

Análise probabilística de modelo biodinâmico para representar a ação de pedestres sobre passarelas

Otavio Brunet Junior¹, Filipe A. Rezende², Eliane M. L. Carvalho¹, Wendell D. Varela^{2,3}, André M. Brabo Pereira⁴

¹*Escola de Engenharia, Universidade Federal Fluminense (UFF)*
Rua Passo da Pátria, 156, São Domingos, 24210-240
Niterói/RJ, Brazil
otaviobrunet@id.uff.br, elianemaria@vm.uff.br

²*PEC/COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)*
Av. Athos da Silveira Ramos, 149, Cidade Universitária, 21941-909
Rio de Janeiro/RJ, Brazil
filipe.rezende@coc.ufrj.br; wendell@fau.ufrj.br

³*Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)*
Av. Pedro Calmon, 550, Cidade Universitária, 21941-901
Rio de Janeiro/RJ, Brazil
wendell@fau.ufrj.br

⁴*Instituto de Computação, Universidade Federal Fluminense (UFF)*
Rua Passo da Pátria, 156, São Domingos, 24210-240
Niterói/RJ, Brazil
andremaues@gmail.com

Abstract. O uso recente de novos materiais e ideias inovadoras em projetos de passarelas têm resultado em estruturas com baixas frequências naturais sujeitas a problemas de vibração excessivas, exigindo análise criteriosas na fase de projeto. No presente trabalho, foram realizadas análises dinâmicas considerando modelos de carregamento com duas formulações: modelo de força por Série de Fourier e modelo biodinâmico, sendo este último para avaliar a relevância da interação pessoa-estrutura na resposta oscilatória. Para simular a aleatoriedade típica do passo humano, um modelo probabilístico também foi considerado. A pesquisa reflete uma evolução desse modelo, onde se buscou representar o movimento de um pedestre de forma ainda mais realista em sua lógica de programação, utilizando o método de *Random Walk* (MRW). Com o auxílio de um modelo tridimensional de uma passarela localizada no Rio de Janeiro, foram feitas correlações entre resultados experimentais e simulações para uma e seis pessoas caminhando em ressonância com a estrutura. A melhor correlação entre os resultados teóricos e experimentais foi obtida para o modelo probabilístico com parâmetros de carregamento que consideram a formulação biodinâmica.

Keywords: *Carregamento humano, random walk, modelos probabilísticos*

1 Introdução

Sabe-se que o caminhar humano é um movimento cíclico cujos efeitos não possuem uma padronização bem definida, devido aos parâmetros físicos e psicológicos de cada indivíduo ou a fatores externos como uma superfície irregular, por exemplo. Simular tal fenômeno tem sido um desafio de engenharia, pois o método proposto requer

assertividade com o mínimo de esforço computacional possível. As principais metodologias de simulação apresentadas na literatura consistem no uso de modelos de força com Série de Fourier e de modelos biodinâmicos. Suas bases de formulação têm uma abordagem determinística, o que pode levar a resultados não representativos, uma vez que estes modelos originalmente não representam as irregularidades existentes no caminhar.

Nesta pesquisa, a fim de simular a variabilidade no passo, foi utilizado o Método de *Random Walk* (MRW), devido à sua implementação intuitiva e sua boa representação de eventos aleatórios, uma vez que os parâmetros são calculados randomicamente com base em um histórico de dados já criados pelo algoritmo.

Como exemplo de aplicação, uma passarela flexível localizada no Rio de Janeiro teve sua resposta experimental analisada. Em uma campanha de ensaios experimentais, a estrutura foi submetida à ação do caminhar de pedestres com controle, em ensaios de vibração livre e induzida. Isto forneceu os dados necessários para a calibração de um modelo tridimensional em elementos finitos, que foi posteriormente traduzido em um modelo equivalente de viga pelo princípio da superposição modal (Rezende et al. [1]).

