

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO  
SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**ESTUDO DAS VIBRAÇÕES INDUZIDAS AO  
CORPO HUMANO CAUSADAS POR CICLISMO  
OUTDOOR – EXPERIMENTO E MODELAGEM**

Gabriela Macedo de Avila Negreiros

Professor Orientador: Fernando Ribeiro da Silva

**Rio de Janeiro**

**Junho de 2016**

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO  
SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**ESTUDO DAS VIBRAÇÕES INDUZIDAS AO  
CORPO HUMANO CAUSADAS POR CICLISMO  
OUTDOOR – EXPERIMENTO E MODELAGEM**

Gabriela Macedo de Avila Negreiros

Projeto final apresentado em cumprimento às  
normas do Departamento de Educação Superior  
do CEFET/RJ, como parte dos requisitos para obtenção  
do título de Bacharel em Engenharia Mecânica

Professor Orientador: Fernando Ribeiro da Silva

**Rio de Janeiro**

**Junho de 2016**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

N385 Negreiros, Gabriela Macedo de Avila  
Estudo das vibrações induzidas ao corpo humano causadas por ciclismo outdoor – Experimento e modelagem / Gabriela Macedo de Avila Negreiros.—2016.  
xvi, 79f. + apêndices e anexo : il. (algumas color.) , grafs. , tabs.  
; enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação  
Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2016.  
Bibliografia : f. 76-79  
Orientador : Fernando Ribeiro da Silva

1. Engenharia mecânica. 2. Corpo humano – Aspectos da  
saúde. 3. Vibração. 4. Ciclismo. 5. ISO 2631-1. I. Silva, Fernando  
Ribeiro da (Orient.). II. Título.

CDD 621

## **DEDICATÓRIA**

Dedico esse trabalho de conclusão a minha mãe, namorado, irmãs, sobrinhos, familiares e amigos por todo o suporte durante a minha jornada.

## AGRADECIMENTOS

A CAPES e ao Governo Federal pelo financiamento da bolsa de intercâmbio estudantil no programa Ciências Sem Fronteiras – Suécia.

A Renato Mourão, aluno de doutorado em Física pela UFRJ, em doutorado sanduíche em Lund (Suécia), por todo o apoio, disponibilidade, gentileza, carinho, parceria e colaboração a esse projeto. Sem a sua ajuda esse trabalho não poderia ter sido realizado.

A Claus Führer, matemático da Universidade de Lund, especializado em dinâmica de multi-corpos, por toda a ajuda, paciência e orientação.

Ao professor Fernando Ribeiro da Silva por toda paciência, compreensão, atenção e disponibilidade em me orientar nesse projeto e assim possibilitar a realização desse trabalho.

A Universidade de Lund pela disponibilização do software MATLAB®, sem o qual esse trabalho não poderia ter seguido em frente.

A minha família pela compreensão, paciência e carinho.

A todos da empresa Deloitte pela compreensão e apoio durante a etapa final deste trabalho, em especial a Ligia Mascarenhas, Paulo Cesar Ferreira, Mariana Manhães, Gustavo Assunção e Larissa Batelocchi.

Aos meus amigos *cefetianos* Rosemere Lima, Débora Kelly, Victor Hugo, Antônio Gomes e Rafael Pereira pelos dias de risos e estudos no decorrer da graduação.

## **RESUMO**

O presente trabalho tem como objetivo estudar as vibrações no corpo humano devido ao ciclismo dependendo da rugosidade do solo. Para tal, o trabalho apresentará o experimento, no qual foram obtidos os dados de vibração do selim ao se pedalar e a comparação com a norma ISO 2631-1, para avaliar se o grau de exposição é nocivo a saúde do ciclista. Após o término da comparação, um modelo será proposto de modo que os dados obtidos experimentalmente possam ser reproduzidos, validando assim a sua modelagem e simulação.

Palavras-chave: ciclismo; vibração do corpo humano; ISO 2631.

## **ABSTRACT**

The aim of this work is to study the whole-body human vibration due to cycling considering the roughness of the terrain. The experiment was made to obtain the saddle vibration during a bike ride. The results will be presented and compared with ISO Standard 2631, to evaluate the degree of exposure to the human health. After finishing the comparison, a model will be proposed based on the experimental data, making possible a reliable modeling and simulation.

