

Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2025**
10º Congresso Latino-americano da Construção Metálica
09 de Setembro de 2025, São Paulo - SP, Brasil

Tema: Dinâmica e vibração das estruturas de aço: projeto, dimensionamento e monitoramento da resposta às ações dinâmicas.

CONSIDERAÇÕES SOBRE A ANÁLISE DINÂMICA DE PASSARELAS DE PEDESTRES

Matheus Simon Vicente¹
Eduardo de Moraes Barreto Campello²
Henrique Campelo Gomes³

Resumo

Passarelas de pedestres, estruturas leves e esbeltas, estão naturalmente sujeitas a problemas de vibração. Este trabalho apresenta um levantamento dos principais métodos de análise dinâmica propostos por normas, manuais técnicos e pela literatura especializada. Identifica-se uma inconsistência relevante no cálculo das acelerações presente na ABNT NBR 7187. Um estudo de caso é realizado com base na modelagem computacional de uma passarela metálica localizada sobre o Rio Capibaribe, em Recife/PE. Quatro metodologias de análise são propostas: três a partir de modelagem computacional e uma utilizando método analítico da resposta espectral. Mostram-se variações significativas nos valores de aceleração obtidos entre os métodos, afetando a avaliação das condições de conforto. Conclui-se que a passarela apresenta suscetibilidade ao desconforto dos usuários.

Palavras-chave: Passarelas de pedestres; Análise dinâmica; Modelagem computacional; Avaliação de conforto.

CONSIDERATIONS ON THE DYNAMIC ANALYSIS OF FOOTBRIDGES

Abstract

Footbridges, lightweight and slender structures, are naturally prone to vibration issues. This study presents a review of the main dynamic analysis methods proposed by standards, technical manuals, and specialized literature. A relevant inconsistency is identified in the acceleration calculation presented in ABNT NBR 7187. A case study is carried out based on computational modeling of a steel footbridge located over the Capibaribe River, in Recife/PE. Four analysis methodologies are proposed: three based on computational modeling and one using an analytical method through spectral response analysis. Significant variations in acceleration values are observed among the methods, affecting the assessment of pedestrian comfort conditions. It is concluded that the footbridge is susceptible to user discomfort.

Keywords: Footbridges; Dynamic analysis; Computational modelling; Comfort assessment.

¹ Mestre em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

² Professor Associado, Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

³ Professor Doutor, Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Passarelas de pedestres são estruturas naturalmente susceptíveis a efeitos dinâmicos durante a passagem de pedestres, mas esse fato nem sempre foi rigorosamente abordado durante o projeto dessas estruturas. No final do século XX e início do século XXI, em Paris e Londres, durante os dias de inauguração das passarelas *Solferino* (1999) e *Millenium Bridge* (2000), respectivamente, foram registrados deslocamentos transversais excessivos e conseqüente desconforto dos pedestres durante a travessia. Ingólfsson & Jönsson (1) e Dallard et al. (2) apresentaram estudos abrangentes sobre esses casos, descrevendo aspectos estruturais das passarelas, desde a sua concepção inicial até detalhes construtivos da infraestrutura e superestrutura. Os estudos subsequentes resultaram na elaboração de diversos manuais e guias técnicos para o dimensionamento e avaliação dinâmica de passarelas de pedestres, que são hoje referências no assunto. Dentre eles, os principais são o guia Sétra (*Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes*, Sétra (3)), o HiVoSS (*Human induced vibrations of Steel Structures*, Feldmann et al. (4)), e os guias apresentados em Butz et al. (5) e no JRC-ECCS Joint Report (Joint Research Centre (JRC) and European Convention for Constructional Steelworks (ECCS), JRC-ECCS (6)), da Comissão Europeia, esses últimos originados a partir dos dois primeiros.

No presente artigo, é apresentado um levantamento dos métodos propostos pelos principais manuais, guias técnicos e literatura referentes à análise dinâmica de passarelas de pedestres, e, posteriormente, esses métodos são utilizados para avaliar o comportamento de uma passarela metálica sobre o Rio Capibaribe, na cidade do Recife/PE, que faz parte de um grande projeto de infraestrutura urbana em implantação na cidade, o parque linear das margens do Rio Capibaribe. O estudo também identifica uma importante inconsistência na expressão do cálculo das acelerações pela ABNT NBR 7187:2021 (7) e mostra que há divergências significativas na avaliação de conforto segundo os diversos métodos.

1.1 OSCILADOR MASSA-MOLA-AMORTECEDOR

O oscilador massa-mola-amortecedor pode ser utilizado para simplificar o comportamento dinâmico da estrutura. Entretanto, embora essa abordagem conduza a um equacionamento relativamente simples, sua efetiva aplicação para a determinação das características dinâmicas de uma estrutura complexa não é imediata. A taxa de amortecimento da estrutura (ξ), por exemplo, é de difícil determinação e não pode ser conhecida a priori (na fase de projeto) com confiabilidade, mas sim somente depois de a estrutura estar executada. Em estruturas da engenharia civil, o valor de ξ é tipicamente baixo (da ordem de no máximo 5%, mas quase sempre bem menor do que isso, especialmente em estruturas de aço), levando, portanto, a valores de amplificação dinâmica altos. Da mesma forma, a massa mobilizada também é de difícil determinação e deve incluir parcelas associadas a elementos estruturais, não estruturais e associadas aos carregamentos dinâmicos. Assim, a abordagem por meio do oscilador de um grau de liberdade deve ser utilizada como uma primeira estimativa do comportamento real da estrutura.

1.2 CLASSIFICAÇÃO DAS PASSARELAS SEGUNDO O GRAU DE CONFORTO EXPERIMENTADO PELOS USUÁRIOS

Embora haja diferenças entre as abordagens dos diversos guias de passarelas, três fatores são geralmente considerados por todos eles (Ricciardelli et al. (8)): (a) faixas críticas de frequência natural da

estrutura para as quais há necessidade da análise dinâmica da estrutura; (b) faixas ou valores máximos de aceleração aceitáveis oriundos da passagem de um pedestre, um grupo de pedestres ou um fluxo de pedestres; e (c) número crítico de pedestres sobre a passarela que induziria a ocorrência de instabilidade lateral. Na Tabela 1 são apresentadas as faixas críticas de frequências naturais, segundo o harmônico do caminhar e direção do modo de vibração analisados, para as quais a excitação dos carregamentos de pedestres tem maior probabilidade de gerar desconforto nos usuários. Em JRC-ECCS (6), cita-se que excitações devidas ao segundo harmônico do caminhar também podem ocorrer, embora não haja registros de problemas de vibrações em passarelas correlacionados ao carregamento devido ao segundo harmônico do caminhar. Passarelas com frequências dentro das faixas apresentadas na tabela abaixo requerem análise dinâmica.

Tabela 1 – Faixas críticas de frequências naturais (f_c) para passarelas de pedestres.

Direção do modo de vibração da estrutura	Harmônico do caminhar	Sétra (3)	JRC-ECCS (6)
Vertical e longitudinal	1°	$1,0 \text{ Hz} \leq f_c \leq 2,6 \text{ Hz}$	$1,25 \text{ Hz} \leq f_c \leq 2,3 \text{ Hz}$
	2°	$2,6 \text{ Hz} < f_c \leq 5,0 \text{ Hz}$	$2,5 \text{ Hz} < f_c \leq 4,6 \text{ Hz}$
Transversal	1°	$0,3 \text{ Hz} \leq f_c \leq 1,3 \text{ Hz}$	$0,5 \text{ Hz} \leq f_c \leq 1,2 \text{ Hz}$
	2°	$1,3 \text{ Hz} < f_c \leq 2,5 \text{ Hz}$	Não indicado

A definição dos valores desses fatores depende situações em serviço projetadas para a passarela. A partir delas, são definidas as chamadas classes de conforto (CC) e de tráfego (CT) da passarela, relativas respectivamente aos níveis máximos de aceleração durante a travessia e de densidade de pedestres. As classes de conforto utilizadas pelos principais guias de passarelas são apresentadas na Tabela 2. Na ABNT NBR 7187 (7), também são utilizadas as mesmas classes de conforto, e as respectivas faixas de aceleração.

Tabela 2 – Classes de conforto e faixas de acelerações aceitáveis segundo os guias Sétra (3), Butz et al. (5) e JRC-ECCS (6).

Classe de conforto	Nível de conforto	Faixa de aceleração vertical e longitudinal (m/s^2)	Faixa de aceleração transversal (m/s^2)
CC.1	Máximo	Inferior a 0,5	Inferior a 0,1*
CC.2	Médio	0,5 – 1,0	0,1* – 0,3
CC.3	Mínimo	1,0 – 2,5	0,3 – 0,8
CC.4	Desconforto inaceitável	Superior a 2,5	Superior a 0,8

*Somente para Sétra (3), o valor considerado é 0,15.

Cada classe de conforto pode ser associada a uma condição distinta de análise durante a vida útil da passarela. As recomendações dos principais guias e manuais indicam a adoção de classes de tráfego conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Densidade de pedestres (pessoas/m²) para cada classe de tráfego (CT) definida de acordo as referências utilizadas.

Referência	CT.1	CT.2	CT.3	CT.4	CT.5
Sétra (3)	0,5	0,8	1	-	-
HiVoSS (2007), Butz et al. (5), JRC-ECCS (6)	15 pessoas*	0,2	0,5	1	1,5

* Para esta classe de tráfego, as referências permitem o cálculo de uma densidade de pedestres equivalente dividindo 15 pessoas pela área da passarela.

