



Universidade Federal Da Paraíba
Centro De Tecnologia
Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Mecânica
- Mestrado - Doutorado

VIBRAÇÕES INDUZIDAS POR MULTIDÕES: EFEITO NOS MOVIMENTOS
CORPÓREOS DOS PEDESTRES NA DIREÇÃO TRANSVERSAL

por

FELIPE FELICIANO GOMES DA SILVA

*Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba para a
obtenção do grau de Mestre*

João Pessoa – Paraíba

Agosto, 2016

FELIPE FELICIANO GOMES DA SILVA

VIBRAÇÕES INDUZIDAS POR MULTIDÕES: EFEITOS NOS MOVIMENTOS
CORPÓREOS DOS PEDESTRES NA DIREÇÃO TRANSVERSAL

FELIPE FELICIANO GOMES DA SILVA

VIBRAÇÕES INDUZIDAS POR MULTIDÕES: EFEITO NOS MOVIMENTOS
CORPÓREOS DOS PEDESTRES NA DIREÇÃO TRANSVERSAL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Professor Orientador: Prof. Dr. Roberto Leal Pimentel

S586v Silva, Felipe Feliciano Gomes da.
Vibrações induzidas por multidões: efeito nos movimentos corpóreos dos pedestres na direção transversal / Felipe Feliciano Gomes da Silva.- João Pessoa, 2016.
88f. : il.
Orientador: Roberto Leal Pimental
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT
1. Engenharia mecânica. 2. Vibrações induzidas - multidão.
3. Pedestres - circulação - movimentos corpóreos. 4. Ações transversais - pedestres. 5. Instrumentação.

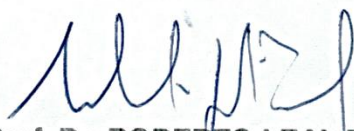
UFPB/BC

CDU: 621(043)

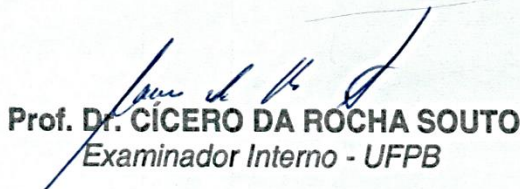
**VIBRAÇÕES INDUZIDAS POR MULTIDÕES:
EFEITO NOS MOVIMENTOS CORPÓREOS DOS
PEDESTRES NA DIREÇÃO TRANSVERSAL**
por

Felipe Feliciano Gomes da Silva

Dissertação aprovada em 15 de agosto de 2016



Prof. Dr. ROBERTO LEAL PIMENTEL
Orientador – UFPB



Prof. Dr. CÍCERO DA ROCHA SOUTO
Examinador Interno - UFPB



Prof. Dr. JOSÉ LUIZ VITAL DE BRITO
Examinador Externo – UnB

Dedico este trabalho aos **MEUS PAIS (MARIA E FRANCISCO)** e **MINHA IRMÃ (TAIANE)**, pelo esforço e preocupação que sempre tiveram em me proporcionar a melhor educação e incentivar a sempre seguir em frente.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família por toda confiança depositada durante todos esses anos de vida acadêmica, acreditando sempre na minha capacidade e me apoiando nos momentos difíceis.

A esta universidade, seu corpo docente, direção e administração que oportunizaram a janela que hoje vislumbro um horizonte, eivado pela acendrada confiança no mérito e ética aqui presentes.

Ao meu orientador Roberto Leal Pimentel, pelo suporte, correções e incentivos.

Agradeço ao professor, Dr Cícero da Rocha Souto, pelo suporte.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

RESUMO

VIBRAÇÕES INDUZIDAS POR MULTIDÕES: EFEITO NOS MOVIMENTOS CORPÓREOS DOS PEDESTRES NA DIREÇÃO TRANSVERSAL

A análise de vibrações induzidas por multidões na direção transversal vem se tornando um tema cada vez de maior interesse devido a ocorrência de vibrações transversais excessivas em algumas estruturas destinadas à circulação de pedestres. Este trabalho apresenta a análise de caminhadas/movimentos na direção transversal para situações de multidão. Para obtenção dos dados experimentais foram feitos testes sucessivos com pessoas instrumentadas, caminhando isoladamente e em meio a uma multidão com densidades diferentes. A análise comparativa dos sinais destes pedestres caminhando só e em multidão, possibilitou a identificação da influência causada por essa multidão na aceleração e deslocamento transversal e na rotação da pélvis.

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

ABSTRACT

CROWD-INDUCED VIBRATION: EFFECT ON BODY MOVEMENTS OF PEDESTRIANS IN THE TRANSVERSE DIRECTION

The analysis of the vibrations induced by crowds in the transverse direction has become a topic of increasing interest, because of the occurrence of excessive transverse vibrations in certain structures due to pedestrian traffic. This work presents the analysis of movements of pedestrians in the transverse direction for crowd situations. Successive tests were carried out with persons instrumented, walking alone and in a crowd. Comparisons between measurements of these pedestrians walking alone and in the crowd provided the identification of the influence of the crowd in the transverse acceleration and displacements and rotation of the pelvis.

Keywords: Crowd, Pedestrians, Transversal Actions, Instrumentation.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1- Algumas formas de movimentos/locomoção do ser humano
- Figura 2 - Ilustração da rotação pélvica (modificado de Rose e Gamble)
- Figura 3 - Diagrama de blocos do sistema experimental
- Figura 4 - Configuração dos acelerômetros
- Figura 5 – Representação das variáveis atuantes durante caminhada.
- Figura 6- Movimentação do centro de massa e dos acelerômetros durante caminhada
- Figura 7 – Pedestre instrumentado e com equipamentos de aquisição
- Figura 8 – Sensores e cabos de comunicação no pedestre
- Figura 9 – Pedestre com o trigger.
- Figura 10 – Configurações do ambiente de teste.
- Figura 11 – Multidão com densidade de $1,8 \text{ ped/m}^2$ (1).
- Figura 12 – Multidão com densidade de $1,0 \text{ ped/m}^2$ (1).
- Figura 13 - Multidão com densidade de $1,8 \text{ ped/m}^2$ (2).
- Figura 14 - Multidão com densidade de $1,0 \text{ ped/m}^2$ (2)
- Figura 15 - Resultado de calibração com frequência de 1 Hz com o acelerômetro PCB - Sinal.
- Figura 16 - Resultado de calibração com frequência de 2 Hz com o acelerômetro PCB - Sinal.
- Figura 17 - Resultado de calibração com frequência de 3 Hz com o acelerômetro PCB – Sinal.
- Figura 18 - Resultado de calibração com frequência de 1 Hz com o acelerômetro PCB – Espectro.

Figura 19 - Resultado de calibração com frequência de 2 Hz com o acelerômetro PCB – Espectro.

Figura 20 - Resultado de calibração com frequência de 3 Hz com o acelerômetro PCB – Espectro.

Figura 21 - Resultado de calibração com frequência de 3 Hz com o acelerômetro PCB – Sinal.

Figura 22 - Resultado de calibração com frequência de 1,2 e 3 Hz com o acelerômetro PCB – Espectro.

Figura 23 – Sinais dos acelerômetros frontal e traseiro.

Figura 24 – Espectros dos acelerômetros frontal e traseiro.

Figura 25 – Aceleração transversal de um pedestre.

Figura 26 – Espectro do sinal médio e média dos espectros.

Figura 27 – Caminhada com taxa de passo 2,0 Hz.

Figura 28 – Caminhada com taxa de passo 1,9 Hz.

Figura 29 – Caminhada com taxa de passo 1,8 Hz.

Figura 30 - Caminhada com taxa de passo 1,7 Hz.

Figura 31 - Caminhada com taxa de passo 1,6 Hz.

Figura 32 – Sinal na multidão.

Figura 33 – Espectro na multidão.

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1. Detalhes e variáveis de testes (Adaptado de Pimentel et al., 2013).
- Tabela 2. Resultados das caminhadas com taxa de passo controlada para o pedestre 01.
- Tabela 3. Resultados das caminhadas com taxa de passo controlada para o pedestre 02
- Tabela 4. Resultados das caminhadas com taxa de passo controlada para o pedestre 03
- Tabela 5. Resultados das caminhadas com taxa de passo controlada para o pedestre 04
- Tabela 6. Resultados das caminhadas com taxa de passo controlada para o pedestre 05.
- Tabela 7. Resultados das caminhadas com taxa de passo controlada para o pedestre 06.
- Tabela 8. Variáveis para caminhadas livres.
- Tabela 9. Taxas de passo dos pedestres na multidão.
- Tabela 10 – Acelerações totais e translacionais em 1,8 ped/m².
- Tabela 11 – Amplitudes do deslocamento total e transversal em 1,8 ped/m²
- Tabela 12 - Amplitude da rotação da pélvis em 1,8 ped/m².
- Tabela 13 – Efeito da rotação em 1,8 ped/m².
- Tabela 14 - Acelerações totais e translacionais em 1,0 ped/m².
- Tabela 15 - Amplitudes do deslocamento total e transversal em 1,0 ped/m².
- Tabela 16 - Amplitude da rotação da pélvis em 1,0 ped/m².
- Tabela 17 - Efeito da rotação em 1,0 ped/m².
- Tabela 18 – Variáveis de todos os pedestres com rotação expurgada.
- Tabela 19 - Comparação das acelerações transversais na multidão (1,8 ped/m²) e com taxa de passo controlada.
- Tabela 20 - Comparação das acelerações transversais na multidão (1,0 ped/m²) e com taxa de passo controlada.

Tabela 21 - Resultados de testes de deslocamento lateral para movimentos de caminhada (Retirado de Pimentel et al., 2013).

SUMÁRIO

ABSTRACT.....	9
LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE TABELAS	12
CAPÍTULO I.....	3
APRESENTAÇÃO.....	3
1.1.INTRODUÇÃO	3
1.2.OBJETIVOS	5
1.2.1. Objetivo principal	5
1.2.2. Objetivos específicos	5
CAPÍTULO II.....	7
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1.DESCRICÃO DO PROCESSO DE CAMINHADA NORMAL DE UM PEDESTRE.....	7
2.1.1. CARACTERIZAÇÃO CINEMÁTICA DA CAMINHADA HUMANA	9
2.2 INTERAÇÃO PEDESTRE ESTRUTURA	10
2.3. CAMINHADAS EM SITUAÇÕES DE MULTIDÃO.....	11
2.4 INSTRUMENTAÇÃO PARA QUANTIFICAÇÃO DO MOVIMENTO CORPORAL	11
2.4.1. AVALIAÇÃO A PARTIR DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS	12
2.4.1. AVALIAÇÃO A PARTIR DE SENSORES	13
CAPÍTULO III	14
MATERIAIS E MÉTODOS.....	14
3.1. INTRODUÇÃO	14
3.2. INSTRUMENTAÇÃO PARA MEDIÇÃO DOS SINAIS	14

3.3. MEDIÇÃO DAS ACELERAÇÕES	15
3.3. ANÁLISE ESTATÍSTICA	25
CAPÍTULO IV	27
RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	27
4.1.RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	27
4.1.1.CALIBRAÇÃO DOS SENSORES	27
4.1.2.RELAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ACELERÔMETROS FRONTAL E TRASEIRO.....	32
4.1.3.ACELERAÇÃO TRANSVERSAL.....	34
4.1.4.ESPECTRO DOS SINAIS E MÉDIA DOS ESPECTROS.....	35
4.1.5.CAMINHADA COM TAXA DE PASSO CONTROLADA.....	36
4.1.6.CAMINHADAS LIVRES	43
4.1.7.CAMINHADAS EM MULTIDÃO	43
4.2. ANÁLISE E CONSIDERAÇÕES FINAIS	50
CAPÍTULO V	55
CONCLUSÃO.....	55
Referências BIBLIOGRÁFICAS	56
Apêndices	60

CAPÍTULO I

APRESENTAÇÃO

1.1.INTRODUÇÃO

O caminhar bípede do ser humano é excepcionalmente eficiente e funcional, sendo uma ação conjunta dos sistemas muscular, neural e esquelético, e produzida por movimentos coordenados pelos segmentos corporais. A locomoção humana e sua análise pode ser dividida em três níveis de variáveis físicas: cinemática, relacionado à geometria do movimento; cinética, que constituem as forças e os movimentos exercidos pelo corpo na interação com o ambiente; e a eletromiografia, que está associada as atividades e alterações elétricas no sistema muscular esquelético (Medved, 2001).

A análise do processo de caminhada e sistema de postura bípede é extremamente importante para a compreensão dos mecanismos de locomoção e para intervenções ortopédicas. Na análise biomecânica do movimento deve-se criar uma metodologia para desenvolver a análise experimental, por meio de técnicas e procedimentos afins. O estabelecimento de uma quantidade ampla de dados sobre a informação do movimento estudado é um aspecto importante, pois proporciona a possibilidade de interpretações estatísticas e criação e desenvolvimento de variáveis relacionadas a este movimento.

Há um desenvolvimento e preocupação crescente no estudo e análise dos movimentos corporais, principalmente no que tange à classificação de comportamentos padrões da biomecânica do movimento corporal e a quantificação de suas variáveis e interpretações para o estudo do caminhar.

Na figura 1 podem ser vistas algumas imagens de pessoas com movimentações e locomoção em diversas situações.

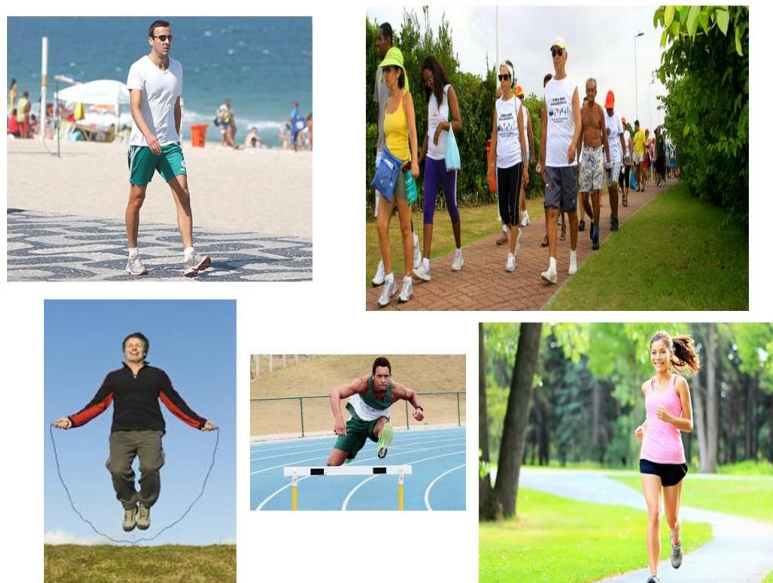


Figura 1- Algumas formas de movimentos/locomoção do ser humano. (Fonte: <http://images.google.com>).

Por outro lado, vibrações induzidas por humanos são cada vez mais um importante problema de funcionalidade 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., 2011) e pulando (Racic e Pavic; 2010; Caetano et al., 2011). Na análise de vibrações para pessoas caminhando adota-se modelos de cargas em que se emprega um único pedestre em caminhada livre (Silva e Pimentel; 2011) e modelos onde considera-se este pedestre envolto por uma multidão caminhando em um fluxo (Silva et al., 2013; Qin et al; 2013; Racic; 2014).

O estudo da relação homem-estrutura é talvez uma das aplicações direta da análise do movimento corporal. Com os avanços em modelagem, estrutura e materiais, a investigação voltada à funcionalidade de estruturas destinadas a circulação de pedestres torna-se imprescindível na engenharia moderna.

Há diversos trabalhos sobre avaliação e desempenho de estruturas destinadas a pedestres. Silva (2011) desenvolveu um modelo biodinâmico de pessoas caminhando para vibrações de passarelas de pessoas na direção vertical, a fim de auxiliar na avaliação da funcionalidade destas estruturas quando são submetidas a essas situações.

Outros autores focam no estudo da influência de multidões caminhando ao mesmo tempo sobre a estrutura em estudo (Caprani et al., 2011).

Vibrações devido a cargas induzidas por pedestres em estruturas é apontado como um dos principais problemas no desenvolvimento de projetos deste tipo de estrutura. Pimentel et al. (2001) realizaram uma compilação de relatos de ocorrências de vibrações excessivas em passarelas, tanto na direção vertical como na direção transversal.

Para situações de pedestres caminhando em multidão na direção transversal há evidências na literatura que este fenômeno é carente de estudos aprofundados, que desenvolvam e descrevam os efeitos e as variáveis causadas por esta situação. Segundo Pimentel et al. (2013) a sincronização dos movimentos de pedestres tem sido identificada como a causa da vibração transversal excessiva em algumas passarelas. O mesmo autor relaciona duas causas: o aumento da densidade da multidão e a interação pedestre-estrutura.

Portanto, através da análise biomecânica da caminhada em situação de multidão, pode-se compreender melhor as características do movimento e os efeitos das causas acima mencionadas.

1.2.OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo principal

Este trabalho propõe-se a desenvolver uma análise de pedestres caminhando em situações de multidão, com frequência de passo controlado e livremente, visando investigar movimentos do corpo do pedestre caminhando sozinho e em multidão.

1.2.2. Objetivos específicos

- Desenvolver um sistema instrumentado para equipar o pedestre e realizar a aquisição do sinal gerado pelo movimento do caminhar;
- Elaborar uma metodologia para avaliar os resultados;

- Avaliar as frequências de passo nas caminhadas livres e em multidão;
- Determinar a influência ou não da multidão no deslocamento e aceleração transversal e rotação da pélvis dos pedestres;
- Avaliar a influência no processo de caminhada quando ocorrendo em densidades diferentes.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE CAMINHADA NORMAL DE UM PEDESTRE

A forma de locomoção habitual entre a maioria dos mamíferos é o quadrupedalismo, movimentando-se utilizando os quatro membros. Diferentemente da maioria dos mamíferos, o ser humano utiliza-se do bipedalismo para movimentar-se; caminhar, pular e correr são movimentos habituais do bipedalismo. Peterka (2002) define o equilíbrio na locomoção bipedal como naturalmente instável. O movimento humano, de forma geral, pode ser descrito como uma combinação complexa de movimentos de rotação e movimentos de translação, sendo o primeiro relacionado a rotação do corpo em torno de um eixo imaginário no centro das articulações do corpo; o segundo diz respeito a movimentação corporal, quando as propriedades de deslocamento e velocidade são as mesmas. A caminhada é um processo de locomoção corporal, onde o corpo humano desloca-se de forma ritmada e cíclica; este movimento é modificado conforme alterações na velocidade do deslocamento.

No processo de caminhada o corpo do pedestre está na posição ereta, sendo o corpo suportado por uma variação/troca de passadas; no processo enquanto o corpo apoia-se na perna de apoio, a outra perna está oscilando e movimentando-se para a frente, posteriormente a perna que estava oscilando agora transforma-se na perna de apoio.

Segundo Norkin e Levangie (2005) a caminhada humana deve ser vista como uma progressão translacional do corpo, gerado a partir de movimentos rotatórios rítmicos caracterizados pela variação de movimentos propulsivos e retropulsivos dentro de fases do ciclo de caminhada, aonde o início da atividade ocorre no ponto de contato inicial da extremidade com o solo e termina quando a mesma toca o solo novamente;

segundo o mesmo autor no ciclo da caminhada existem duas fases: fase de apoio e balanço.

Uma forma de acompanhar e analisar o movimento corporal humano é observando o movimento de centro de massa (COM – *Center of Mass*) do corpo humano. O centro de massa em adultos está situado aproximadamente a 55% da estatura em relação à distância do solo; tomando como referência a coluna vertebral, o COM situa-se antes da segunda vértebra sacral (Saunders et al., 2010). Durante a postura ereta, o objetivo é manter o centro de massa total dentro da fronteira dos dois pés (Winter e Eng; 1993). Segundo Saini et al., (1998) a medição do deslocamento vertical do centro de massa do corpo durante a caminhada fornece informações úteis sobre a energia necessária para caminhar. O centro de massa corporal (COM) é responsável pelo controle dinâmico da coordenação do movimento corpóreo e a postura corporal neste processo (Stapley et al., 1999). Durante o processo de caminhada, o centro de massa do pedestre é deslocado verticalmente e lateralmente (transversalmente) descrevendo uma curva senoidal.

Movimentos de rotação e translação ocorrem em praticamente todas as partes do corpo durante uma caminhada, tais como, pélvis/bacia, joelho, tornozelo, tórax, ombros, entre outros. Ao se mover para a frente, a pélvis ondula de acordo com os movimentos de rotação e translação; esses movimentos ocorrem de forma alternada exigindo uma extensão e flexão dos quadris.

