

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

VIBRAÇÕES INDUZIDAS POR MULTIDÕES: ANÁLISES DE MOVIMENTOS NA DIREÇÃO TRANSVERSAL

Felipe Feliciano Gomes da Silva, ffbr90@yahoo.com¹

Roberto Leal Pimentel, r.pimentel@uol.com.br²

Cícero da Rocha Souto, Cicerosouto@cear.ufpb.br³

¹Universidade Federal da Paraíba, 58051-900 João Pessoa, PB, Brasil

²Universidade Federal da Paraíba, 58051-900 João Pessoa, PB, Brasil

³Universidade Federal da Paraíba, 58051-900 João Pessoa, PB, Brasil

Resumo: O corpo de um pedestre em movimento pode ser considerado semelhante à de um sistema de um grau de liberdade. Na literatura existem algumas propostas de modelos para o corpo humano, definindo-se a massa, rigidez e o amortecimento, para vários tipos de locomoção. Por outro lado, a interação homem-estrutura é um importante e novo tópico a ser estudado. A sincronização entre pessoas caminhando em multidão é outro aspecto relevante do fenômeno. Modelos biodinâmicos e biomecânicos são então usados para investigar a interação entre o pedestre e uma estrutura; há modelos que consideram apenas os efeitos da inércia do corpo humano enquanto que outros, também contêm elementos elásticos e dissipativos. Na análise de vibração de estruturas para situações de multidões, o efeito da ação de pedestres, de acordo com pesquisas, não é bem modelado ao se aplicar modelos que consideram os pedestres apenas como aplicando cargas na estrutura, sem considerar a dinâmica do corpo. Isto tanto na direção vertical quanto na transversal, em virtude dos movimentos do corpo. Este trabalho apresenta a análise de caminhadas/movimentos na direção transversal para situações de multidão utilizando-se dados experimentais. Para aquisição destes dados foram feitos testes sucessivos com pessoas utilizando o mesmo equipamento, caminhando isoladamente e posteriormente em multidão. A instrumentação para a captação do sinal é de dois acelerômetros dispostos lateralmente em um cinto adaptado, sendo postos equidistantes do centro de massa do corpo. Esta configuração visa a minimização do efeito das rotações na hora que o pedestre estiver caminhando, já que o interesse é na detecção de deslocamentos transversais do corpo. As comparações com medições dos sinais de pessoas caminhando só e em multidão, possibilitou a identificação da influência causada por essa multidão no deslocamento transversal.

Palavras-chave: Multidão, Pedestres, Ações Transversais, Instrumentação

1. INTRODUÇÃO

Entre os movimentos humanos, caminhar é a condição de projeto para passarelas em uso normal, porque estas estruturas são concebidas para o transporte de pedestres Toso *et al.* (2015).

Vibrações induzidas por humanos são cada vez mais um importante problema de manutenção e segurança no projeto estrutural moderno Racic *et al.* (2009). Existe na literatura alguns trabalhos que avaliam o desempenho de estruturas destinados para a travessia de pedestres. Na relação homem-estrutura podemos ter situações de pedestres caminhando Pimentel *et al.* (2001) e pulando (Racic, 2010 e Caetano, 2011). Na análise de vibrações em estruturas para pessoas caminhando adota-se modelos de cargas que se emprega um único pedestre em caminhada livre (Da Silva e Pimentel, 2011) e modelos aonde considera-se este pedestre envolto por uma multidão caminhando em um fluxo (Racic e Morin, 2014; Qin *et al.*, 2013 e Da Silva *et al.*, 2013).

Segundo Pimentel *et al.* (2013) a sincronização dos movimentos de pedestres tem sido identificada como a causa da vibração lateral excessiva em algumas passarelas. O mesmo autor relaciona duas causas: O aumento da densidade da multidão e a interação pedestre-estrutura.

O corpo humano na atividade de caminhada é aqui concebido como um modelo SDOF (*Single Degree of Freedom*), pois os modelos mais utilizados em pesquisas na área de biodinâmica são de um único grau de liberdade para representar o movimento do corpo humano em relação a direção transversal e vertical ao caminhar. Cabe, entretanto, observar que há na literatura propostas para modelos com mais de um grau de liberdade. Kim *et al.* (2008) propõem um

sistema de 3 graus de liberdade para a representação de um pedestre caminhando na direção vertical sendo os seus parâmetros obtidos por meio de resposta de um sinal de um pedestre atravessando uma passarela. Caprani *et al.* (2011) propuseram um modelo SMD (*Spring Mass Damper*) para representar um pedestre atravessando uma estrutura e em adição a um modelo de força para este mesmo pedestre. Há uma certa carência de propostas para modelos que representem o movimento na direção transversal de pedestres caminhando. (Racic e Brownjohn, 2012) apresentam um modelo matemático para gerar sinais de força transversal de banda estreita devido a pessoas caminhando.

Este trabalho propõe-se a desenvolver uma análise de pedestres caminhando em situações de multidões, de frequência de passo controlado e livremente, visando investigar movimentos do corpo do pedestre. A partir de dados experimentais uma investigação é feita, afim de identificar diferenças entre o caminhar de pedestres caminhando sozinho e em multidão.

2. METODOLOGIA

Para a captação das acelerações transversais, foram utilizados dois acelerômetros Endevco 7754-A com sensibilidade de 1V/g, acoplado em um cinto adaptado. Os acelerômetros foram dispostos lateralmente no cinto, sendo postos equidistantes do centro de massa do corpo. A disposição dos acelerômetros objetiva a anulação do efeito da rotação, realizando uma média entre o sinal captado pelo acelerômetro da frente com o de trás; por conseguinte após a realização da média obtém-se o valor da aceleração do centro de massa.