1.3 CÁLCULO DA ACELERAÇÃO MÁXIMA PELO MÉTODO ANALÍTICO DA RESPOSTA ESPECTRAL

Este método oferece uma alternativa relativamente simples, baseada em expressões analíticas para o cálculo das acelerações máximas, dispensando uma análise computacional. Teorias estocásticas e simulações de Monte-Carlo são utilizadas para incluir a aleatoriedade dos eventos de travessia, a partir de diversas configurações de geometria e carregamentos verticais e horizontais, variando a densidade de pedestres, a largura do deck, a frequência de passada e a velocidade de travessia, conforme descrito em Butz et al. (5). Envolve a determinação das funções de densidade espectral durante a passagem de pedestres em função das forças de excitação modal, e a posterior integração numérica da função de resposta espectral de acelerações, para obtenção da variância do espaço amostral das acelerações máximas obtidas nas simulações. O valor da aceleração máxima em serviço ($a_{max,k}$) é então dado por

$$a_{max,k} = \frac{1000k_{a,k}}{m_i^*} \sqrt{k_F N k_1 \xi^{k_2} C} \quad [m/s^2], \quad (1)$$

em que $k_{a,k}$, k_F (em kN²) e C são constantes que dependem da densidade de pedestres sobre a passarela; ξ é a taxa de amortecimento da estrutura; m_i^* (em kg) é a massa modal generalizada para o modo de vibração i ; e k_1 e k_2 são constantes, com valores definidos em Butz et al. (5), dependentes da frequência natural da estrutura (f_i). O fator de multiplicação 1000 é adicionado à formulação original apresentada em Butz et al. (5) para o ajuste de unidades, resultando em aceleração na unidade m/s². São assumidas algumas hipóteses para a aplicação deste método, dentre elas: (a) a frequência média de passada dos pedestres sobre a passarela é igual à frequência natural da estrutura; (b) a massa da passarela é uniformemente distribuída ao longo de sua extensão; (c) os formatos dos modos de vibração são senoidais; (d) não há acoplamento modal; (e) o comportamento da estrutura é elástico-linear. Tais hipóteses restringem a aplicabilidade do método, principalmente em casos de passarelas com geometrias mais complexas, nos quais o acoplamento de modos de vibração geralmente é observado. Este método de obtenção da aceleração máxima em serviço é proposto pela ABNT NBR 7187 (7), em seu Anexo C, como alternativa para a realização da análise dinâmica da passarela. Entretanto, a apresentação da formulação na norma está inconsistente, e leva o projetista a cometer erros relevantes na avaliação de conforto dos usuários, subestimando sobremaneira os valores de aceleração resultantes. Na equação de obtenção de $a_{max,k}$ apresentada pela norma, que é similar à equação (1), não é incluído o fator de ajuste 1000. Esta correção é necessária para realizar o ajuste dimensional da equação apresentada na norma (já que o coeficiente k_F tem unidade kN²) para que o valor de aceleração resultante tenha unidade m/s². Como a norma não informa a unidade em que a aceleração é

obtida, o usuário é levado a presumir que seja m/s^2 . Assim, os valores de aceleração máximos obtidos com a equação da ABNT NBR 7187 (7) são três ordens de grandeza inferiores ao valor correto fornecido pelo método e, portanto, conduzem a uma avaliação de conforto severamente comprometida, muito provavelmente indicando nível de conforto máximo.

1.4 CÁLCULO DA ACELERAÇÃO MÁXIMA POR ANÁLISE DINÂMICA COMPUTACIONAL

O cálculo de acelerações máximas é recomendado quando a estrutura apresenta frequências naturais dentro das faixas críticas da Tabela 1. Nesses casos, as acelerações podem ser obtidas por análise dinâmica computacional. Embora os programas computacionais tenham se tornando ferramentas corriqueiras de projeto, sua utilização para análise dinâmica não é trivial, e exige, dentre outros aspectos, a definição rigorosa dos carregamentos dinâmicos.

Em uma passarela, de forma geral, os carregamentos induzidos por pedestres são forças pontuais variáveis no tempo e no espaço. Por se tratar de uma ação aleatória, sua determinação durante a passagem sobre a estrutura é complexa. A dificuldade em definir parâmetros analíticos para a modelagem deste carregamento levou alguns pesquisadores a desenvolverem modelos experimentais, utilizando estruturas monitoradas com sensores. Ebrahimpour et al. (9), Sétra (3) e Butz et al. (5) apresentam experimentos com objetivo de avaliar os carregamentos verticais e horizontais aplicados durante o caminhar, a adequação da frequência de passada durante o movimento e a tendência de sincronização do caminhar quando os pedestres são expostos a vibrações laterais e verticais da estrutura. Em Butz et al. (5), é apresentada uma relação entre a velocidade do caminhar (v_s) e a frequência de passada (f_s) para um faixa de 1,3 Hz a 1,8 Hz, sendo:

$$v_s = 1,271f_s - 1 [m/s]. \quad (2)$$

Esses monitoramentos mostraram em sua maioria que, apesar da complexidade inerente, os carregamentos aplicados pelos pedestres podem ser aproximados por funções periódicas, conforme mostrado por Bachmann et al. (10), e que, portanto, podem ser descritos por séries de Fourier, da seguinte maneira:

$$F_v(t) = G_0 + G_0 \sum_i^{nh} \alpha_i \text{sen}(i2\pi f_s t - \phi_i), \quad (3)$$

em que F_v é a componente vertical do carregamento, G_0 é o peso estático do pedestre (700 N por convenção), α_i é o coeficiente de magnitude de força do harmônico i , f_s é a frequência da passada, ϕ_i é o ângulo de fase entre o harmônico i e o primeiro harmônico, nh representa o número de harmônicos considerados. A descrição do carregamento de pedestres não se limita a uma componente vertical, mas inclui também componentes horizontais laterais (F_h) e longitudinal (F_l), nas quais a parcela devida ao peso vertical estático do pedestre não deve ser considerada, de modo que a equação (3) possa ser adaptada para

$$F_h(t) = G_0 \sum_i^{nh} \alpha_i \text{sen}(i\pi f_s t - \phi_i). \quad (4)$$

$$F_i(t) = G_0 \sum_i^{nh} \alpha_i \text{sen}(i2\pi f_s t - \phi_i). \quad (5)$$

Destaca-se que a frequência do carregamento para a componente lateral é a metade da frequência para as componentes vertical e longitudinal, já que, no primeiro caso, o carregamento se repete a cada 2 passadas e, no segundo, a cada passo.

Bachmann et al. (10) determinaram os valores dos coeficientes de Fourier com base em diversas atividades humanas como caminhada, corrida, pulo, dança, dentre outros. Na análise de passarelas de pedestres, utilizam-se correntemente os coeficientes referentes a atividades de caminhada e corrida, que são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Coeficientes de Fourier para atividades de caminhada e corrida segundo Bachmann et al. (10).

Atividade	Componente	α_1	α_2	ϕ_2	α_3	ϕ_3
Caminhada	Vertical	0,4	0,1	$\pi/2$	0,1	$\pi/2$
	Longitudinal	0,2	0,1	~ 0	~ 0	~ 0
	Transversal	0,1	0,1	~ 0	~ 0	~ 0
Corrida	Vertical	1,6	0,7	0	0,2	0

* São apresentados os coeficientes para os três primeiros harmônicos apenas.

Os guias de análise de passarelas sugerem que, caso seja necessário efetuar uma análise dinâmica (por integração no tempo, por superposição modal etc.), o carregamento aplicado sobre a passarela deve tomar como base o carregamento de um único pedestre, porém adaptado para um carregamento distribuído sobre toda a estrutura, levando em consideração o número equivalente de pedestres com movimentação perfeitamente sincronizada (N_{eq}). A partir das simulações computacionais mostradas em Sétra (3) e em Butz et al. (5), nas quais foram realizadas passagens aleatórias de N pedestres ao longo do vão de uma passarela, resultando em uma densidade de pedestres d , variando o amortecimento da estrutura (ξ), foi inferida a seguinte expressão para N_{eq} :

$$N_{eq} = \begin{cases} 10,8d\sqrt{\xi/N}, & d < 1 \left[\frac{\text{Pessoa}}{m^2} \right] \\ 1,85d\sqrt{1/N}, & d \geq 1 \left[\frac{m^2}{\text{Pessoa}} \right] \end{cases} \quad (6)$$

Assim, o carregamento periódico distribuído sobre a passarela, em N/m^2 , é dado por

$$p(t) = \alpha_1 G_0 N_{eq} \psi \cos(2\pi f_c t), \quad (7)$$

em que f_c é a frequência natural da estrutura para o modo de vibração considerado e ψ é fator redutor do carregamento distribuído, definido logo mais a seguir. Os valores de α_1 são aqueles apresentados na Tabela 4. Observa-se que o carregamento periódico indicado considera somente o primeiro termo da série de Fourier, e impõe que a frequência do carregamento seja igual à frequência natural do modo de vibração analisado. No caso dos modos horizontais transversais, o valor de α_1 determinado por Bachmann et al. (10) é de 0,1. Entretanto, nos guias Sétra (3), Butz et al. (5) e JRC-ECCS (6), esse valor é de 0,05.

Além do fator N_{eq} , são observados dois pontos de divergência entre as equações (3), (4) e (7). O primeiro deles é a inclusão do fator ψ em (5), que visa estabelecer uma redução do carregamento distribuído quando a frequência natural da estrutura se afasta da frequência média de passo do pedestre (considerada em torno de 2 Hz). Sétra (3) e JRC-ECCS (6) definem os valores deste coeficiente em função da direção do carregamento (vertical [V] ou horizontal [H]) e do harmônico do carregamento do caminhar analisado (1° [1] ou 2° [2]). Butz et al. (5) utilizam os mesmos valores de Sétra (3). Na Figura 1 são apresentados os valores de ψ até a frequência de 5 Hz.

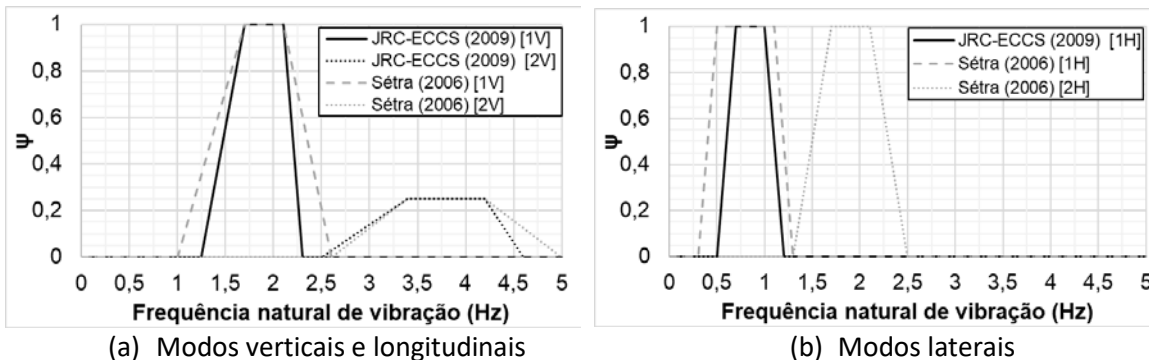


Figura 1 – Coeficiente de redução do carregamento dinâmico (ψ) segundo Sétra (3) e JRC-ECCS (6).