Rose e Gamble (2006) mostram que durante uma caminhada normal, a pélvis/bacia rotacional em torno de um eixo, alternadamente para ambos os lados, em relação a sua linha de progressão e que o passo habitual de uma pessoa normal, a magnitude desta rotação é de cerca de 4 graus em cada lado do eixo central, totalizando cerca de 8 graus, sendo este valor aumentado quando a velocidade da caminhada é aumentada; os mesmos autores mostram o significado da rotação pélvica em um modelo teórico simplificado (Figura 2) que descreve a locomoção bípede. Na figura a pélvis é representada por uma barra duplamente bifurcada, sendo as articulações do quadril representadas por esferas e o centro de massa por um pequeno bloco.

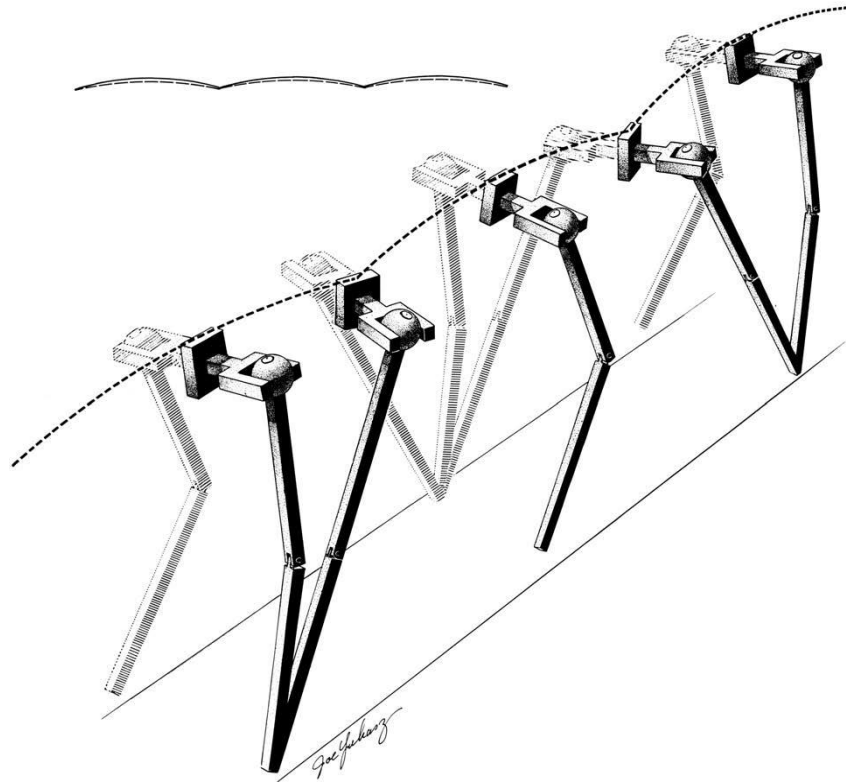


Figura 2 - Ilustração da rotação pélvica (modificado de Rose e Gamble).

2.1.1. CARACTERIZAÇÃO CINEMÁTICA DA CAMINHADA HUMANA

Há diversos tipos de movimentos relacionados a locomoção/movimentação humana, portanto torna-se necessário um cuidado na análise da biomecânica do movimento humano. Damos a descrição e análise dos movimentos corporais e as forças atuantes neste corpo o nome de biomecânica, ciência que envolve o estudo de sistemas biológicos de uma perspectiva mecânica. Dentro deste ramo temos a bioengenharia, que é o conjunto de técnicas e métodos para análises quantitativas do movimento humano. A partir da aplicação do conhecimento destas análises, é possível detectar e alterar erros e anomalias, afim de otimizar/melhorar o processo/sistema.

A cinemática foca-se na análise do movimento, estudo dos corpos sem considerar as forças envolvidas, descrevendo aspectos do movimento variantes no tempo, como posição, velocidade, aceleração e variação angular dos segmentos corporais. Durante uma caminhada, o movimento realizado pelas articulações, e gerado

pelas ações musculares varia o posicionamento destas articulações entre si, a partir de movimentos angulares.

Lakany (2000) defende que a interpretação do caminhar envolve a avaliação de todas as medições cinemáticas e cinéticas para identificação de anormalidades no caminhar e, portanto, sugerir e avaliar alternativas de tratamento.

Bharatkumar et al. (1994) propôs um modelo simples para a caminhada humana livre comparando imagens comuns de uma pessoa andando com um modelo utilizando três dados cinemáticos dimensionais de indivíduos caminhando com marcadores sobre as articulações dos seus membros inferiores.

2.2 INTERAÇÃO PEDESTRE ESTRUTURA

Uma das principais preocupações em engenharia é como e porque ocorre as interações de pedestres em movimento (caminhando, correndo e pulando) com estruturas destinadas à circulação de pessoas. Estas interações ocorrem devido a uma troca de forças entre a estrutura e o pedestre; as intensidades destas forças são alteradas de acordo com mudanças na locomoção.

Segurança e conforto são variáveis importantes e de grande relevância no projeto de estruturas. Estes pontos podem ficar comprometidos pelo excesso de vibração. Hicks et al., (2010) afirma que o aumento de problemas de vibração em passarelas modernas mostra que o projeto destas estruturas não devem mais ser concebidos somente considerando cargas estáticas, devendo considerar também cargas dinâmicas.

Sachse et al., (2003) realizaram uma revisão de literatura sobre a interação de pedestres com vários tipos de estruturas, citando trabalhos que consideravam modelos dotados de massa, rigidez e amortecimento para pessoas em movimento. Já Zivanovic et al., (2005) investigaram a interação entre um único pedestre e uma passarela durante uma caminhada com a frequência de passo controlada por um metrônomo, sendo que a força modal induzida pelo pedestre (para excitar um modo de vibração) foi modelada como uma força harmônica modulada.

2.3. CAMINHADAS EM SITUAÇÕES DE MULTIDÃO

Roloff (1981) define multidão de pedestres como um grande grupo de indivíduos em um mesmo ambiente físico, compartilhando um objetivo comum, podendo agir diferentemente do que quando estão sozinhos. Fatores cognitivos do ser humano como motivação e percepção segundo autores (Hughes, 2003; Bradley, 1993 e Seyfried et al., 2008) estabelecem decisões na movimentação em uma multidão.

A análise de como estruturas reagem a multidões e aglomerações é fundamental para o projeto de passarelas que como dito anteriormente são propensas a problemas com excessos de vibrações. (Ebrahimpour e Sack, 1992; Allen, 1990) foram um dos pioneiros na investigação e estudo do comportamento de estruturas submetidas a multidões de pessoas caminhando, desenvolvendo um modelo de carga harmônica para atuar na prevenção de vibrações associadas a estes movimentos.

Fujino et. (1993) verificaram que em uma aglomeração de pedestres caminhando em uma ponte, 20% ou mais atuam de forma sincronizada devido à vibração lateral da estrutura. Mais recentemente Pimentel et al. (2013) defenderam que a sincronização dos movimentos de locomoção de pedestres tem sido uma das causas de vibrações laterais excessivas em algumas pontes, e listam duas condições para tal fenômeno: aumento da densidade da multidão e a interação pedestre estrutura.

2.4 INSTRUMENTAÇÃO PARA QUANTIFICAÇÃO DO MOVIMENTO CORPORAL

Para analisarmos o movimento corporal do ponto de vista da cinemática e da cinética e estudar as causas e os efeitos deste movimento, é preciso quantificar o movimento, armazenar, processar e avaliar os resultados. Desta forma o fenômeno pode ser descrito dentro das suas características básicas e ainda podendo ser modelado matematicamente, a fim de maximizar a compreensão dos mecanismos do movimento corporal.

Para a avaliação da atividade do movimento seja ele cinemático ou via cinética, há uma variedade de opções de aquisição e processamento. Na análise cinemática é

utilizado a videogrametria e sistemas ópticos-eletrônicos. O sistema de videogrametria utiliza câmeras de vídeo digitais para a aquisição de imagens, o que permite maior flexibilidade na seleção dos movimentos a serem estudados, diminui as restrições do ambiente de coleta de dados, permite a aquisição das imagens concomitantemente ao registro das coordenadas dos marcadores e favorece a difusão dessa forma de análise, por seu baixo custo (Araújo et al., 2004). Os sistemas ópticos são um dos responsáveis pela evolução na medição e análise da cinemática. Sistemas baseados em tecnologia óptico-eletrônica e descrevem a cinemática articular do corpo humano por meio da digitalização do movimento e detecção de pontos articulares do corpo que representam sua posição e orientação espacial (Pinheiro et., 2013).

No caso do estudo das forças responsáveis pelos movimentos corporais são utilizados nas suas medições transdutores eletrônicos, tais como, acelerômetros, de pressão e piezelétricos. Há também a eletromiografia, que é um método de registro dos potenciais elétricos gerados pelas fibras musculares, associando a contração muscular, como um meio de determinação dos padrões de ativação muscular durante atividades diferentes.

2.4.1. AVALIAÇÃO A PARTIR DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS

A evolução da tecnologia permitiu a partir da utilização de novos sistemas de softwares e hardwares a aquisição, transferência e o processamento de imagens de uma forma mais eficiente. Dado o interesse crescente em pesquisas sobre reconhecimento facial e de movimentos, o processamento e a análise de sinal em imagens tornam-se tópicos de importância e que devem ser estudados.

De acordo com Mündermann et al. (2005) as técnicas de captura de movimento humano são usadas para uma grande variedade de aplicações, tais como: análise biomecânica e animação digital.

Fernandes et al. (2012) desenvolveram um protótipo de software para análise do movimento humano, baseado em sequencias de imagens digitais utilizando técnicas de segmentação de imagens, morfologia matemática, rastreamento de objetos e predição de localização. Eles verificaram que o processo de rastreamento não atingiu a total

corretude devido as oclusões e que outros objetos de cena não são rastreados como marcas.

Pimentel et al., (2013) utilizaram a técnica de processamento de imagens para detectar padrões de caminhada em situações com variações de congestionamento. No processo de aquisição uma câmera foi alinhada com o eixo de passagem do caminhar e colocada suficientemente alta para capturar o movimento da cabeça do pedestre. A partir do deslocamento da cabeça, foi obtido um sinal oscilante. Foi também estimada a força lateral aplicada ao piso pelos pedestres ao caminhar e observado um aumento de tal força a partir do aumento da densidade/congestionamento.

2.4.1. AVALIAÇÃO A PARTIR DE SENSORES

Um sensor é um dispositivo sensível a algum tipo de energia (física/química) e que relaciona dados sobre algo mensurável (posição, velocidade, aceleração, tensão, corrente entre outros), tendo a função de detectar e informar mudanças no ambiente analisado, produzindo um sinal para isso. Segundo Oppenheim e Willsky (2010) os sensores são normalmente classificados como: mecânicos, acústicos, inerciais, magnéticos e de rádio.

Muitos aspectos do processamento de dados de um sistema de sensoriamento eletrônico são semelhantes aos de processamento de imagens. Estes sistemas geralmente limitam-se a laboratórios ou espaços destinados para tal execução devido a necessidade da utilização de fios para captação dos sinais.

CAPÍTULO III

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1.INTRODUÇÃO

Neste capítulo são abordados materiais e metodologias utilizados no desenvolvimento do processo de aquisição, quantificação dos sinais e avaliação dos resultados; além do detalhamento da montagem do equipamento e estratégias de instrumentação e captura do sinal

3.2.INSTRUMENTAÇÃO PARA MEDIÇÃO DOS SINAIS

Um equipamento de aquisição de sinais foi projetado e construído para capturar as acelerações transversais de um pedestre durante uma caminhada. Inicialmente foi utilizada uma bancada que simula um movimento oscilatório, contendo um gerador de sinais, amplificador de potência e um excitador eletrodinâmico (*Shaker*) com um sensor (acelerômetro) conectado a uma placa de aquisição. Esta configuração visou a análise da relação da variação da amplitude captada pelo acelerômetro com a frequência, visando verificar a adequação do acelerômetro na correta detecção de amplitudes do sinal em baixa frequência. Estes resultados eram visualizados e analisados instantaneamente em um microcomputador. Foram realizadas uma bateria de análises com diversos níveis de frequência e a sua amplitude correspondente. A partir do monitoramento dos resultados dentro de uma faixa de frequência desejada chegou-se à conclusão que a calibração do sensor estava adequada e a elaboração do aplicativo para aquisição do sinal correta.

Na figura 3 é apresentado um diagrama de blocos simplificado do sistema experimental desenvolvido para captura das acelerações. Inicialmente é representado o pedestre instrumentado no processo de caminhada. No segundo bloco é representado o acelerômetro piezelétrico, composto de um cristal piezelétrico, que quando submetido a

uma aceleração, a massa do cristal sofre uma compressão/deformação gerando um sinal elétrico. No terceiro bloco é representado um condicionador de sinais, dispositivo responsável pela conversão de um sinal eletrônico; dentre as suas funções, pode-se citar: amplificação, linearização, excitação e isolamento elétrico. O sinal elétrico gerado pelo sensor deve ser otimizado para a escala de entrada, amplificando os sinais de baixa intensidade, isolando-os e filtrando para uma medição mais precisa. Uma placa de aquisição de dados de 14 bits (USB 6009) é representada no quarto bloco, responsável pela conversão do sinal de entrada de natureza analógica para um valor digital; de forma geral a placa adquire e envia para uma central de processamento as tensões de saída da mesma. No último bloco é mostrado os elementos responsáveis pelo processamento dos sinais adquiridos; normalmente são utilizados em sistemas de aquisição de dados notebooks ou computadores pessoais; para adquirir, processar e analisar os sinais são utilizados os softwares LabVIEW e Matlab instalados no microcomputador.

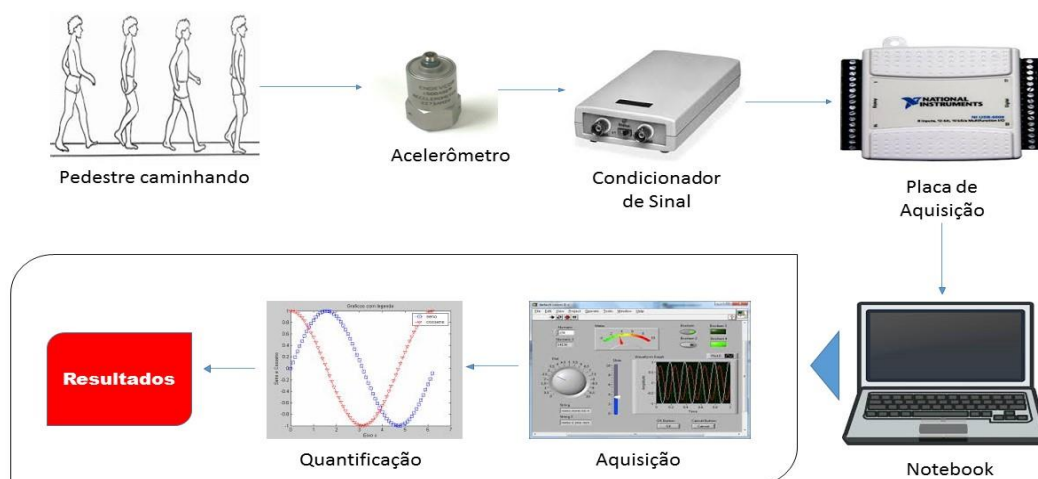


Figura 3 - Diagrama de blocos do sistema experimental

3.3.MEDIÇÃO DAS ACELERAÇÕES

Para a captação das acelerações transversais dos pedestres no momento da caminhada em um ponto próximo ao centro de massa do corpo do pedestre, foram

utilizados dois acelerômetros Endevco modelo 752A13 com sensibilidade de 1 V/g, acoplados a um cinto adaptado, como mostrado na figura 4.

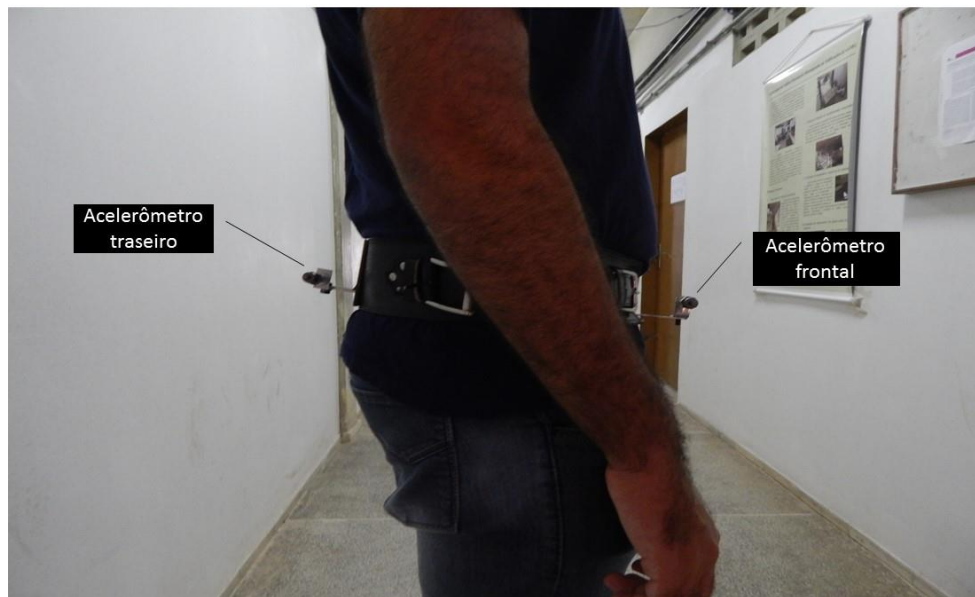


Figura 4 - Configuração dos acelerômetros.

Os dois acelerômetros e as suas disposições objetivam a anulação do efeito da rotação causada pela pélvis durante o movimento de caminhada, 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, conforme mostrada na equação:

$$a_{c.m} = \frac{a_f + a_t}{2} \quad \text{Eq.(1)}$$

Onde:

a_f = Sinal do acelerômetro frontal;

a_t = Sinal do acelerômetro traseiro;

Na figura 5 é mostrada uma representação das variáveis atuantes durante a caminhada do pedestre. Como representado na equação anterior o pedestre possui dois sensores de aceleração acoplados em um cinto (a_f e a_t). A distância do centro de massa para os acelerômetros é igual (L_f e L_t). O movimento do centro de massa é um dos principais focos da pesquisa. Na figura 5, a movimentação do centro de massa (C.M) é representada; no ponto 1) o pedestre encontra-se em repouso e não há deslocamento lateral do C.M; após a partida do pedestre, o C.M desloca-se lateralmente sendo representado no ponto 2); no ponto 3) é representado a aceleração angular de rotação da pélvis e consequentemente do C.M.

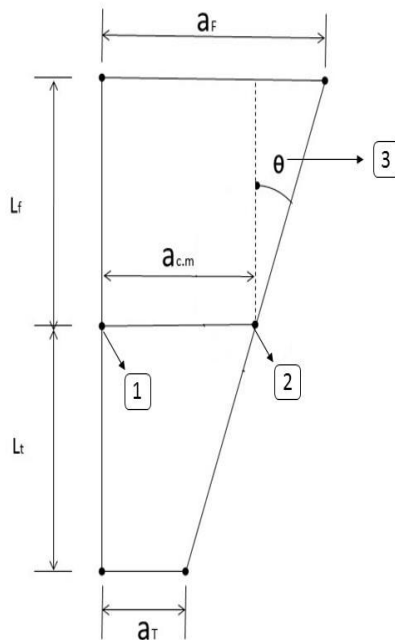


Figura 5 – Representação das variáveis atuantes durante caminhada.

A rotação da pélvis como mostrada na figura anterior é representado por teta ($\ddot{\theta}$). Da figura pode-se obter a tangente da aceleração (Equação 2). Devido aos pequenos ângulos envolvidos, considera-se aceleração angular igual a tangente (Equação 3).

$$\tan \ddot{\theta} = \frac{a_f - a_t}{(Lf + Lt)} \quad \text{Eq.(2)}$$

$$\ddot{\theta} = \frac{a_f - a_t}{(Lf + Lt)} \quad \text{Eq.(3)}$$

Sabendo-se que:

$$\ddot{\theta} = \theta \cdot \omega^2 \quad \text{Eq.(4)}$$

A rotação da pélvis é definida como:

$$\theta = \frac{a_f - a_t}{(Lf + Lt) \cdot \omega^2} \quad \text{Eq.(5)}$$

Na figura 6 é representado em forma de diagramas um ciclo de caminhada de um pedestre e a movimentação do centro de massa dos dois acelerômetros. No estágio 1 o pedestre encontra-se em repouso, assim que o mesmo inicia a marcha o centro de massa é deslocado como representado no diagrama 2. Em cada estágio os acelerômetros são deslocados, as setas representam os deslocamentos dos acelerômetros.