As análises conduzidas no modelo equivalente referem-se à ação dos pedestres simulados por meio dos modelos de força e biodinâmico, em abordagens determinísticas e probabilísticas. Dessa forma, pretende-se avaliar qual modelo de caminhar fornece resultados mais próximos ao real comportamento da estrutura, comparando os sinais experimentais com aqueles adquiridos por meio de simulações. As boas correlações obtidas nas simulações propostas apontam que, a utilização do MRW se provou eficaz para a simulação das irregularidades presentes no ciclo do caminhar de pedestres.

2 Simulação do carregamento humano

Segundo Pimentel [2], as atividades humanas de caminhar, correr, saltar e balançar lateralmente, em contato com a superfície, são os movimentos de interesse como fontes de excitação dinâmica. A caminhada é a atividade mais comum considerada no projeto, pois está relacionada ao uso normal de uma passarela. Muitos modelos bidimensionais e de carga humana foram desenvolvidos utilizando esteiras com células de carga (Medved [3]). Outras medidas baseiam-se na fixação de acelerômetros na cintura da pessoa, que refletem a cinemática dos movimentos corporais, como em Solís et al. [4] e Da Costa [5].

As seções abaixo apresentam os dois modelos de carregamento humano estudados neste artigo: o modelo de força por Série de Fourier e o modelo biodinâmico.

2.1 Modelo de força

O modelo mais comum de simulação de carregamento humano consiste em uma força variável em posição e tempo, cuja intensidade é periódica, dada por uma Série Fourier. Devido à sua simplicidade, o modelo de força é usado extensivamente para os projetos de passarela de pedestres e tem se mostrado bastante eficaz em diversos problemas. Neste modelo, a força do pedestre é determinada pela soma de uma parcela estática (peso da pessoa) com uma dinâmica, como mostrado a seguir:

$$F(t) = G + \sum_{j=1}^n G \alpha_j \text{sen} (2j\pi f_p t - \phi_j) \quad (1)$$

G = peso de uma única pessoa;

f_p = frequência de passo;

α_j = coeficientes do j -ésimo harmônico da série;

ϕ_j = ângulos de fase do j -ésimo harmônico da série;

t = instante de tempo;

$F(t)$ = magnitude da força.

2.2 Modelo biodinâmico

Outras análises consideram a ação induzida pela caminhada humana por meio de modelos biodinâmicos, simulando pedestres por sistemas de massa-mola-amortecedor de propriedades dinâmicas individuais. Essa abordagem tem produzido resultados mais representativos, pois considera a interação pessoa-estrutura, permitindo

o estudo da relevância em considerar o sistema acoplado na resposta final.

Para este artigo, utilizou-se o modelo desenvolvido por Toso et al. [6]. As Eqs. (2), (3) e (4) foram geradas para representar as propriedades dinâmicas dos modelos biodinâmicos com um grau de liberdade, utilizando modelos de regressão e redes neurais artificiais a partir de resultados experimentais encontrados na literatura. Com o estudo, foi possível obter um modelo mais preciso para representar as cargas dos pedestres com base em parâmetros cinéticos dos indivíduos.

$$m(f_p, M) = -231,34 + 3,69M + 154,06f_p - 1,97Mf_p + 0,005M^2 - 15,25f_p^2 \quad (2)$$

$$c(M, m) = -1115,69 + 92,56M - 108,94m + 2,91Mm - 1,33M^2 - 1,30m^2 \quad (3)$$

$$k(M, f_p) = 75601,45 - 1295,32M - 33789,75f_p + 506,44Mf_p + 3,59M^2 + 536,39f_p^2 \quad (4)$$

M = massa do pedestre;

m = massa modal do pedestre;

c = coeficiente de amortecimento do pedestre;

k = coeficiente de rigidez do pedestre;

f_p = frequência de passo do pedestre.