O segundo ponto de divergência é a ausência do termo constante referente ao valor médio da função periódica (G_0) na equação (7). De fato, existe uma divergência em relação à apresentação das formulações, mas que não implica a obtenção de respostas dinâmicas diferentes, já que o peso estático dos pedestres, de acordo com a densidade considerada em cada caso, não tem influência sobre os valores de aceleração da estrutura. Em Sétra (3), Butz et al. (5) e JRC-ECCS (6), menciona-se que o peso dos pedestres deve ser considerado na análise, incluído como massa incorporada à massa da estrutura. No guia Sétra (3), indica-se que toda a massa dos pedestres deve ser incorporada. Para Butz et al. (5), a incorporação da massa dos pedestres na estrutura também deve ser integral, porém feita somente se a massa modal dos pedestres for superior a 5% da massa modal da passarela. Os experimentos realizados por Pfeil et al. (11), por sua vez, levaram a correlações para determinação da massa modal de um pedestre que corresponderam a 69% a 86% da massa total do pedestre.

Uma consideração adicional presente em Sétra (3), Butz et al. (5) e JRC-ECCS (6) estabelece que o sentido do carregamento periódico distribuído deve estar em fase com a deformada da estrutura, conforme mostrado esquematicamente na Figura 2. Essa apropriação de carregamento representa uma situação pouco provável, mas que é adotada com o objetivo de maximizar as acelerações obtidas, de forma conservadora, para cada um dos modos de vibração.

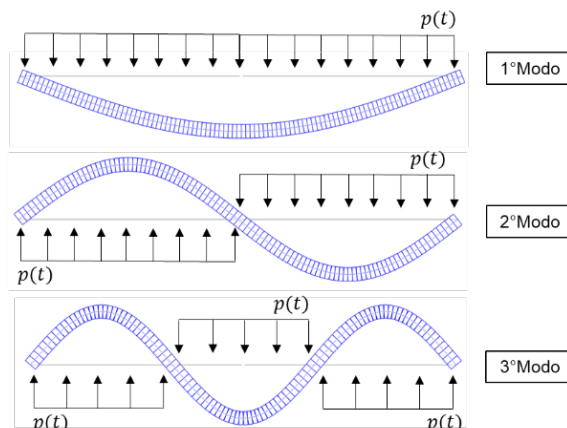


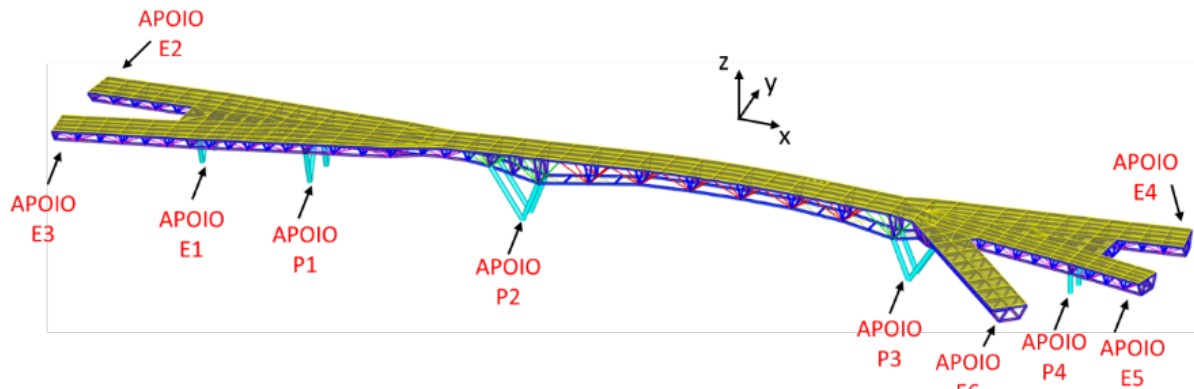
Figura 2 – Sentido do carregamento periódico distribuído em fase com a deformada da estrutura, segundo em Sétra (3), Butz et al. (5) e JRC-ECCS (6).

Além dessas metodologias apresentadas pelos principais manuais, foram desenvolvidos na literatura modelos alternativos de análise de passarelas de pedestres. Em alguns deles, modela-se a interação entre pedestre e estrutura (“Human-Structure Interaction”, HSI), particularmente importante em estruturas leves, com frequências naturais baixas (próximas da frequência do caminhar) e baixas taxas de amortecimento. Diversos trabalhos visaram determinar os parâmetros para a modelagem da HSI, desenvolvendo modelos analíticos e/ou experimentais denominados frequentemente como modelos biodinâmicos. Em Pfeil et al. (11), foi proposto um modelo biodinâmico que descreve o pedestre como um sistema massa-mola-amortecedor de um grau de liberdade na direção vertical com excitação de base. Gonzaga et al. (12) utilizaram esse modelo para estabelecer equações simplificadas para previsão do coeficiente de amortecimento e frequência natural da estrutura. Schweizer et al. (13) buscaram representar a aleatoriedade da movimentação de um pedestre, propondo um modelo que utiliza o conceito de incertezas polimórficas, associado à utilização da transformadas de Fourier difusas (*Fuzzy Fourier Transform*), definindo critérios e variáveis para representar a incerteza associada à movimentação de pedestres em uma passarela de pedestres, tanto na magnitude e direção do carregamento, como no posicionamento dos pedestres ao longo da estrutura. As análises apresentadas por Rezende et al. (14) também utilizam um modelo probabilístico para considerar a variabilidade da movimentação de pedestres, representando de forma mais realística situações de carregamento dinâmico a partir da determinação de parâmetros de forma estocástica.

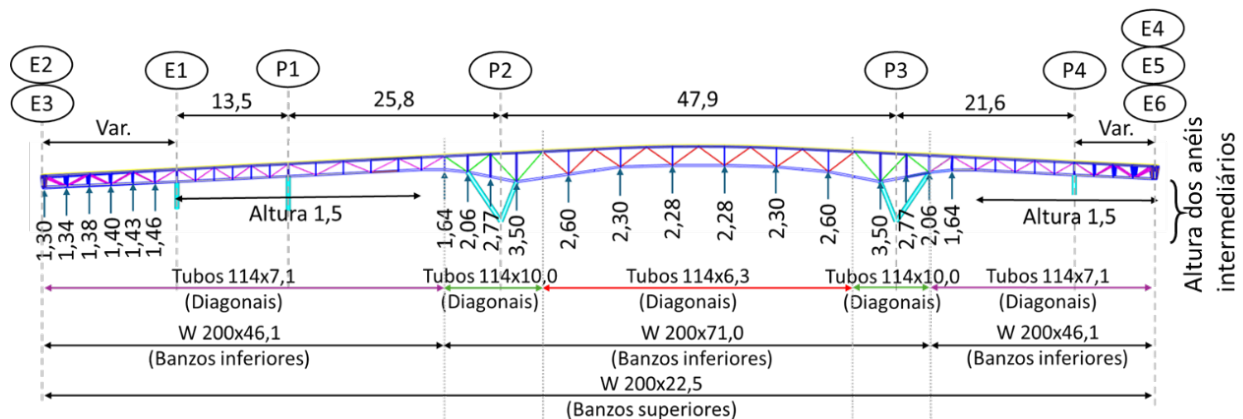
2 ANÁLISE DINÂMICA DE PASSARELA METÁLICA SOBRE O RIO CAPIBARIBE NO RECIFE/PE

Um grande projeto de infraestrutura urbana a ser implantado na cidade do Recife/PE é o parque linear das margens do Rio Capibaribe, do qual fazem parte um conjunto de várias passarelas de pedestres para transpor o rio ao longo de sua extensão na zona norte da cidade. Uma dessas estruturas é a passarela metálica da travessia Santana-Torre, alvo do estudo de caso apresentado a seguir. Os desenhos do projeto básico foram gentilmente disponibilizados pela projetista, a GAFAU Projeto e Consultoria, e correspondem à fase de desenvolvimento da solução estrutural em que os problemas de vibração surgiram e motivaram este trabalho.

A concepção estrutural da passarela prevê superestrutura formada por treliças tridimensionais em perfis metálicos, com seis tramos, que dão suporte à laje de piso em steel deck. As treliças tridimensionais estão apoiadas diretamente sobre blocos de coroamento sobre estacas (nas extremidades) ou sobre pilares circulares de concreto de 60 cm de diâmetro (nos tramos centrais), conforme ilustrado na Figura 3. O vão central (entre os eixos P2 e P3) possui 47,9 m de comprimento. As exigências arquitetônicas do projeto executivo e o nível máximo do Rio Capibaribe em época de cheia resultaram na necessidade de treliças transversais e longitudinais com alturas reduzidas no vão central, de no máximo 2,28 m, conforme indicado na Figura 3. O acesso ao vão central é feito por ramos laterais, que possuem a mesma concepção do vão central. O tabuleiro sobre a passarela é composto por laje mista de aço e concreto (tipo MF50) com capa de concreto, resultando em espessura total de 14 cm. Sobre o tabuleiro há acabamento de argamassa de 10 cm, cuja massa foi considerada no modelo matemático. Sua área total é de 1158 m². Na direção longitudinal, foram concebidas treliças com banzos em perfis laminados e diagonais em tubos circulares. Estas são conectadas transversalmente por treliças de altura constante, denominadas anéis intermediários, nos quais foram utilizados perfis metálicos laminados. Para melhor visualização da estrutura, consultar desenhos apresentados em Vicente (15).



(a) Vista isométrica e identificação dos apoios.



(b) Elevação longitudinal e perfis dos elementos estruturais.

Figura 3 – Geometria da passarela Torre-Santana. Dimensões em metros.