Foram feitos testes sucessivos com várias pessoas utilizando o cinto adaptado juntamente com uma mochila instrumentada contendo um sistema de aquisição USB – 6009 da National Instruments, computador para visualização e gravação dos sinais e dois condicionadores de sinais próprios dos acelerômetros como mostra a Fig. 1; esta instrumentação é responsável pela aquisição do sinal do pedestre caminhando.

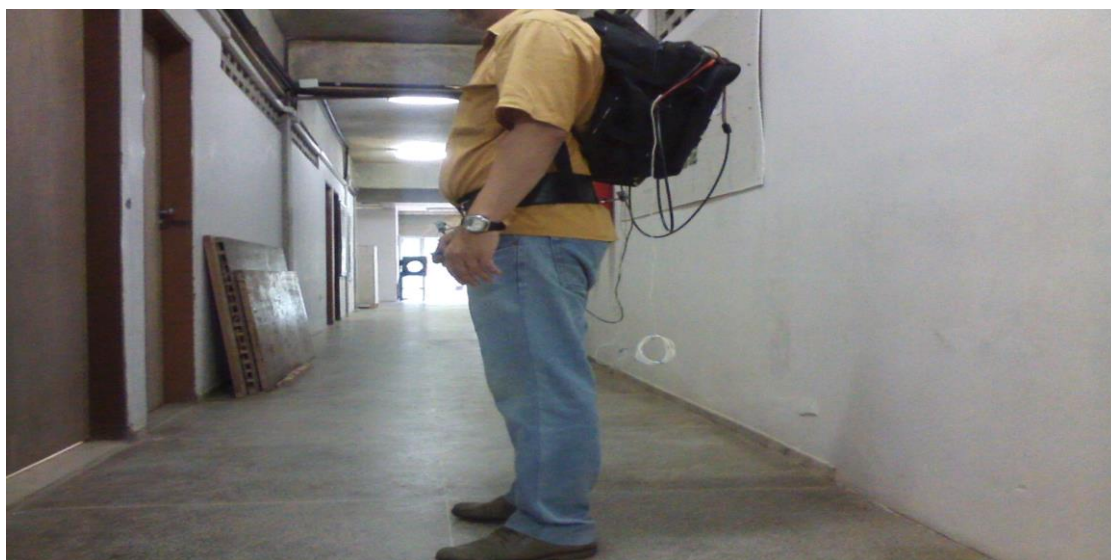


Figura 1. Configuração do pedestre instrumentado.

Para cada pedestre foi solicitado que caminhasse primeiramente, na sua taxa normal de caminhada livremente em linha reta por um trajeto com duração de 10 (dez) segundos, e posteriormente a caminhadas com frequências controladas; foram utilizadas as frequências de 2,0 Hz, 1,9 Hz, 1,8 Hz, 1,7 Hz e 1,6 Hz. Para ajudar o pedestre a caminhar nestas frequências foi utilizado um metrônomo ajustado a frequência correspondente e com emissão de som para ajustar o ritmo. A caminhada com frequência controlada foi medida visando a comparação com as caminhadas em multidão e livre de mesma taxa de passo. Após as caminhadas livres e com frequência de passo controlada foi realizado com o mesmo pedestre caminhadas em meio a uma multidão com densidades de pedestres de 1,8 pedestres/m² e 1,0 pedestre/m².

Os testes com multidões foram realizados em um corredor com aproximadamente 20 m de comprimento e 1,4 m de largura como mostra a Fig. 2. Em todos os testes nenhum tráfego de pedestres na direção oposta estava ocorrendo. Todos os testes foram realizados no mesmo ambiente; a multidão foi composta na sua grande maioria de estudantes universitários, variando de 12 (doze) a 18 (dezoito) pessoas. Na Fig. 2 mostra-se esta configuração.



Figura 2. Configuração do pedestre caminhando em multidão.

Para cada experimento a caminhada foi repetida 12 vezes, portanto considerando as caminhadas livres, controladas e em multidão com diferentes densidades, cada participante fez 96 vezes o mesmo percurso nas condições relatadas acima. A repetição e o grande número de medições visam identificar as variabilidades da caminhada de um pedestre em situações com e sem multidão.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os sinais captados nos testes experimentais passaram por um pós-processamento para a obtenção das acelerações laterais/transversais no domínio do tempo e no domínio da frequência (Espectro do sinal). A obtenção do sinal no domínio do tempo dá-se a partir da plotagem do sinal captado e processado com o intervalo de tempo pré-definido na aquisição. Para a obtenção do espectro do sinal, utiliza-se um algoritmo FFT (*Fast Fourier Transform*) para a transformação do sinal no domínio do tempo para o domínio da frequência. Na Fig. 3 é mostrado um exemplo de espectro do sinal de um pedestre caminhando em uma multidão e na Fig. 4 um exemplo de um sinal no domínio do tempo.