Vale ressaltar que o modelo biodinâmico não substitui por completo o modelo de força, mas o complementa. Os valores de massa, amortecimento e rigidez do pedestre passam a englobar a equação da estrutura, tornando-se um sistema acoplado e o pedestre adiciona um grau de liberdade no problema. Para este modelo, a parcela estática da força do pedestre – parâmetro G da Eq.(1) - subdivide-se em duas componentes: um associada à rigidez modal do pedestre e outra ao amortecimento do pedestre. No entanto, a parcela dinâmica da força do pedestre permanece inalterada em relação à Eq. (1).

3 Descrição da estrutura

A estrutura analisada é uma passarela de aço treliçada e de dois vãos, um com 68,5m e outro com 17,7m. Apenas o mais longo foi instrumentado, pois é o mais flexível e o mais problemático em termos de vibração. Uma descrição mais completa da estrutura é feita em Rezende et. al [1], junto à apresentação dos resultados experimentais.

Após a campanha experimental, a frequência natural do primeiro modo mais energético de vibração vertical foi de 1,85 Hz, que se encontra dentro dos limites de frequências típicas da caminhada humana (entre 1,6 Hz e 2,4 Hz - Sétra [7]). Portanto, segundo a orientação do guia de projeto, a passarela analisada é muito suscetível a problemas de vibração induzidos pelo caminhar humano.

Utilizando os resultados dos ensaios experimentais, um modelo 3-D em elementos finitos da passarela foi feito e calibrado usando o SAP2000 [8]. Como é usual em passarelas (Sétra [7]), observou-se que o comportamento do modelo assemelhava-se ao de uma viga bi apoiada, permitindo simplificar ainda mais a modelagem da estrutura em uma concepção de viga equivalente, por meio da aplicação do princípio da superposição modal (Rezende et. al [1]).

Alguns trechos foram selecionados a partir dos sinais experimentais de vibração forçada obtidos por Rezende et. al [1], referentes à passagem de uma e seis pessoas em ressonância com a passarela. Estes sinais foram utilizados para as correlações teórico-experimentais, que serão apresentadas posteriormente neste trabalho.

4 Implementação do método de *Random Walk*

Lawler & Limic [9], definem o MRW como um processo estocástico formado por sucessivas somas de variáveis aleatórias independentes e distribuídas de forma idêntica. A abordagem pode ser utilizada em qualquer área de estudo que lide diretamente com imprevisibilidade de eventos como por exemplo: na variação de DNA em animais da mesma espécie (Neigel [10]), na eficiência de mercados financeiros (Seetharam [11]), na dispersão de líquidos solúveis em água por hidrodinâmica (Dunsbergen [12]) etc. O método pode ser utilizado também para n dimensões, porém por este estudo ter considerado a passarela como um modelo equivalente de viga bi apoiada, apenas uma dimensão foi considerada. Nas sessões seguintes, será mostrado como o MRW foi implementado em

ambos os modelos estudados neste trabalho e de que forma o comportamento humano influenciou na abordagem escolhida para a simulação.

4.1 Frequência e comprimento do passo

A frequência f_p e o comprimento c_p do passo compõem o conjunto das variáveis mais influentes na simulação, pois através delas é possível definir como o pedestre irá caminhar. Diversos estudos abordam os valores médios de frequência e comprimento de passo e seus desvios-padrão para diferentes cargas de multidão, como em Matsumoto et al. [13] e Živanović et al. [14]. É notável que esses estudos consideraram cada pedestre possuindo uma frequência diferente, porém sem a sua variação ao longo do tempo. Para este trabalho, foi considerado que os parâmetros de frequência do passo e comprimento do passo, variam ao longo do tempo de travessia da passarela, razão pela qual o MRW foi escolhido para calculá-los.

