



ANÁLISE DE CARGAS HUMANAS E A SUA INTERAÇÃO COM A ESTRUTURA

Dianelys Vega

Carlos Magluta

Ney Roitman

dianelys@coc.ufrj.br

magluta@coc.ufrj.br

roitman@coc.ufrj.br

Laboratório de Estruturas e Materiais – PEC/COPPE/UFRJ

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Centro de Tecnologia, Bloco I-216, Ilha do Fundão, CEP: 21941-9726 Rio de Janeiro, Brasil,

Resumo: Na atualidade, devido aos avanços técnico-científicos, estruturas cada vez mais esbeltas e flexíveis têm sido concebidas, podendo provocar uma redução nas suas frequências naturais. No caso específico das passarelas, o risco de ressonância com o carregamento humano tende a aumentar já que as frequências de excitação desse tipo de carregamento podem se aproximar das frequências naturais dessas estruturas. O objetivo deste trabalho é a abordagem por meio de modelo analítico-numérico da variação dos parâmetros modais de uma passarela sob cargas induzidas por pedestre validado através de medições experimentais. A metodologia empregada é a realização de ensaios sobre uma plataforma mista de aço e concreto a qual foi instrumentada com acelerômetros para medir a sua resposta estrutural sob excitação produzida por carregamento humano. A partir dos resultados experimentais o modelo numérico é ajustado, mostrando que o comportamento da estrutura depende da densidade de pessoas sobre a mesma, podendo modificar as propriedades dinâmicas como frequências naturais e amortecimento devido à interação dinâmica entre a estrutura e as pessoas.

Palavras chave: dinâmica estrutural, cargas humanas, frequências naturais, vibrações,

1 INTRODUÇÃO

A movimentação humana, através do ato de caminhar, de correr ou de pular, impõe esforços dinâmicos aos elementos estruturais. Tal comportamento está particularmente presente em passarelas de pedestres. Neste caso o risco de ressonância com o carregamento humano tende a aumentar já que as frequências de excitação desse tipo de carregamento podem se aproximar das frequências naturais dessas estruturas. Isso pode comprometer não apenas a segurança estrutural, mas também o conforto dos usuários, já que os níveis de vibração podem ficar acima do desejável, daí a importância do estudo desse fenômeno.

Como as passarelas são geralmente projetadas para resistir à ação de cargas estáticas, sem considerar características peculiares como a presença das pessoas e o efeito da movimentação delas sobre a estrutura, elevado número dessas estruturas tem apresentado alguma forma de dano devido às cargas dinâmicas, como por exemplo, o caso da Millenium Bridge, em Londres (Willford, 2002), fechada logo após sua inauguração por vibrações laterais excessivas. Algumas pontes mais conhecidas por colapso da estrutura devido a cargas dinâmicas são a ponte de Broughton, também na Inglaterra em 1831 (Živanović, 2005), e o caso da ponte Tacoma, nos Estados Unidos em 1940 (Billah, 1991).

O objetivo geral desta pesquisa é a caracterização de cargas humanas do tipo andar e sua interação com a estrutura. Isso está sendo realizado através de um modelo analítico-numérico do comportamento dinâmico de uma passarela sob cargas induzidas por pedestres andando validado através de medições experimentais.

Os objetivos específicos deste trabalho são realizar um estudo preliminar sobre o tema de cargas humanas e a sua interação com a estrutura e apresentar os resultados numéricos de um estudo paramétrico das propriedades modais da passarela quando se encontra sob o efeito da presença de pessoas. Isto foi realizado baseado em testes experimentais realizados e valores numéricos obtidos da modelagem de alguns casos.

Nos próximos itens são apresentados um estudo preliminar sobre a ação do pedestre, a descrição da estrutura utilizada para a realização dos testes experimentais e a sua instrumentação, a descrição dos ensaios realizados, a abordagem numérica empregada e a correlação entre ambos e finalmente os comentários finais.

2 ESTUDO PRELIMINAR DA AÇÃO DO PEDESTRE

2.1 Carga produzida pelo andar

As cargas provocadas pelo movimento de pedestres são cargas variáveis no tempo e no espaço, de caráter randômico, não só devido ao fato de que diferentes indivíduos possuem diferentes características físicas, mas também devido ao fato de que um mesmo indivíduo não repete passos idênticos. Esse aspecto relevante levou à necessidade do aprofundamento do estudo das cargas induzidas pelo andar das pessoas para a descrição de modelos matemáticos mais confiáveis para o projeto estrutural.

Ao caminhar um indivíduo produz efeitos em três direções: uma na vertical, produzida pelo peso do corpo sobre um pé e o outro, e duas na horizontal, nas direções lateral e longitudinal. Na direção lateral é causada pelo movimento de zig-zag dos pés durante a caminhada e na direção longitudinal é produzida pelas acelerações e desacelerações do indivíduo quando anda. Nesta

pesquisa serão analisados somente os esforços na direção vertical devido a que estas são as solicitações de maior magnitude (Venuti, 2009).

Na Fig. 1 é mostrada de forma esquemática a força vertical ao longo do tempo produzida por um pé durante uma caminhada. Os valores deste gráfico podem variar dependendo dos parâmetros que descrevem o movimento de um pedestre, como a frequência do passo (f_p), a longitude do passo (l_p) e a velocidade do passo (v_p), que relaciona os dois parâmetros anteriores através da expressão $v_p = f_p * l_p$ (Venuti, 2009). Esses parâmetros variam de indivíduo para indivíduo e são influenciados por fatores fisiológicos e psicológicos, como as características biométricas do indivíduo (peso, altura, idade, gênero), tipo de caminhada, entre outros.