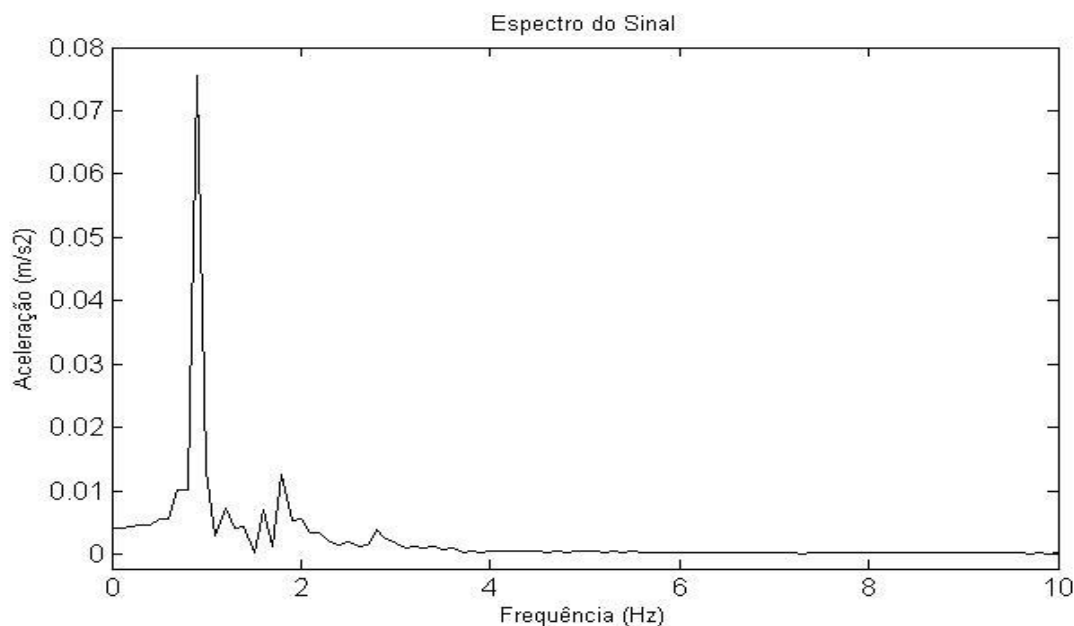


Figura 3. Espectro de um sinal de um pedestre caminhando em multidão.

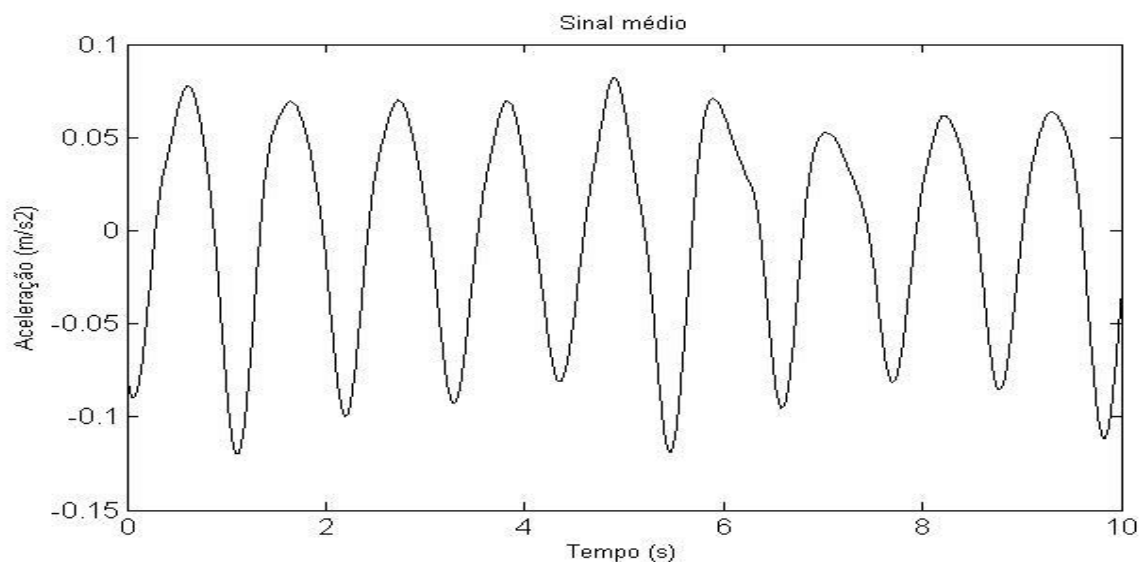


Figura 4. Sinal no domínio do tempo após filtragem.

Para evitar que no começo e no fim do intervalo de aquisição o sinal possua baixas amplitudes, o pedestre foi instruído a iniciar a aquisição alguns segundos depois que iniciasse a caminhada; isto foi possível a partir da utilização de um *trigger* que é um aparato eletrônico com comunicação direta com o programa de aquisição. Baixas amplitudes no começo e no fim do sinal ocorrem devido ao pedestre iniciar e terminar a aquisição em repouso.

Na Fig. 5 é mostrado um exemplo de uma amostra de um pedestre que realizou uma caminhada com a frequência de passo controlado por um metrônomo, na figura a frequência utilizada foi de 1,9 Hz. Analisando o gráfico pode-se perceber a uniformidade do sinal no decorrer do período de tempo estipulado. O intervalo de frequência utilizado foi de 1,6 a 2,0 Hz, sendo importante a comparação do comportamento da caminhada nessas duas frequências. A partir da Fig. 6 observa-se inicialmente que as amplitudes na frequência de 2,0 Hz são ligeiramente maiores do que na frequência de 1,6 Hz.