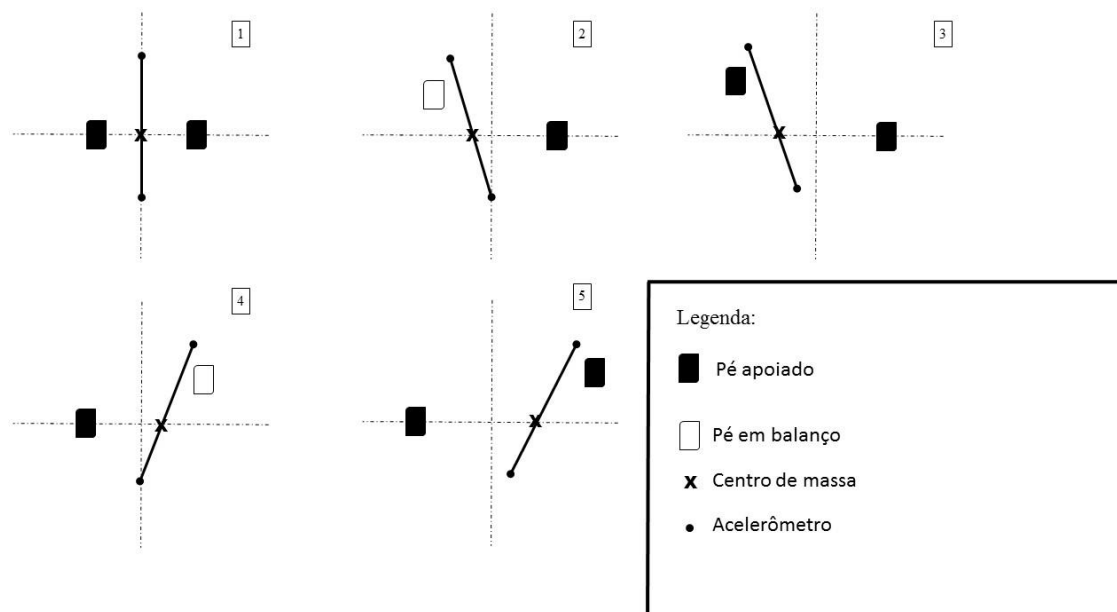


Figura 6 – Movimentação do centro de massa e dos acelerômetros durante caminhada

Foram feitos testes sucessivos com 06 (Seis) pedestres utilizando o cinto adaptado juntamente com uma mochila instrumentada contendo o sistema de aquisição USB-6009 da National Instruments, computador para processamento e dois condicionadores de sinais. Na fig. 7 pode-se ser visualizado o pedestre com a mochila e equipamentos.



Figura 7 – Pedestres instrumentado e com equipamentos de aquisição

Como pode ser visto na figura, os fios de conexão e aquisição estão expostos. Esta configuração visa uma maior mobilidade do pedestre durante a caminhada, uma vez que os sensores devem se comunicar através de fios com os equipamentos contidos na mochila e a forma que estes fios são dispostos é extremamente importante, pois eles poderiam romper durante a atividade ou impedir uma caminhada natural do pedestre.

Na fig. 8 é possível visualizar os sensores com os seus cabos conectados.



Figura 8 – Sensores e cabos de comunicação no pedestre

Para cada pedestre foi solicitado que caminhasse primeiramente na sua taxa de passo normal de caminhada, livremente em linha reta por um trajeto com duração de 10 (dez) segundos. Em uma segunda etapa o pedestre caminhou no mesmo percurso, com a mesma duração, com frequência de passo controlada; para definição da faixa de frequência de passo que seria usada nos testes foi usado como base as pesquisas de Matsumoto (1978), que pesquisou faixas características de frequência de passo de pedestres durante caminhada normal. Neste trabalho as frequências utilizadas foram: 1,6 Hz, 1,7 Hz, 1,8 Hz, 1,9 Hz e 2,0 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 do passo. A caminhada com frequência de passo controlada foi realizada objetivando a comparação entre as caminhadas em multidão e livre com taxas de passo iguais.

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 passos 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. Na fig. 9 é possível visualizar o pedestre segurando na mão direita o aparato.



Figura 9 – Pedestre com o trigger.

Após as caminhadas livres e com frequência de passo controlada, foram realizadas com o mesmo pedestre caminhadas em meio a uma multidão, no mesmo local em que foram realizadas as caminhadas livres. Tais testes foram realizados em um corredor com aproximadamente 20 metros de comprimento e 1,4 metros de largura; na fig. 8 é mostrada esta configuração. Em todos os casos nenhum tráfego de pedestres na direção oposta estava ocorrendo. Todos os testes foram realizados no mesmo ambiente e a multidão foi composta na sua grande maioria de estudantes universitários.

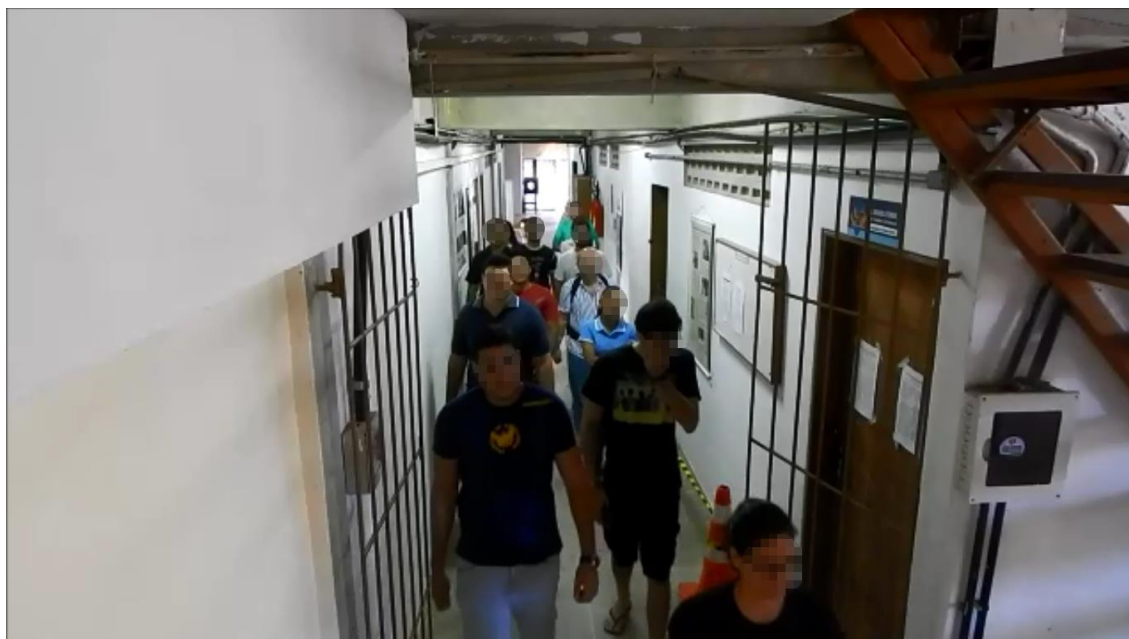


Figura 10 – Configurações do ambiente de teste.

As densidades de multidão utilizadas foram de 1,8 pedestres/m² e 1,0 pedestres/m². Para a utilização destas densidades utilizou-se como referência os estudos de sincronização de pedestres devido a multidões de Pimentel et al., (2013). Na tabela 1 são apresentados detalhes e variáveis usadas nos testes da referência citada; como citado anteriormente, o ambiente de testes aqui usado é um corredor com dimensões próximas ao trabalho citado.

Tabela 1. Detalhes e variáveis de testes (Adaptado de Pimentel et al., 2013).

Lugar de teste	Nº de pedestres envolvidos	Comprimento do percurso (m)	Densidade de pedestres ped/m ²	Condições de testes	Taxa de passo médio (Hz)
Protótipo de passarela	12	11,6	0,3	Fluxo contínuo	1,9
Protótipo de passarela	31	11,6	0,7	Fluxo contínuo	1,8
Protótipo de passarela	48	11,6	0,9	Fluxo contínuo	1,76
Corredor	37	25	1	Cruzando por um grupo grande	1,75
Passarela composta	12 20	60	1,5	Cruzando por um grupo grande	1,77
Corredor	37	25	1,8	Cruzando por um grupo grande	1,71

Nas figuras 11-14 é possível visualizar as duas configurações (1,8 ped/m² e 1,0 ped/m²).

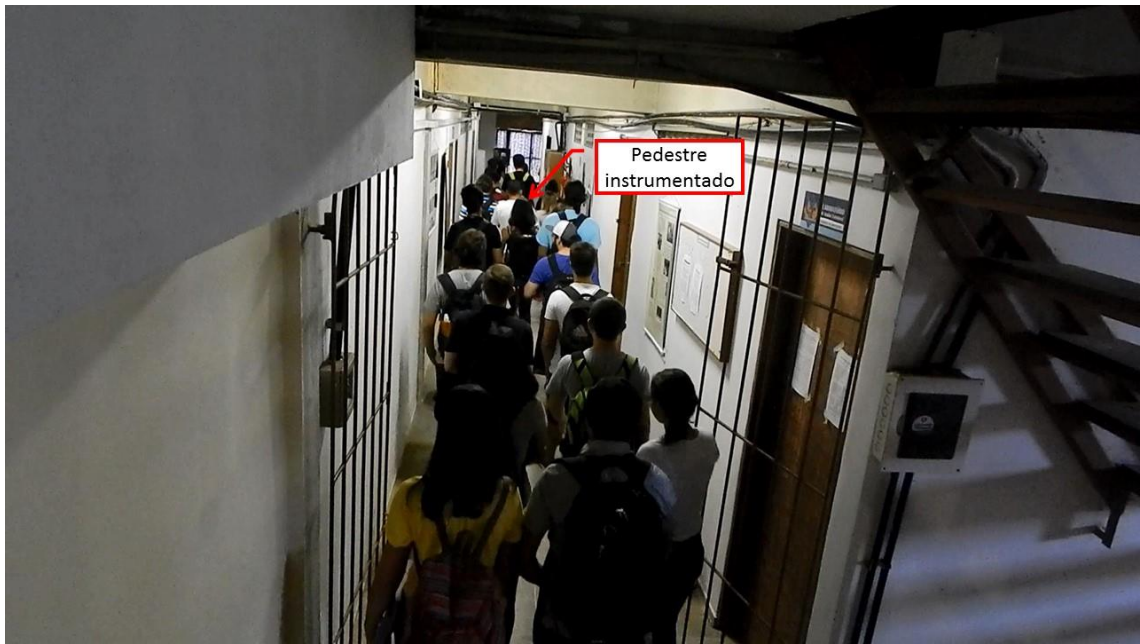


Figura 11 – Multidão com densidade de 1,8 ped/m² (1).

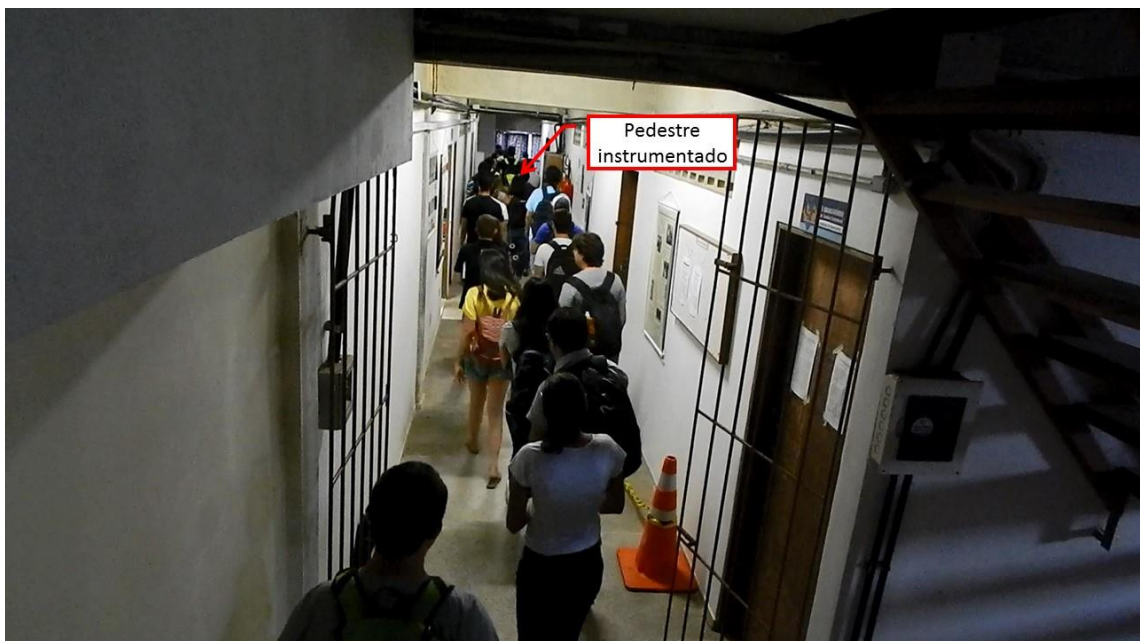


Figura 12 - Multidão com densidade de 1,0 ped/m² (1).

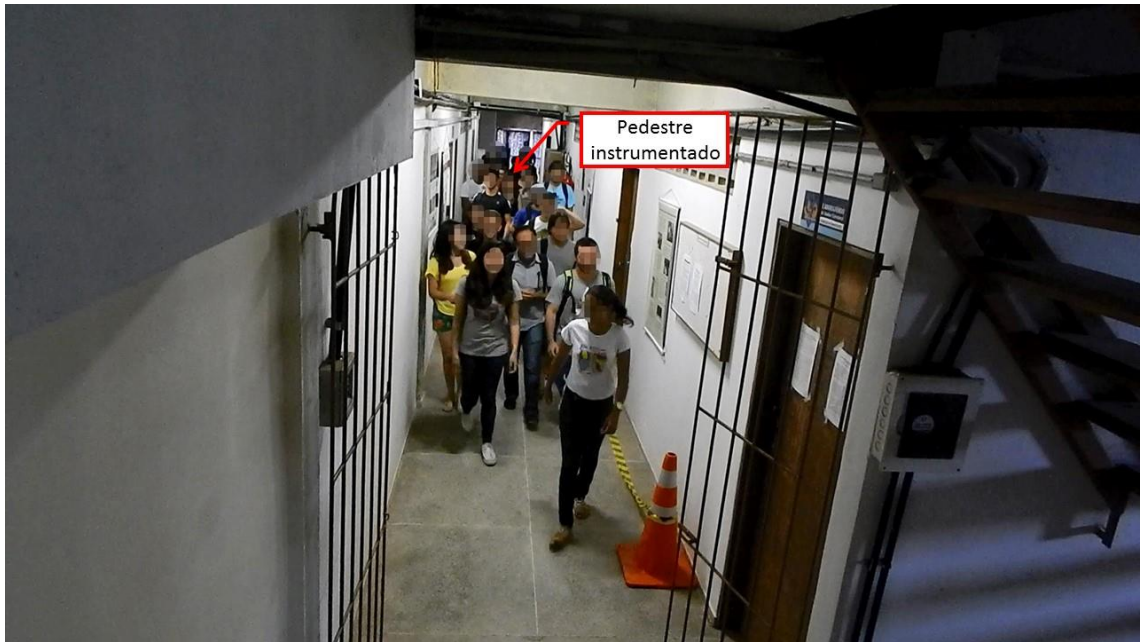


Figura 13 - Multidão com densidade de 1,8 ped/m² (2).



Figura 14 - Multidão com densidade de 1,0 ped/m² (2)

Como já dito, as configurações do espaço são as mesmas para as duas densidades e o número de pessoas envolvidas também. Observando as figuras acima é possível visualizar a diferença de espaçamento entre os envolvidos; na configuração de 1,8 pedestres/m² (mais denso) a multidão ocupa um menor espaço e as pessoas estão mais próximas umas das outras; já na configuração de 1,0 pedestres/m² (menos denso),

a multidão ocupa um espaço maior, havendo maior afastamento entre as pessoas. Por exemplo, utilizando as medidas do ambiente usado e adotando o número de 20 pessoas como multidão, a densidade de 1,8 pedestres/m² ocupará aproximadamente 8,0 metros com os pedestres espaçados uniformemente.

3.3. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para fornecer significância estatística, após o processamento dos sinais foram analisadas as amostras, a fim de verificar a distribuição estatística e se os números de amostras são suficientes.

Inicialmente para verificar o nível de normalidade das amostras e a representatividade do valor médio dos espectros de cada caminhada em relação ao tamanho das amostras, foi utilizado um teste estatístico. Em primeiro lugar, aplicou-se o teste Shapiro-Wilk (1965) para determinar se as amostras recolhidas são ajustadas para uma distribuição normal. O teste é baseado na estatística W dada por:

$$W = \frac{b^2}{\sum_{i=1}^n (x_{(i)} - \bar{X})^2} \quad \text{eq. (6)}$$

Em que $x_{(i)}$ são os valores da amostra ordenada. A constante b é determinada da seguinte forma:

$$b = \begin{cases} \sum_{i=1}^{n/2} a_{n-1+1} \cdot (x_{(n-1+1)} - x_{(i)}) & \text{se } n \text{ é par} \\ \sum_{i=1}^{(n+1)/2} a_{n-1+1} \cdot (x_{(n-1+1)} - x_{(i)}) & \text{se } n \text{ é ímpar} \end{cases} \quad \text{eq. (7)}$$

Onde os x_i são valores constantes gerados pela média e pela variância das estatísticas relacionando-se com o número da amostra. Seus valores são encontrados na tabela Shapiro- Wilk.

Para a formulação da hipótese deve-se executar da seguinte forma:

$$\begin{cases} H_0 : A amostra é ajustada para uma distribuição normal \\ H_1 : A mostra não é ajustada para uma distribuição normal \end{cases} \quad \text{eq.(8)}$$

Comprovando a característica de distribuição normal, utilizou-se a distribuição t-student (Triola, 2007) para determinar o tamanho de cada amostra, para o qual foi adotado um intervalo de confiança de 5% do valor médio e considerando uma margem de erro de 10%, com a seguinte equação:

$$n = \left(\frac{t_{\alpha/2} \cdot S}{E} \right)^2 \quad \text{eq.(9)}$$

Onde $t_{\alpha/2}$ é o fator de abrangência (obtido de tabela) e E é o erro tolerado ou admitido.

Para verificação da influência ou não na aceleração transversal de um pedestre caminhando em multidão em relação a sua caminhada livre, utilizou-se um teste de hipótese entre as duas médias amostrais distintas (eq. 10). Para isso, utiliza-se a verificação de hipótese nula da igualdade das suas médias a partir da equação 8.

$$\begin{cases} H_0 : \mu_1 = \mu_2 \\ H_1 : \mu_1 > \mu_2 \end{cases} \quad \text{eq.(10)}$$

$$t = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}} \quad \text{eq.(11)}$$

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e discutido os resultados das caminhadas realizadas no intuito de investigar a influência na aceleração transversal, quando um pedestre caminha em meio a uma multidão.

4.1.RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.1.1.CALIBRAÇÃO DOS SENSORES

Como já dito na metodologia, a fim de comprovar que o acelerômetro não produza erros de amplitude nas faixas de frequência de interesse, foram realizados testes com um *shaker* (atuador eletromecânico) e acelerômetros. Nas figuras 15-17 são apresentados os resultados dos sinais da calibração destes sensores; inicialmente foram realizados testes com o acelerômetro da Endevco modelo 752A13. Além dos acelerômetros da Endevco foram também realizados testes com acelerômetros da PCB modelo 39B04. Nas figuras 18-20 são mostrados os valores das amplitudes das acelerações dos espectros em cada situação, para verificar a amplitude utilizou-se variações de frequências e de ganhos. Para estes acelerômetros foram realizados testes com e sem ganho (10x).

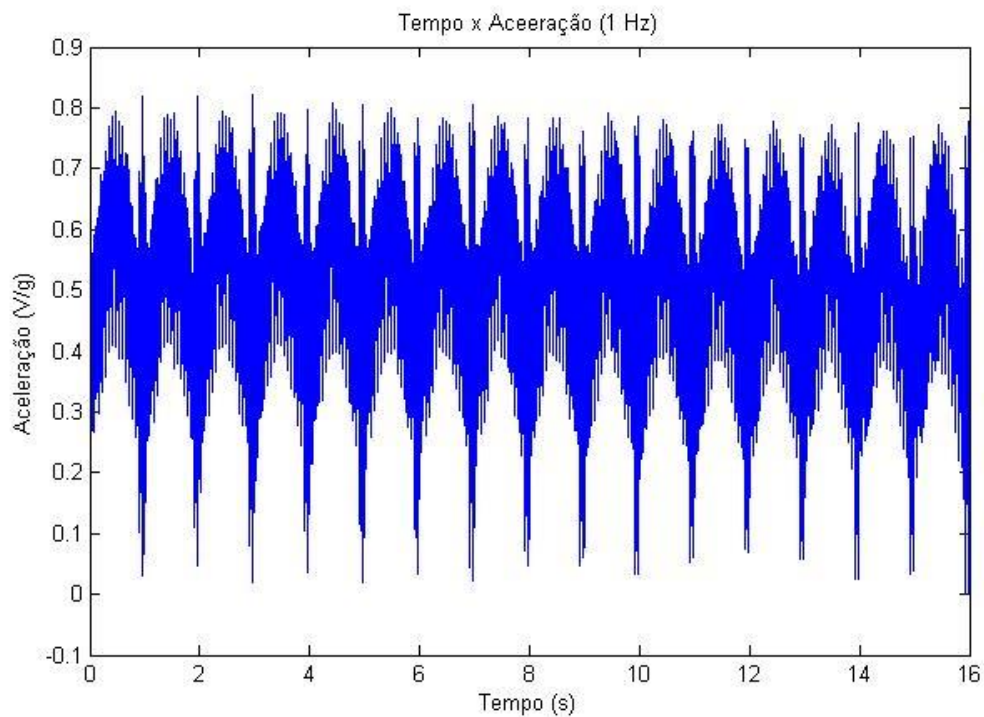


Figura 15. Resultado de calibração com frequência de 1 Hz com o acelerômetro PCB - Sinal.