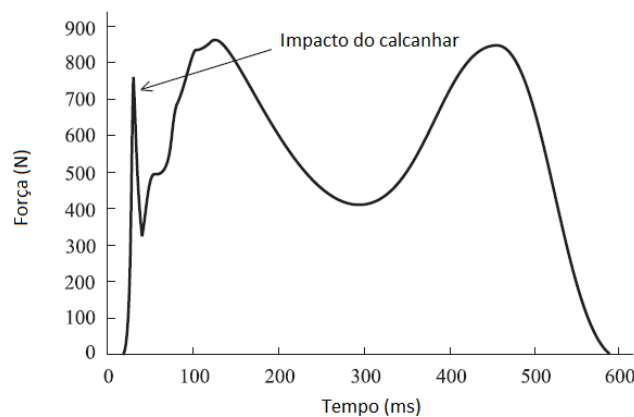


Figura 1: Reação no piso na direção vertical produzida por um pé de um indivíduo padrão durante a caminhada (Racic, 2009)

2.2 Interação pessoa-estrutura

Estudos anteriores mostram que, no caso de análises de vibrações na direção vertical para situações de multidão, o efeito do pedestre sobre a estrutura não é representado adequadamente quando essa ação é descrita como uma carga móvel pulsante sobre a estrutura.

Diferentes autores têm apresentado modelos biodinâmicos para representar a ação de pedestres, alguns deles Brownjohn (1999), Falati (1999) e R. Sachse, A. Pavic, P. Reynolds (2004). Tais modelos consideram que o indivíduo atua como um sistema massa-mola-amortecedor acoplado à estrutura e, conseqüentemente, modifica as suas propriedades dinâmicas, como frequências naturais e amortecimento. As propriedades dinâmicas da pessoa, como a sua massa, rigidez e amortecimento são representadas no modelo. Essas propriedades são de difícil obtenção devido às diferenças entre características de indivíduos, porém, já existe na literatura estimativa para esses parâmetros obtidos através de testes experimentais (Pimentel, 2013).

É esperado que, ao considerar a interação da estrutura com as pessoas, uma modificação da resposta da estrutura vá acontecer, devido às mudanças das características do sistema (B. R. Ellis, T. Ji, 1997).

Um modelo biodinâmico de um grau de liberdade para representar um pedestre em movimento na direção vertical foi desenvolvido por Silva e Pimentel (2011). Na Fig.2 mostra-se o esquema representativo desse modelo. Os parâmetros dinâmicos nesse modelo, m , c e k foram selecionados de forma tal que representassem as acelerações ao nível da cintura (centro de

gravidade da pessoa). No esquema, P_{Gnd} é a reação do piso causada pelo andar do pedestre e u_t é o deslocamento do grau de liberdade referente a um ponto fixo de referência.

Existem relatos em estudos anteriores de aumentos de amortecimento e variações na frequência natural das estruturas quando se encontram ocupadas por pessoas paradas (Sachse et al., 2004; Butz et al., 2008).

Para atender aos objetivos desta pesquisa foram realizados testes experimentais em uma passarela construída especialmente para esse fim. Os próximos itens descrevem a passarela e a instrumentação utilizada.

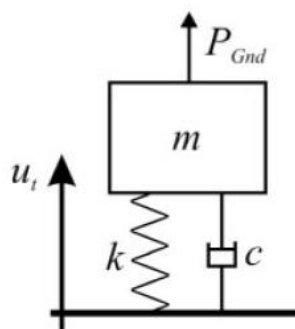


Figura 2: Modelo biodinâmico de um grau de liberdade (Pimentel, 2013)

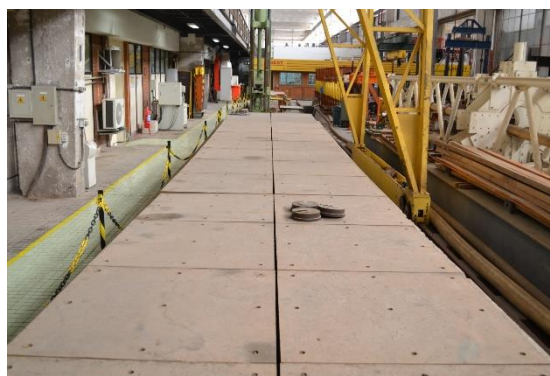
3 DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA

A estrutura utilizada para a realização de testes experimentais já foi usada em trabalhos anteriores (Faisca, 2003). A mesma consiste de uma laje de concreto sobre perfis I metálicos longitudinais e transversais. Segundo Faisca (2003), a estrutura foi projetada para suportar uma carga de $7,4 \text{ kN/m}^2$, o que equivale aproximadamente ao seu peso próprio somado à carga acidental de $4,9 \text{ kN/m}^2$, que é um valor próximo ao equivalente estático sugerido pela U.S. Standards and Building Code (ANSI, 1982).

A estrutura encontra-se sobre quatro apoios, sendo dois em cada extremidade, com um vão livre máximo de 11,5 m de comprimento, o que a torna bem flexível. Nas Fotografias 1a, 1b e nas Fig. 2a e 2b são mostrados esquemas das dimensões e detalhes da estrutura.