A interface entre superestrutura e a mesoestrutura, composta pelos pilares de concreto, é feita por meio de aparelhos de apoio de neoprene fretados, cujos dados são mostrados na Tabela 5. Para os eixos em que a estrutura metálica está apoiada diretamente sobre os blocos de coroamento (eixos E2 a E6), a interface entre superestrutura e infraestrutura, composta por blocos de coroamento apoiados sobre estacas, também é feita por aparelhos de apoio, do mesmo tipo que os demais.

Tabela 5 – Dimensões dos aparelhos de apoio da passarela.

Tipo	Eixos	Largura [cm]	Comprimento [cm]	Espessura* [cm]
A	P2 e P3	25	40	2
B	E1 a E6 e P1	25	30	4

* A espessura total das camadas de elastômetro é de 1,6 cm e 3,2 cm para os tipos A e B, respectivamente. A espessura restante faz referência às chapas de aço no interior dos aparelhos de apoio.

2.1 MODELAGEM COMPUTACIONAL

Foi elaborado um modelo computacional da passarela com o auxílio do programa de elementos finitos SAP2000. Pilares de concreto, perfis metálicos e aparelhos de apoio foram modelados com elementos de barra (“Frame” no manual técnico do programa), com dimensões típicas de 1,0m e 2,0m para os dois primeiros. Para os aparelhos de apoio a dimensão do elemento é equivalente à sua espessura (ver Tabela 5). A laje steel deck foi modelada com elementos de casca (“thin-plate shell”), com dimensões típicas de 3,5m x 1,25 m. O aço (concreto) foi considerado com módulo de elasticidade de 200 GPa (31 GPa), coeficiente Poisson de 0,3 (0,2), módulo de elasticidade transversal de 77 GPa (11 GPa) e massa específica de 7850 kg/m³ (2500 kg/m³). As ligações entre os diversos elementos estruturais foram modeladas da seguinte forma: as diagonais das treliças longitudinais (perfis em tubos) foram articuladas nos encontros com os banzos; os elementos de um mesmo anel intermediário têm ligações rígidas entre si; os anéis intermediários têm ligações rígidas com os banzos das treliças longitudinais; e os contraventamentos no nível inferior da passarela têm ligações articuladas em ambas as extremidades. Os aparelhos de apoio, por sua vez, foram admitidos com as bases rigidamente conectadas aos pilares de concreto ou aos elementos de fundação (Eixos E2 a E6), e articulados no topo junto à estrutura metálica.

As fundações foram consideradas como apoios ou engastes ideais nas bases dos pilares. Na Tabela 6 são apresentadas as condições de vínculo associadas a cada um dos blocos de fundação, seguindo o seguinte critério: as translações nas três direções (d_x , d_y e d_z) foram restritas em todos os blocos; a rotação em torno do eixo vertical (r_z) foi restrita em todos os blocos; as rotações em torno dos eixos horizontais (r_x e r_y) foram restritas nos blocos que possuem três ou mais estacas alinhadas na direção dos respectivos eixos e, caso contrário, liberadas. Conforme mostrado nos guias Sétra (3), JRC-ECCS (6) e Butz et al. (5), as taxas de amortecimento médias determinadas para estruturas de aço e estruturas mistas (aço e concreto) são de 0,4% e 0,6%, respectivamente. Para a análise a seguir, o valor de ξ considerado para todos os modos de vibração foi de 0,5%, compatível com os valores recomendados na literatura. A análise dinâmica foi realizada pelo método da superposição modal (Linear Modal History na terminologia do SAP2000), utilizando os 20 primeiros modos de vibração, com passo de tempo de 0,1

segundo, que corresponde a aproximadamente 50% do período do 20º modo de vibração (último utilizado na análise dinâmica) e a 20% do período do 5º modo de vibração (último modo para o qual as acelerações em serviço foram determinadas, conforme apresentado abaixo).

Tabela 6 – Condições de vínculo dos blocos de fundação junto às bases dos pilares. Vínculos restritos são marcados com “x”.

Bloco(s)	d_x	d_y	d_z	r_x	r_y	r_z
E2 a E6	x	x	x			x
E1/P1	x	x	x			x
P2/P3	x	x	x	x		x
P4	x	x	x	x		x

A partir das condições apresentadas, foram determinados inicialmente os primeiros modos de vibração da estrutura, via análise modal convencional, que são mostrados na Figura 4. Como o foco principal da análise é avaliar o comportamento dinâmico do vão central (pelas características da passarela), são mostrados os seis primeiros modos de vibração referentes a esse trecho da estrutura. Também há modos de vibração associados às vias de acesso para entrada e saída da passarela, mas que não são objeto de análise neste trabalho.

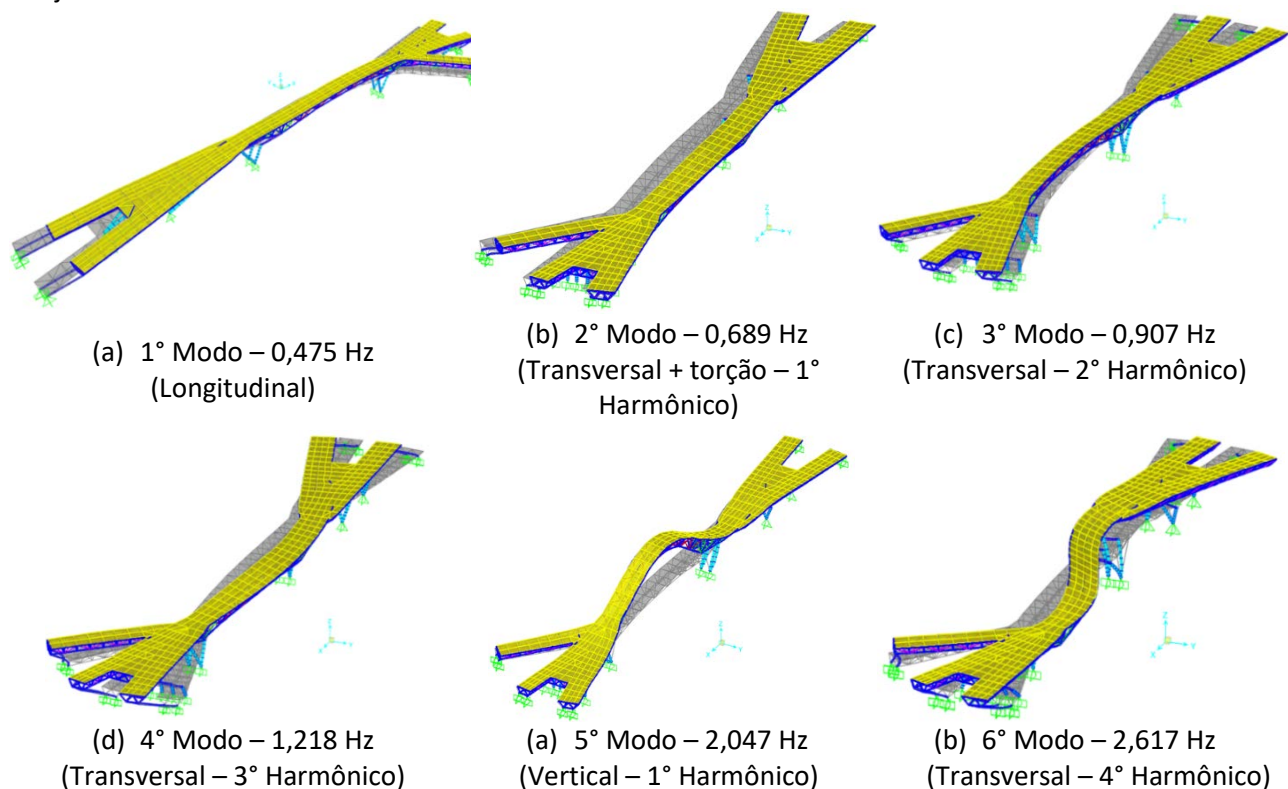


Figura 4 – Modos de vibração do vão central da passarela. Configuração indeformada na cor cinza.

Conforme indicado nos guias S etra (3), Butz et al. (5) e JRC-ECCS (6), conclui-se que a an alise de conforto do v ao central  e principalmente recomendada para os modos de vibra ao 2 a 5, cujas frequ encias incidem dentro da respectiva faixa cr tica (vide se ao 2.2), indicando a necessidade de an alise din mica da estrutura. Aqui, esta ser  feita por superposi ao modal, utilizando carregamentos de pedestres baseados nas formula oes da se ao 2.3, e descritos a seguir.

2.2 METODOLOGIAS DE AN LISE E DETERMINA AO DAS ACELERA OES M XIMAS DA PASSARELA

Foram adotadas quatro metodologias de an lise da passarela para obten ao das acelera oes m ximas em cada caso, denominadas I, II, III e IV. As tr s primeiras envolvem a utiliza ao de modelagem computacional para aplica ao de carregamentos de pedestres sobre a estrutura. A metodologia IV   referente   determina ao anal tica das acelera oes m ximas, segundo o m todo da resposta espectral apresentado no cap tulo 1.3, que tamb m   utilizado na ABNT NBR 7187 (7).

A metodologia I segue as diretrizes propostas nos guias S etra (3), Butz et al. (5) e JRC-ECCS (6). Assim, o valor do carregamento distribuido resultante sobre a passarela   obtido a partir da equa ao (7). As densidades de pedestres consideradas foram de 0,2, 0,5, 0,8, 1,0 e 1,5 pessoas/m². Na Figura 5(a), s o apresentadas as varia oes percentuais da frequ ncia natural da estrutura obtida com a considera ao da massa dos pedestres em rela ao ao valor obtido sem essa considera ao, para cada densidade. Observa-se que a varia ao   relativamente pequena, atingindo os valores m ximos (de cerca de 7%) no caso de maior densidade de pedestres, como esperado. A partir das frequ ncias obtidas, foram determinados os valores do coeficiente de redu ao ψ de acordo com as proposi oes de JRC-ECCS (6) e S etra (3), i.e., utilizando os gr ficos da Figura 1. Os resultados est o apresentados na Figura 5(b) (somente os modos 2 e 4 s o mostrados, j  que para os modos 3 e 5, tem-se $\psi = 1$).