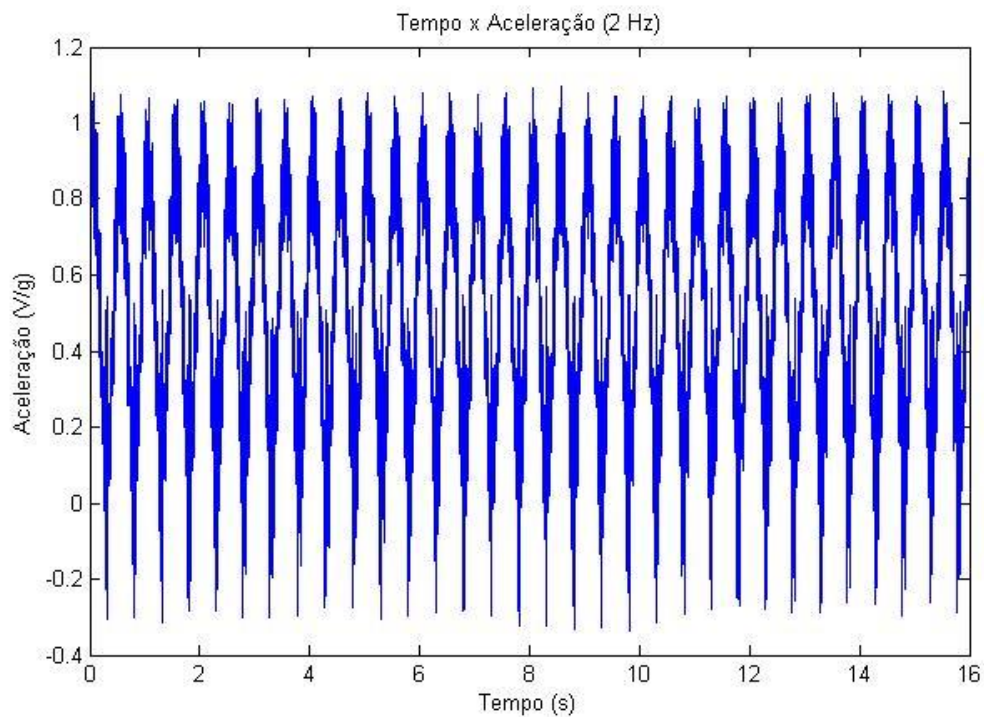


Figura 16. Resultado de calibração com frequência de 2 Hz com o acelerômetro PCB - Sinal.

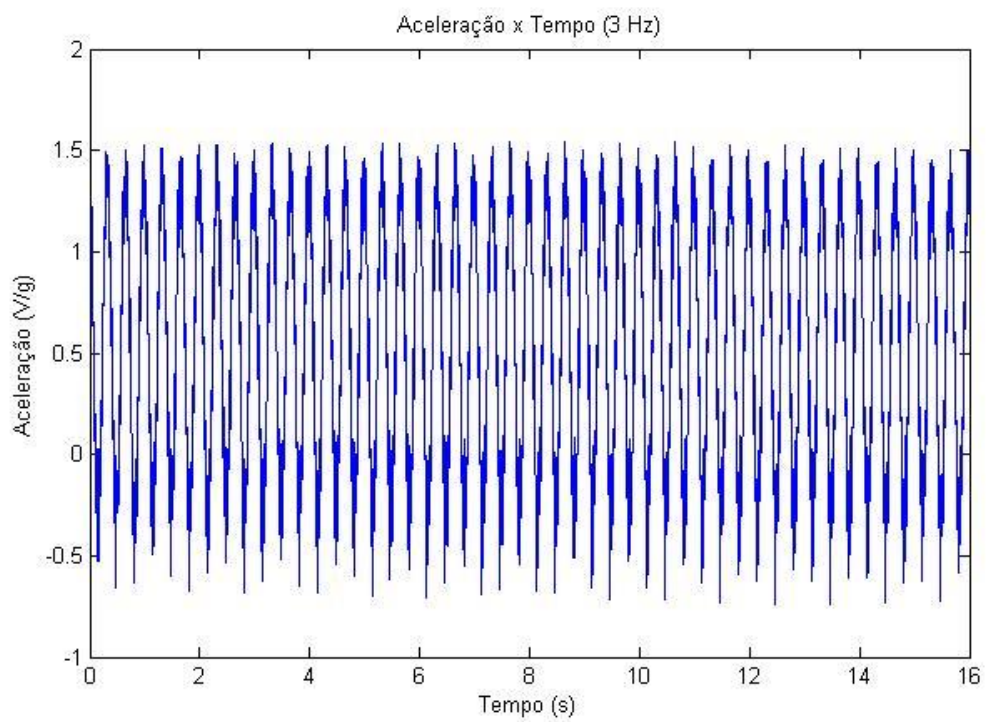


Figura 17. Resultado de calibração com frequência de 3 Hz com o acelerômetro PCB – Sinal.

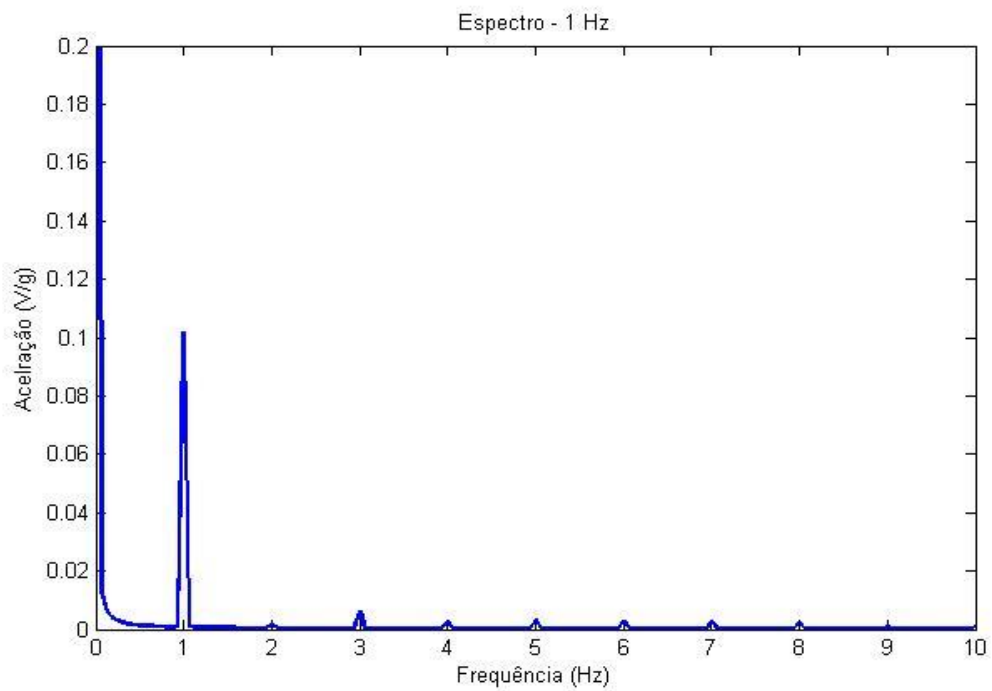


Figura 18. Resultado de calibração com frequência de 1 Hz com o acelerômetro PCB – Espectro.

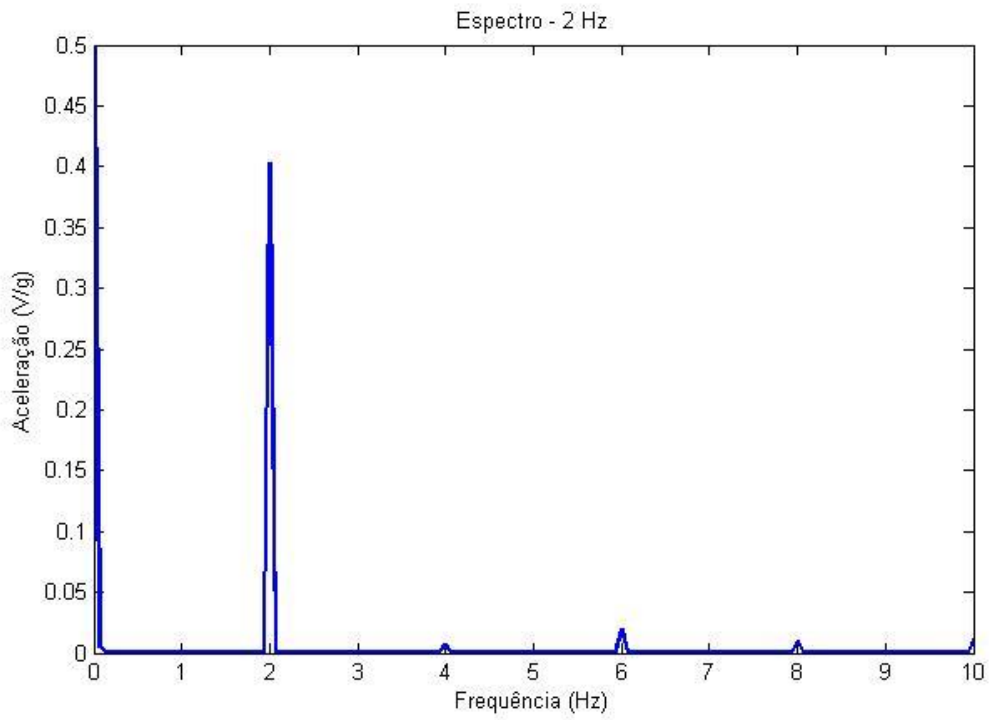


Figura 19. Resultado de calibração com frequência de 2 Hz com o acelerômetro PCB – Espectro.

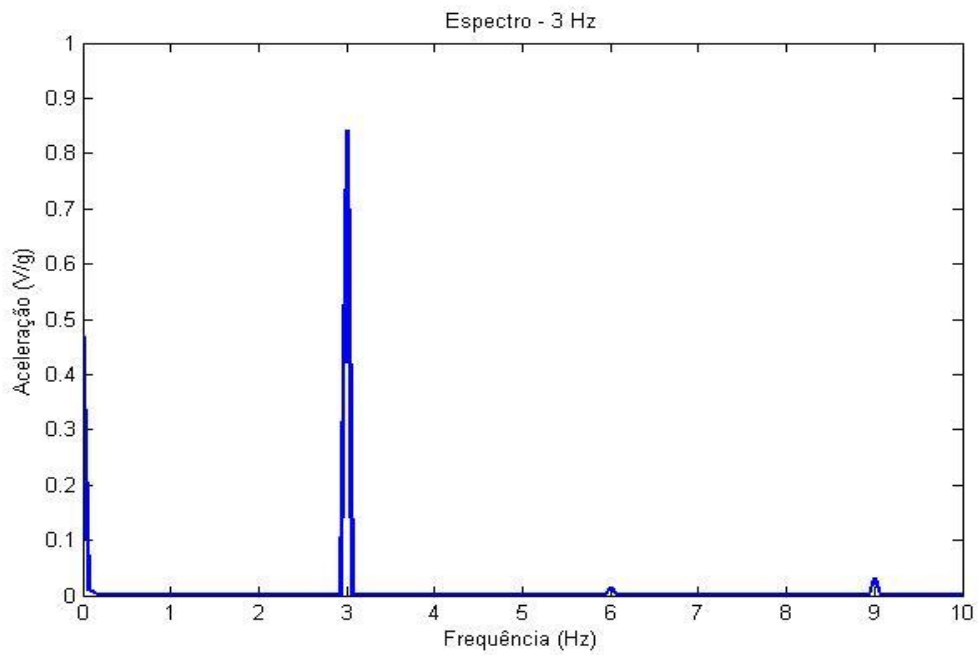


Figura 20. Resultado de calibração com frequência de 3 Hz com o acelerômetro PCB – Espectro.

Nas figuras 21 e 22 são mostrados o comportamento da amplitude do deslocamento em relação ao tempo e em relação a frequência; pode-se ser observado que nas três situações abordadas observa-se a mesma amplitude, concluindo-se que não perca de amplitude com a variação da frequência.

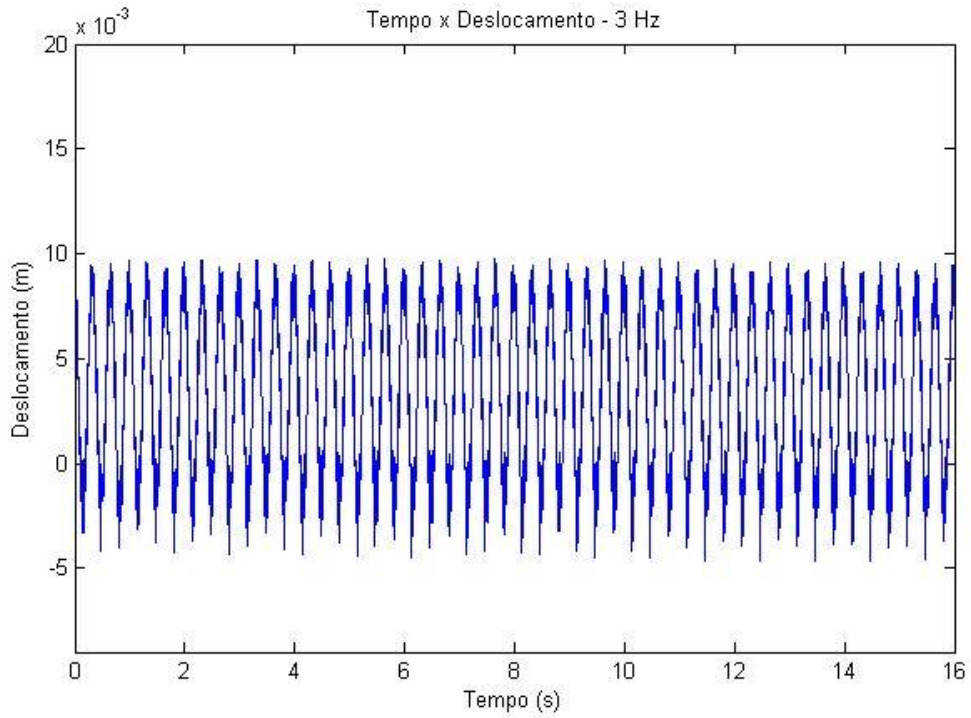


Figura 21. Resultado de calibração com frequência de 3 Hz com o acelerômetro PCB – Sinal.

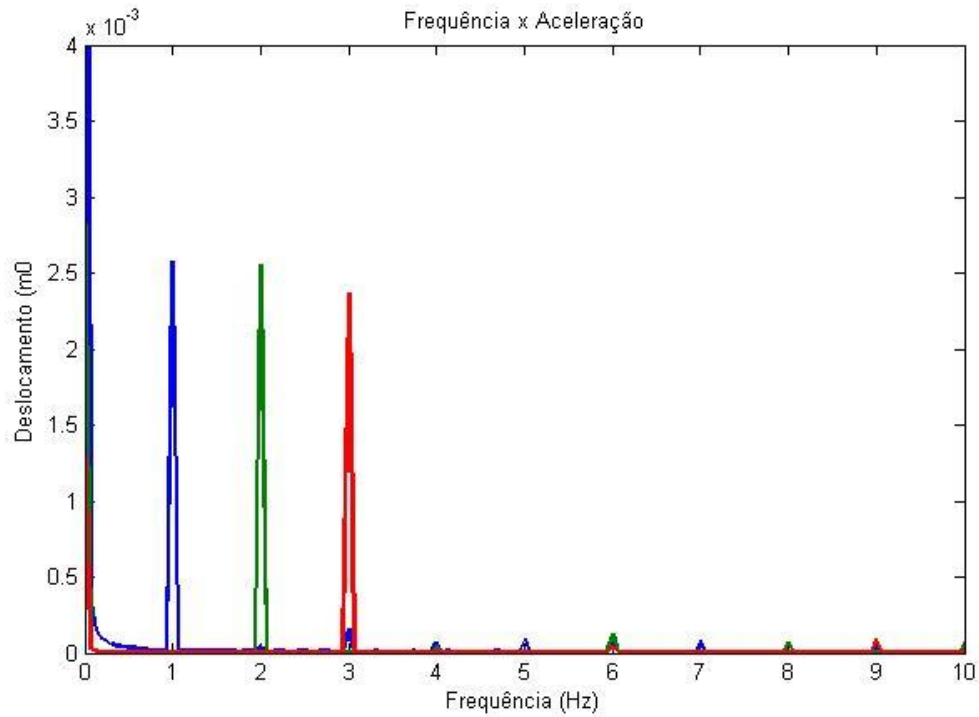


Figura 22. Resultado de calibração com frequência de 1,2 e 3 Hz com o acelerômetro PCB – Espectro.

4.1.2.RELAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ACELERÔMETROS FRONTRAL E TRASEIRO

Como já foi explicitado anteriormente, a fim de evitar o efeito da rotação natural da pélvis na captação do sinal, foram utilizados dois acelerômetros localizados na frente e atrás do pedestre com a mesma distância em relação ao centro de massa do corpo. Após a captação destes sinais verificou-se uma diferença nas amplitudes dos mesmos.

Nas figuras 23 e 24 são mostrados uma comparação destes sinais, no domínio do tempo e no domínio da frequência respectivamente. Nas figuras podem ser visualizados valores superiores de aceleração para os sinais do acelerômetro frontal em relação ao acelerômetro traseiro. Quando o pedestre caminha e desloca-se para a direita e a esquerda com ambas as pernas, ocorre um efeito aditivo da translação e rotação no

acelerômetro frontal e subtrativo no acelerômetro traseiro. Esta movimentação de adição e subtração pode ser melhor entendida visualizando a figura 6 apresentada na seção 3.3. Conforme é possível observar com o avançar do pedestre ao caminhar, a translação e rotação do centro de massa movimentada o acelerômetro frontal para a direita (1º quadrante, adiciona) e o acelerômetro traseiro para a esquerda (3º quadrante, subtrai).

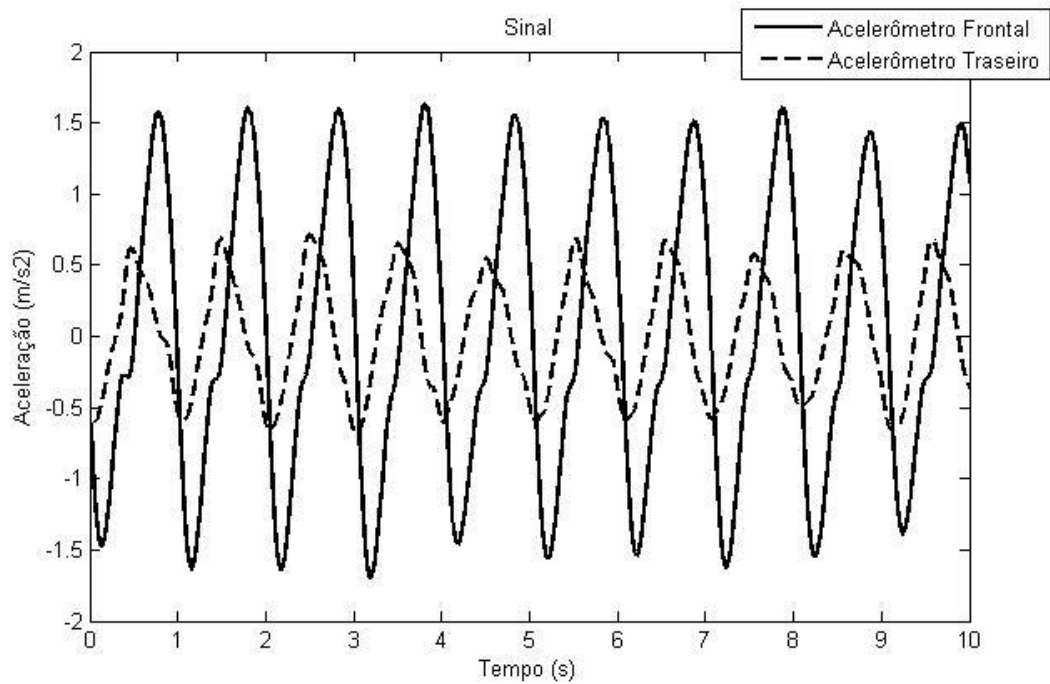


Figura 23 – Sinais dos acelerômetros frontal e traseiro.