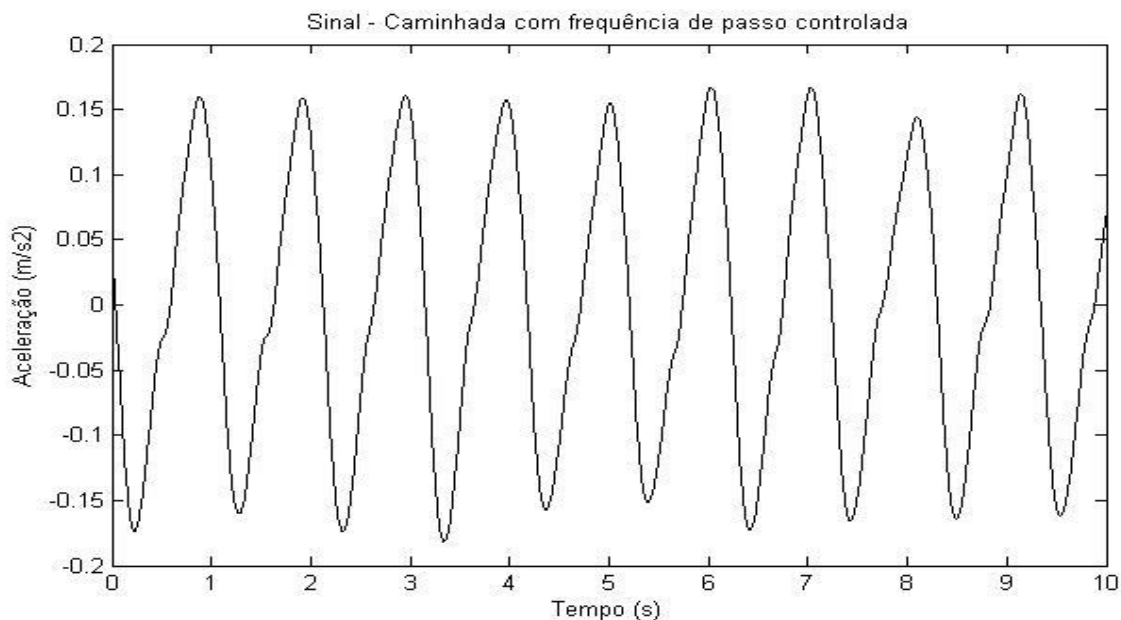


Figura 5. Caminhada com frequência de 1,9 Hz.

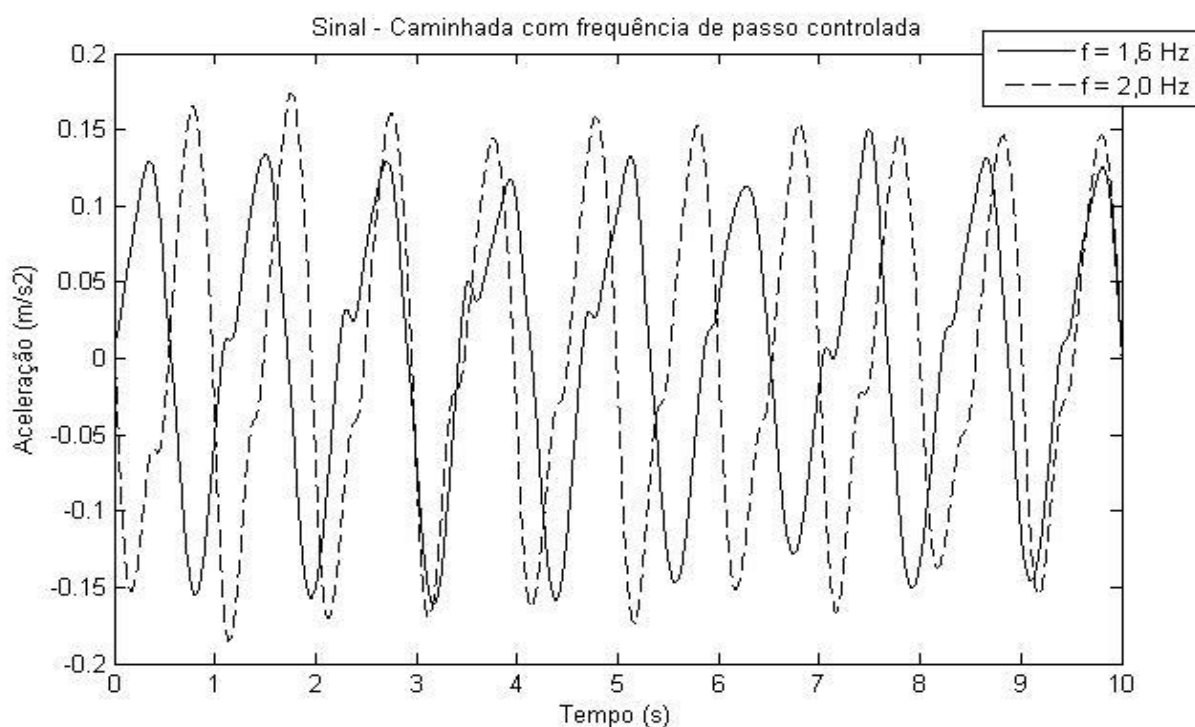


Figura 6. Comparação de caminhadas com frequência de 2,0 e 1,6 Hz.

Como já foi explicitado anteriormente, a fim de evitar o efeito da rotação na captação do sinal, foi realizada uma média entre os sinais dos acelerômetros frontal e traseiro. A verificação da diferença de valores de pico nos espectros do sinal médio e da média nos espectros dos sinais individuais (o sinal individual é afetado pela rotação), permite identificar o efeito da rotação. Cabe salientar que este efeito é causado pelo movimento natural da pélvis, que no sentido transversal é mais influente do que no sentido vertical.