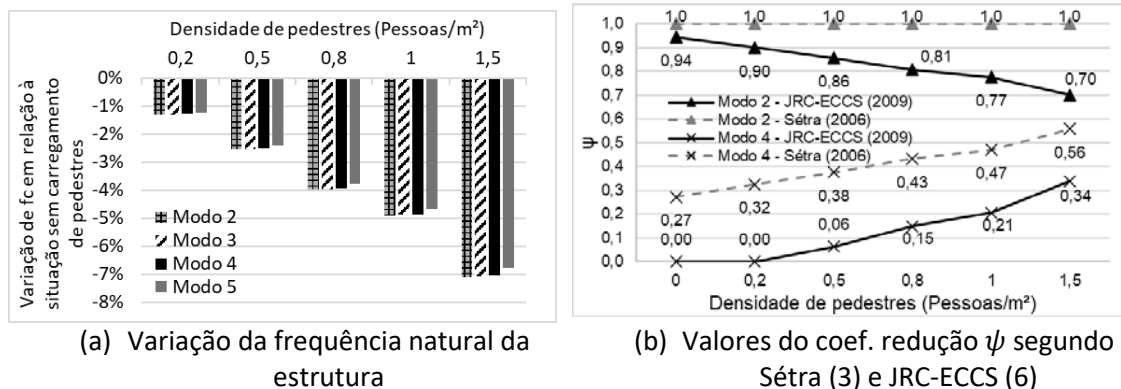


Figura 5 – Par metros estruturais considerados na an lise din mica de acordo com a densidade de pedestres sobre a passarela.

Os valores de N_{eq} (conforme (6)) para as densidades de pedestres 0,2, 0,5, 0,8, 1,0 e 1,5 pessoas/m², s o 0,0100, 0,0159, 0,0201, 0,0544 e 0,0667, respectivamente.

Na Figura 6, mostram-se esquematicamente a dire ao e o sentido do carregamento distribuido sobre a passarela, que foi aplicado em fase com a deformada da estrutura para cada modo de vibra ao,

conforme as diretrizes dos guias. Note-se que nas Figura 6(a) a 6(c) a direção do carregamento é horizontal, enquanto na Figura 6(d), ela é vertical.

A metodologia II de aplicação do carregamento de pedestres segue, em linhas gerais, as mesmas diretrizes da metodologia I, porém com algumas adaptações. A primeira se refere à massa de pedestres considerada sobre a passarela. Conforme indicado por Pfeil et al. (11), a consideração de toda a massa dos pedestres reduz artificialmente os valores das frequências naturais da estrutura, já que a massa efetivamente mobilizada durante o caminhar seria de no máximo 69% a 86% da massa total dos pedestres. A partir disso, utiliza-se na metodologia II o valor intermediário de 75% da massa dos pedestres sobre a passarela.

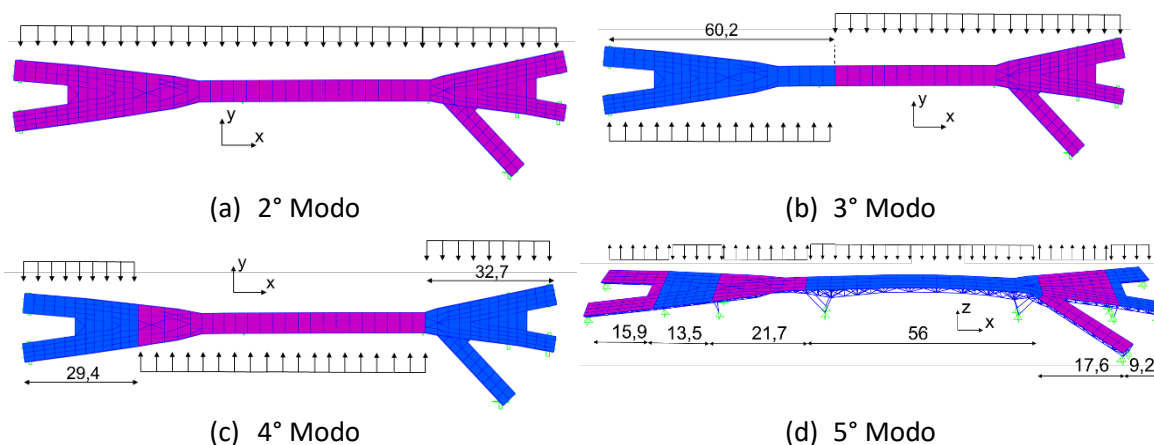


Figura 6 – Aplicação do carregamento distribuído sobre o deck – Metodologia I.

A segunda adaptação se refere à aplicação do coeficiente de redução ψ . Conforme indicado nos guias, a inclusão deste coeficiente na determinação do carregamento distribuído leva em consideração a probabilidade de a frequência de passada se aproximar da frequência natural da estrutura. Entretanto, tal consideração é válida somente quando a frequência imposta para o carregamento periódico é igual à frequência natural do modo de vibração analisado. Assim, assume-se que a frequência do carregamento periódico é f_s , que será considerada no intervalo entre 1,6 Hz e 2,4 Hz, faixa indicada por Bachmann et al. (10), e que engloba faixas indicadas por outras referências, em intervalos de 0,05 Hz. Assim, a utilização de f_s na equação (7) implica desconsiderar o fator de redução do carregamento ψ , de tal forma que a equação possa ser reescrita como

$$p(t) = \alpha_i G_0 N_{eq} \cos(2\pi f_s t), \quad (8)$$

A metodologia III, por fim, busca modelar os carregamentos de pedestres como cargas pontuais e variáveis no tempo e no espaço, conforme descrito na Figura 7, sem a consideração de carregamentos distribuídos sobre o deck. Para isso, os carregamentos de cada pedestre são descritos pelas equações (3) e (4), com os coeficientes da transformada de Fourier apresentados na Tabela 4 e o peso estático do pedestre de 700 N. Com base nas indicações de Sétra (3) e JRC-ECCS (6) acerca de experimentos com passagem de comboios de pessoas em passarelas reais para avaliação das condições de conforto dos

usuários após a construção da estrutura, são então definidos os seguintes casos de análise para esta metodologia:

- Caso 1: passagem de um único pedestre andando (Figura 7(a));
- Caso 2: passagem de um grupo de 15 pedestres andando em fila única, separados de 3 em 3 metros (Figura 7(b));
- Caso 3: passagem de um fluxo contínuo e ordenado de pedestres igualmente espaçados caminhando em filas, em duas situações (Figura 7(c)):
 - Situação A: o fluxo é tal que resulte em uma densidade de pedestres de 0,2 pessoa/m² no vão central (total de 48 pessoas, divididos em 3 filas);
 - Situação B: o fluxo é tal que resulte em uma densidade de pedestres de 0,5 pessoa/m² no vão central (total de 120 pessoas, divididos em 3 filas);
- Caso 4: passagem de um fluxo contínuo e não ordenado de pedestres desigualmente espaçados caminhando em fila, em 2 situações (Figura 7(d)):
 - Situação A: o fluxo é tal que resulte em uma densidade de pedestres de 0,2 pessoa/m² no vão central (total de 48 pessoas, divididos em 3 filas, com espaçamento escolhido aleatoriamente entre 1m e 5m);
 - Situação B: o fluxo é tal que resulte em uma densidade de pedestres de 0,5 pessoa/m² no vão central (total de 120 pessoas, divididos em 3 filas, com espaçamento escolhido aleatoriamente entre 1m e 2m);

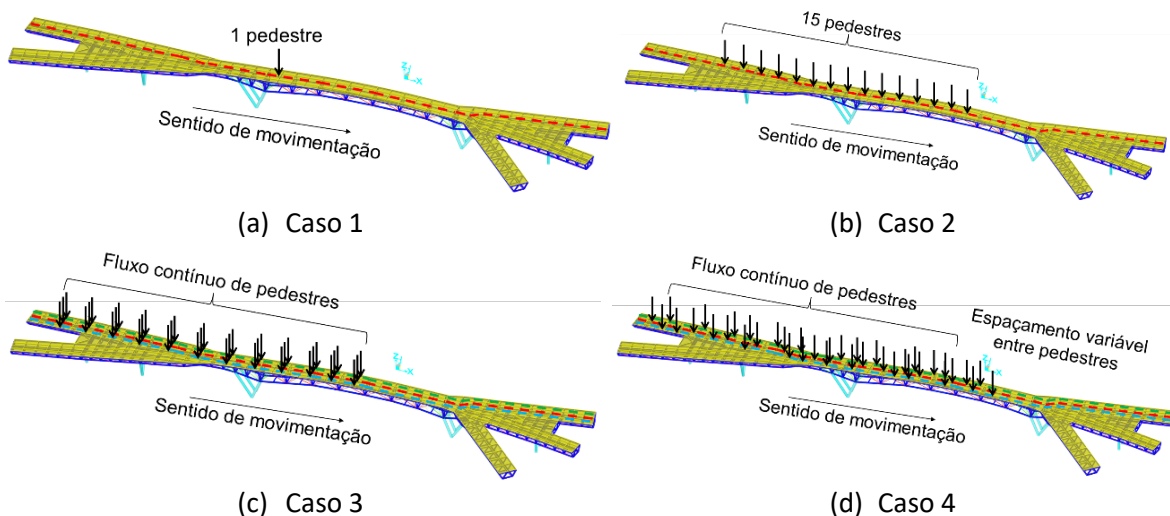


Figura 7 – Aplicação dos carregamentos pontuais sobre o deck – Metodologia III.

Em Vicente (15), os casos 1 e 2 também foram analisados para pedestres correndo sobre a passarela. A velocidade dos pedestres é considerada conforme a equação (2), para frequências de passada entre 1,6 Hz e 1,8 Hz. Para frequências de passada acima de 1,8 Hz, utiliza-se a velocidade fixa de 5 km/h, que corresponde a um caminhar típico de pedestres exercendo atividade física. A inclusão da massa dos pedestres para a determinação das frequências naturais da passarela é feita nos casos 3 e 4 apenas (por

serem os de maior número de pedestres), de acordo com as respectivas densidades de pessoas e considerando a contribuição de 75% da massa dos pedestres para a massa modal da estrutura, conforme Pfeil et al. (11). Nos casos 1 e 2, como a densidade de pedestres é baixa, a adição da massa tem influência pequena sobre a frequência natural da estrutura, sendo, portanto, desprezada.