Key words: cycling; whole-body human vibration; ISO 2631.

## SUMÁRIO

1. Introdução.....	1
1.1 Motivação .....	2
1.2 Objetivo .....	2
1.3 Justificativa .....	3
1.4 Metodologia e Trabalho realizado .....	3
1.5 Organização do Trabalho.....	4
2. Revisão Bibliográfica .....	6
2.1 A atividade do ciclismo .....	6
2.2 Efeitos das vibrações no corpo humano .....	7
2.3 Modelagem e análise de vibrações .....	7
3. Parâmetros da Bicicleta .....	9
3.1 Bicicleta .....	9
3.2 Altura da Postura.....	11
3.2.1 Altura do Selim .....	11
3.2.2 Comprimento da manivela .....	13
3.2.3 Posição da presilha do sapato.....	14
3.2.4 Recuo do selim.....	15
3.3 Comprimento da Postura .....	16
3.3.1 Alcance.....	16
3.3.2 Nível e largura do guidão .....	18
3.4 Vibrações características do corpo humano.....	19
3.5 Norma ISO 2631-1 – Vibração mecânica e choque – Avaliação da exposição humana a vibração de corpo inteiro .....	21
4. Abordagem Experimental.....	24
4.1 A bicicleta e o ciclista.....	24
4.2 Diferentes solos e inclinações.....	26

4.3 Acelerômetro .....	28
4.4 Procedimento Experimental.....	30
4.5 Análise de dados .....	31
5. Abordagem Experimental - Resultados, Discussão e Conclusão .....	32
5.1 Resultados.....	32
5.1.1 Pedrinhas .....	32
5.1.2 Paralelepípedo .....	33
5.1.3 Asfalto .....	34
5.1.4 Calçada.....	35
5.2 Comparação e Discussão .....	36
5.2.1 Aceleração Vertical.....	37
5.3 Conclusão.....	38
6. Modelo Físico Idealizado .....	40
6.1 Modelo Completo .....	40
6.2 Mecanismo 4-barras.....	41
6.3 Modelo de Vibração.....	43
6.4 Rugosidade do solo .....	45
6.4.1 Pedrinhas .....	46
6.4.2 Asfalto .....	46
6.4.3 Calçada.....	47
6.4.4 Paralelepípedo .....	48
6.4.5 Todas as Rugosidades .....	48
6.5 Centro de Massa.....	49
6.5.1 Distribuição da Força Peso.....	49
6.5.2 Ponto de Equilíbrio.....	50
6.6 Momento de Inércia .....	51
6.7 Constantes de Rigidez e Amortecimento.....	52

7. Resultados e Discussão do Modelo .....	55
7.1 Solo de Pedrinhas.....	55
7.2 Solo de Asfalto.....	58
7.3 Solo de Cimento - Calçada .....	60
7.4 Solo de Paralelepípedo.....	62
7.5 Frequências Naturais.....	65
7.6 Conclusão.....	65
8. Comparação – Experimento vs Modelo.....	66
8.1 Solo Pedrinhas .....	66
8.2 Solo Asfalto .....	67
8.3 Solo Cimento – Calçada .....	68
8.4 Solo Paralelepípedo .....	69
8.5 Solos - Simulação .....	70
8.6 Diferentes Variáveis .....	71
9. Discussão e Conclusão do Trabalho.....	73
10. Trabalhos Futuros.....	75
Referências Bibliográficas.....	76
APÊNDICE A – Programas em Matlab® .....	80
A.1 – Tratamento de dados do acelerômetro .....	80
A2 – Rugosidade.....	82
A3 – Simulação Solo de Pedrinhas.....	84
A4 – Simulação Solo Asfalto.....	89
A5 – Simulação Solo Calçada .....	93
A6 – Simulação Solo Paralelepípedo.....	96
A7 – Determinação das Frequências Naturais do Modelo Físico idealizado .....	101
APÊNDICE B – Estudo de vibração dos dados coletados .....	104
B.1 - Resultados.....	104