Primeiro é necessário definir qual o tipo de distribuição de probabilidade irá representar cada variável. Imaginando situações normais de fluxo de pedestres, supõem-se que os indivíduos possuem chances relativamente próximas de acelerar ou desacelerar. Logo, a distribuição estabelecida para representar a variabilidade em todos estes parâmetros supracitados foi a gaussiana, tipicamente caracterizada por uma média e um desvio padrão, e pela simetria em torno do valor médio. Além disso, a média da distribuição gaussiana desses parâmetros foi alterada a cada ciclo de passo do pedestre, com acréscimos e decréscimos aleatórios, utilizando o MRW.

Para a realização deste método, gerou-se uniformemente uma série de valores de probabilidades que determinariam a chance da média das distribuições de f_p e c_p sofrerem variações. A chance de ocorrer acréscimo ou decréscimo foi estabelecida em 5% cada uma. O desvio-padrão foi considerado 50% da média escolhida. A fim de facilitar o entendimento, os autores optaram por chamar os acréscimos e decréscimos randômicos de “parcelas gaussianas”.

A introdução das parcelas gaussianas possibilita gerar uma lista de frequências. Essa lista é a base para definir quantas vezes o comprimento do passo, os ângulos de fase e os coeficientes harmônicos da Série de Fourier variam ao longo da caminhada, já que o tempo necessário para a realização de um passo é definido pelo inverso da frequência. Os parâmetros modais dos pedestres acabam também sendo influenciados, devido a sua dependência em relação à frequência do caminhar.

Por fim, é necessário definir limites de frequência e comprimento de passo de tal forma que o pedestre mantenha o ciclo de caminhar da maneira mais orgânica possível, evitando grandes discontinuidades no padrão da força. De acordo com o guia Sétra [7], para um caminhar com contato contínuo ao solo, os valores estimados de frequência podem ir de 1,6Hz a 2,4Hz. Os limites de comprimento de passo foram definidos com base em estudos de Živanović et al. [14], onde foi considerado 10% do desvio padrão do valor inicial aleatório ou não-aleatório.

4.2 Ângulos de fase

Živanović et al. [14] realizaram um estudo de modelos de força baseados na Série de Fourier, considerando harmônicos e sub-harmônicos para cargas aleatórias de multidões. Analisando o espectro gerado pela frequência, foi possível observar que os harmônicos entre faixas de 0,25 a 5,25Hz tinham os ângulos de fase uniformemente distribuídos em uma faixa $[-\pi, +\pi]$.

Os ângulos de fase ϕ_j foram gerados para cada ciclo de passo por meio de escolhas aleatórias com base na faixa de valores supracitados, seguindo uma distribuição uniforme. O ângulo de fase do primeiro harmônico tem um valor nulo, pois é a referência entre os outros harmônicos. Portanto, apenas a segundo harmônico foi submetido à escolha aleatória dos ângulos de fase, pois era a única frequência harmônica dentro da faixa de frequência citada.

4.3 Coeficientes α dos harmônicos da força

Diferentes pessoas geram diferentes fatores de amplificação dinâmica α , mesmo quando caminham na mesma frequência e Kerr [15] obteve equações, valores e desvios-padrão para coeficientes presentes em até cinco harmônicos, por meio de testes experimentais e métodos numéricos. Para o primeiro harmônico, α depende da frequência característica de caminhar em um dado momento e pode ser calculado a partir da equação apresentada

na Tab. 1 com um desvio padrão de 0,16.

O método de obtenção do primeiro α coeficiente harmônico consistia em calcular aleatoriamente uma frequência para cada ciclo de passo sob uma determinada circunstância após o MRW discutido na sessão 4.1 e computá-lo pela equação do primeiro harmônico. O segundo e terceiro harmônicos têm um único coeficiente e um desvio-padrão para qualquer frequência. Assim, para cada ciclo de passo, um valor de harmônico aleatório é escolhido de acordo com a Tab. 1.