Na metodologia IV, as acelerações máximas também foram calculadas segundo o método analítico da resposta espectral. Os valores da massa modal mobilizada são variáveis de acordo com a densidade de pedestres considerada e foram determinados com o software de elementos finitos SAP2000. Os valores de m_i^* para as densidades de pedestre 0,2, 0,5, 0,8, 1,0 e 1,5 Pessoas/m² são 134, 138, 142, 144, 151 toneladas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As acelerações verticais e horizontais da passarela foram calculadas por análise computacional para cada uma das quatro metodologias de análise, e monitoradas no ponto localizado no meio do vão central. Na Figura 8, são apresentadas as acelerações máximas obtidas com a metodologia I para cada uma das densidades de pedestres consideradas. Para os modos 2 e 4, como há divergência entre os valores de ψ para os guias Sétra (3) e JRC-ECCS (6), os resultados estão apresentados separadamente conforme o guia. Para os modos 3 e 5, contudo, os valores de ψ são os mesmos para os dois guias, e logo os resultados são únicos. Observa-se que para os modos 2 e 4 o guia Sétra (3) mostra-se mais conservador, resultando em valores de a_{max} consideravelmente superiores aos de JRC-ECCS (6) (até 494,2% maiores para o modo 4 e 43,0% para o modo 2, vide Tabela 7). Além disso, a classificação de conforto resultou discrepante entre os dois casos com densidade de pedestres de 1 e 1,5 pessoa/m², para os modos de vibração 2 e 4, que possuem coeficientes ψ distintos para cada guia. Para esses modos, a propósito, nota-se que a diferença no valor da aceleração transversal entre os dois guias é muito próxima à diferença do coeficiente ψ entre ambos, conforme apresentado na Tabela 7.

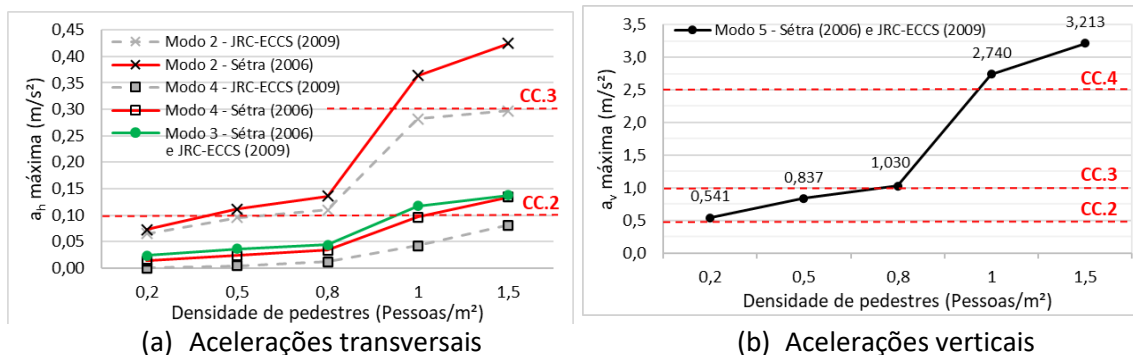


Figura 8 – Acelerações máximas obtidas no meio do vão central utilizando a Metodologia I. As linhas vermelhas horizontais (tracejadas) indicam as transições entre as diversas classes de conforto, conforme definido na Tabela 2.

Tabela 7 – Diferença nos valores de a_{max} e ψ obtidos com Sétra (3) em relação aos valores obtidos com JRC-ECCS (6) para os modos 2 e 4 – Metodologia I.

Modo	Direção	Parâmetro	0,2 P/m ²	0,5 P/m ²	0,8 P/m ²	1,0 P/m ²	1,5 P/m ²
2	Transversal	a_{max}	11,1%	16,6%	23,8%	29,1%	43,0%
		ψ	11,2%	16,8%	24,0%	29,0%	43,0%
4	Transversal	a_{max}	-*	494,2%	189,4%	129,2%	65,4%
		ψ	-*	499,5%	189,9%	129,2%	65,3%

* Coeficiente ψ nulo para o guia JRC-ECCS (6)

Na Figura 9 são apresentados os resultados obtidos com a metodologia II. Também são inseridos os resultados da metodologia I, para comparação. Para o modo de vibração 2 (transversal), observa-se que a metodologia II conduz a acelerações bem menores do que a metodologia I, implicando em conforto máximo para todas as densidades de pedestres consideradas. Para o modo 3, os resultados de ambas as metodologias são bastante próximos. Para o modo 4, as avaliações para as densidades menores (0,2, 0,5 e 0,8 P/m²) foram próximas entre as duas metodologias e discrepantes para densidades maiores (1,0 e 1,5 P/m²), com a metodologia II se revelando mais conservadora. Para o modo de vibração vertical, por sua vez, a classificação de conforto para a densidade de 0,5 P/m² resultou igual para ambas as metodologias (CC.2) e, para as demais, a avaliação pela metodologia II revelou-se menos conservadora, com valores de aceleração inferiores aos da metodologia I.

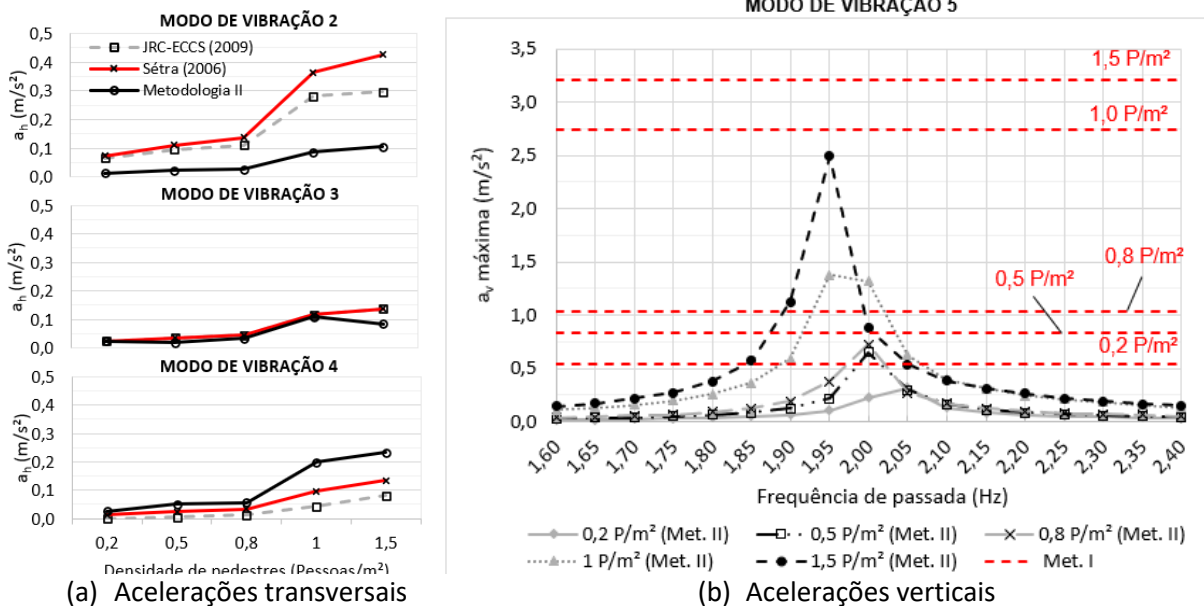


Figura 9 – Acelerações máximas obtidas no meio do vão central utilizando a metodologia II. As linhas vermelhas horizontais (tracejadas) indicam os valores de aceleração vertical obtidos com a metodologia I (vide Figura 8(b)).

A diferença entre os resultados das duas metodologias é explicada pelas considerações acerca da massa dos pedestres (que é menor na metodologia II), o coeficiente de redução ψ (que é desconsiderado na metodologia II) e a frequência do carregamento distribuído, que é diferente nas duas metodologias. Na metodologia I, a estrutura é induzida ao comportamento ressonante, já que a frequência do carregamento é igualada à frequência natural em cada um dos modos de vibração. Já na metodologia II, a frequência do carregamento é igualada à frequência de passada dos pedestres (admitida dentro da faixa 1,6 Hz e 2,4 Hz) em intervalos de 0,05 Hz, não equivalendo à frequência natural da estrutura. Nos casos em que essa discretização se aproxima do valor de f_c , os valores de aceleração atingem valores máximos, como pode ser observado na Figura 9(b).

Na Figura 10 são apresentados os resultados obtidos com a metodologia III, casos 1 e 2. Considerando os valores máximos dentre os pontos de análise, conclui-se que o nível de conforto para acelerações transversais é máximo (CC.1) para os casos 1 e 2. Na direção vertical, a classe de conforto para o caso 1 é máxima (CC.1), em todas as frequências de passada. Entretanto, para o caso 2, a classe de conforto para o grupo de pedestres é mínima (CC.3) para f_s de 2,05 Hz, média (CC.2) para f_s de 2 Hz e 2,1 Hz e máxima para as demais frequências.

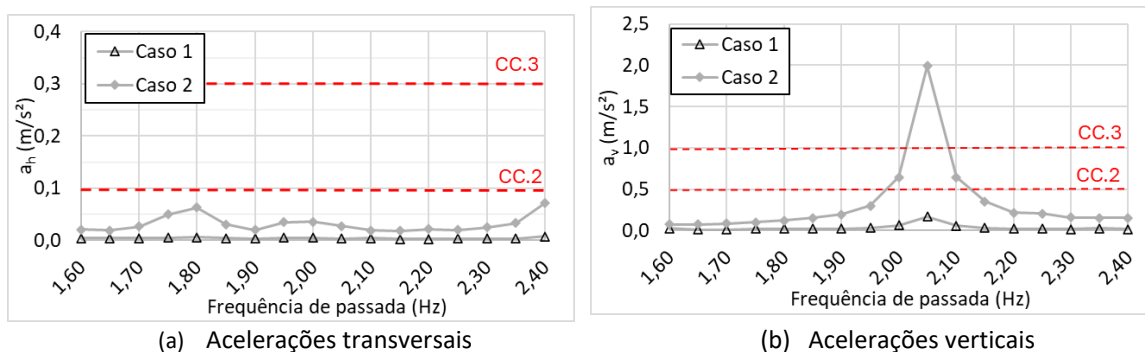


Figura 10 – Acelerações máximas obtidas no meio do vão central utilizando a metodologia III – Casos 1 e 2. As linhas vermelhas horizontais (tracejadas) indicam as transições entre as diversas classes de conforto.