B.1.1 Pedrinhas .....	104
B.1.2 Paralelepípedo .....	107
B.1.3 - Asfalto .....	110
B.1.4 - Calçada .....	113
B.2 - Comparação e Discussão .....	116
B.2.1 - Aceleração Vertical .....	116
B.2.2 - Aceleração Lateral.....	118
B.2.3 - Aceleração Longitudinal .....	120
B.3 - Conclusão.....	122
ANEXO A – Datasheet ADXL335 .....	123

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ciclovía irregular - Moema, São Paulo [7].....	2
Figura 2: Medidas de altura da postura: (A) altura do selim; (B) comprimento da manivela; (C) alcance; (D) recuo do selim [26].....	10
Figura 3: Ajuste do selim e do guidão - variáveis cruciais para a postura correta do ciclista [25]. .....	10
Figura 4: Ângulo do joelho na posição BDC ( $\alpha$ ) de no máximo $150^\circ$ e na posição TDC ( $\beta$ ) não inferior a $65^\circ$ . Ângulo de flexão do tornozelo na posição BDC ( $\gamma$ ) é de $13^\circ$ [25].....	11
Figura 5: Medindo o comprimento interno das pernas para estimar a altura do selim [5].....	12
Figura 6: Conferindo se a altura do selim está correta [5].....	13
Figura 7: Posição correta da presilha do sapato [25].....	15
Figura 8: Posição correta do recuo do selim [25].....	15
Figura 9: Medindo o comprimento da parte posterior da perna [25].....	16
Figura 10: a) Comprimento do braço; b) comprimento da parte superior do corpo [25].....	17
Figura 11: a) Postura errada - inclinação pélvica para frente; b) Postura correta - inclinação pélvica para trás [25]. .....	18
Figura 12: Nível do guidão [25]. .....	18
Figura 13: Medida dos ombros - indicação satisfatória da largura do guidão [25].....	19
Figura 14: Frequências de ressonância do corpo humano [31]. .....	20
Figura 15: Curva de Frequência Ponderada (dB) por Frequência (Hz) para o eixo z e os eixos x e y [6].....	21
Figura 16: Eixos do corpo humano [33].....	22
Figura 17: Zonas de precaução - Guia de Saúde [6].....	22
Figura 18: Bicicleta utilizada no experimento.....	24
Figura 19: Tipos de solos a) asfalto; b) cimento; c) paralelepípedo; d) pedrinhas.....	27
Figura 20: Acelerômetro.....	29
Figura 21: Dispositivo para medir a vibração. ....	29
Figura 22: Caixa preta, cabo, acelerômetro e sd card.....	30
Figura 23: Solo de pedrinhas plano. À esquerda, dados originais e interpolados da Aceleração ( $m/s^2$ ) pelo tempo (s). À direita, o espectro de Frequência da vibração no eixo vertical.....	33
Figura 24: Bandas de 1/3 de oitava para superfície plana de pedrinhas.....	33