Fotografia 1a – Vista da Passarela com os apoios



Fotografia 1b - Vista Superior da Passarela

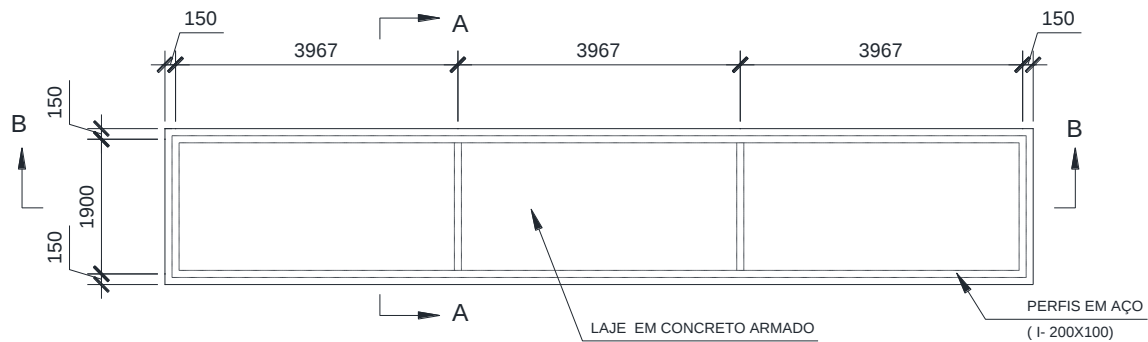


Figura 2a: Vista superior (cotas em mm)

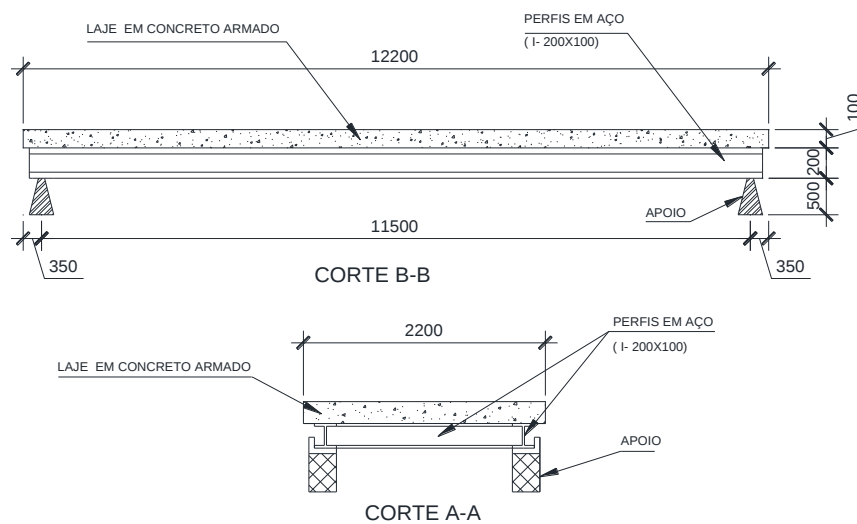


Figura 2b: Vista Frontal (cotas em mm)

4 TESTES EXPERIMENTAIS

4.1 Instrumentação

A estrutura foi instrumentada para medir a sua resposta estrutural quando for excitada por uma força externa. Os sensores colocados para realizarem essa tarefa foram seis acelerômetros (de tipos resistivos) de capacidade 1g, que foram colados na base dos perfis I longitudinais, na direção vertical. Na Fig. 3 apresenta-se um esquema simplificado das posições na passarela dos acelerômetros, que estão representados pelas siglas AC. Na Fotografia 2 mostra-se o detalhe da fixação dos acelerômetros aos perfis.

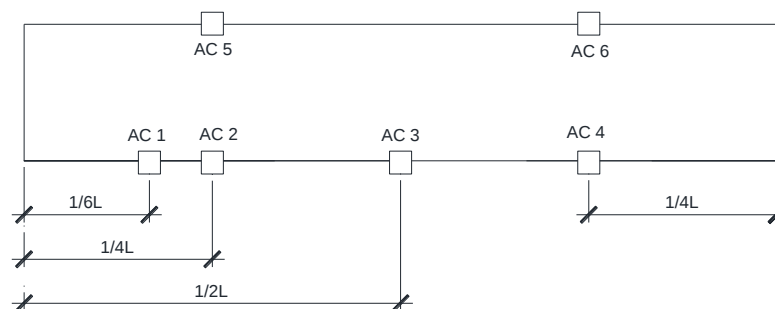


Figura 3: Posição dos acelerômetros



Fotografia 2: Fixação do acelerômetro resistivo

4.2 Descrição dos Testes Experimentais

Numa primeira etapa foi realizada a identificação da estrutura. Os dois tipos de excitação usados para determinar os parâmetros modais foram: excitação manual, ou seja, aplicando deslocamento vertical na estrutura com a mão; e com impactos de uma pessoa pulando sobre ela. O ponto de excitação foi aproximadamente a $\frac{1}{4}$ do comprimento da passarela. Posteriormente, foram realizados testes dos quais participou um grupo de 12 pessoas, essas pessoas apresentavam uma faixa de massa corporal entre 55 e 85 kg, com um valor médio de 72 kg.

Para a análise dos resultados dos testes experimentais foram utilizados dois programas computacionais baseados na ferramenta Labview, desenvolvidos na COPPE/UFRJ (Bucher, 2001). Para estimar a taxa de amortecimento, aplica-se a técnica “Short Time Frequency Technique” (STFT) implementada em um dos programas, enquanto, as frequências naturais são estimadas a partir do espectro dos sinais medidos.

Um espectro de frequências de um sinal característico dos testes realizados durante a identificação da estrutura é mostrado na Fig. 4 onde se observam quatro picos de acelerações correspondentes aos quatro primeiros modos de vibração. Esses modos foram identificados através das fases entre acelerômetros para cada frequência natural. Na Fig. 5 ilustram-se as fases dos acelerômetros AC2 e AC5 e na Tabela 1 mostram-se os parâmetros modais obtidos nesses primeiros testes, onde f indica modo de flexão e t de torção. Cada teste foi repetido três vezes, dessa forma, nessa Tabela, foram consideradas um total de nove amostras para a estimativa dos valores médios e desvios padrão.