Tabela 1. Parâmetros da distribuição normal dos coeficientes α obtidos por Kerr [15]

Harmônico	Coefficientes dos harmônicos [α]	Desvio-padrão [σ]
1°	$-0,2649f_p^3 + 1,3206f_p^2 - 1,7597f_p + 0,7613$	0,16
2°	0,07	0,03
3°	0,05	0,02

5 Simulações e resultados

Para realizar a validação das simulações, os sinais experimentais obtidos por Rezende et al. [1] foram utilizados como referência. As Figs. 1-a e 1-b apresentam os sinais para uma e seis pessoas, respectivamente. Em ambos os casos, os pedestres estavam caminhando com o auxílio de um metrônomo a 1,85Hz, o qual foi utilizado para se obter ressonância com a frequência natural da estrutura durante os ensaios.

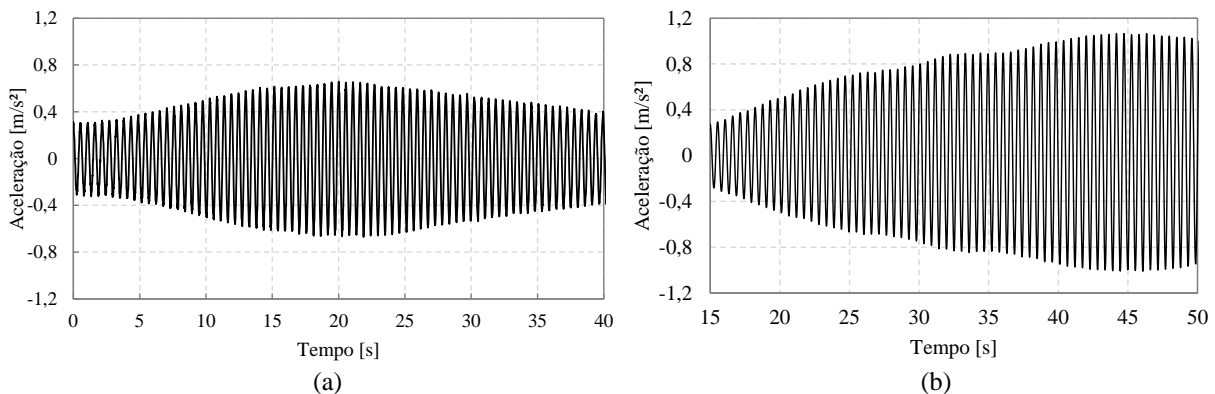


Figura 1. Sinais experimentais obtidos por Rezende et al. [1] para: (a) uma pessoa e (b) seis pessoas

Para iniciar as simulações, foi necessário definir dados de entrada que tivessem relação próxima às condições da passarela durante os ensaios assim como aos fatores físicos e psicológicos, que podem influenciar na maneira que os pedestres caminham. Com intuito de simplificar os cálculos, foram feitas as seguintes considerações para ambos os casos: todos os pedestres pesam 700N e o comprimento de passo inicial de cada pedestre foi de 0,71m. Para cada um dos casos analisados, os valores de frequências iniciais e de parcela gaussiana média foram escolhidos arbitrariamente para cada pedestre.

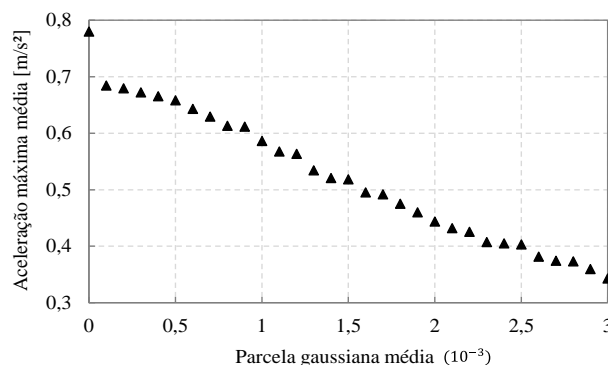


Figura 2. Gráfico de acelerações máximas médias para diferentes parcelas gaussianas médias