Figura 25: Solo de paralelepípedo plano. À esquerda, dados originais e interpolados da Aceleração ( $m/s^2$ ) pelo tempo (s). À direita, o espectro de Frequência da vibração no eixo vertical. ....	34
Figura 26: Espectro de bandas de 1/3 de oitava - paralelepípedo - solo plano.....	34
Figura 27: Solo de asfalto plano. À esquerda, dados originais e interpolados da Aceleração ( $m/s^2$ ) pelo tempo (s). À direita, o espectro de Frequência da vibração no eixo vertical. ....	35
Figura 28: Espectro de bandas de 1/3 de oitava - asfalto - solo plano .....	35
Figura 29: Solo calçada plana. À esquerda, dados originais e interpolados da Aceleração ( $m/s^2$ ) pelo tempo (s). À direita, o espectro de Frequência da vibração no eixo vertical. ....	36
Figura 30: Espectro de bandas de 1/3 de oitava - calçada - solo plano .....	36
Figura 31: Solo plano – Aceleração vertical .....	37
Figura 32: Magnitude da aceleração em solo plano. ....	38
Figura 33: Modelo físico idealizado da bicicleta.....	40
Figura 34: Mecanismo 4-barras.....	41
Figura 35: Modelo de vibrações de três graus de liberdade. ....	43
Figura 36: Rugosidade - pedrinhas.....	46
Figura 37: Rugosidade - Asfalto.....	47
Figura 38: Rugosidade – Calçada.....	47
Figura 39: Rugosidade - Paralelepípedo.....	48
Figura 40: Rugosidades simuladas.....	49
Figura 41: Esquemático de distribuição de massa na bicicleta. ....	50
Figura 42: Perfil de Aceleração do ciclista - Solo Pedrinhas .....	55
Figura 43: Perfil de deslocamento do ciclista na direção vertical - Solo Pedrinhas.....	56
Figura 44: Força vertical aplicada ao pedal da bicicleta - Solo Pedrinhas .....	56
Figura 45: Simulação Solo de pedrinhas plano. À esquerda, dados obtidos pela simulação - Aceleração ( $m/s^2$ ) pelo tempo (s). À direita, o espectro de Frequência da vibração no eixo vertical. ....	57
Figura 46:Bandas de 1/3 de oitava para superfície plana de pedrinhas - Simulação.....	57
Figura 47: Perfil de Aceleração do ciclista - Solo Asfalto. ....	58
Figura 48: Perfil de deslocamento do ciclista na direção vertical – Asfalto. ....	58
Figura 49: Força vertical aplicada ao pedal da bicicleta - Solo Asfalto.....	59
Figura 50: Simulação Solo asfalto plano. À esquerda, dados obtidos pela simulação - Aceleração ( $m/s^2$ ) pelo tempo (s). À direita, o espectro de Frequência da vibração no eixo vertical. ....	59

Figura 51: Bandas de 1/3 de oitava para superfície plana asfalto - Simulação. ....	60
Figura 52: Perfil de Aceleração do ciclista - Solo Cimento - Calçada. ....	60
Figura 53: Perfil de deslocamento do ciclista na direção vertical – Calçada. ....	61
Figura 54: Força vertical aplicada ao pedal da bicicleta - Solo Asfalto. ....	61
Figura 55: Simulação Solo - Calçada. À esquerda, dados obtidos pela simulação - Aceleração (m/s <sup>2</sup> ) pelo tempo (s). À direita, o espectro de Frequência da vibração no eixo vertical. ....	61
Figura 56: Bandas de 1/3 de oitava para superfície plana cimento - calçada. ....	62
Figura 57: Perfil de Aceleração do ciclista - Solo Paralelepípedo. ....	63
Figura 58: Perfil de deslocamento do ciclista na direção vertical – Paralelepípedo. ....	63
Figura 59: Força vertical aplicada ao pedal da bicicleta – Paralelepípedo. ....	63
Figura 60: Simulação Solo de paralelepípedo no plano. À esquerda, dados obtidos pela simulação - Aceleração (m/s <sup>2</sup> ) pelo tempo (s). À direita, o espectro de Frequência da vibração no eixo vertical. ....	64
Figura 61: Bandas de 1/3 de oitava para superfície plana de paralelepípedo. ....	64
Figura 62: Comparação entre os gráficos de 1/3 de oitava do Experimento e da Simulação - Solo Pedrinhas Plano. ....	66
Figura 63: Comparação entre os gráficos de 1/3 de oitava da Amplitude Normalizada do Experimento e da Simulação - Solo Pedrinhas Plano. ....	67
Figura 64: Comparação entre os gráficos de 1/3 de oitava do Experimento e da Simulação - Solo Asfalto Plano. ....	67
Figura 65: Comparação entre os gráficos de 1/3 de oitava da Amplitude Normalizada do Experimento e da Simulação - Solo Asfalto Plano. ....	68
Figura 66: Comparação entre os gráficos de 1/3 de oitava do Experimento e da Simulação - Solo Calçada Plana. ....	68
Figura 67: Comparação entre os gráficos de 1/3 de oitava da Amplitude Normalizada do Experimento e da Simulação - Solo Calçada Plana. ....	69
Figura 68: Comparação entre os gráficos de 1/3 de oitava do Experimento e da Simulação - Solo Paralelepípedo Plano. ....	69
Figura 69: Comparação entre os gráficos de 1/3 de oitava da Amplitude Normalizada do Experimento e da Simulação - Solo Paralelepípedo Plano. ....	70
Figura 70: Comparação dos gráficos de 1/3 de frequência de oitava de todos os tipos de solos - Simulação. ....	70
Figura 71: Comparação do Modelo original com o Modelo considerando a massa da bicicleta 30 kg. ....	71