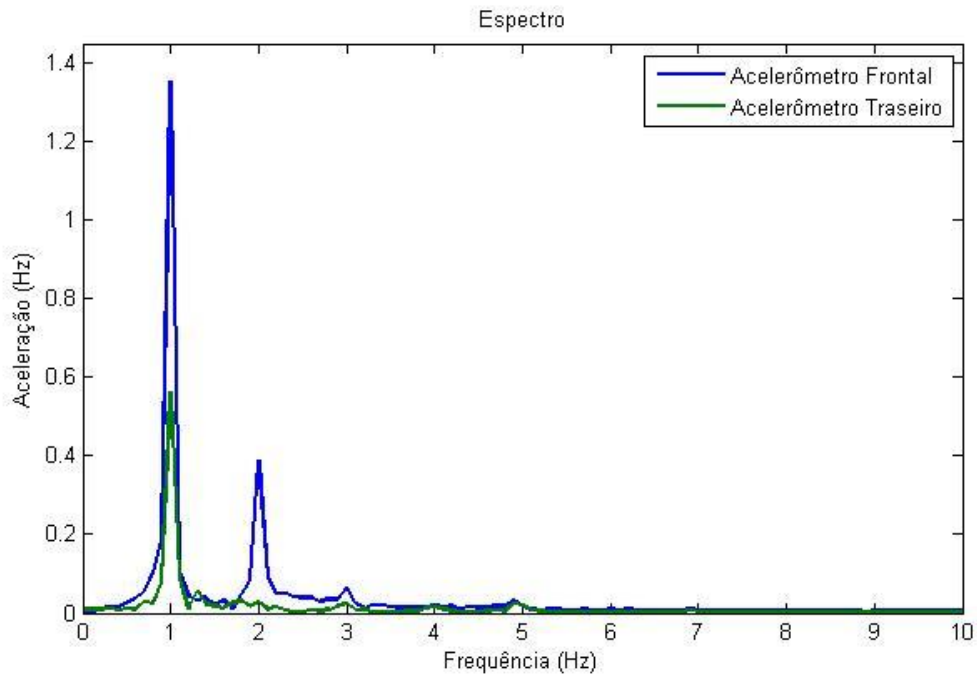


Figura 24 – Espectros dos acelerômetros frontal e traseiro.

4.1.3.ACELERAÇÃO TRANSVERSAL

Os sinais captados (frontal e traseiro) nos testes experimentais foram submetidos a uma média aritmética entre eles, a fim de obter a aceleração transversal do centro de massa. Na figura 25 é mostrado um sinal no domínio do tempo de um pedestre caminhando livremente.

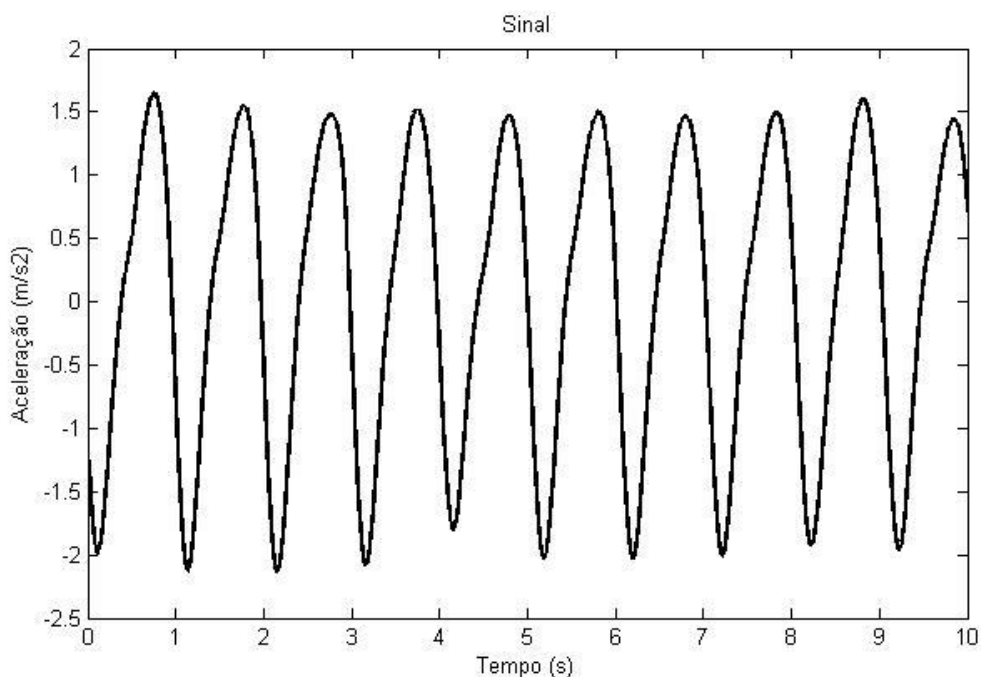


Figura 25 – Aceleração transversal de um pedestre.

A obtenção do sinal no domínio do tempo dá-se a partir da plotagem do sinal captado e processado com intervalo de tempo de aquisição pré-definido. Este gráfico com aspecto senoidal, de acordo com as literaturas pesquisadas (Winter, 1995; Amadio et al., 1998 e Collins, 2008) descreve a movimentação do centro de massa durante o processo de caminhada do pedestre

4.1.4. ESPECTRO DOS SINAIS E MÉDIA DOS ESPECTROS

Após a obtenção do sinal de cada acelerômetro separadamente, foi calculado os espectros destes sinais e feito uma média entre ambos, chamado de média dos espectros. Diferentemente o espectro designado por espectro do sinal médio é obtido diretamente da média dos sinais, que possui o efeito da rotação expurgado. Da comparação entre estes dois espectros avalia-se o efeito da rotação. Na fig. 26 são mostrados os espectros das duas situações em um comparativo. Na figura pode-se observar uma diferença na amplitude da aceleração, sendo esta devido ao efeito da rotação.

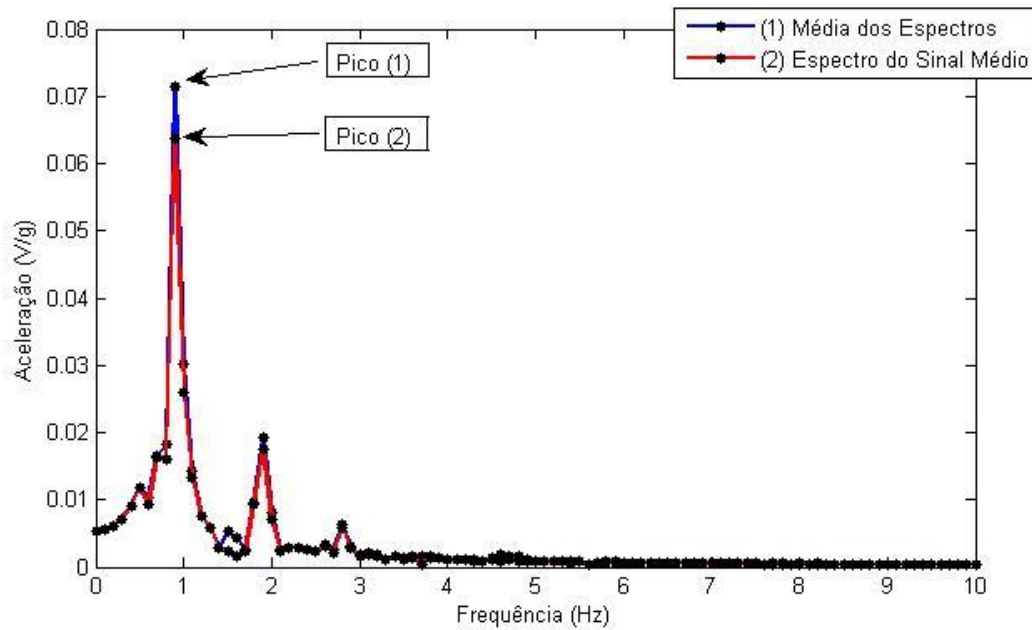


Figura 26 – Espectro do sinal médio e média dos espectros.

4.1.5. CAMINHADA COM TAXA DE PASSO CONTROLADA

Para realização de comparação das caminhadas livre e multidão, executou-se testes controlando a taxa de passo que um pedestre desempenhava na atividade. Nas figuras 27 a 31 são mostrados os resultados de caminhadas com o mesmo pedestre com taxa de passo controlada. Como pode ser visto, a amplitude da aceleração diminui de acordo com a diminuição da taxa de passo.

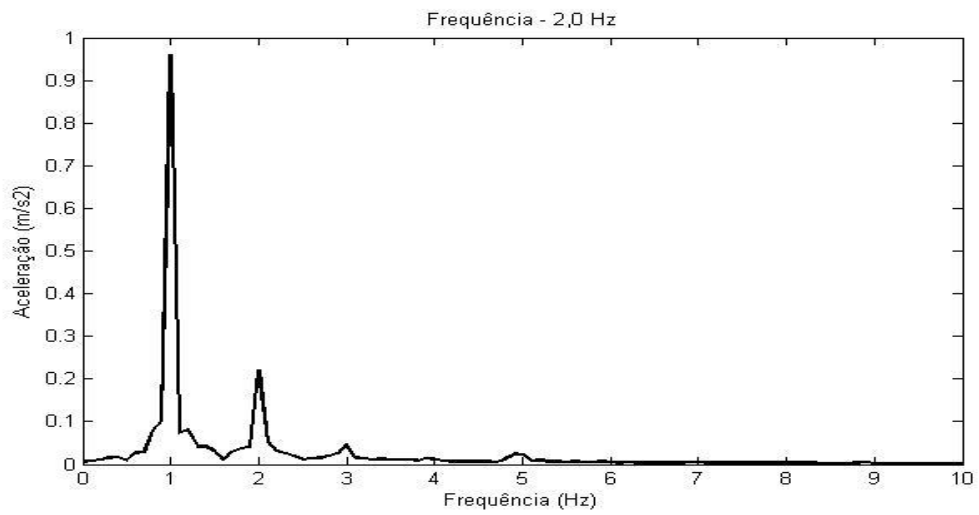
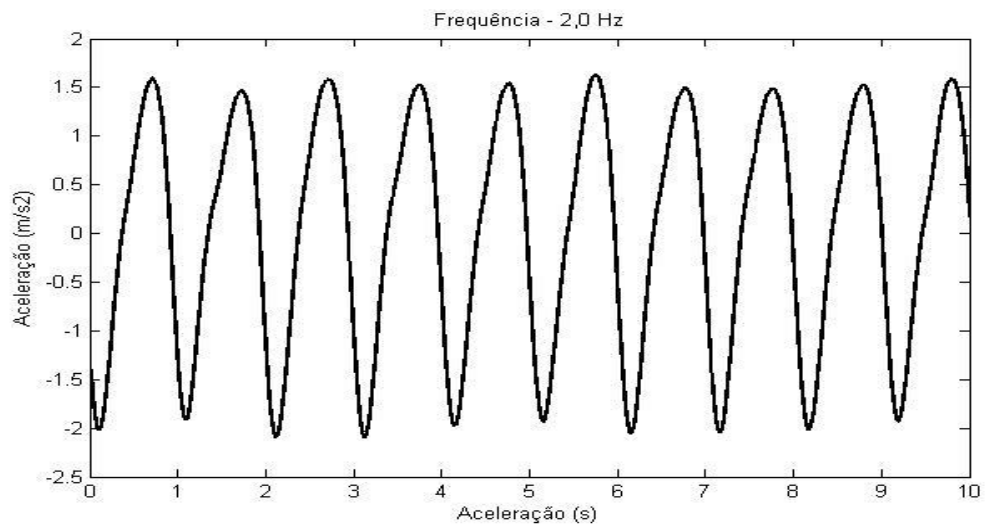
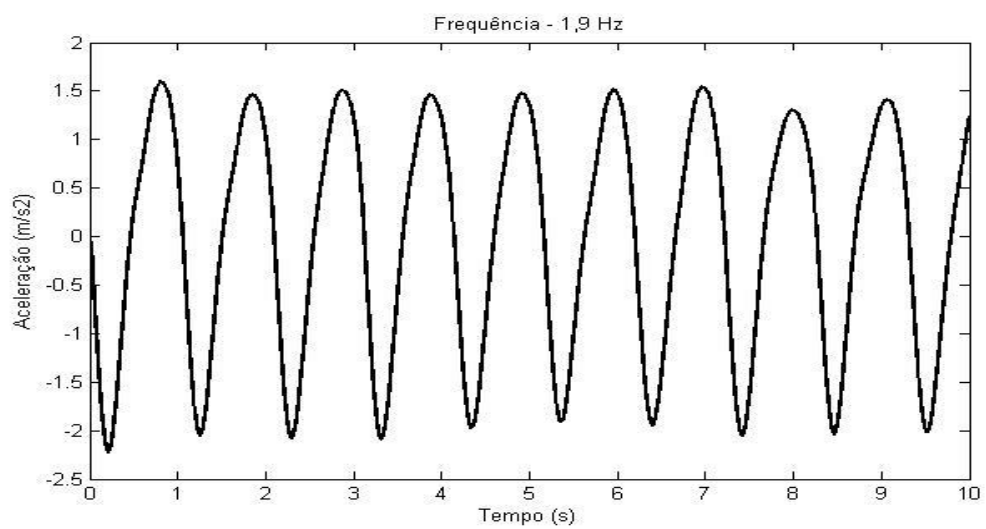


Figura 27 – Caminhada com taxa de passo 2,0 Hz.



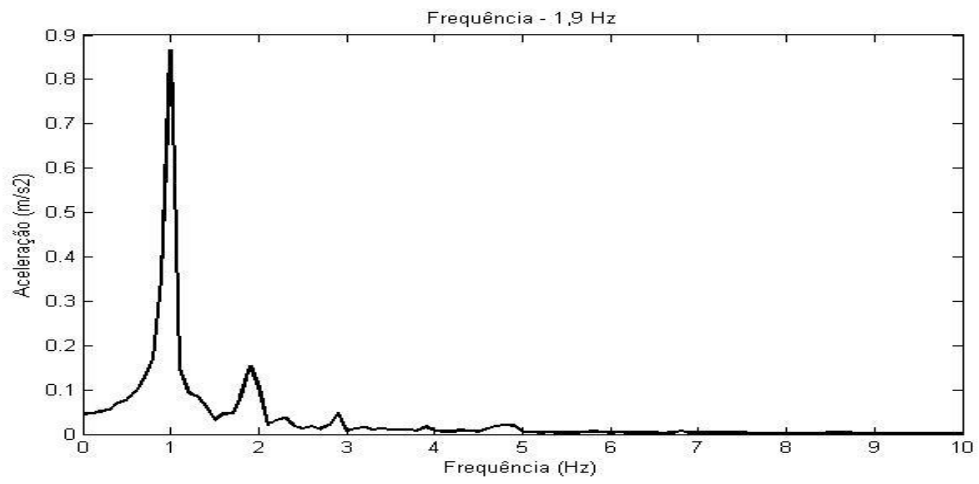


Figura 28 – Caminhada com taxa de passo 1,9 Hz.

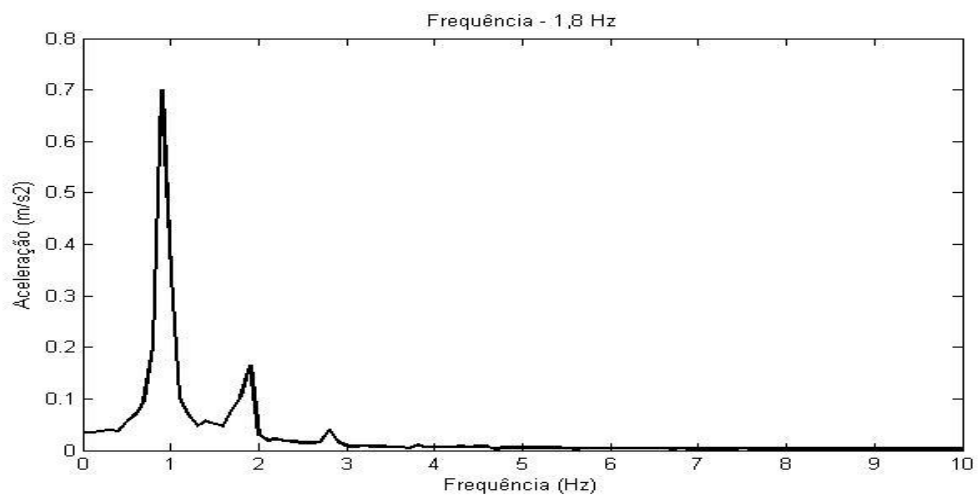
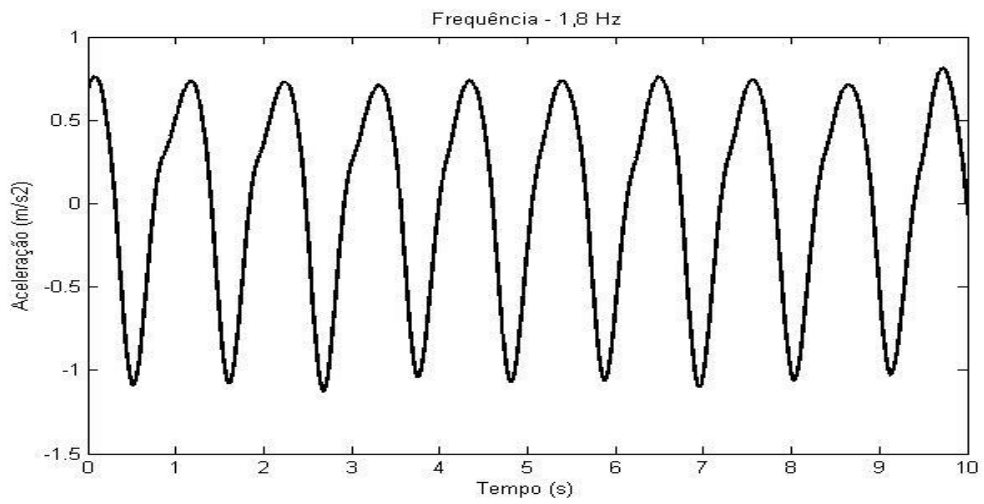


Figura 29 – Caminhada com taxa de passo 1,8 Hz.