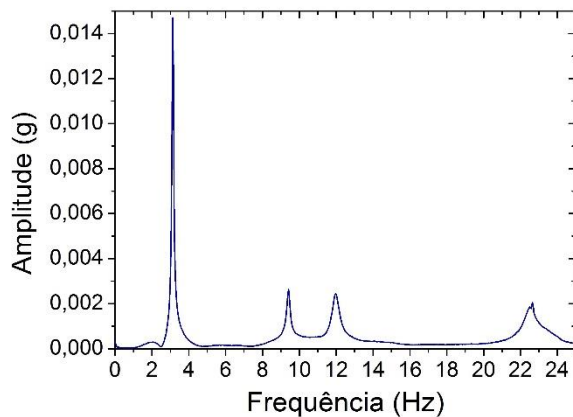


Figura 4: Espectro de frequências

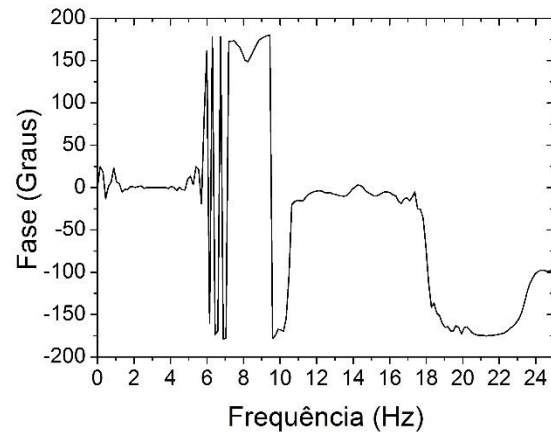


Figura 5: FRF entre os acelerômetros AC2 e AC5

Tabela 1: Parâmetros Modais obtidos experimentalmente (*f*: modo de flexão, *t*: modo de torção)

Tipo de excitação	Frequências naturais (Hz)			
	Modo 1 (<i>f</i>)	Modo 2 (<i>t</i>)	Modo 3 (<i>f</i>)	Modo 4 (<i>t</i>)
Manual	3,15±0,01	9,43±0,01	12,06±0,01	22,63±0,01
Pulos	3,12±0,02	9,42±0,02	11,98±0,01	22,60±0,06
Taxa de amortecimento (%)				
	Pulos			
Pulos	0,6±0,01	0,7±0,00	1,5±0,01	1,2±0,01

Desses testes conclui-se que os valores devidos à excitação com uma pessoa pulando são muito próximos aos obtidos com excitação manual, ou seja, a presença de uma pessoa praticamente não altera a frequência natural da estrutura. Para o caso com excitação manual, não foi possível estimar o amortecimento da estrutura devido às baixas amplitudes das respostas. Dessa forma, os valores de amortecimento indicados na Tabela 1 serão considerados como os valores de amortecimento da estrutura original sem pessoas sobre ela.

Numa segunda etapa, foi realizado uma série de testes cujo principal objetivo foi determinar como as pessoas influenciavam a variação das propriedades dinâmicas da estrutura. De forma geral, os ensaios consistiam em excitar a estrutura com pulos de uma pessoa que executava a atividade sempre no mesmo lugar e a diferença entre os testes consistia no número de pessoas paradas sobre a estrutura. Para esses testes foram selecionadas diferentes posições das pessoas sobre a passarela, de tal forma que ficassem espalhadas para os dois primeiros casos, e concentradas próximas ao meio do vão para o caso 3. Essas posições são mostradas no esquema simplificado da Fig. 6 e na Tabela 2, que apresenta o número total de pessoas em cada ensaio com suas respectivas localizações (A, B, ..., F), indicadas nesta figura. As cotas no esquema estão referidas ao comprimento total da estrutura, e coincidem com as posições dos acelerômetros.

Nesses testes, a pessoa posicionada sempre em A, realizava um pulo até a estrutura amortecer e, as restantes pessoas ficavam paradas de acordo com as posições mostradas para cada um dos testes. As Fotografias 3 e 4 foram tiradas durante os ensaios, nelas observam-se duas das situações descritas na Tabela 2.

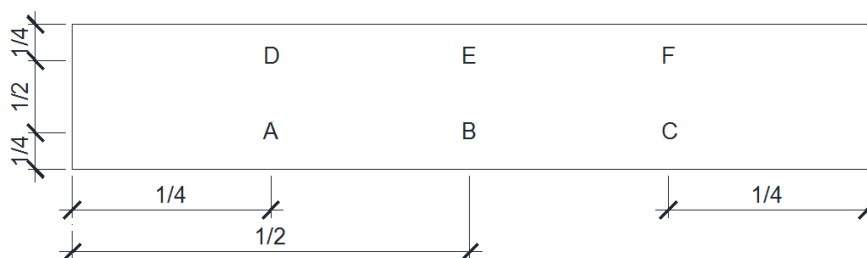
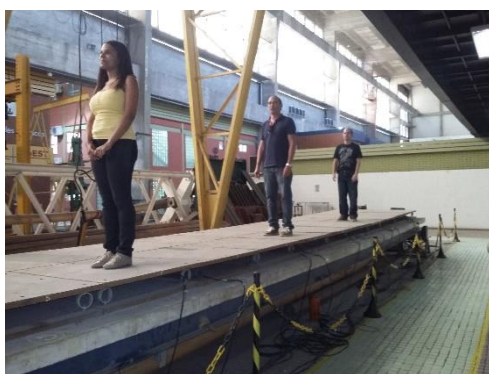


Figura 6: Posições das pessoas sobre a passarela durante os ensaios.

Tabela 2: Resumo dos testes realizados e a quantidade de indivíduos participantes.