Pode ser visto na Fig. 7 que os picos de resposta para o sinal do acelerômetro frontal são maiores do que o sinal do acelerômetro traseiro; isto acontece devido à incorporação do efeito de rotação ao sinal captado pelos acelerômetros, fenômeno este que se repete em todas as situações propostas: caminhada livre, caminhada controlada e caminhada em multidão com variação de densidade de pedestres. É relevante relatar que o grau de efeito causado se diferencia a cada situação. No caso é mostrado esta diferença na caminhada livre sem multidão.

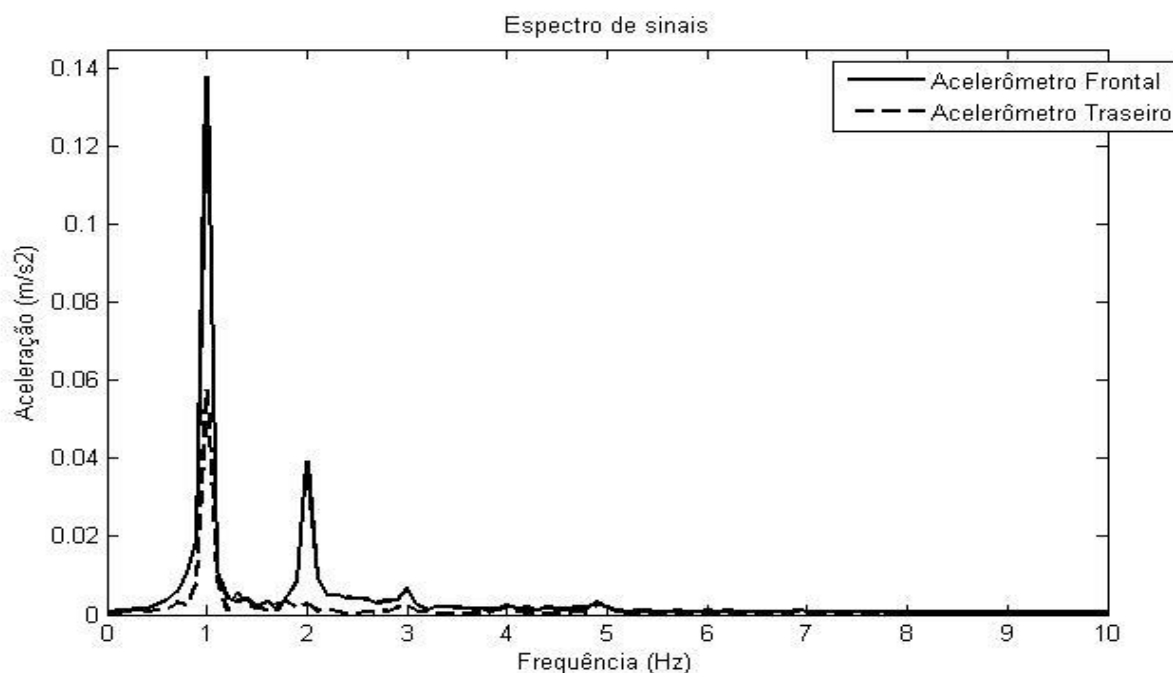


Figura 7. Espectro do sinal frontal e traseiro.

Tendo como foco principal o estudo do efeito causado por uma multidão na aceleração transversal de um pedestre caminhando, é mostrado na Fig. 8 e também na Fig. 9 a relação de uma caminhada do mesmo pedestre em meio a uma multidão com densidade de pedestre de $1,8 \text{ pedestres/m}^2$ e uma caminhada livre.

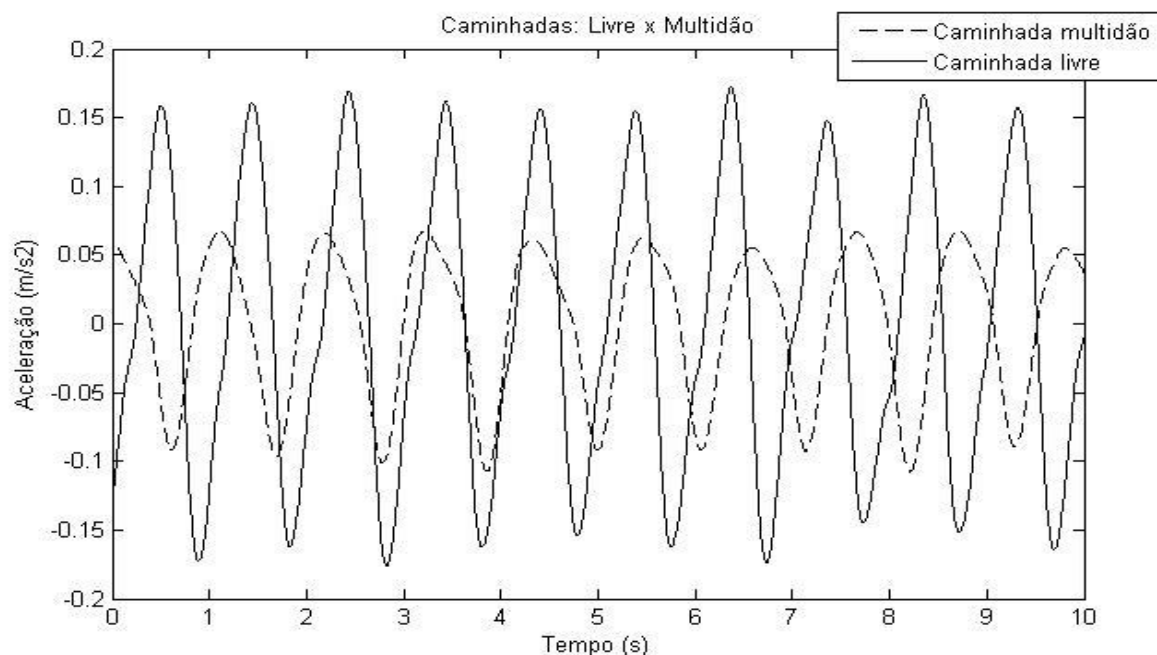


Figura 8. Sinal no domínio do tempo de caminhada livre e de multidão.