Em relação às parcelas gaussianas, uma análise de sensibilidade foi feita a fim de compreender como a variação destes valores influenciam na amplitude dinâmica máxima. A Fig. 2 apresenta os resultados obtidos, onde se considerou o modelo de força para uma pessoa caminhando com frequência de 1,85Hz, comprimento de passo de 0,71m e 700N de peso. Diferentes valores médios de parcelas gaussianas foram utilizados a fim de gerar acelerações máximas médias para 500 iterações. O gráfico contribuiu nas tomadas de decisão ao modelar a forma de caminhar dos pedestres.

Ao analisar uma pessoa caminhando em ressonância, a frequência inicial escolhida foi de 1,85Hz e a parcela gaussiana média foi de 0,0005. Este último valor foi utilizado, pois a aceleração máxima média analisada na Fig.2 para este caso é de 0,659 m/s². Como aceleração máxima do sinal experimental é de 0,660m/s², tem-se uma diferença percentual de 0,15%, tendo a validação da escolha para a simulação. Além disso, durante o ensaio, o pedestre estava caminhando com o auxílio de um metrônomo, portanto, parcelas gaussianas menores corroboram com a realidade, já que a variação de frequência e de comprimento a cada passo é reduzido em situações como esta.

As Figs. 3-a e 3-b apresentam as simulações determinísticas e probabilísticas respectivamente, onde comparou-se os resultados obtidos com o sinal experimental para um pedestre. Os sinais determinísticos, com a aplicação do MRW, sofreram uma redução na amplitude máxima de 17,9% podendo ser notado uma melhor aproximação ao real comportamento da estrutura ao longo de todo corpo do sinal. Comparando-se os sinais dos modelos de força e biodinâmico, nota-se uma diferença mínima entre as amplitudes de ambos os modelos, pois a interação pessoa-estrutura não é relevante para este caso.

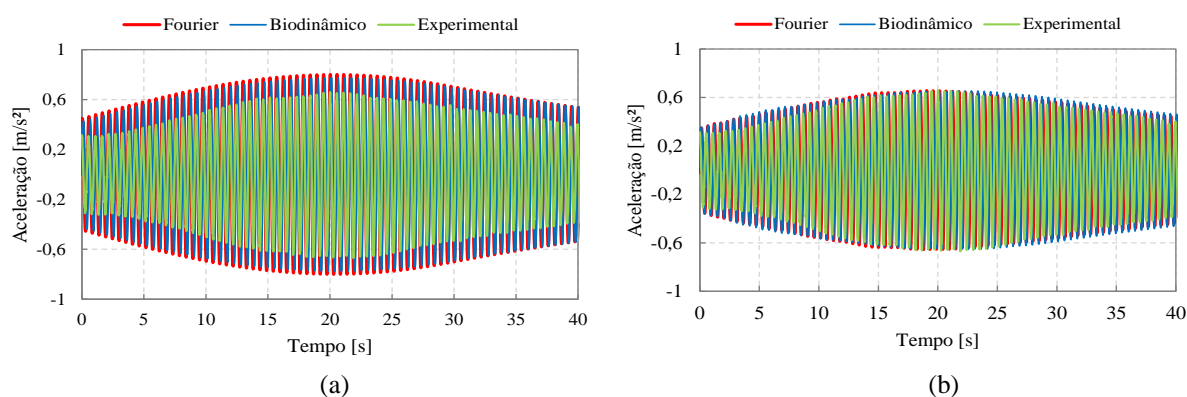


Figura 3. Sinais simulações para uma pessoa caminhando em ressonância (a) Determinístico e (b) MRW