Casos	Testes	# pessoas	A	B	C	D	E	F
1	1	1	1					
	2	2	1	1				
	3	3	1	1	1			
	4	4	1	1		1	1	
	5	6	1	1	1	1	1	1
2	1	3	1	2				
	2	5	1	2	2			
	3	7	1	2		2	2	
	4	11	1	2	2	2	2	2
	5	12	2	2	2	2	2	2
3	1	5	1	2			2	
	2	7	1	3			3	
	3	9	1	4			4	



Fotografia 3 : Teste 3 caso 1



Fotografia 4: Teste 5 caso 1

Os sinais dos três acelerômetros de cada um dos testes realizados foram processados e seus resultados (valores médios e desvios padrão) para cada situação são apresentados em forma de gráficos e tabelas. Os resultados obtidos para taxa de amortecimento são mostrados nos gráficos das Figuras 7 a 10, as quais descrevem a variação do parâmetro em função do número de pessoas sobre a estrutura. Nas Fig. 7, 8 e 9 podem-se observar os valores dos quatro modos de vibração para cada

caso analisado, e no gráfico da Fig. 10 foram considerados os valores juntando os casos 1 e 2 por serem similares. Desta forma esta figura apresenta um maior número de pontos, permitindo uma melhor interpretação dos resultados.

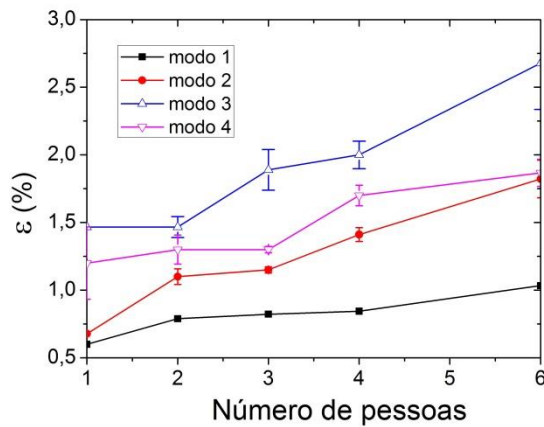


Figura 7: Variação da taxa de amortecimento para o caso 1

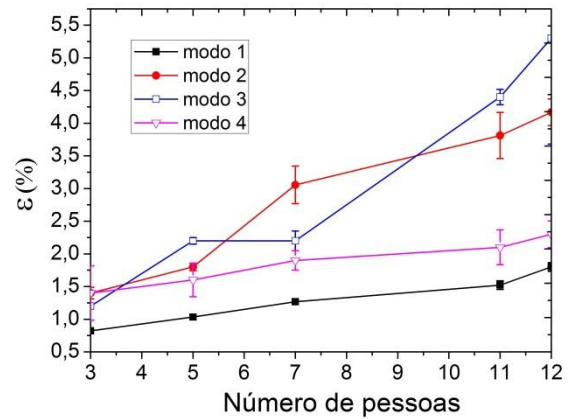


Figura 8: Variação da taxa de amortecimento para o caso 2

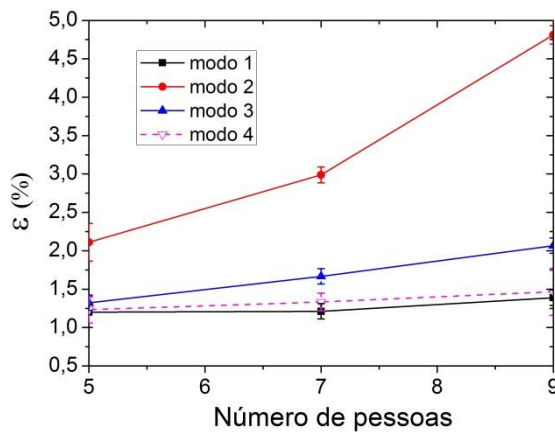


Figura 9: Variação da taxa de amortecimento para o caso 3

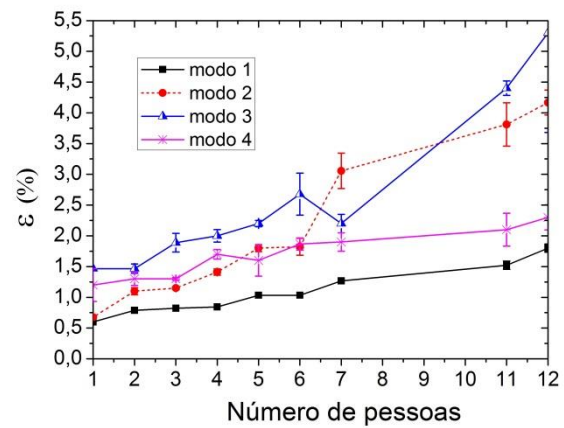


Figura 10: Variação da taxa de amortecimento com o incremento de pessoas

Conforme esperado o amortecimento apresenta um aumento à medida que aumenta o número de pessoas sobre a estrutura, o qual verifica que a teoria de interação pessoa-estrutura é coerente, na qual as pessoas atuam como um sistema massa-mola-amortecedor. No gráfico da Fig.10 os pontos que não são coerentes com o aumento são simplesmente devido ao fato que para esses casos ocorre a mudança de um caso para o outro, onde as pessoas não estão nas mesmas posições. Deve-se realçar que o caso 3 foi uma situação criada apenas para mostrar o aumento do amortecimento devido à densidade de pessoas, já que essa situação na prática, em geral, não é real.

Por outro lado, os valores médios obtidos para as frequências naturais são apresentados nas Fig. 11, 12, 13 e 14. Cada gráfico representa um modo de vibração e descreve a variação do parâmetro para os três casos devido à presença de pessoas.