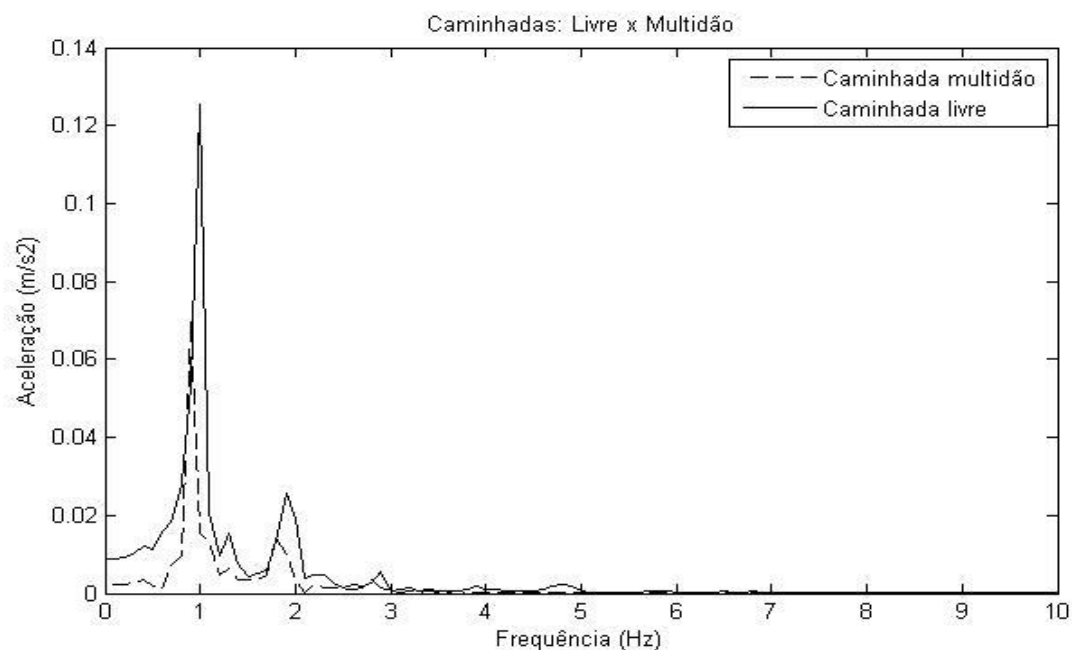
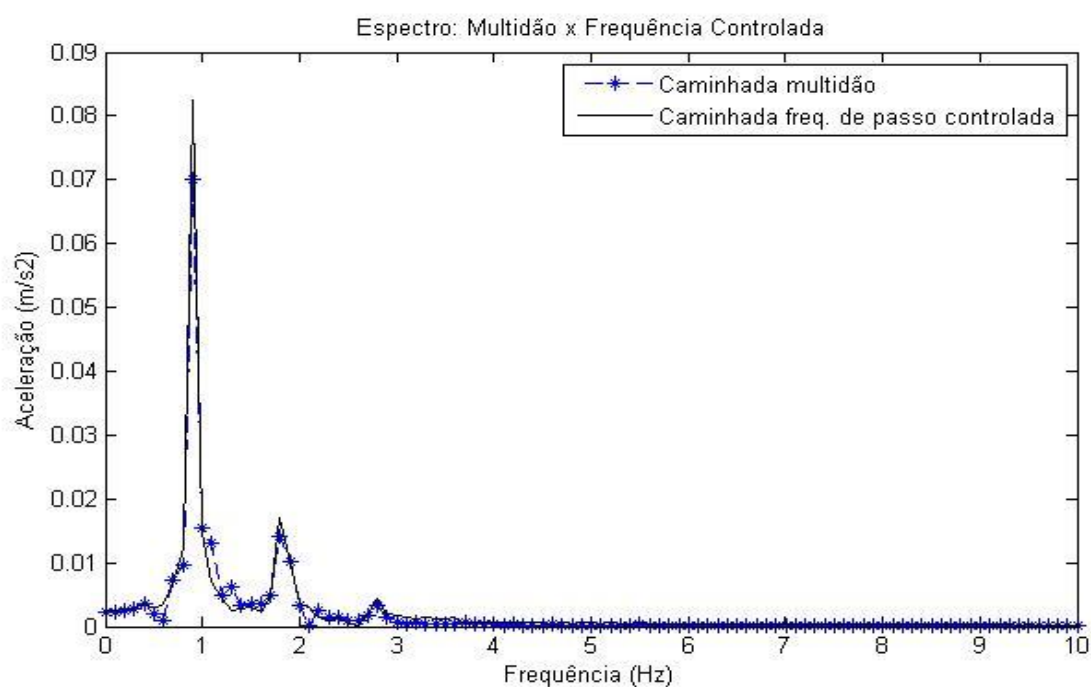


Figura 9. Espectro de caminhadas livre e de multidão.