Figura 72: Comparação do Modelo original com o Modelo considerando a constante de amortecimento do selim 17 vezes maior. ....	72
Figura 73: Comparação do Modelo original com o Modelo considerando as constantes de rigidez das molas do modelo vibracional 1.5 vezes maior. ....	72

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comprimento da manivela com relação ao comprimento interno da perna [30]. ....	14
Tabela 2: Porção do comprimento do pé que deve ser levado em conta na altura do selim [25]. .....	14
Tabela 3: Recuo do selim de acordo com o comprimento da parte posterior da perna [25]. ...	16
Tabela 4: Comprimento do alcance com relação ao comprimento do tronco e do braço [25].	17
Tabela 5: Nível do guidão de acordo com o comprimento do braço e do tronco [25]. .....	19
Tabela 6: Efeitos da vibração no corpo inteiro e no sistema mão-braço [32]. .....	20
Tabela 7: Resumo dos parâmetros da bicicleta e do ciclista. ....	26
Tabela 8: Tipos de solos para os testes. ....	28
Tabela 9: Tipos de solos apresentados no trabalho. ....	28
Tabela 10: Resumo dos Resultados do Experimento – Solo Plano. ....	38
Tabela 11: Resumo dos Resultados da Simulação – Solo Plano. ....	71

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

BDC – Bottom Dead Centre

CET SP – Companhia de Engenharia de Tráfego de São Paulo

FFT – Transformada Rápida de Fourier

ISO – International Organization for Standardization

RMS – Root Mean Square (rms)

SMAC – Secretaria Municipal do Meio Ambiente do Rio de Janeiro

TDC – Top Dead Centre

# Capítulo 01

## Introdução

O número de adeptos ao ciclismo como meio de lazer, prática de atividade física ou meio de transporte alternativo aumenta a cada dia. O uso da bicicleta, quando há ciclovias seguras, é uma opção para melhorar as condições de mobilidade urbana e redução na emissão de gás carbônico [1] e, com isso, ajuda na melhoria de qualidade de vida e do ambiente.

Em algumas cidades da Europa como Lund (Suécia), Amsterdã (Holanda), Copenhagen (Dinamarca), Paris (França) e Berlim (Alemanha), o uso da bicicleta como meio de locomoção supera o uso de automóveis [2]. No Brasil, o ciclismo ainda não é uma prática muito difundida. No entanto, cidades como Rio de Janeiro e São Paulo vem criando políticas públicas para viabilizar o uso da bicicleta como meio de transporte [3] [4].

Assim como em qualquer outra atividade física, a prática de ciclismo pode gerar desconforto e lesões ao corpo humano quando mal executada, devido ao excesso ou ainda quando o ambiente não é adequado. O problema relacionado a má execução dos movimentos pode ser minimizado fazendo-se os corretos ajustes na bicicleta e na postura do praticante [5]. Já o desconforto causado pelas vibrações mecânicas devido a rugosidade e/ou irregularidades do solo, ao qual a atividade está sujeita, pode ser contornado estabelecendo-se um tipo de superfície que maximize o conforto do ciclista e, posteriormente, através da manutenção periódica da mesma.

O estudo do desconforto causado no corpo humano inerente à prática de atividades físicas pode ser realizado através da medição da vibração à qual o indivíduo está sujeito. Vibrações mecânicas podem ser medidas em aceleração, velocidade ou deslocamento e vão depender, no caso proposto, da rugosidade e inclinação do solo. Para tal, o estudo de vibrações mecânicas as quais o ciclista está sujeito quando praticando o exercício se torna necessário de modo a comparar os resultados obtidos com os aceitos pela norma ISO 2631 [6].

