz a 14,24 Hz, com base em normas e guias de projeto, indicou que a estrutura está sujeita a um alto risco de ressonância com a atividade humana, sobretudo em relação aos quatro primeiros modos. As diferentes modelagens de atividades humanas para carregamentos dinâmicos induzidos evidenciaram que, quanto à energia, e ao grau de impacto relacionado a estas, a estrutura pode apresentar respostas significativas e relevantes sob a ação dinâmica. Assim, foram avaliados 6 estudos de casos em ressonância com o primeiro modo ($f=1,99$ Hz) referente à torção do tabuleiro. As acelerações máximas obtidas considerando apenas uma pessoa saltando, com valores de $2,603$ m/s² e de $3,509$ m/s², extrapolaram o limite de conforto humano dos guias de projeto do AISC (2016) e SÉTRA (2006), sendo classificadas por este último como desconfortáveis e inaceitáveis. Além disso, para um grupo de 16 pessoas, estes valores foram cerca de até 15 vezes maiores. Em relação à caminhada de uma pessoa, as acelerações máximas de $0,772$ m/s² e $0,640$ m/s² se encontraram na faixa de conforto médio segundo o SÉTRA (2006) e ultrapassaram o limite considerado pelo AISC (2016), este igual a $0,5$ m/s². Portanto, a avaliação dinâmica apresentada mostrou-se relevante ao estudo do comportamento da estrutura analisada, visto que a concepção de um projeto apenas sob perspectiva estática não contempla as situações dinâmicas reais de uso da estrutura, as quais devem assegurar, além da segurança, o conforto dos usuários bem como minimizar a ocorrência de intervenções futuras, as quais, no geral, são onerosas e de execução com maior grau de complexibilidade.

Agradecimentos

Os autores deste trabalho de pesquisa agradecem ao suporte financeiro fornecido pelas agências brasileiras de fomento à pesquisa: CAPES, CNPq e FAPERJ.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118, Projeto de estruturas de concreto: Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- AVELINO, A. F. Elementos Finitos: A base da tecnologia CAE: Análise Dinâmica. Ed. Érica, Rio de Janeiro, 2008.
- DALLARD, P. et al., The London Millennium Footbridge. *Structural Engineer*, v. 79, n. 22, p. 17–33, London, England, 2001.
- DIAS, A. P.; SOUZA, F. C. T. T. Análise estática e dinâmica de passarela metálica no Terminal Olímpico do Rio de Janeiro. Projeto de Graduação em Engenharia Civil. PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2017.
- GASPAR, C. M. R. Avaliação do efeito da interação humana sobre pisos de edificações submetidos a atividades humanas rítmicas. Tese de Doutorado em Engenharia Civil. Universidade Estadual do Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2018.
- ISO 2631-1, Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 1: General requirements. Switzerland, 1997.
- ISO 10137, Bases for design of structures - Serviceability of buildings and walkways against vibrations. Switzerland, 2007.
- L'ASSOCIATION FRANÇAISE DE GÉNIE CIVIL. Footbridges – Assessment of vibration behaviour of footbridges under pedestrian loading. Service d'études techniques des routes et autoroutes (SÉTRA), Paris, France, 2006.
- MOHAMMED, A. S.; PAVIC, A.; RACIC, V., Improved model for human induced vibrations of high-frequency floors. *Engineering Structures*, v. 168, 2018.
- MURRAY, T. M. et al, Vibrations of Steel-Framed Structural Systems Due to Human Activity: AISC DG11 Second Edition. Chicago, USA, 2016.
- NAKAMURA, S. I.; FUJINO, Y., Lateral vibration on a pedestrian cable-stayed bridge. *Structural Engineering International: Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE)*, v. 12, n. 4, p. 295–300, Tokyo, Japan, 2002.
- RIBEIRO, M. C. P. Avaliação do comportamento dinâmico de passarelas submetidas a atividades humanas. Projeto de Graduação em Engenharia Civil. PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2020.
- ŽIVANOVIĆ, S.; PAVIC, A.; REYNOLDS, P., Vibration serviceability of footbridges under human-induced excitation: A literature review. *Journal of Sound and Vibration*, v. 279, 2005.