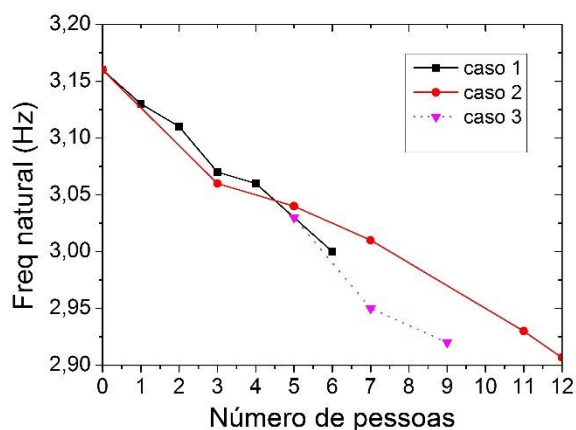


Figura 11: Variação da frequência natural para o modo 1

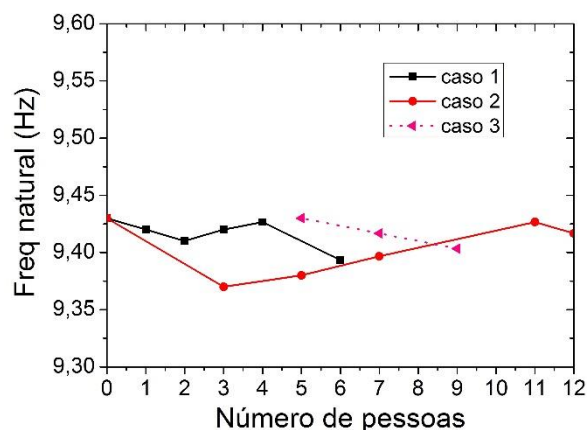


Figura 12: Variação da frequência natural para o modo 2

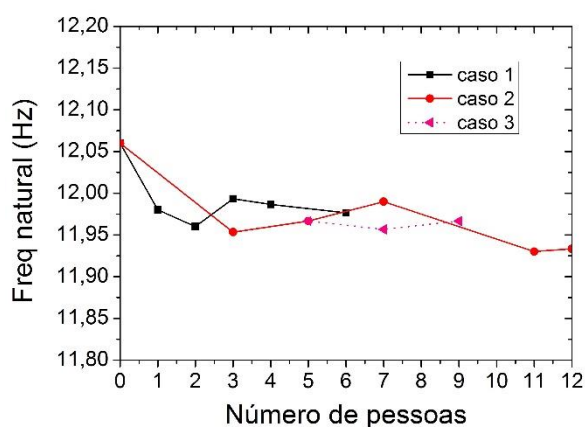


Figura 13: Variação da frequência natural para o modo 3

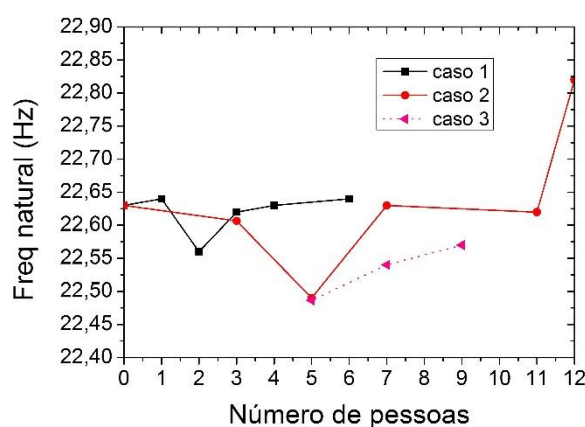


Figura 14: Variação da frequência natural para o modo 4

Nota-se no gráfico da Figura 11 que o primeiro modo de vibração apresenta uma tendência clara para a diminuição da frequência natural com o acréscimo de pessoas. Nos demais modos de vibração observa-se que a variação não segue um padrão determinado. Este resultado é corroborado com um relato da literatura de um caso que mostra a redução do valor numérico da frequência natural para o modo fundamental de vibração vertical, não obstante a multidão tem a capacidade de aumentar esse valor assim como fazer aparecerem novos modos de vibração (B.R. Ellis, T. Ji, 1997). De acordo com (B.R. Ellis, T. Ji, 1997; J.M.W. Brownjohn, 2001) os ocupantes às vezes, porém nem sempre, reduzem a frequência natural de estruturas civis.

5 ANÁLISE NUMÉRICA

5.1 Modelo numérico

A estrutura foi modelada em elementos finitos num programa baseado na ferramenta Matlab, desenvolvido por Laila (2015) com algumas alterações para realizar a análise numérica de elementos de pórtico espacial. Foi usado um modelo simplificado composto de 62 elementos de pórtico espacial e 39 nós, considerando apoios simples nos quatro nós das extremidades. Na Fig.15 mostra-se o esquema da discretização adotada no modelo.

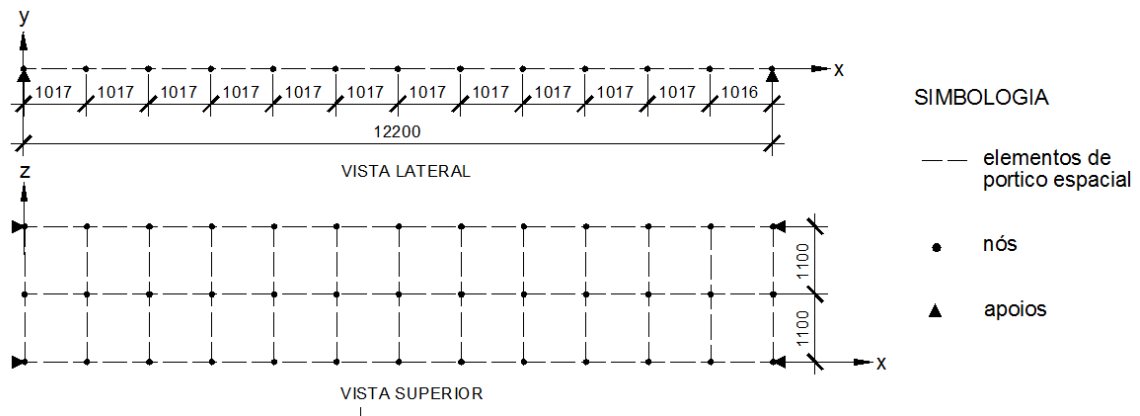


Figura 15: Discretização adotada para a modelagem numérica (cotas em mm)

Para o cálculo das propriedades mecânicas, a estrutura foi considerada como uma seção mista de aço e concreto e foram usadas as propriedades equivalentes da seção homogeneizada calculadas segundo Pfeil (2009), tanto em relação ao plano x-y, quanto em relação ao x-z. Os valores calculados para cada direção foram divididos proporcionalmente para cada elemento de pórtico. Na Tabela 3 mostram-se os valores calculados utilizados no modelo numérico tanto para os elementos longitudinais, como transversais.