## 1.1 Motivação

Pedalar pode se tornar uma atividade desconfortável ou até mesmo impossível dependendo das condições da ciclovia ou do local designado para isso. A Figura 1 mostra um exemplo de ciclovia irregular, onde o pedalar pode ser desagradável.



**Figura 1:** Ciclovia irregular - Moema, São Paulo [7].

Para que o ciclismo seja promovido com sucesso, além de seguras, as ciclovias devem ser também confortáveis.

## 1.2 Objetivo

O principal objetivo do presente trabalho é determinar o tipo de solo que oferece maior conforto ao ciclista e propor modificações na bicicleta, de modo que as vibrações desconfortáveis ao ciclista possam ser minimizadas. Para isso é necessário estudar as vibrações mecânicas as quais o ciclista está sujeito em diferentes rugosidades e inclinações do solo e, assim, determinar se as vibrações estão dentro do nível aceitável. Usa-se como base a norma ISO 2631 [6]. Outro objetivo deste trabalho é a proposição de modificações nas características da bicicleta para atenuação do desconforto gerado pela vibração.

### 1.3 Justificativa

O ciclismo é uma das formas mais limpas e eficientes de transporte e está relacionado a inúmeros benefícios, tais como: melhora na saúde do praticante, não gera poluição sonora ou ambiental e ajuda a reduzir congestionamentos. Uma maneira de se promover o ciclismo é através da implementação de uma infraestrutura adequada como, por exemplo: a construção de ciclovias, bicicletários e o investimento em bicicletas de aluguel, que são comumente chamadas de *city bikes* (bicicletas da cidade, em tradução livre), onde o usuário faz o seu cadastro e paga um valor simbólico para usufruir do direito de usar a bicicletas por um determinado intervalo de tempo [8].

Um estudo de conforto relacionado a rugosidade e inclinação da ciclovia se faz necessário, tendo em vista a rápida difusão do ciclismo como opção de transporte alternativo, de modo a determinar o tipo de superfície mais adequada à prática dessa atividade a ser implementado nas ciclovias. Ademais, possíveis mudanças na bicicleta também podem ser sugeridas de modo a diminuïrem as vibrações nocivas e desconfortáveis ao ciclista.

### 1.4 Metodologia e Trabalho realizado

A metodologia aplicada neste trabalho pode ser descrita em cinco etapas: revisão bibliográfica, idealização e realização do experimento, análise dos dados experimentais, modelagem computacional do problema, comparação entre os resultados computacionais e os obtidos experimentalmente.

A revisão bibliográfica foi realizada de modo a conhecer os trabalhos já realizados e aprofundar os conhecimentos na área do problema proposto. Assim, pesquisou-se a respeito da necessidade de um estudo do conforto de ciclistas através de vibrações mecânicas as quais estão sujeitos dependendo da rugosidade e inclinação da ciclovia, obtenção dos dados experimentalmente e simulação destes por meio de um modelo matemático. A revisão bibliográfica se faz necessária durante todo o processo de desenvolvimento e conclusão do presente projeto.

Após a revisão bibliográfica, ficou clara a necessidade do uso de um acelerômetro para medir a intensidade das vibrações mecânicas as quais o ciclista está sujeito. Para isso, foi necessário o desenvolvimento de um dispositivo eletrônico capaz de medir as acelerações nas três direções ( $x$ ,  $y$  e  $z$ ) e armazená-las, para posterior análise. Para a realização do experimento

e com o dispositivo eletrônico já pronto, o acelerômetro foi acoplado ao banco da bicicleta (selim) e quatro tipos de superfícies foram escolhidas para serem estudadas: asfalto, cimento (calçada), paralelepípedo e irregular com pequenas pedras. Esses tipos de solos foram escolhidos devido a sua diferença de rugosidade e facilidade de serem encontrados como ciclovias. Casos em que havia inclinação do solo também foram estudados, porém não serão o foco de estudo deste trabalho.

De posse dos dados experimentais, decidiu-se usar um método de integração numérica (Método de Simpson) de modo a ter a aceleração rms (raiz quadrada média, tradução livre), necessária para comparação com a norma ISO 2631 [6]. Assim, a transformada rápida de Fourier foi aplicada aos dados de modo a obter as frequências de vibração do sistema.