Na Figura 11, são apresentados os resultados obtidos com a metodologia III, casos 3 e 4. Para os casos 3A e 4A, nos quais a densidade de pedestres é de $0,2 P/m^2$, os valores de aceleração vertical são altos e indicam nível de desconforto inaceitável para f_s de 2,0 Hz e 2,05 Hz, e nível de conforto mínimo para f_s de 1,95 Hz e 2,1 Hz. Essa faixa de frequências está em torno da frequência natural do modo vertical de vibração. Já nos casos 3B e 4B, nos quais a densidade de pedestres é de $0,5 P/m^2$, obtêm-se valores de aceleração extremamente elevados, que indicam desconforto inaceitável no intervalo entre 1,95 Hz e 2,05 Hz (novamente, em torno da frequência natural de vibração do modo vertical).

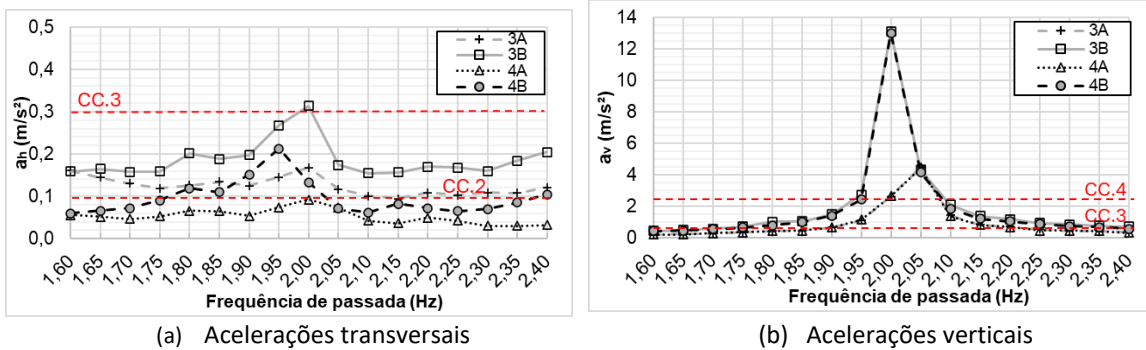


Figura 11 – Acelerações máximas obtidas no meio do vão central utilizando a metodologia III – Casos 3 e 4. As linhas vermelhas horizontais indicam as transições entre as diversas classes de conforto.

Adicionalmente, as respostas dinâmicas verticais da estrutura são praticamente as mesmas para os casos 3A e 4A e para os casos 3B e 4B, evidenciando que a aleatoriedade do posicionamento dos pedestres durante a travessia pouco influencia os valores máximos de aceleração vertical. Na direção transversal, o nível de conforto é médio para os casos 3A e 4A e mínimo para os casos 3B e 4B. No geral, observa-se que a metodologia III conduz a valores de aceleração vertical significativamente maiores (uma ordem de grandeza acima) do que aqueles obtidos com as metodologias I e II (que possuem a mesma ordem de grandeza entre si, ainda que a metodologia I seja mais conservadora do que a II). A Tabela 8 sumariza as diferenças entre os carregamentos de pedestres das três metodologias.

Tabela 8 – Comparação entre os carregamentos verticais aplicados para as metodologias I a III.

Item	Metodologia I	Metodologia II	Metodologia III
Modo de aplicação do carregamento	Distribuído ao longo do deck	Distribuído ao longo do deck	Pontual e móvel
Frequência do carregamento periódico	Frequência natural do modo de vibração analisado (f_c)	Frequência da passada (f_s)	Frequência da passada (f_s)
Valor do carregamento vertical	$0,4G_0N_{eq}\psi\cos(2\pi f_c t)$	$0,4G_0N_{eq}\cos(2\pi f_s t)$	$G_0 \sum_1^3 \alpha_i \text{sen}(i2\pi f_s t - \phi_i)$

Para as metodologias I e II, o carregamento é aplicado de forma distribuída e sempre de forma concordante com a deformada do modo de vibração analisado. Já na metodologia III, o carregamento é aplicado de forma pontual e variável no espaço, em função da movimentação dos pedestres. Em relação à frequência utilizada para os carregamentos periódicos, as metodologias II e III utilizam os valores da frequência de passada dos pedestres, enquanto a metodologia I utiliza o próprio valor da frequência natural do modo de vibração analisado. Além disso, o coeficiente N_{eq} , cujo valor é de 0,01 e 0,0159 para

as densidades de 0,2 P/m² e 0,5 P/m², respectivamente, resulta significativa diferença no valor do carregamento vertical.

Na metodologia IV, as acelerações máximas foram calculadas segundo o método analítico da resposta espectral. Na Figura 12 são apresentados os resultados desta metodologia em comparação com as metodologias I e II. Para estas últimas, os valores de aceleração são obtidos separadamente para cada um dos modos de vibração analisados, assim como no método analítico. As acelerações verticais máximas obtidas para o modo 5 com a metodologia IV são significativamente maiores em comparação às obtidas com as metodologias I e II para as densidades de 0,2, 0,5, 0,8 pessoas/m², superando-as em 347%, 230%, 197%, respectivamente. Entretanto, para as densidades de pedestres de 1,0 e 1,5 pessoas/m², os valores obtidos com a metodologia I superam os valores da metodologia IV (em até 32%, para a densidade de 1,5 pessoas/m²). Para a densidade de pedestres de 1,0 pessoa/m², os valores obtidos com a metodologia II superam os valores da metodologia IV em 12%. Especificamente para estas duas densidades, os coeficientes utilizados pelo método da resposta espectral são alterados em comparação às densidades abaixo de 1,0 pessoas/m².

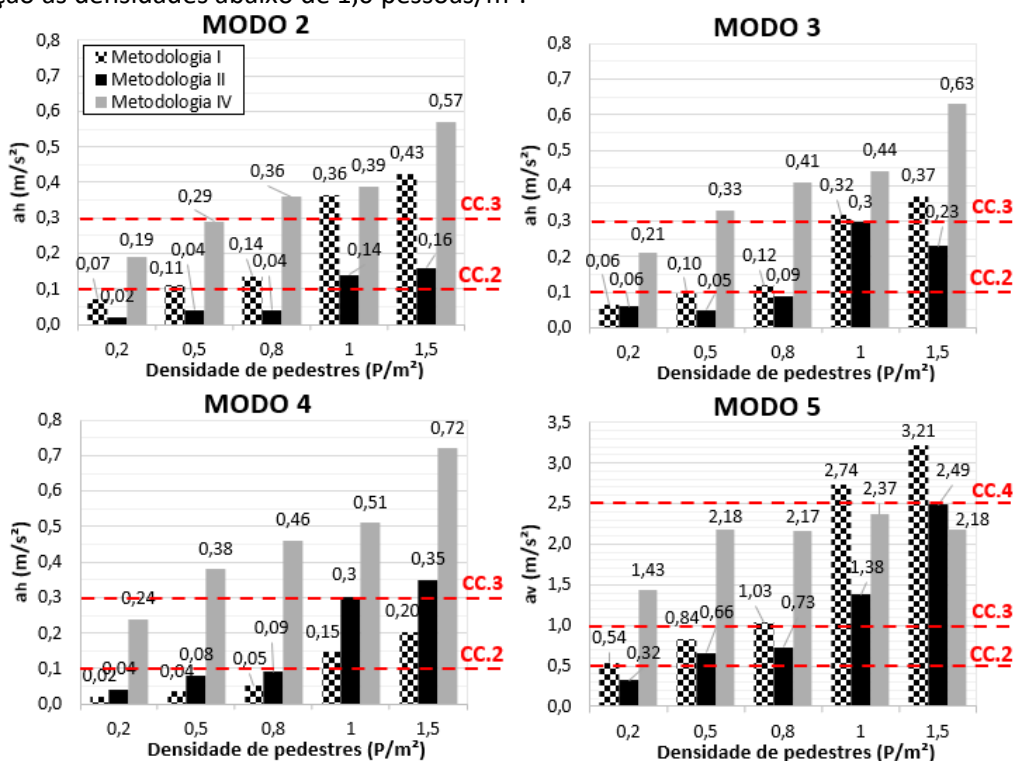


Figura 12 – Comparação entre acelerações máximas para as metodologias I, II e IV.

Para a metodologia III, a definição dos valores máximos de aceleração não são feitos para cada modo de vibração, devido à natureza da aplicação dos carregamentos sobre a passarela (de forma pontual). Desta forma, para cada frequência de passada, foram considerados os maiores valores de aceleração entre os

pontos de análise. Na Figura 11 são apresentadas as acelerações transversais obtidas pela metodologia III, em seus casos 3 e 4, e pelo método analítico.

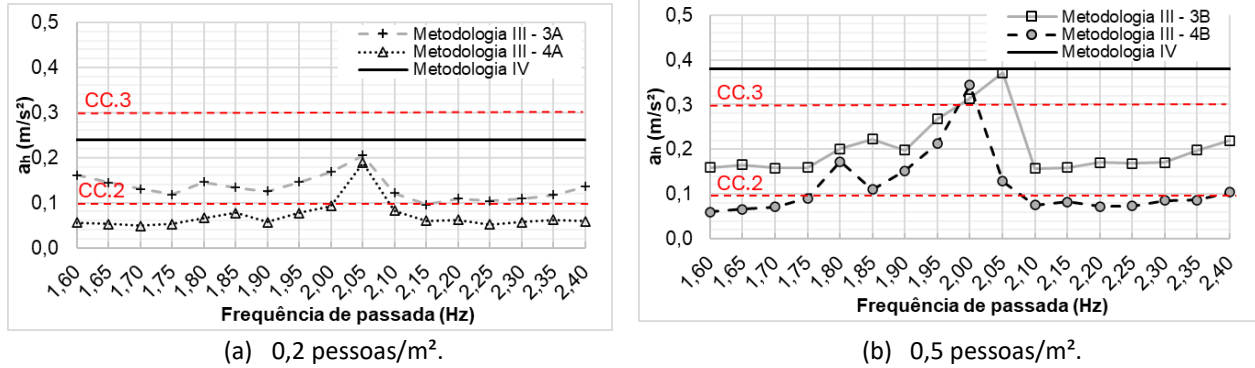


Figura 13 – Comparação entre valores de aceleração transversal obtidos pela Metodologia IV e pela Metodologia III, nos casos 3 e 4.