O ensaio realizado para seis pessoas caminhando em ressonância teve condições mais específicas e foi necessária uma maior atenção na escolha dos dados de entrada. O arranjo de pedestre escolhido consistiu em dividir o grupo de seis pessoas em três pares (A, B e C), que distam 1 metro um dos outros onde: o par A liderou o grupo, o par B ficou em segundo e o par C por último. Para todos os pares, uma parcela gaussiana média de 0,001 foi escolhida, pois entende-se que seja mais difícil manter uma baixa variação de frequência e comprimento de passo com menos espaço sobre a passarela. No quesito de frequências, para o par A foi atribuído um valor inicial de 1,85Hz, enquanto para os pares B e C as frequências foram de 1,825Hz e 1,8Hz respectivamente. Estas escolhas foram feitas com base em fatores psicológicos da seguinte forma: entende-se que o par A entraria na passarela com maior probabilidade de se gerar ressonância, por estar na liderança do grupo e sem interferências; o par B teria receio de se chocar com o par A logo a frente, tendo a necessidade de se reduzir a frequência de passo; da mesma forma, o par C teria receio de esbarrar no B, por isso a frequência inicial escolhida foi ainda menor.

As Figs. 4-a e 4-b apresentam os resultados das simulações obtidas de maneira determinística e pelo MRW em comparação com o sinal experimental para seis pessoas caminhando em ressonância. Em ambos os casos, é possível notar uma diferença significativa na amplificação dinâmica entre os modelos de força e biodinâmico. Com a maior quantidade de pedestres, o acoplamento considerado em modelos biodinâmicos acaba sendo relevante, tendo como resultado um amortecimento na resposta dinâmica da estrutura.

Os sinais determinísticos, com a aplicação do MRW, sofrem uma redução na amplitude máxima devido à variabilidade e ainda é possível notar uma similaridade notável com o sinal experimental. Para o modelo de força determinístico, a diferença percentual da aceleração máxima obtida em relação ao sinal experimental foi de 82,4% e com a aplicação do MRW, a diferença reduziu para 26,1%. Já para o modelo biodinâmico determinístico, a

diferença percentual ficou em 59,5% e ao introduzir o MRW, a diferença foi reduzida para 1,8% demonstrando coerência nas condições de contorno do modelo de carregamento.

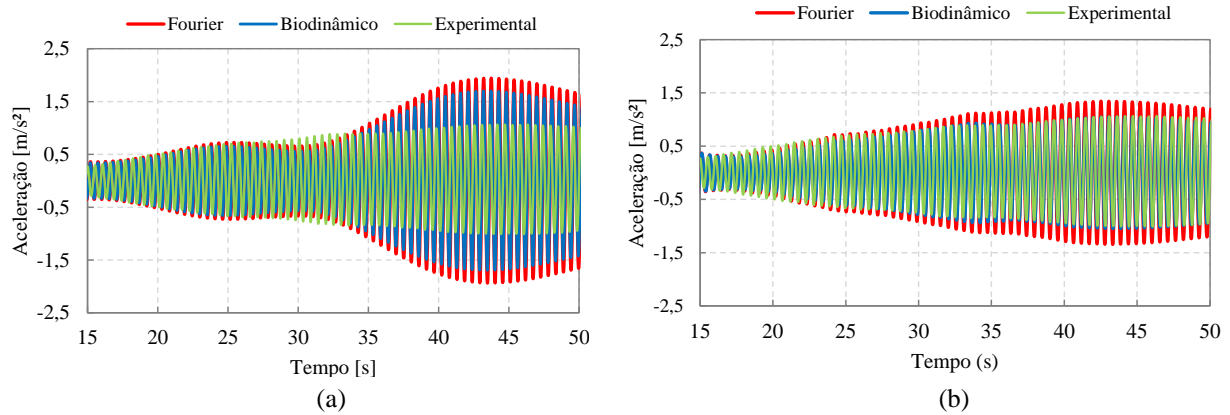


Figura 4. Sinais de simulações para seis pessoas caminhando em ressonância: (a) Determinístico (b) MRW

6 Conclusões

As simulações realizadas permitiram avaliar que o método de *Random Walk* se provou eficaz e prático para simulação de imperfeições presentes no ciclo do caminhar de pedestres. A metodologia atuou na geração de valores randômicos de frequências e comprimentos de passo a cada ciclo do caminhar ao longo do tempo. Com isso, foi possível reduzir a amplificação dinâmica em relação à metodologia determinística, obtendo resultados mais representativos.