Os valores de acelerações de pico de um pedestre obtidos a partir de cada sinal são apresentados na Tab. 1 para a densidade de $1,8 \text{ pedestres/m}^2$ e para a situação de caminhada livre com frequência de passo controlada, juntamente com o número de amostras, média dos picos e desvio padrão do mesmo. Tendo esses dados a disposição foi realizado um teste de hipótese para a verificação de igualdade da média populacional. A partir de uma análise dos testes de hipótese e a verificação da condição de hipótese nula, foi possível tecer conclusões sobre os efeitos causados pelas condições testadas. Portanto após análise, concluiu-se que há evidências suficientes para suportar a afirmação que a densidade de $1,8 \text{ pedestres/m}^2$ e $1,0 \text{ pedestres/m}^2$ afetam o deslocamento lateral médio dos pedestres. Na Fig. 10 e Fig. 11 são mostrados os sinais de caminhadas com multidão, juntamente com os sinais de frequências controladas, obtidos a partir de comparação das médias dos picos de sinais.

Tabela 1. Resultados de caminhadas em multidão e sozinho com frequência de passo controlado. Valores utilizados no teste de hipótese.

	Caminhada Multidão	Caminhada freq. de passo controlada
	Densidade 1,8 pedestres/m ²	Frequência 1,8 Hz
Caminhada 1	0,0756	0,0714
Caminhada 2	0,0709	0,0826
Caminhada 3	0,0707	0,0826
Caminhada 4	0,0737	0,0836
Caminhada 5	0,0812	0,0834
Caminhada 6	0,0763	0,0833
Caminhada 7	0,0700	0,0767
Caminhada 8	0,0744	0,0844
Caminhada 9	0,0653	0,0734
Caminhada 10	0,0756	0,0843
Caminhada 11	0,0600	0,0926
Caminhada 12	0,0667	0,0902
Núm de amostras	12	12
Média dos Picos	0,0717	0,0824
Desvio Padrão	0,0057	0,0061

**Figura 20. Espectro dos sinais médios das situações de multidão e frequência de passo controlada com frequência de 1,8 Hz.**

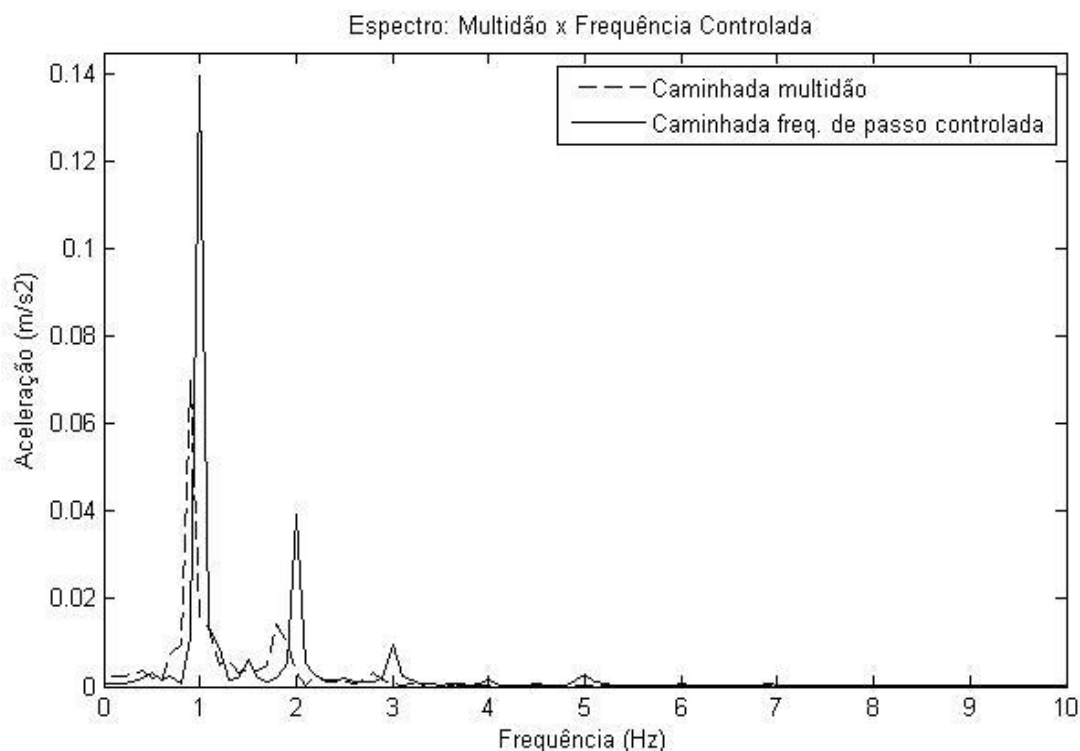


Figura 31. Espectro dos sinais médios das situações de multidão e frequência de passo controlada com frequência de 2,0 Hz.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho uma análise de movimentos na direção transversal de pedestres foi apresentada, destinada a investigação dos efeitos causados pela situação de multidão no deslocamento transversal dos pedestres caminhando.

Foram apresentadas as metodologias utilizadas para a medição de sinais de aceleração no domínio do tempo e da frequência para pedestres caminhando em situações de frequência de passo controlado, livremente sem obstruções de outros pedestres e caminhadas em meio a uma multidão com densidade de pedestres de 1,8 e 1,0 pedestres/m². Estas medições fornecem dados que possibilitam investigações sobre a natureza da atividade do caminhar e as suas características quando postos em situações distintas.

Foi realizada uma investigação sobre a relação do sinal de acelerômetro frontal e de acelerômetro traseiro, dispostos no corpo do pedestre. Foi observada uma diferença expressiva na amplitude e no pico espectral do sinal do acelerômetro frontal em relação ao traseiro.

Além de se confirmar que as multidões contribuem no efeito da rotação do corpo ocorrida durante o caminhar, os resultados também confirmaram a influência causada por essa multidão no deslocamento transversal; os resultados mostraram também a maior influência do efeito da rotação na situação de multidão em relação as caminhadas com frequência controlada e livre.