Tabela 3: Propriedades mecânicas dos elementos longitudinais e transversais

Elem	E (N/m ²)	I_x (m ⁴)	I_y (m ⁴)	I_z (m ⁴)	I_r (m ⁴)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	G (N/m ²)
long	2,00E+11	3,33E-05	4,2E-02	1,32E-04	4,2E-02	1,75E-02	17450	7,69E+10
trans	2,00E+11	1,68E-04	4,2E-02	3,33E-05	4,2E-02	2,33E-05	17450	7,69E+10

E : Modulo de elasticidade do aço

I_x : Constante de torção

I_y : Inercia em relação ao eixo y

I_z : Inercia em relação ao eixo z

I_r : Momento de Inercia Polar

A : Área da seção transversal

ρ : Densidade do material misto

G : Módulo de elasticidade transversal

Os resultados da modelagem numérica para os primeiros quatro modos de vibração são mostrados de forma gráfica na Fig. 16. As formas modais foram exibidas em um programa para visualização de dados desenvolvido no Laboratório de Estruturas da COPPE-UFRJ, baseado na ferramenta Labview.

O modelo numérico conseguiu representar bem os modos obtidos experimentalmente, já que para os quatro primeiros modos de vibração encontrados as formas modais coincidem com as obtidas experimentalmente. As frequências desses modos também apresentam uma boa correlação. Os valores numéricos e experimentais serão correlacionados no próximo item.

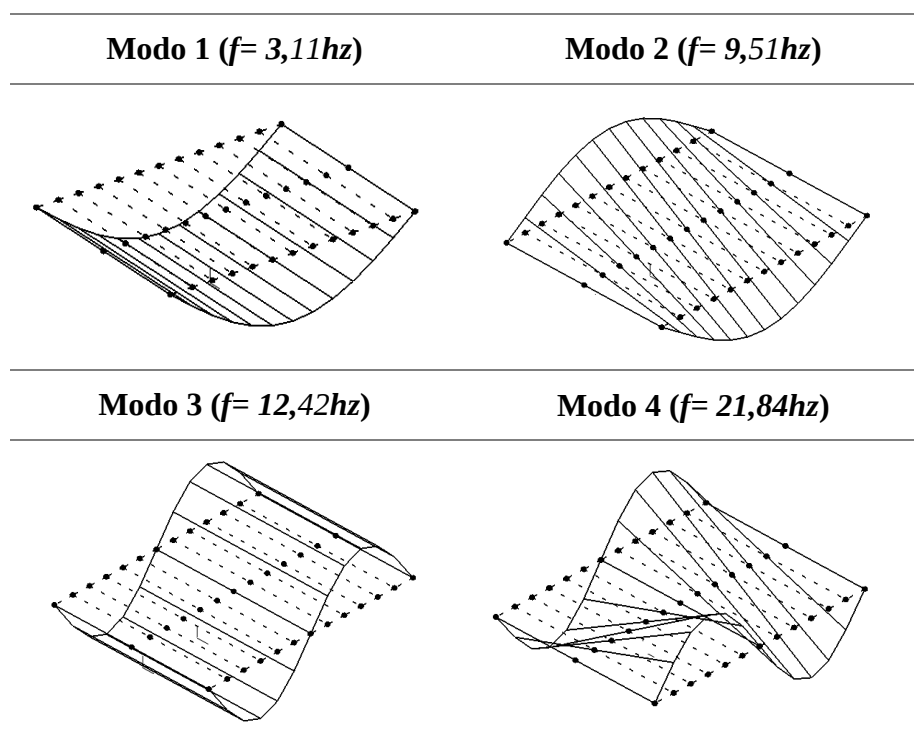


Figura 16: Frequências naturais e modos de vibração obtidos numericamente

6 CORRELAÇÃO DOS RESULTADOS NÚMERICOS COM OS EXPERIMENTAIS

Os valores das frequências naturais da estrutura obtidos numericamente e experimentalmente são mostrados na Tabela 4. Como a maior diferença encontrada não excede 4%, pode-se considerar que o modelo numérico está ajustado aos resultados experimentais.

Dos testes experimentais foram escolhidas aleatoriamente algumas situações com presença de pessoas para serem simuladas no modelo numérico. As pessoas foram modeladas como massas adicionadas à estrutura concentradas nos nós mais próximos das posições onde se encontravam durante os testes. São apresentadas na Tabela 5 comparações dos resultados numéricos e experimentais para essas três situações selecionadas. Nessa Tabela especifica-se também o número de pessoas paradas sobre a estrutura em cada teste, para uma melhor interpretação.

Tabela 4: Frequências naturais da estrutura obtidas de forma numérica e experimental

	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4
Valores experimentais	3,15±0,01	9,43±0,01	12,06±0,00	22,63±0,00
Valores numéricos	3,11	9,51	12,42	21,84

Tabela 5: Comparação de resultados numéricos e experimentais para as situações modeladas, médias e desvios.