Provou-se que é possível simular fatores psicológicos de pedestres, através da escolha arbitrária de frequências e de parcelas gaussianas médias. Estes acabam sendo fatores chave para determinar o grau de ressonância entre os pedestres e a passarela durante uma modelagem.

A correlação com o sinal experimental sofreu uma significativa melhora ao introduzir o MRW nos cálculos em ambos os modelos estudados. O modelo biodinâmico se destacou, pois obteve resultados bem mais representativos do que o modelo de força no caso de seis pedestres sobre a passarela, chegando a uma diferença de 1,8% em relação à amplitude máxima do sinal experimental, utilizando o MRW.

References

- [1] Rezende F.A, Varela W.D, Carvalho E.M.L and Pereira A.M.B *Vibration performance assessment of a long-span steel footbridge*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Structures and Buildings, 2020
- [2] Pimentel R.L. *Vibrational performance of pedestrian bridges due to human-induced loads*. Ph.D. thesis. Sheffield (UK): University of Sheffield; 1997
- [3] Medved, V. *Measurement of Human Locomotion*. Boca Raton: CRC, Press LLC, 2001
- [4] Solís, F.M., Limon, S.V, Treviño, A.V., Lelis, J.M., Sánchez, A.C., Treviño, M.V., 2014. *Design of a low-cost measurement system based on accelerometers for gait analysis*. Acta Scientiarum, v. 36, n. 1, p. 111-121.
- [5] Da Costa N.P.A *Modelo biodinâmico do caminhar humano tendo em vista a interação dinâmica pessoa-estrutura*. Tese de doutorado, Rio de Janeiro (BR): Universidade Federal do Rio de Janeiro; 2019
- [6] Toso, M. A. *Instrumentação e modelos biodinâmicos para simulação de carregamentos em estruturas submetidas a esforços da caminhada humana* Tese de doutorado, Rio de Janeiro (BR): Universidade Federal do Rio de Janeiro; 2016
- [7] Sétra, 2006. *Assessment of vibrational behavior of footbridges under pedestrian loading*.
- [8] SAP2000 14 [Software]. Computers and Structures, Berkley, CA.
- [9] Lawler G.F and Limic V. *Random Walk: A Modern Introduction*, Cambridge University Press, 2010
- [10] Neigel J.E and Avise J.C. *Application of a Random Walk Model to Geographic Distributions of Animal Mitochondrial DNA Variation* – Department of Biology, University of Southwestern Louisiana, 1993
- [11] Seetharam Y., Auret. C, Celik T. *The Dynamics of Market Efficiency: Testing the Random Walk Hypothesis in South Africa* - Frontiers in Finance and Economics – Vol 14 N°1, 29-69
- [12] Dunsbergen D.W., Stelling G.S - *The combination of a random walk method and a hydrodynamic model for the simulation of dispersion of dissolved matter in water* - Delft University of Technology, 1993
- [13] Matsumoto, Y., Sato, S., Nishioka, T. and Shiojiri, H. *A study on dynamic design of pedestrian over-bridges*. Trans. JSCE, vol. 4, 1972, pp. 50-51
- [14] Živanović, S., Pavić, A. and Reynolds, P. (2007) *Probability-based prediction of multi-mode vibration response to walking excitation*. Engineering Structures, Vol. 29, No. 6, pp. 942-954.
- [15] Kerr, S.C., 1998. *Human Induced Loading on Staircases*, Ph.D. thesis, University of London, London, England.