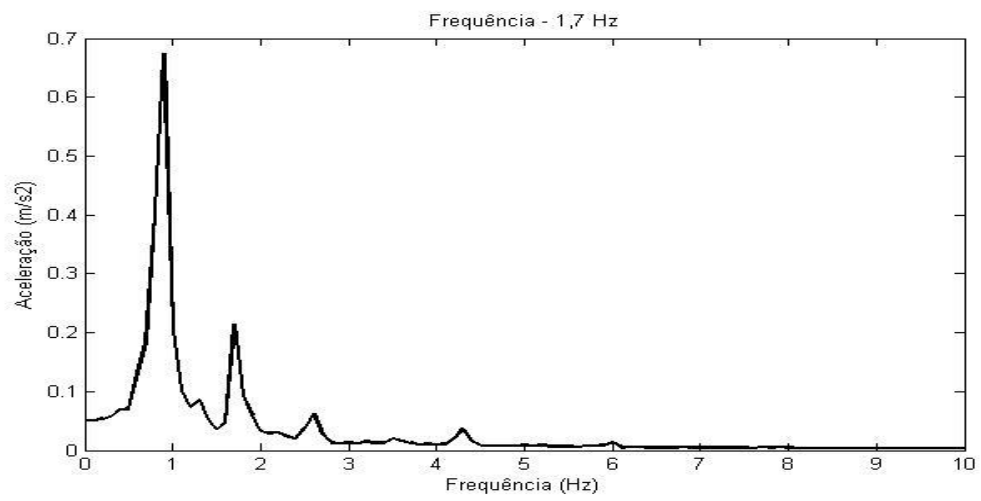
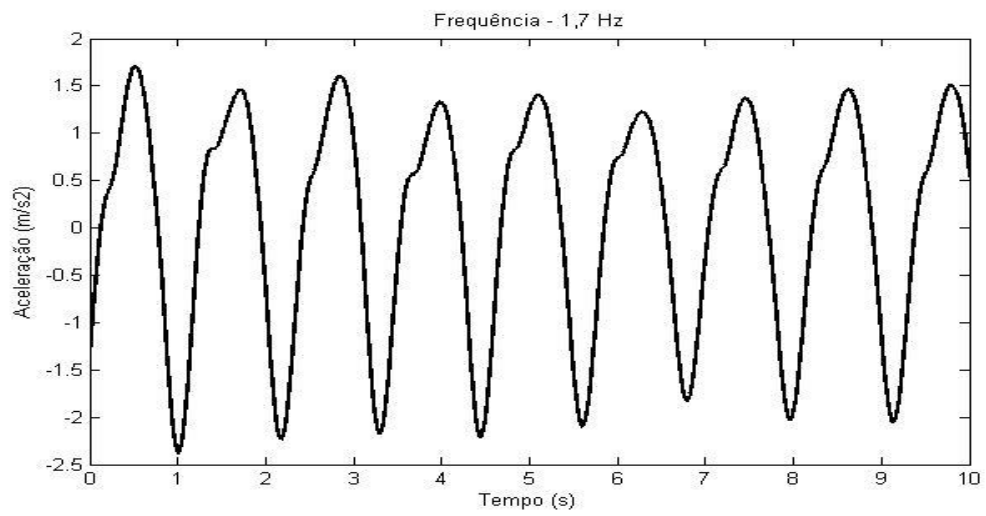
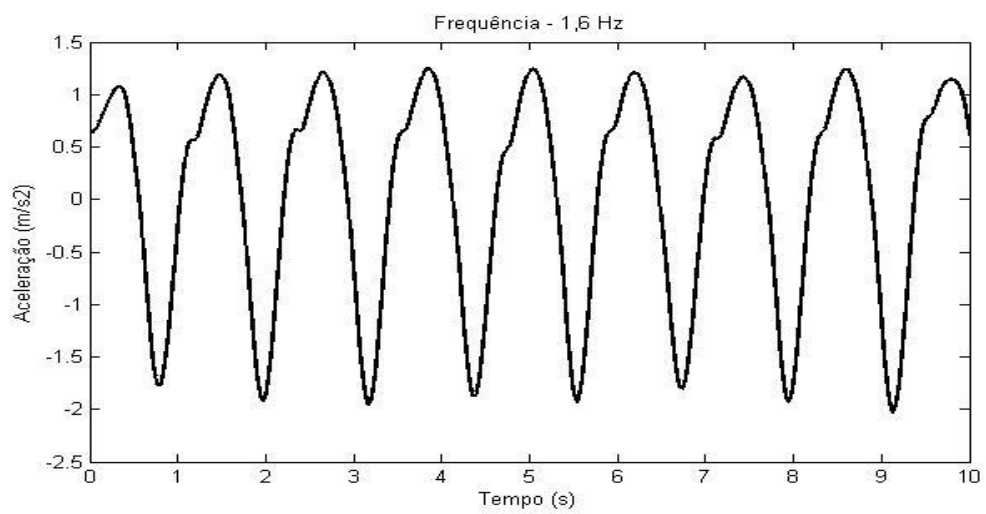


Figura 30 - Caminhada com taxa de passo 1,7 Hz.



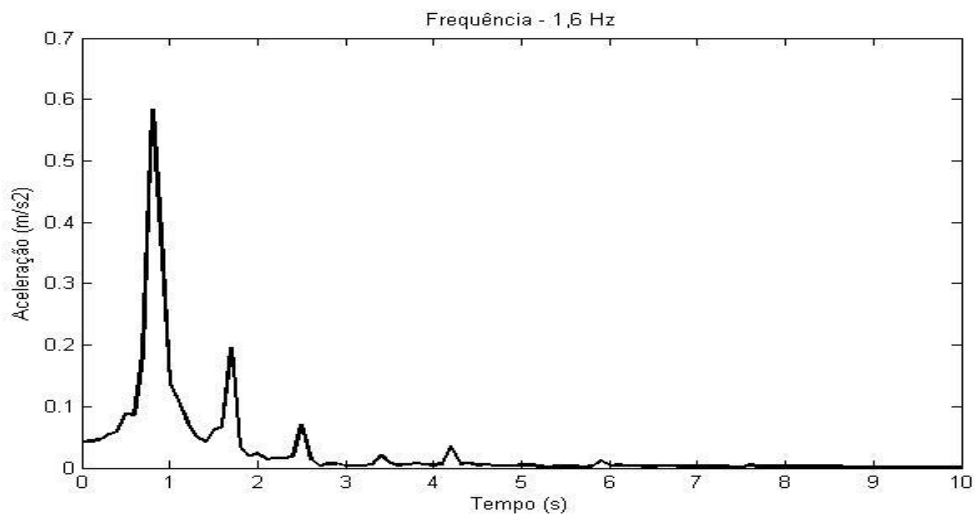


Figura 31 - Caminhada com taxa de passo 1,6 Hz.

Nas tabelas 2-7 são apresentados os valores das variáveis com faixa de taxa de passo utilizada (2,0 Hz, 1,9 Hz, 1,8 Hz, 1,7 Hz e 1,6 Hz) para todos os pedestres utilizados nos experimentos. Nesta situação alguns pontos devem ser destacados: a) o comportamento das variáveis analisadas segue um padrão de crescimento e decrescimento de acordo com a frequência imposta na caminhada para os 6 (seis) pedestres analisados, salvo raras exceções; b) tanto a aceleração total quanto a aceleração translacional decrescem de acordo com a diminuição da taxa de passo; este dado é um indicativo prévio para a situação de multidão, pois como será mostrado a taxa de passo diminui com o aumento da densidade de pedestre; c) em relação aos deslocamentos o comportamento é inverso, este cresce de acordo com a diminuição da taxa de passo.

Tabela 2. Resultados das caminhadas com taxa de passo controlada para o pedestre 01.

Taxa de passo	Aceleração Total (m/s ²)	Aceleração Translacional (m/s ²)	Efeito da Rotação	Deslocamento (cm)	Deslocamento Lateral (cm)	Rotação (radianos)	Rotação (graus)
2,0	0,9856	0,8972	8,97 %	2,4966	2,2725	0,0960	5,5024
1,9	0,9543	0,8559	10,32 %	2,6784	2,4021	0,0926	5,3041
1,8	0,8830	0,7946	10,01 %	2,7613	2,4848	0,0882	5,0555
1,7	0,7904	0,7433	5,96 %	2,7709	2,6058	0,0832	4,7664
1,6	0,6834	0,6620	3,13 %	2,7047	2,6200	0,0797	4,5681

Tabela 3. Resultados das caminhadas com taxa de passo controlada para o pedestre 02.

Taxa de passo	Aceleração Total (m/s ²)	Aceleração Translacional (m/s ²)	Efeito da Rotação	Deslocamento (cm)	Deslocamento Lateral (cm)	Rotação (radianos)	Rotação (graus)
2,0	0,9752	0,8752	10,25 %	2,4703	2,2170	0,0956	5,4761
1,9	0,9373	0,8152	13,02 %	2,6306	2,2881	0,0916	5,2477
1,8	0,8752	0,7951	9,15 %	2,7370	2,4865	0,0887	5,0794
1,7	0,7610	0,7054	7,30 %	2,6680	2,4731	0,0834	4,7794
1,6	0,6776	0,6409	5,42 %	2,6820	2,5367	0,0788	4,5165

Tabela 4. Resultados das caminhadas com taxa de passo controlada para o pedestre 03.

Taxa de passo	Aceleração Total (m/s ²)	Aceleração Translacional (m/s ²)	Efeito da Rotação	Deslocamento (cm)	Deslocamento Lateral (cm)	Rotação (radianos)	Rotação (graus)
2,0	0,9892	0,8658	12,48%	2,5058	2,1931	0,1025	5,8717
1,9	0,9669	0,8530	11,78%	2,7137	2,3941	0,0895	5,1255
1,8	0,9196	0,8099	11,93%	2,8758	2,5327	0,0882	5,0555
1,7	0,8110	0,7556	6,83%	2,8434	2,6491	0,0848	4,8584
1,6	0,7939	0,7504	5,48%	3,1422	2,9698	0,0770	4,4114

Tabela 5. Resultados das caminhadas com taxa de passo controlada para o pedestre 04.

Taxa de passo	Aceleração Total (m/s ²)	Aceleração Translacional (m/s ²)	Efeito da Rotação	Deslocamento (cm)	Deslocamento Lateral (cm)	Rotação (radianos)	Rotação (graus)
2,0	0,9987	0,8827	11,61%	2,5296	2,2359	0,0983	5,6294
1,9	0,9776	0,8610	11,93%	2,7439	2,4165	0,0953	5,4614
1,8	0,8644	0,7727	10,61%	2,7033	2,4165	0,0891	5,1052
1,7	0,7928	0,7194	9,26%	2,7795	2,5220	0,0868	4,9727
1,6	0,6924	0,6401	7,56%	2,7403	2,5333	0,0818	4,6893

Tabela 6. Resultados das caminhadas com taxa de passo controlada para o pedestre 05.

Taxa de passo	Aceleração Total (m/s ²)	Aceleração Translacional (m/s ²)	Efeito da Rotação	Deslocamento (cm)	Deslocamento Lateral (cm)	Rotação (radianos)	Rotação (graus)
2,0	0,9752	0,8621	11,60%	2,4703	2,1837	0,0982	5,6282
1,9	0,9486	0,8543	9,94%	2,6623	2,3978	0,0906	5,1912
1,8	0,7940	0,7208	9,22%	2,4830	2,2541	0,0875	5,0158
1,7	0,7798	0,7201	7,66%	2,7340	2,5246	0,0852	4,8829
1,6	0,6700	0,6501	2,97%	2,6518	2,5730	0,0813	4,6575

Tabela 7. Resultados das caminhadas com taxa de passo controlada para o pedestre 06.

Taxa de passo	Aceleração Total (m/s ²)	Aceleração Translacional (m/s ²)	Efeito da Rotação	Deslocamento (cm)	Deslocamento Lateral (cm)	Rotação (radianos)	Rotação (graus)
2,0	0,9995	0,8707	12,88%	2,5317	2,2055	0,1107	6,3410
1,9	0,9733	0,8608	11,55%	2,7317	2,4161	0,0973	5,5772
1,8	0,9236	0,8198	11,23%	2,8882	2,5638	0,0929	5,3211
1,7	0,9075	0,8365	7,82%	3,1815	2,9328	0,0892	5,1126
1,6	0,8977	0,8501	5,31%	3,5531	3,3644	0,0844	4,8352

4.1.6.CAMINHADAS LIVRES

Aqui serão apresentados os resultados relativos as variáveis para as caminhadas livres, ou seja, cada pedestre caminhando isoladamente sem aglomerações/multidões no mesmo fluxo da caminhada. É importante salientar que o pedestre foi instruído a caminhar de forma natural, conforme o mesmo faz no seu dia-dia. Dado a variação natural que cada pessoa tem na forma de caminhar os valores apresentados podem apresentar discrepâncias entre si. Na tabela 8 é possível visualizar as taxas de passo transversal médio que cada pedestre teve nas suas caminhadas livres. Na coluna de taxa de passo há alguns valores acima de 1 (um), que são taxas de passos acima de 2,0 Hz, como o intervalo de taxa de passo foi de 1,6 a 2,0 Hz, não foi possível afirmar qual o valor exato, mas somente que estava acima de 2,0 Hz. Na mesma tabela também é mostrada as variáveis já apresentadas em seções anteriores: aceleração total e transversal. Deslocamento total e transversal, efeito da rotação e rotação da pélvis.

Tabela 8. Variáveis para caminhadas livres.

	Taxa de passo (Hz)	Aceleração Total (m/s ²)	Aceleração Translacional (m/s ²)	Efeito da Rotação	Deslocamento (cm)	Deslocamento Lateral (cm)	Rotação (radianos)	Rotação (graus)
Pedestre 01	2,0	0,9151	0,8210	10,28%	2,3179	2,0796	0,0951	5,4505
Pedestre 02	1,9	0,9650	0,8667	10,19%	2,7085	2,4325	0,0910	5,2166
Pedestre 03	1,9	0,9373	0,8201	12,50%	2,6306	2,3018	0,0896	5,1348
Pedestre 04	2,0	0,9962	0,8811	11,56%	2,5235	2,2318	0,0977	5,5995
Pedestre 05	2,0	0,9795	0,8697	11,21%	2,4811	2,2030	0,0967	5,5388
Pedestre 06	> 1	0,9422	0,8288	12,03%	2,3865	2,0994	0,0995	5,7021

4.1.7.CAMINHADAS EM MULTIDÃO

Nesta subseção é apresentado e discutido os resultados dos testes experimentais com pedestres submetidos a aglomerações/multidões de pedestres caminhando em fluxo. As densidades de pedestres utilizadas foram de 1,8 e 1,0 pedestres/m². Com os resultados obtidos foi possível analisar: aceleração total, aceleração translacional, deslocamento lateral e rotação da pélvis. Na tabela 9 é apresentado os valores das taxas de passos/frequência de passo de cada pedestre nas suas caminhadas em multidão; estes valores são obtidos a partir das médias de taxa de passo de todas as amostras do pedestre.

Tabela 9. Taxas de passo dos pedestres na multidão.

Taxa de passo (Hz) - Caminhada em Multidão		
	Densidade - 1,8 pedestres/m ²	Densidade - 1,0 pedestres/m ²
Pedestre 01	1,7	1,8
Pedestre 02	1,7	1,8
Pedestre 03	1,6	1,7
Pedestre 04	1,7	1,8
Pedestre 05	1,7	1,8
Pedestre 06	1,8	1,9

- DENSIDADE DE 1,8 pedestres/m²

Nas figuras 32 e 33 são mostrados exemplos (domínio do tempo e frequência) de sinais de um pedestre caminhando em multidão com densidade de 1,8 pedestres/m².

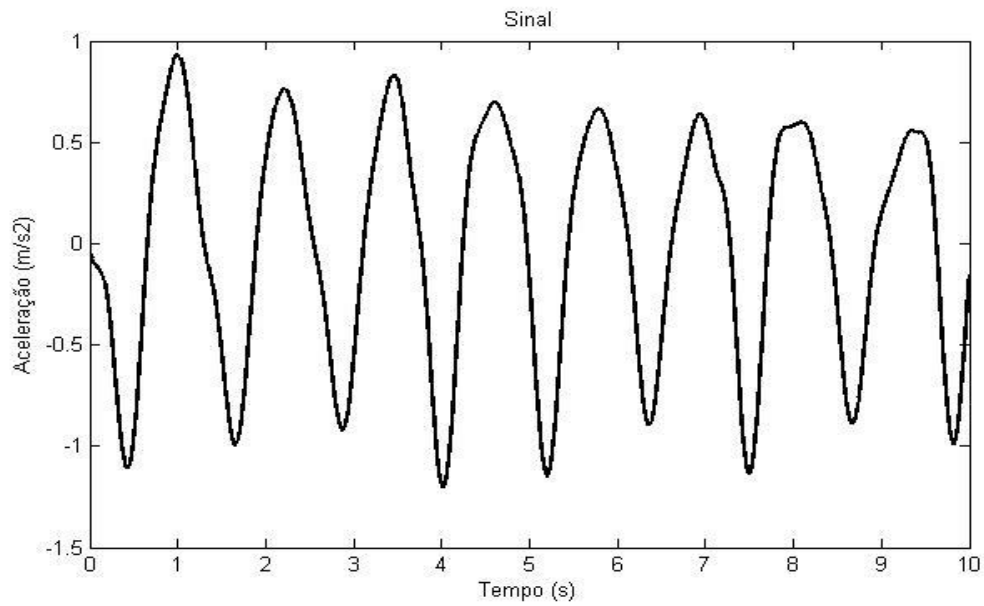


Figura 32 – Sinal na multidão.

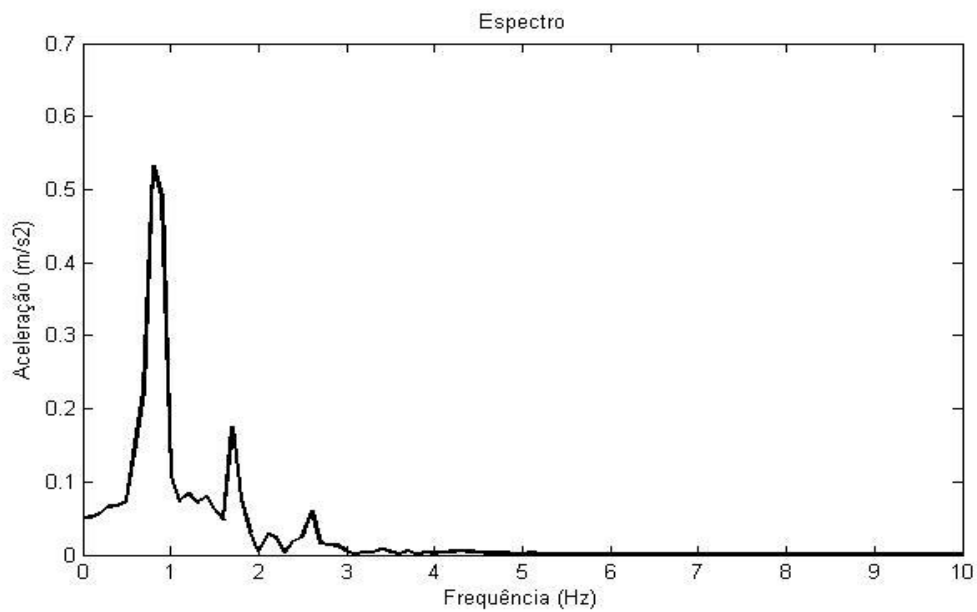


Figura 33 – Espectro na multidão.

Na Tabela 10 são apresentados os valores de acelerações totais (com rotação) e acelerações translacionais (sem Rotação). Estes valores são as médias das amplitudes da aceleração obtidas a partir do espectro dos sinais.

Tabela 10 – Acelerações totais e translacionais em 1,8 ped/m².

Densidade - 1,8 pedestres/m ²		
	Aceleração Total (m/s ²)	Aceleração Translacional (m/s ²)
Pedestre 01	0,7377	0,6441
Pedestre 02	0,6046	0,5406
Pedestre 03	0,5623	0,5177
Pedestre 04	0,6689	0,5437
Pedestre 05	0,7438	0,6341
Pedestre 06	0,6971	0,5739

Na Tabela 11 é apresentado os valores de amplitude de deslocamento. A primeira coluna é referente ao deslocamento total com a rotação inclusa nos valores; a segunda coluna é referente ao deslocamento lateral, com valores sem o efeito da rotação (rotação expurgada).

Tabela 11 – Amplitudes do deslocamento total e transversal em 1,8 ped/m².

Densidade - 1,8 pedestres/m ²		
	Deslocamento (cm)	Deslocamento Lateral (cm)
Pedestre 01	2,7056	2,4335
Pedestre 02	2,1196	1,8953
Pedestre 03	2,2254	2,0489
Pedestre 04	3,0890	2,8976
Pedestre 05	2,9395	2,7442
Pedestre 06	2,8075	2,6895

Na Tabela 12 é apresentado os valores de amplitude da rotação da pélvis em radianos e graus.

Tabela 12 - Amplitude da rotação da pélvis em 1,8 ped/m².

Densidade - 1,8 pedestres/m ²		
	Rotação (radianos)	Rotação (graus)
Pedestre 01	0,0669	3,8355
Pedestre 02	0,0657	3,7671
Pedestre 03	0,0685	3,9272
Pedestre 04	0,0686	3,9325
Pedestre 05	0,0711	4,0755
Pedestre 06	0,0686	3,9291

Na Tabela 13 é apresentado os valores percentuais do efeito da rotação. Estes valores são calculados a partir da diferença entre as acelerações com e sem rotação (aceleração total e translacional, respectivamente).

Tabela 13 – Efeito da rotação em 1,8 ped/m².

Densidade - 1,8 pedestres/m ²	
	Efeito da rotação (%)
Pedestre 01	12,69%
Pedestre 02	10,58%
Pedestre 03	7,93%
Pedestre 04	18,72%
Pedestre 05	14,79%
Pedestre 06	17,67%

- DENSIDADE DE 1,0 pedestres/m²

Na Tabela 14 são apresentados os valores de acelerações totais e acelerações translacionais.

Tabela 14 - Acelerações totais e translacionais em 1,0 ped/m².

Densidade - 1,0 pedestres/m ²		
	Aceleração Total (m/s ²)	Aceleração Translacional (m/s ²)
Pedestre 01	0,7490	0,6531
Pedestre 02	0,6899	0,5562
Pedestre 03	0,5729	0,5083
Pedestre 04	0,7129	0,5977
Pedestre 05	0,7730	0,6937
Pedestre 06	0,7633	0,6140

Na Tabela 15 é apresentado os valores de amplitude do deslocamento.

Tabela 15 - Amplitudes do deslocamento total e transversal em 1,0 ped/m².