Caso 1 Teste 4 (4 pessoas)		Caso 1 Teste 5 (6 pessoas)		Caso 2 Teste 4 (11 pessoas)	
Numérico	Experimental	Numérico	Experimental	Numérico	Experimental
3,02	3,06 ± 0,00	3,00	3,01 ± 0,00	2,90	2,91 ± 0,00
9,38	9,43 ± 0,02	9,35	9,39 ± 0,03	9,19	9,42 ± 0,08
12,2	11,99 ± 0,01	12,04	11,98 ± 0,02	11,69	11,93 ± 0,03
21,63	22,63 ± 0,02	21,49	22,64 ± 0,02	21,17	22,79 ± 0,02

Observa-se que os valores das frequências naturais associadas ao primeiro modo de vibração obtidas numericamente e experimentalmente tendem a diminuir aproximadamente na mesma proporção, indicando que a consideração das pessoas como massas concentradas no modelo numérico é válida, já que a diferença dos valores numéricos e experimentais, para todos os casos analisados, não supera 0,5%. Dessa tabela também se pode observar que, conforme esperado, as frequências naturais têm maiores variações a partir de 11 pessoas paradas sobre a passarela (caso mais próximo ao efeito de multidão).

A modelagem das pessoas como massas concentradas adicionadas à estrutura leva à diminuição numérica das frequências naturais, mas não é possível simular as frequências naturais dos demais modos devido ao fato da rigidez e do amortecimento que as pessoas aportam à estrutura não estarem sendo levado em consideração (R. Sachse, A. Pavic, P. Reynolds, 2004).

7 COMENTÁRIOS FINAIS

Para todos os testes realizados, verificou-se que, com o aumento do número de pessoas paradas sobre a estrutura, aumenta a taxa de amortecimento, indicando que existe uma interação entre as pessoas e a estrutura, onde as pessoas contribuem para o amortecimento do sistema. Deve-se ressaltar que apesar de não se poder considerar para efeito de projeto esse acréscimo do amortecimento, esse efeito é benéfico para a segurança estrutural. No que se refere às frequências naturais, constatou-se que essas se modificam quando tem pessoas sobre a estrutura, com tendência a diminuir para o modo fundamental de vibração vertical.

A representação no modelo dos indivíduos como massas concentradas nos nós conseguiu representar a variação das frequências naturais coerentemente para o 1º modo de vibração quando comparadas com os resultados experimentais. Para simular numericamente as demais frequências naturais seria necessário modelar a rigidez introduzida pelas pessoas no sistema.

Os resultados obtidos até agora são uma base firme para dar continuidade à pesquisa, faltando programar no modelo numérico a carga humana de pessoas andando. Após essa implementação será possível inferir o valor da taxa de amortecimento com pessoas andando sobre a passarela, isso será realizado correlacionando as respostas numéricas com as experimentais.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Billah, K.; R. Scanlan. (1991). Resonance, Tacoma Narrows Bridge Failure, and Undergraduate Physics Textbooks. American Journal of Physics 59 (2):118–124. DOI:10.1119/1.16590. Bibcode: 1991Am JPh.59.118B.

B. R. Ellis, T. Ji, BSc. Human–structure interaction in vertical vibrations, Proc. Instn Civ. Engrs Structs & Bldgs, 1997, 122, Feb., 1–9

Brownjohn J.M.W. “Energy dissipation in one-way slabs with human participation”, Proceedings of the Asia-Pacific Vibration Conference 99, Nanyang Technological University, Singapore, 11-13 December 1999. Vol. 1: 155-60.

Brownjohn J.M.W, Energy dissipation from vibrating floor slabs due to human-structure interaction, Shock and Vibration 8 (2001) 315–323

Bucher, H. F. Metodologias para a aplicação de técnicas tempo-frequência em dinâmica estrutural e ao método dos elementos de contorno. Tese de Doutorado, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2001.

Clarissa Maciel dos Santos. Avaliação do comportamento dinâmico de uma passarela submetida a carregamentos induzidos por pedestres. Tese de mestrado, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2011.

David E. Newland. Pedestrian excitation of bridges recent results. Tenth International Congress of Sound and Vibration, Stockholm, Sweden 2003.

Faisca, R. G. Caracterização de cargas dinâmicas geradas por atividades humanas. Tese de Doutorado, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2003.

Falati S. “The contribution of non-structural components to the overall dynamic behavior of concrete floor slabs” Concrete Floor Slabs”. Thesis (PhD) University of Oxford, Oxford, UK, 1999.

H.T. da Silva, H.M.B.F. Brito, R.L. Pimentel. Modeling of crowd load in vertical direction using biodynamic model for pedestrians crossing footbridges, 2013.

Laila Saraiva Aparecida Pereira, Análise dinâmica de edifícios submetidos à excitação de base. Seminário de Qualificação de Mestrado, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2015.

Luiz Augusto Cavalcanti Moniz de Aragão Filho. Identificação de estruturas em operação através de análise modal híbrida. Tese de Doutorado, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2008.

Natasha de Paula Amador da Costa. Interação dinâmica pessoa-estrutura de passarelas em material compósito. Tese de mestrado, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2013.

Pfiel W., Pfiel M. Estruturas de aço. Dimensionamento pratico, 8va Edição.

R. Sachse, A. Pavic, P. Reynolds. Parametric study of modal properties of damped two-degree-of-freedom crowd–structure dynamic systems. Journal of Sound and Vibration 274 (2004) 461–480

Venuti F., Bruno L. Crowd-structure interaction lively footbridges under synchronous lateral excitation: a literature review. Physics of Life Reviews 6 (2009)176-206

V. Racic, A. Pavic, J.M.W. Brownjohn. Experimental identification and analytical modelling of human walking forces: Literature Review. Journal of Sound and Vibration 326 (2009) 1-49

Willford, M. Dynamic actions and reaction of pedestrians in: Proceedings of Footbridge, Paris, France, November 20-22, pp 66-73 _ 2002

Živanović, S., Pavić, A. and Reynolds, P. (2005) Vibration serviceability of footbridges under human-induced excitation: a literature review. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 279, No. 1-2, pp. 1-74.