A análise destes dados auxiliará na formulação de um modelo biodinâmico de modo que este venha representar os movimentos na direção transversal de uma pessoa caminhando, e na determinação de uma metodologia para desenvolvimento de parâmetros deste sistema biodinâmico de modo que a análise de vibrações de estruturas sujeitas a cargas de pedestres se locomovendo possa ser realizada com mais precisão.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Caetano, E., Cunha, Á., Moutinho, C., 2011, Vandals Loads and Induced Vibrations on a Footbridge. *Journal of Bridge Engineering*, Vol 16, pp. 375-382.
- Caprani, C. C., Keogh, J., Archbold, P., Fanning, P., 2011, Characteristic Vertical Response of a Footbridges Due Crowd Loading. In *EURODYN 2011 Proceedings of the 8th International Conference on Structure Dynamics*, Lovaina, Bélgica, pp. 978-985.
- Da Silva, F. T., Brito, H. M., Pimentel, R.L., 2013, Modeling of Crowd Load in Vertical Direction Using Biodynamic Model for Pedestrians Crossing Footbridges. *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 40, pp. 1196-1204.
- Da Silva, F.T., Pimentel, Roberto L., 2011, Biodynamic Walking Model for Vibration on Serceability of a Footbridges Due Crowd Loading. In *EURODYN 2011 Proceedings of the 8th International Conference on Structure Dynamics*, Lovaina, Bélgica.

- Kim, S., Cho, K., Choi, M., Lim, J., 2008, Development of Human Body Model for the Dynamic Analysis of Footbridges Under Pedestrian Induced Excitation. *Journal Steel Structure*, Vol. 8, pp. 333-345.
- Pimentel, R. L., Araújo, Moacir C., Brito, Halane Maria B. F., De Brito, José L., 2013, Synchronization Among Pedestrians in Footbridges Due to Crowd Density. *Journal of Bridge Engineering*, Vol 18, pp. 400-408.
- Pimentel, Roberto L., Pavic, A., Waldron, P., 2011, Evaluation of Design Requirements for Footbridges Excited by Vertical Forces from Walking. *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 28, pp. 769-777.
- Qin, J.W., Law, S.S., Yang, Q.S., 2013, Pedestrian – Bridge Dynamic Interaction, Including Human Participation. *Journal of Sound and Vibration*. Vol. 332. pp. 1107-1124.
- Racic, V., Brownjohn, J.M.W., 2012, Mathematical Modelling of Random Narrow Band Lateral Excitation of Footbridges Due to Pedestrian Walking. *Computers and Structures*, Vol. 90-91, pp. 116-130.
- Racic, V., Morin, J. B., 2014, Data-Driven Modelling of Vertical Dynamic Excitation of Bridges Induced by People Running, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 43, pp. 153-170.
- Racic, V., Pavic, A., 2010, Stochastic Approach to Modelling of Near-Periodic Jumping Loads. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 24, pp. 3037-3059.
- Racic, V., Pavic, A., Brownjohn, J.M.W., 2009, Experimental Identification and Analytical Modelling of Human Walking Forces: Literature Review. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 326, pp. 1-49.
- Toso, Marcelo A., Gomes, Herbert M., Da Silva, Felipe T., Pimentel, Roberto L., 2015, Experimentally Fitted Biodynamic Models for Pedestrian-Structure Interaction in Walking Situations, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 72-73, pp. 590-606.

6. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores Felipe Feliciano Gomes da Silva, Roberto Leal Pimentel e Cícero da Rocha Souto são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

CROWD-INDUCED VIBRATION: MOTION ANALYSIS IN THE TRANSVERSE DIRECTION

Felipe Feliciano Gomes da Silva, ffbr90@yahoo.com¹

Roberto Leal Pimentel, r.pimentel@uol.com.br²

Cícero da Rocha Souto, Cicerosouto@cear.ufpb.br³

¹Universidade Federal da Paraíba, 58051-900 João Pessoa, PB, Brasil

²Universidade Federal da Paraíba, 58051-900 João Pessoa, PB, Brasil

³Universidade Federal da Paraíba, 58051-900 João Pessoa, PB, Brasil

Abstract. *The body of a moving pedestrian may be considered similar to a system of one degree of freedom. In the literature there are some proposed models for the human body by setting the mass, stiffness and damping for various types of locomotion. Moreover, man-structure interaction is an important new topic to be studied. Synchronization between people walking in crowd is another important aspect of the phenomenon. Biodynamic and biomechanical models are then used to investigate the interaction between the pedestrian and a structure; There are models that consider only the effects of inertia of the human body while others also contain elastic and dissipative elements. When analyzing vibration in the transverse direction in crowds situations, the effect of pedestrian action, is not well modeled by applying models that consider pedestrians only as applying loads to the structure, without considering the dynamics of body. This applies to both the vertical and transverse directions. This work presents the analysis of movements in the transverse direction for crowd situations using experimental data. Successive tests with people using the same equipment walking alone and later in crowd were carried out. The instrumentation for signal capture consisted of two accelerometers arranged laterally on a suitable belt, being placed equidistant from the body center of mass. This configuration is intended to minimize the effect of rotations at the time the pedestrian is walking, since the interest is in detecting transverse displacement of the body. Comparisons with measurements of the signs of people walking alone and in the crowd, enabled the identification of the influence of this crowd in the transverse displacement.*

Keywords: Crowd, Pedestrians, Transversal actions, Instrumentation