Densidade - 1,0 pedestres/m ²		
	Deslocamento (cm)	Deslocamento Lateral (cm)
Pedestre 01	2,3423	2,0423
Pedestre 02	2,0310	1,7393
Pedestre 03	1,9851	1,7821
Pedestre 04	2,6199	2,4772
Pedestre 05	2,4770	2,3782
Pedestre 06	2,5761	2,4189

Na Tabela 16 é apresentado os valores de rotação da pélvis em radianos e graus.

Tabela 16 - Amplitude da rotação da pélvis em 1,0 ped/m².

Densidade - 1,0 pedestres/m ²		
	Rotação (radianos)	Rotação (graus)
Pedestre 01	0,0696	3,9901
Pedestre 02	0,0673	3,8544
Pedestre 03	0,0717	4,1078
Pedestre 04	0,0704	4,0343
Pedestre 05	0,0726	4,1576
Pedestre 06	0,0706	4,0454

Na Tabela 17 é apresentado os valores percentuais do efeito da rotação.

Tabela 17 - Efeito da rotação em 1,0 ped/m².

Densidade - 1,0 pedestres/m ²	
	Efeito da rotação (%)
Pedestre 01	12,81%
Pedestre 02	19,38%
Pedestre 03	11,27%
Pedestre 04	16,16%
Pedestre 05	10,25%
Pedestre 06	19,56%

4.2. ANÁLISE E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A fim de comparar e analisar os dados, na tabela 18 são apresentadas todas as variáveis com rotação expurgada. Desta forma é possível comparar o comportamento da aceleração, deslocamento e rotação em um contexto geral.

Tabela 18 – Variáveis de todos os pedestres com rotação expurgada.

	Aceleração Translacional (m/s ²)		Deslocamento Lateral (cm)		Rotação (radianos)	
	1,8 ped/m ²	1,0 ped/m ²	1,8 ped/m ²	1,0 ped/m ²	1,8 ped/m ²	1,0 ped/m ²
Pedestre 01	0,6441	0,6531	2,4335	2,0423	0,0669	0,0696
Pedestre 02	0,5406	0,5562	1,8953	1,7393	0,0657	0,0673
Pedestre 03	0,5177	0,5083	2,0489	1,7821	0,0685	0,0717
Pedestre 04	0,5437	0,5977	2,8976	2,4772	0,0686	0,0704
Pedestre 05	0,6341	0,6937	2,7442	2,3782	0,0711	0,0726
Pedestre 06	0,5739	0,6140	2,6895	2,4189	0,0686	0,0706

Nas tabelas 19 e 20 são mostrados os valores de acelerações transversais para as caminhadas em multidões juntamente com os valores correspondentes aos valores da taxa de passo que o pedestre que caminhou na multidão. Esta comparação é relevante, pois a partir dela é possível realizar os testes de hipóteses para determinar a influência da multidão na aceleração transversal.

Tabela 19 - Comparação das acelerações transversais na multidão (1,8 ped/m²) e com taxa de passo controlada.

	Aceleração Translacional (m/s ²)	
	1,8 ped/m ²	Taxa de passo
Pedestre 01	0,6441	0,7433
Pedestre 02	0,5406	0,7054
Pedestre 03	0,5177	0,7504
Pedestre 04	0,5437	0,7194
Pedestre 05	0,6341	0,7201
Pedestre 06	0,5739	0,8198

Tabela 20 - Comparação das acelerações transversais na multidão (1,0 ped/m²) e com taxa de passo controlada.

	Aceleração Translacional (m/s ²)	
	1,0 ped/m ²	Taxa de passo
Pedestre 01	0,6531	0,7946
Pedestre 02	0,5562	0,7951
Pedestre 03	0,5083	0,7556
Pedestre 04	0,5977	0,7727
Pedestre 05	0,6937	0,7208
Pedestre 06	0,6140	0,8608

Para efeito de comparação com os resultados coletados são apresentados resultados de trabalhos anteriores. Na tabela 21 são apresentados os resultados de testes de deslocamentos laterais para movimentos de caminhada. Visualizando a tabela pode ser observado o comportamento do deslocamento lateral com a variação da densidade de pedestres; com multidões mais densas (1,8 ped/m²) o deslocamento aumenta (4,39 cm) e menos densas (1,0 ped/m²) diminui (3,75 cm). É o mesmo comportamento obtido neste trabalho.

Tabela 21 - Resultados de testes de deslocamento lateral para movimentos de caminhada (Retirado de Pimentel et al., 2013).

Densidade de pedestres ped/m ²	Nº de pedestres envolvidos	Média do deslocamento lateral máximo (cm)	Desvio padrão (cm)
0,3	83	1,82	0,88
0,7	142	2,68	1,34
0,9	158	3,19	1,66
1	123	3,75	1,95
1,8	63	4,39	2,27

Os valores obtidos de deslocamento lateral apresentados na tabela 21 são obtidos a partir do deslocamento de um ponto na face do pedestre ao passo que os aqui investigados são ao nível do centro de massa. Isto pode explicar a diferença nos valores relatados na tabela 21 e os aqui obtidos, com os primeiros sendo mais elevados.

A partir do conteúdo experimental analisado e apresentado neste tópico, é possível afirmar:

- A aceleração transversal tende a diminuir com o aumento da densidade de multidão, ou seja, a aceleração transversal é maior em aglomerações menos densas;

- O deslocamento transversal tende a aumentar com o aumento da densidade de multidão, ou seja, o deslocamento transversal é maior em aglomerações mais densas;
- A rotação da pélvis tende a aumentar com a diminuição da densidade de multidão, ou seja, a rotação da pélvis é maior em aglomerações menos densas.

CAPÍTULO V

CONCLUSÃO

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

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 pela densificação 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 para o pedestre, 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.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, D. (1990). *Building Vibrations from Human Activities*. Ottawa: Concrete International: Design & Construction. Vol. 12, No. 6. 66-73.
- Amadio, A. C., Costa, P. H., Sacco, I. C., & S. J. (1998). Introdução à Análise do Movimento Humano - Descrição e Aplicação dos Métodos Biomecânicos de Medição. *Revista Brasileira de Fisioterapia*, 41-54.
- Araújo, A. (2004). Sistema para análise cinemática da marcha humana baseado em videogrametria. *Fisioterapia Vol. 4*. Número 1.
- Bharatkumar, A., Daigle, K., Pandy, M., Cai, Q., Aggarwal, J. (1994). Lower limb kinematics of human walking with the medial axis transformation. *Motion of Non-Rigid and Articulated Objects*. pp. 70-76.
- Bradley, G. (1993). A Proposed Mathematical Model for Computer Prediction of Crowd Movements and their Associated Risks. *International conference, Engineering for crowd safety* (pp. 303-312). London: Elsevier.
- Caetano, E. C. (2011). Vandals Loads and Induced Vibrations on a Footbridge. *Journal of Bridge Engineering, Vol 16*, pp. 375-382.
- Caprani, C., Keogh, J., Archbold, P., Fanning, P. (2011). Characteristic Vertical Response of a Footbridge Due to Crowd Loading. *Proceedings of the 8th International Conference on Structural Dynamics, EURODYN*, (pp. 978-985). Leuven; Belgium.
- Collins, S. H. (2008). *Dynamic Walking Principles Applied to Human Gait*. The University of Michigan.
- Ebrahimpour, A. (1992). Design Live Loads for Coherent Crowd Harmonic Movements. *American Society of Civil Engineers, Journal of Structural Engineering*. Vol. 118. 1121-1136.
- Fernandes, A., Comunello, E., Machado, F. (2012). Análise do Movimento Humano por Videogrametria. *Simpósio de Excelência em Gestão e tecnologia*.

- Fujino, Y., Pacheco, B., Nakamura, S., Warchitahai, P. (1993). *Synchronization of human walking observed during lateral vibration of a congested pedestrian bridge*. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. Vol. 22, 741-758.
- Hicks, S., Feldmann, M., Heinemeyer, C., Lukic, M. (2010). *Human induced Vibrations of Steel Structures*. Luxemburgo: European Communities.
- Hughes, R. (2003). The flow of human crowds. *Annual Review of Fluid Mech*, Vol. 35. 169–182.
- Lakany, H. (2000). A generic kinematic pattern for human walking. *Neurocomputing* , pp. 27-54.
- Medved, V. (2001). *Measurement of Human Locomotion*. Boca Raton: CRC Press.
- Mündermann, L. (2005). The Evolution of Methods for the Capture of Human Movement Leading to Markerless Motion Capture for Biomechanical Applications . *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*. Vol. 3, 3-6.
- Norkin, C., Levangie, P. (2005). *Joint Structure and Function*. Philadelphia: Davis Company.
- Oppenheim, A., Willsky, A. (2010). *Sinais e Sistemas 2ª Edição*. São Paulo: Pearson.
- Peterka, R.(2002). Sensorimotor Integration in Human Postural Control. *Neurological Sciences Institute, Oregon Health & Science University*, pp. 1097–1118.
- Pimentel, R., Pavic, A., Waldron, P. (2001). Evaluation of Design Requirements for Footbridges Excited by. *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 28, pp. 769-777.
- Pimentel, R., Araújo, M., Brito, H., Brito, J. (2013). Synchronization Among Pedestrians in Footbridges due to Crowd density. *Journal of Bridge Enginring*, Vol 18, pp. 400-408.
- Pinheiro, A., Santos,S., Pereira, A., Andrade, A. (2013). Sistema óptico-eletrônico para reconstrução tridimensional do movimento humano e quantificação de sua cinemática articular. *Brazilian Journal of Biomechanics*, Vol. 14, n. 26.

- Qin, J., Law, S., Yang, Q., Yang, N. (2013). Pedestrian – Bridge Dynamic Interaction, Including Human Participation. *Journal of Sound and Vibration*. Vol. 332, pp. 1107-1124.
- Racic, V. M. (2014). Data-Driven Modelling of Vertical Dynamic Excitation of Bridges Induced by People. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 43, pp. 153-170.
- Racic, V., Pavic, A., Brownjohn (2009). Experimental Identification and Analytical Modelling of Human. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 326, pp. 1-49.
- Racic, V; Pavic, A. (2010). Stochastic Approach to Modelling of Near-Periodic Jumping Loads. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 24. pp. 3037-3059.
- Roloff, M. E. (1981). *Interpersonal Communication: The Social Exchange Approach*. Universidade da Califórnia: SAGE Publications.
- Rose, J., Gamble, J. (2006). *Human Walking*. Philadelphia: lippincott williams & wilkins.
- Sachse, R., Pavić, A., Reynolds, P. (2003). Human-structure dynamic interaction in civil engineering dynamics: A literature review. *Shock and Vibration Digest*, 3-18.
- Saini, M., Kerrigan, D., Thirunarayan, M., Duff, R. (1998). The Vertical Displacement of the Center of Mass During Walking: A Comparison of Four Measurement Methods. *Journal of Biomechanical Engineering*, 133-139.
- Saunders, M., Inman, V., Eberhart, H. (2010). The Major Determinants in Normal and Pathological Gait. *The Journal of Bone and Joint Surgery*, pp. 543-558.
- Seyfried, A., Steffen, B., Lippert, T. (2008). Basics of Modelling the Pedestrian Flow. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. Vol. 368. 232-238
- Silva, F., Pimentel, R. (2011). Biodynamic Walking Model for Vibration on Serceability of a Footbridges. In *EURODYN 2011 Proceedings of the 8th International Conference on Structure Dynamics*. Leuven, Bélgica.

- Silva, F. T. (2011). *Vibrações de passarelas de pedestres na direção vertical considerando modelos biodinâmicos de pessoas caminhando*. João Pessoa: Tese de Doutorado - UFPB.
- Silva, F., Brito, H., Pimentel, R. (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.
- Stapley, P., Pozzo, T., Grishin, A., Chéron, A. (1999). Does the coordination between posture and movement during whole-body reaching ensure centre of mass stabilisation?. *Experimental Brain Research*, 136-146.
- Winter, D., Eng, J. (1993). Estimations of the horizontal displacement of the total body centre of mass: considerations during standing. *Gait & Posture*, 141-144.
- Winter, D. A. (1995). Human Balance and Posture Control during Standing and Walking. *Gait & Posture*, 193-214.
- Zivanovic, S., Pavic, A., Reynolds, P. (2005). Human-Structure Dynamic Interaction in Footbridges. *Bridge Engineering*. Vol. 158. pp 165-177.

APÊNDICES

APÊNDICE I - CÁLCULO DOS ESPECTROS DOS SINAIS

```
% _____  
%LIMPA A ÁREA DE TRABALHO  
clear all  
close all  
clc  
% _____  
%CARREGA OS DADOS COLETADOS  
load caminhada_1.lvm  
load caminhada_2.lvm  
load caminhada_3.lvm  
load caminhada_4.lvm  
load caminhada_5.lvm  
load caminhada_6.lvm  
load caminhada_7.lvm  
load caminhada_8.lvm  
load caminhada_9.lvm  
load caminhada_10.lvm  
load caminhada_11.lvm  
load caminhada_12.lvm  
% _____  
% AMPLITUDES DO SINAL ACELERÔMETRO FRONTAL  
y1f=caminhada_1(:,1);  
y2f=caminhada_1(:,1);  
y3f=caminhada_1(:,1);  
y4f=caminhada_1(:,1);  
y5f=caminhada_1(:,1);  
y6f=caminhada_1(:,1);  
y7f=caminhada_1(:,1);  
y8f=caminhada_1(:,1);
```

```

y9f=caminhada_1(:,1);
y10f=caminhada_1(:,1);
y11f=caminhada_1(:,1);
y12f=caminhada_1(:,1);
%_____
% AMPLITUDES DO SINAL ACELERÔMETRO TRASEIRO
y1t=caminhada_1(:,1);
y2t=caminhada_1(:,1);
y3t=caminhada_1(:,1);
y4t=caminhada_1(:,1);
y5t=caminhada_1(:,1);
y6t=caminhada_1(:,1);
y7t=caminhada_1(:,1);
y8t=caminhada_1(:,1);
y9t=caminhada_1(:,1);
y10t=caminhada_1(:,1);
y11t=caminhada_1(:,1);
y12t=caminhada_1(:,1);
%_____
% AMPLITUDES DO SINAL
y1=(y1f+y1t)/2;
y2=(y2f+y2t)/2;
y3=(y3f+y3t)/2;
y4=(y4f+y4t)/2;
y5=(y5f+y5t)/2;
y6=(y6f+y6t)/2;
y7=(y7f+y7t)/2;
y8=(y8f+y8t)/2;
y9=(y9f+y9t)/2;
y10=(y10f+y10t)/2;
y11=(y11f+y11t)/2;
y12=(y12f+y12t)/2;
%_____

```

%TAXA DE AMOSTRAGEM

fa=250;

dt=1/fa;

%

%TAMANHO DA AMOSTRA

N1=length(y1);

N2=length(y1);

N3=length(y1);

N4=length(y1);

N5=length(y1);

N6=length(y1);

N7=length(y1);

N8=length(y1);

N9=length(y1);

N10=length(y1);

N11=length(y1);

N12=length(y1);

%

%PERÍODO

T1=N1*dt;

T2=N2*dt;

T3=N3*dt;

T4=N4*dt;

T5=N5*dt;

T6=N6*dt;

T7=N7*dt;

T8=N8*dt;

T9=N9*dt;

T10=N10*dt;

T11=N11*dt;

T12=N12*dt;

%

%PARÂMETROS DE FREQUÊNCIA

```

df1=1/T1;
df2=1/T1;
df3=1/T1;
df4=1/T1;
df5=1/T1;
df6=1/T1;
df7=1/T1;
df8=1/T1;
df9=1/T1;
df10=1/T1;
df11=1/T1;
df12=1/T1;
%_____
%INTERVALO DE TEMPO
t1=linspace(0,T1,N1);
t2=linspace(0,T1,N1);
t3=linspace(0,T1,N1);
t4=linspace(0,T1,N1);
t5=linspace(0,T1,N1);
t6=linspace(0,T1,N1);
t7=linspace(0,T1,N1);
t8=linspace(0,T1,N1);
t9=linspace(0,T1,N1);
t10=linspace(0,T1,N1);
t11=linspace(0,T1,N1);
t12=linspace(0,T1,N1);
%_____
%INTERVALO DE FREQUÊNCIA
freq1=linspace(0,fa,N1);
freq2=linspace(0,fa,N2);
freq3=linspace(0,fa,N3);
freq4=linspace(0,fa,N4);
freq5=linspace(0,fa,N5);

```

```

freq6=linspace(0,fa,N6);
freq7=linspace(0,fa,N7);
freq8=linspace(0,fa,N8);
freq9=linspace(0,fa,N9);
freq10=linspace(0,fa,N10);
freq11=linspace(0,fa,N11);
freq12=linspace(0,fa,N12);
%_____

%FFT DOS SINAIS
fftsinal1=((abs(fft(y1)))/N1)*2;
fftsinal2=((abs(fft(y1)))/N1)*2;
fftsinal3=((abs(fft(y1)))/N1)*2;
fftsinal4=((abs(fft(y1)))/N1)*2;
fftsinal5=((abs(fft(y1)))/N1)*2;
fftsinal6=((abs(fft(y1)))/N1)*2;
fftsinal7=((abs(fft(y1)))/N1)*2;
fftsinal8=((abs(fft(y1)))/N1)*2;
fftsinal9=((abs(fft(y1)))/N1)*2;
fftsinal10=((abs(fft(y1)))/N1)*2;
fftsinal11=((abs(fft(y1)))/N1)*2;
fftsinal12=((abs(fft(y1)))/N1)*2;
%_____

%PLOTA OS SINAIS NO DOMINIO DO TEMPO
figure(1.1)
plot(t1,y1)
xlabel('Tempo (s)')
ylabel('Aceleração (m/s2)')
title('Sinal – caminhada 01')
grid on
figure(1.2)
plot(t2,y2)
xlabel('Tempo (s)')
ylabel('Aceleração (m/s2)')

```

```
title('Sinal – caminhada 02')
grid on
figure(1.3)
plot(t3,y3)
xlabel('Tempo (s)')
ylabel('Aceleração (m/s2)')
title('Sinal – caminhada 03')
grid on
figure(1.4)
plot(t4,y4)
xlabel('Tempo (s)')
ylabel('Aceleração (m/s2)')
title('Sinal – caminhada 04')
grid on
figure(1.5)
plot(t5,y5)
xlabel('Tempo (s)')
ylabel('Aceleração (m/s2)')
title('Sinal – caminhada 05')
grid on
figure(1.6)
plot(t6,y6)
xlabel('Tempo (s)')
ylabel('Aceleração (m/s2)')
title('Sinal – caminhada 06')
grid on
figure(1.7)
plot(t7,y7)
xlabel('Tempo (s)')
ylabel('Aceleração (m/s2)')
title('Sinal – caminhada 07')
grid on
figure(1.8)
```