Os valores de aceleração transversal máximos para cada uma das densidades de pedestres analisadas utilizando a metodologia III são muito próximos aos valores fornecidos pelo método analítico da resposta espectral (Metodologia IV). Por outro lado, as acelerações verticais não seguem o mesmo padrão de comportamento, conforme mostrado na Figura 14.

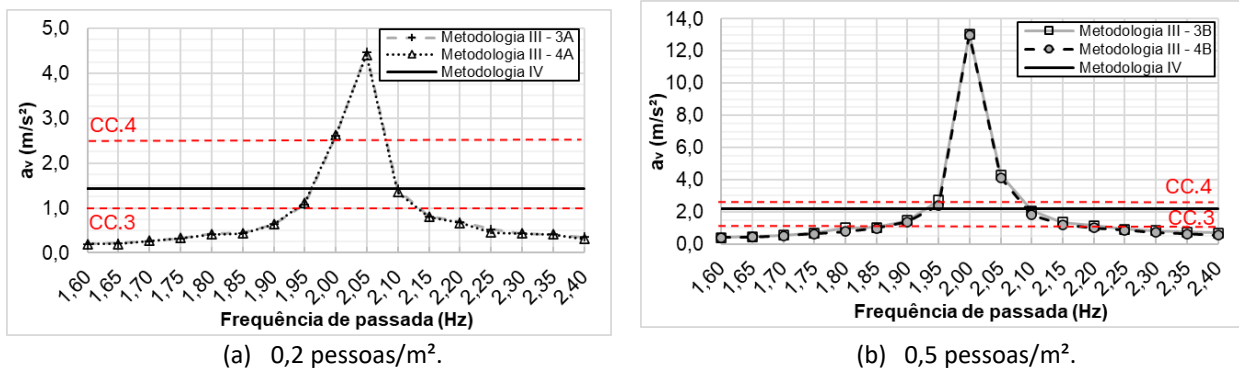


Figura 14 – Comparação entre valores de aceleração vertical obtidos pela Metodologia IV e pela Metodologia III, nos casos 3 e 4.

As acelerações verticais obtidas pela metodologia III são superiores na faixa de frequências de passada entre 1,95 Hz e 2,10 Hz em comparação ao método analítico. Para as demais frequências de passada, os valores de aceleração obtidos pelo método analítico são mais conservadores. Para as acelerações transversais, os valores obtidos com o método da resposta espectral são maiores do que os obtidos com as metodologias I e II, e próximos aos valores obtidos com a metodologia III. Um maior detalhamento desses valores é apresentado em Vicente (15).

4 CONCLUSÃO

Este artigo apresenta um levantamento dos principais métodos para análise dinâmica de passarelas de pedestres, conforme manuais, guias técnicos e literatura especializada, com aplicação ao estudo de caso da passarela Santana-Torre, localizada em Recife/PE. A passarela em questão apresenta configuração estrutural não convencional, distinta das tipologias usuais compostas por vigas ou treliças biapoiadas com seção constante. Foram consideradas quatro metodologias distintas de análise da passarela: (i) conforme os guias internacionais de passarelas (carregamentos distribuídos fixos), (ii) com pequenas adaptações em relação aos guias (também com carregamentos distribuídos), (iii) com carregamentos pontuais móveis simulando o caminhar de pedestres, (iv) com avaliação analítica das acelerações pelo método da resposta espectral. Os resultados mostraram que a metodologia I fornece estimativas mais conservadoras em relação à metodologia II, tanto na direção vertical quanto na transversal. Dentro da própria metodologia I, diferenças entre os guias Sétra (3) e JRC-ECCS (6) conduzem à atribuição de diferentes classes de conforto, dependendo do modo de vibração e da densidade de pedestres. A metodologia III resultou em acelerações verticais significativamente maiores — até uma ordem de grandeza acima — em comparação às metodologias I e II, devido à maior representatividade do carregamento dinâmico móvel. Para acelerações transversais, os valores obtidos foram similares entre as três metodologias. Na metodologia IV, os resultados obtidos por meio do método analítico da resposta espectral mostraram-se, em sua maioria, mais conservadores do que os obtidos pelas demais metodologias, que se valeram de análise dinâmica computacional. Foi identificada uma inconsistência relevante na expressão de cálculo das acelerações máximas proposta pela ABNT NBR 7187 (7), que pode resultar na subestimação das acelerações e, conseqüentemente, em avaliações equivocadas quanto ao conforto dos usuários.

Apesar das variações entre métodos, os resultados indicam que a passarela Santana-Torre apresenta suscetibilidade a problemas de conforto, tanto na direção vertical quanto transversal, em situações com diferentes densidades de pedestres. Dada a indefinição quanto ao início da construção, recomenda-se a revisão da concepção estrutural com o objetivo de aumentar a rigidez global da estrutura e mitigar os efeitos dinâmicos identificados. Recomenda-se, ainda, a implantação de um sistema de monitoramento estrutural logo após a conclusão da obra, a fim de aferir a taxa real de amortecimento e os níveis de aceleração durante o uso. Se necessário, devem ser previstos dispositivos de controle de vibração, como amortecedores viscosos ou TMDs (Tuned Mass Dampers), cuja instalação deve ser compatível com o projeto estrutural. Esta prática é comum em projetos internacionais de passarelas. Exemplos adicionais de aplicação dos métodos aqui analisados, bem como fundamentos teóricos complementares, podem ser encontrados em Vicente (15).

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à GAFAU Projeto e Consultoria pelo fornecimento dos desenhos de projeto (projeto básico estrutural) da passarela Santa-Torre.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) INGÓLFSSON, E. T.; GEORGAKIS, C. T.; JÖNSSON, J. Pedestrian-induced lateral vibrations of footbridges: A literature review. **Engineering Structures**, v. 45, p. 21–52, 2012.
- (2) DALLARD, P.; FITZPATRICK, A.J.; FLINT, A.; LE BOURVA, S.; LOW, A.; SMITH, R.M.R; WILLFORD, M. The London Millennium Footbridge. **The structural Engineer**, v. 79, n. 22, p. 17–21, 2001.
- (3) SÉTRA (service d'Études techniques des routes et autoroutes). Assessment of vibrational behavior of footbridges under pedestrian loading, 2006.
- (4) FELDMANN, M.; HEINEMEYER, C.; LUKIĆ, M. Human-induced vibration of steel structures (Hivoss). European Commission, Directorate-General for Research and Innovation, 2007.
- (5) BUTZ, C.; FELDMANN, M.; HEINEMEYER, C.; SEDLACEK, G.; CHABROLIN, B.; LEMAIRE, A.; LUKIC, M.; MARTIN, P.O.; CAETANO, E.; CUNHA, A.;GOLDACK, A.; KEIL, A.;SCHLAICH, M. Advanced load models for synchronous pedestrian excitation and optimised design guidelines for steel footbridges, **Research Fund for Coal and Steel series**, Luxembourg, 2008.
- (6) HEINEMEYER, C.; BUTZ, C.; KEIL, A.; SCHLAICH, M.; GOLDACK, A.; TROMETER, S.; LUKIC, M.; CHABROLIN, B.; LEMAIRE, A.; MARTIN, P.O.; CUNHA, A.; CAETANO, E. Design of Lightweight Footbridges for Human Induced Vibrations. **JRC-ECCS Joint Report, JRC Scientific and Technical Reports**. Editors: G. Sedlacek, Chr. Heinemeyer, Chr. Butz together with M. Gérardin, JRC first edition., 82p, 2009.
- (7) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7187: Projeto de pontes, viadutos e passarelas de concreto. Rio de Janeiro, 2021
- (8) RICCIARDELLI, F.; DEMARTINO, C. Design of Footbridges against Pedestrian-Induced Vibrations. **Journal of Bridge Engineering**, v. 21, n. 8, 2016.
- (9) EBRAHIMPOUR, A.; HAMAM, A.; SACK, R.L.; PATTEN, W.N. Measuring and Modeling Dynamic Loads Imposed by Moving Crowds. **Journal of Structural Engineering**, v. 122, n. 12, p. 1468–1474, 1996.
- (10) BACHMANN, H.;AMMANN, W.J.; DEISCHI, F.;EISENMANN, J.; FLOEGL, I.;HIRSCH, G.H.;KLEIN, G.K.;LANDE, G.J.;MAHRENHOLTZ, O.;NATKE, H.G.; NUSSBAUMER, H.;PRETLOVE, A.J.; RAINER, J.H.;SAEMANN, E.U.;STEINBEISSER, L.J. Vibration Problems in Structures. Practical Guidelines. Basel, 1995.
- (11) PFEIL, M.S; VARELA, W.D.; DA COSTA, N. DE P. A. Experimental calibration of a one degree of freedom biodynamic model to simulate human walking-structure interaction. **Engineering Structures**, v. 262, 11p., 2022.
- (12) GONZAGA, I. G. N; PFEIL, PFEIL, M.S; VARELA, W.D. Modal parameters to estimate the dynamic response of footbridges considering the human-structure interaction. **Engineering Structures**, v. 323, p. 119271, 2025.
- (13) SCHWEIZER, M.; FINA, M.; WAGNER, W.; KASIC, S.; FREITAG, S. Uncertain pedestrian load modeling for structural vibration assessment in footbridge design. **Engineering Structures**, v. 311, p. 118070, 2024.
- (14) REZENDE, F. A.; BRUNET JUNIOR, O.; CARVALHO, E. M. L.; VARELA, W.D.; PEREIRA, A. M. B. Vibration-based sensitivity analysis of a flexible steel footbridge using probabilistic walking models. **Engineering Structures**, v. 302, p. 117343, 2024.
- (15) VICENTE, M. S. Contribuições para a análise dinâmica de passarela de pedestres. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2025.