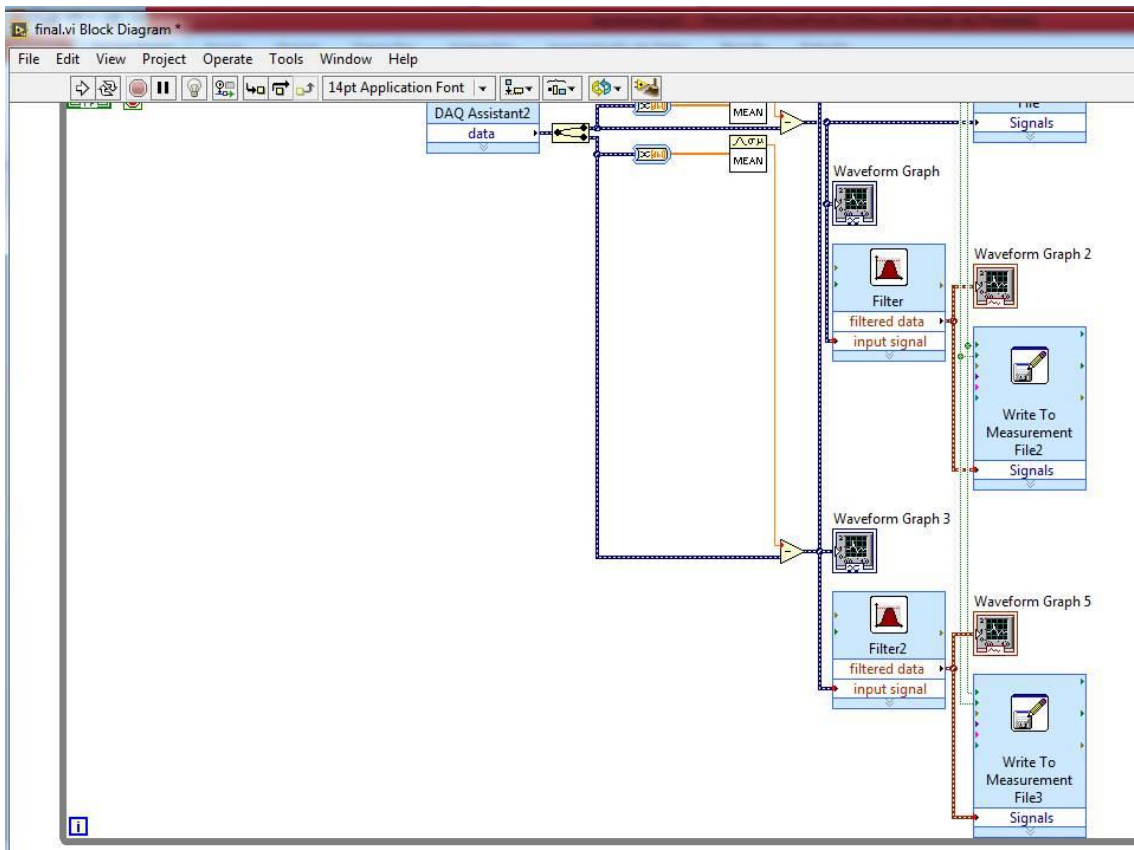
```

plot(t8,y8)
xlabel('Tempo (s)')
ylabel('Aceleração (m/s2)')
title('Sinal – caminhada 08')
grid on
figure(1.9)
plot(t9,y9)
xlabel('Tempo (s)')
ylabel('Aceleração (m/s2)')
title('Sinal – caminhada 09')
grid on
figure(1.10)
plot(t10,y10)
xlabel('Tempo (s)')
ylabel('Aceleração (m/s2)')
title('Sinal – caminhada 10')
grid on
figure(1.11)
plot(t11,y11)
xlabel('Tempo (s)')
ylabel('Aceleração (m/s2)')
title('Sinal – caminhada 11')
grid on
figure(1.12)
plot(t12,y12)
xlabel('Tempo (s)')
ylabel('Aceleração (m/s2)')
title('Sinal – caminhada 12')
grid on
%_____
%PLOTA OS SINAIS NO DOMINIO DA FREQUÊNCIA
figure(2.1)
plot(freq1,fftsinal1)

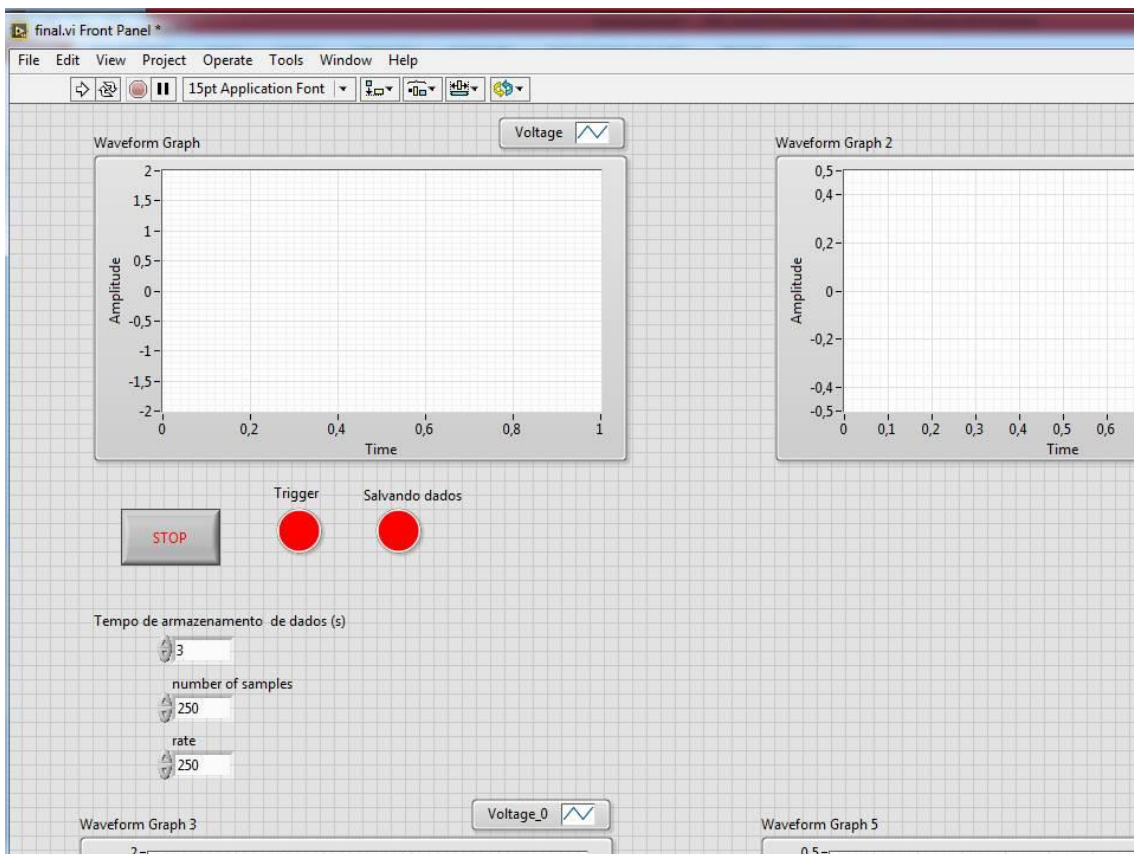
```

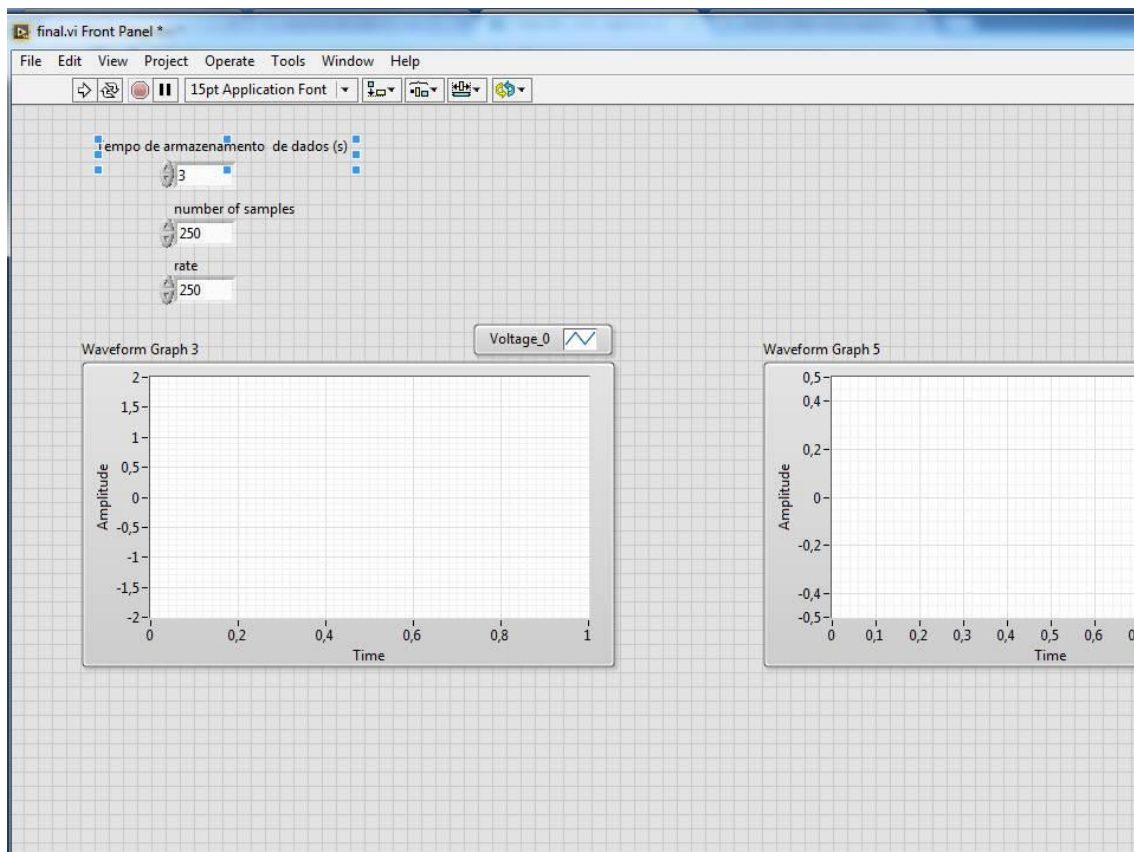
```
xlabel('Frequência (Hz)')
ylabel('Aceleração (m/s2)')
title('Espectro – caminhada 01')
grid on
figure(2.2)
plot(freq2,fftsinal2)
xlabel('Frequência (Hz)')
ylabel('Aceleração (m/s2)')
title('Espectro – caminhada 02')
grid on
figure(2.3)
plot(freq3,fftsinal3)
xlabel('Frequência (Hz)')
ylabel('Aceleração (m/s2)')
title('Espectro – caminhada 03')
grid on
figure(2.4)
plot(freq4,fftsinal4)
xlabel('Frequência (Hz)')
ylabel('Aceleração (m/s2)')
title('Espectro – caminhada 04')
grid on
figure(2.5)
plot(freq5,fftsinal5)
xlabel('Frequência (Hz)')
ylabel('Aceleração (m/s2)')
title('Espectro – caminhada 05')
grid on
figure(2.6)
plot(freq6,fftsinal6)
xlabel('Frequência (Hz)')
ylabel('Aceleração (m/s2)')
title('Espectro – caminhada 06')
```

```
grid on
figure(2.7)
plot(freq7,fftsinal7)
xlabel('Frequência (Hz)')
ylabel('Aceleração (m/s2)')
title('Espectro – caminhada 07')
grid on
figure(2.8)
plot(freq8,fftsinal8)
xlabel('Frequência (Hz)')
ylabel('Aceleração (m/s2)')
title('Espectro – caminhada 08')
grid on
figure(2.9)
plot(freq9,fftsinal9)
xlabel('Frequência (Hz)')
ylabel('Aceleração (m/s2)')
title('Espectro – caminhada 09')
grid on
figure(2.10)
plot(freq10,fftsinal10)
xlabel('Frequência (Hz)')
ylabel('Aceleração (m/s2)')
title('Espectro – caminhada 10')
grid on
figure(2.11)
plot(freq11,fftsinal11)
xlabel('Frequência (Hz)')
ylabel('Aceleração (m/s2)')
title('Espectro – caminhada 11')
grid on
figure(2.12)
plot(freq12,fftsinal12)
```

APÊNDICE III – BLOCO DE DIAGRAMA DO PROGRAMA DE AQUISIÇÃO





APÊNDICE IV – PARAMETROS DAS CAMINHADAS EM MULTIDÃO DE DENSIDADE DE 1,8 pedestres/m²

Pedestre 01					
	Aceleração Total	Aceleração Translacional	Deslocamento Total	Deslocamento Transversal	Rotação
C_01	0,780718	0,742114865	0,0273714	0,026018	0,1413308
C_02	0,671537	0,598056605	0,0235436	0,0209674	0,1569778
C_03	0,876389	0,695822692	0,0307255	0,024395	0,1672002
C_04	0,89033	0,693754283	0,0312143	0,0243225	0,1857991
C_05	0,760713	0,723113778	0,02667	0,0253518	0,1388956
C_06	0,844904	0,796196846	0,0296217	0,0279141	0,1708728
C_07	0,78257	0,748167253	0,0274363	0,0262302	0,1332791
C_08	0,750344	0,686716795	0,0263065	0,0240758	0,1897484
C_09	0,792563	0,729832078	0,0277867	0,0255874	0,1796066
C_10	0,718261	0,64097247	0,0251817	0,022472	0,1943441
C_11	0,786247	0,741476666	0,0275652	0,0259956	0,15165
C_12	0,72483	0,588635502	0,025412	0,0206371	0,2844373
C_13	0,701171	0,654266217	0,0245825	0,0229381	0,1484367
C_14	0,67441	0,607905717	0,0236443	0,0213127	0,198666

C_15	0,820797	0,764778516	0,0287765	0,0268125	0,1769838
------	----------	-------------	-----------	-----------	-----------

Pedestre 02					
	Aceleração Total	Aceleração Translacional	Deslocamento Total	Deslocamento Transversal	Rotação
C_01	0,506814383	0,474448572	0,5068144	0,4744486	0,1529318
C_02	0,644711374	0,494139223	0,6447114	0,4941392	0,2072002
C_03	0,573990213	0,573990213	0,5739902	0,5739902	0,1697899
C_04	0,46957075	0,46957075	0,4695708	0,4695708	0,160779
C_05	0,696278777	0,58032344	0,6962788	0,5803234	0,195569
C_06	0,609493347	0,5063116	0,6094933	0,5063116	0,1668565
C_07	0,581158332	0,532514232	0,5811583	0,5325142	0,1521122
C_08	0,735687603	0,65810707	0,7356876	0,6581071	0,1705447
C_09	0,596803095	0,596803095	0,5968031	0,5968031	0,2101302
C_10	0,60907087	0,471355898	0,6090709	0,4713559	0,1985019
C_11	0,626678684	0,589170814	0,6266787	0,5891708	0,155156

Pedestre 03					
	Aceleração Total	Aceleração Translacional	Deslocamento Total	Deslocamento Transversal	Rotação
C_01	0,71883	0,651858068	0,0284503	0,0257996	0,2546622
C_02	0,453455	0,408226414	0,0179471	0,016157	0,1969125
C_03	0,682145	0,633973163	0,0269983	0,0250918	0,2243884
C_04	0,468993	0,450687685	0,0185621	0,0178376	0,1330001
C_05	0,547757	0,505944275	0,0216795	0,0200246	0,1758907
C_06	0,63579	0,586403512	0,0251637	0,023209	0,2379121
C_07	0,603692	0,574788089	0,0238933	0,0227493	0,1603931
C_08	0,496399	0,470548932	0,0196468	0,0186237	0,1341064
C_09	0,457081	0,392467179	0,0180906	0,0155333	0,1997383
C_10	0,614009	0,563492472	0,0243016	0,0223022	0,2434619
C_11	0,537803	0,490226556	0,0212855	0,0194025	0,1890899
C_12	0,531379	0,483381874	0,0210312	0,0191316	0,1932457

Pedestre 04					
	Aceleração Total	Aceleração Translacional	Deslocamento Total	Deslocamento Transversal	Rotação
C_01	0,054112	0,035110985			0,2614163
C_02	0,060409	0,037009553			0,3091457

C_03	0,048985	0,035908921			0,2516394
C_04	0,047102	0,040527895			0,2343872
C_05	0,037802	0,030119682			0,1954872
C_06	0,045465	0,030591141			0,2440519
C_07	0,059958	0,048831983			0,299872
C_08	0,045865	0,03763183			0,240697
C_09	0,057127	0,03763183			0,2680707
C_10	0,075814	0,050152986			0,3907003
C_11	0,060895	0,052626482			0,2676698
C_12	0,069449	0,047122502			0,3454031

Pedestre 05					
	Aceleração Total	Aceleração Translacional	Deslocamento Total	Deslocamento Transversal	Rotação
C_01	0,061052	0,060952561			0,3187478
C_02	0,078108	0,078066755			0,4084913
C_03	0,052571	0,052570075			0,2778943
C_04	0,075924	0,07584339			0,3982497
C_05	0,082984	0,082864429			0,4310959
C_06	0,086874	0,0868612			0,4505498
C_07	0,080588	0,080550411			0,4198736
C_08	0,083158	0,083053972			0,434786
C_09	0,082225	0,082163691			0,4285122
C_10	0,091005	0,090984339			0,4702151
C_11	0,089407	0,089393135			0,4635365
C_12	0,087912	0,087788401			0,4572789

Pedestre 06					
	Aceleração Total	Aceleração Translacional	Deslocamento Total	Deslocamento Transversal	Rotação
C_01					
C_02					
C_03					
C_04					
C_05					
C_06					
C_07					
C_08					
C_09					

C_10					
C_11					
C_12					

APÊNDICE V – PARAMETROS DAS CAMINHADAS EM MULTIDÃO DE DENSIDADE DE 1,0 pedestres/m²

Pedestre 01					
	Aceleração Total	Aceleração Translacional	Deslocamento Total	Deslocamento Transversal	Rotação
C_01	0,778787	0,696305275	0,0243542	0,0217748	0,2195644
C_02	0,699849	0,62592496	0,0218857	0,0195739	0,1908422
C_03	0,762562	0,651752424	0,0238468	0,0203816	0,2454057
C_04	0,798316	0,699486501	0,0249649	0,0218743	0,250009
C_05	0,856271	0,780254949	0,0267773	0,0244001	0,2133831
C_06	0,781751	0,708347384	0,0244469	0,0221514	0,2195644
C_07	0,798562	0,697640975	0,0249726	0,0218166	0,2291958
C_08	0,594527	0,536169042	0,018592	0,0167671	0,1735813
C_09	0,704499	0,58604426	0,0220311	0,0183268	0,235313
C_10	0,745978	0,650338813	0,0233282	0,0203374	0,2258761
C_11	0,688132	0,604290291	0,0215192	0,0188973	0,2112289
C_12	0,677141	0,526862707	0,0211755	0,016476	0,2649357
C_13	0,886612	0,774058884	0,0277261	0,0242063	0,2531252
C_14	0,669257	0,567610838	0,020929	0,0177503	0,2278929
C_15	0,793091	0,691284105	0,0248015	0,0216178	0,2527488

Pedestre 02					
	Aceleração Total	Aceleração Translacional	Deslocamento Total	Deslocamento Transversal	Rotação
C_01	0,711158	0,562002441	0,0222393	0,0175749	0,2242473
C_02	0,70191	0,636522527	0,0219501	0,0199053	0,157721
C_03	0,534415	0,438512602	0,0167122	0,0137132	0,1520189
C_04	0,567882	0,441719343	0,0177588	0,0138134	0,1763646
C_05	0,751435	0,586373503	0,0234988	0,0183371	0,2369058
C_06	0,716985	0,589154883	0,0224215	0,018424	0,2276448
C_07	0,867288	0,650007373	0,0271218	0,020327	0,2903232
C_08	0,807583	0,673206159	0,0252547	0,0210525	0,2391666
C_09	0,689862	0,576347447	0,0215734	0,0180235	0,1934497
C_10	0,512474	0,447628181	0,0160261	0,0139982	0,145929

C_11	0,673089	0,495272575	0,0210488	0,0154881	0,2293437
C_12	0,774385	0,605607852	0,0242165	0,0189386	0,2458289
C_13	0,513744	0,419329774	0,0160658	0,0131133	0,1623303
C_14	0,790159	0,648400828	0,0247098	0,0202768	0,2398848
C_15	0,736734	0,572537508	0,0230391	0,0179044	0,2321135

Pedestre 03					
	Aceleração Total	Aceleração Translacional	Deslocamento Total	Deslocamento Transversal	Rotação
C_01	0,600414	0,549326116	0,0210501	0,019259	0,2191544
C_02	0,564833	0,530817785	0,0198026	0,0186101	0,1665406
C_03	0,686545	0,6259725	0,0240698	0,0219461	0,2278919
C_04	0,505595	0,425326981	0,0177258	0,0149116	0,180925
C_05	0,7364	0,692628467	0,0258176	0,024283	0,2096489
C_06	0,578497	0,522561552	0,0202817	0,0183206	0,1706598
C_07	0,53611	0,459146122	0,0187956	0,0160973	0,1922301
C_08	0,377479	0,336843439	0,0132341	0,0118095	0,1278222
C_09	0,626787	0,584061158	0,0219747	0,0204767	0,2095781
C_10	0,56441	0,486800688	0,0197878	0,0170669	0,2063693
C_11	0,539118	0,517723505	0,0189011	0,018151	0,1720315
C_12	0,478266	0,368691526	0,0167676	0,012926	0,2104711

Pedestre 04					
	Aceleração Total	Aceleração Translacional	Deslocamento Total	Deslocamento Transversal	Rotação
C_01	0,057761	0,053051665			0,2726594
C_02	0,038942	0,033185204			0,1893739
C_03	0,065957	0,055846099			0,2939952
C_04	0,077187	0,052363535			0,3830763
C_05	0,061244	0,054575008			0,2971107
C_06	0,072512	0,056355612			0,3451228
C_07	0,057577	0,043544302			0,3032743
C_08	0,071565	0,066267329			0,2978621
C_09	0,054496	0,050209067			0,2861677
C_10	0,063537	0,055463235			0,2778222
C_11	0,061861	0,047711695			0,2975918
C_12	0,086329	0,057506666			0,4311478

Pedestre 05					
	Aceleração Total	Aceleração Translacional	Deslocamento Total	Deslocamento Transversal	Rotação
C_01					
C_02					
C_03					
C_04					
C_05					
C_06					
C_07					
C_08					
C_09					
C_10					
C_11					
C_12					

Pedestre 06					
	Aceleração Total	Aceleração Translacional	Deslocamento Total	Deslocamento Transversal	Rotação
C_01					
C_02					
C_03					
C_04					
C_05					
C_06					
C_07					
C_08					
C_09					
C_10					
C_11					
C_12					
C_13					
C_14					
C_15					