A modelagem e a comparação dos resultados obtidos com os dados experimentais serão as etapas que irão concluir o presente projeto. A modelagem computacional irá levar em conta um modelo matemático que simula o uso de uma bicicleta e, para isso, o software MATLAB<sup>®</sup> será usado. Após obter os resultados da simulação, uma comparação entre os resultados experimentais e computacionais se faz necessária.

## **1.5 Organização do Trabalho**

O presente trabalho está organizado em dez capítulos.

O primeiro capítulo aborda a introdução ao tópico em questão, justificando o porquê da escolha e os objetivos almejados.

O segundo capítulo trata da revisão bibliográfica realizada durante todo o processo de estudo do tema abordado. Neste capítulo é possível encontrar maiores informações sobre as vibrações aceitáveis para não gerar desconforto ao corpo humano.

O terceiro capítulo aborda os ajustes necessários dos parâmetros móveis da bicicleta, parte importante para o início do experimento.

O quarto capítulo aborda experimentalmente o projeto: configuração dos parâmetros da bicicleta, suposições feitas, desenvolvimento do dispositivo que contém o acelerômetro, procedimento experimental realizado e análise/tratamento de dados.

O quinto capítulo apresenta, também, os resultados experimentais e uma discussão com relação aos valores aceitos pelas normas.

O sexto capítulo expõe as conclusões obtidas e, assim, a determinação da melhor superfície com relação ao conforto do ciclista.

O sexto capítulo apresenta ao leitor a modelagem matemática, que foi utilizada para a modelagem computacional.

O sétimo capítulo aborda os resultados e a discussão dos dados obtidos pela simulação.

O oitavo capítulo elucida todas as comparações entre o experimento e o modelo físico idealizado do projeto.

No nono capítulo desenvolve a conclusão do trabalho.

O capítulo dez trata os possíveis pontos a serem estudados em trabalhos futuros.

## Capítulo 02

### Revisão Bibliográfica

O objetivo deste capítulo é contextualizar o trabalho a ser desenvolvido, de modo a abordar termos e conceitos necessários para o bom entendimento do projeto.

#### 2.1 A atividade do ciclismo

O ciclismo é uma modalidade de atividade física que pode trazer benefícios nas mais variadas áreas. Na área de saúde, por exemplo, pode trazer aumento do condicionamento físico e mental do praticante. No ponto de vista urbano, ajuda a diminuir os congestionamentos. Economicamente, há o custo inicial e o de manutenção. Não há a necessidade de nenhum tipo de combustível, fazendo que o seu custo total seja bem menor que o gasto com um automóvel, por exemplo. Considerando o fato de não haver queima de combustível, esse meio de transporte é considerado sustentável e ajuda a reduzir a poluição, uma vez que o usuário opta por um transporte com emissão zero de qualquer gás do efeito estufa ou outro componente oriundo da queima de combustíveis fósseis [9].

Devido aos benefícios e vantagens que o ciclismo oferece ao praticante e ao meio ambiente, alguns estudos a seu respeito vêm sendo desenvolvidos ao longo dos anos. Destaca-se, como exemplo:

**Jonathan Dingwell et al. (2008)** realizaram um estudo no qual verificaram influência da fadiga muscular em lesões por esforço repetitivo em ciclistas que levam o seu esforço muscular às raias da exaustão [10].

**Felipe Carpes et al (2009)** analisaram a geometria de dois assentos de modelos diferentes e duas posições distintas para o ciclista. O estudo visava estudar os efeitos das forças da bicicleta sobre o tronco e o quadril em praticantes do sexo masculino e feminino [11] [12].

**Aline Tamborindeguy e Rodrigo Bini (2009)** mediram as forças exercidas sobre os joelhos dos ciclistas para diferentes alturas do selim [13].

**Daniel Savionek (2010)** estudou os efeitos das vibrações transmitidas pelo guidom aos braços e mãos do ciclista. O estudo experimental foi realizado para diferentes superfícies e modelos de bicicletas [14].

## 2.2 Efeitos das vibrações no corpo humano

Oscilações, ou vibrações, são tipos de movimentos muito comuns na física. Por exemplo, no campo musical a vibração da corda do violão pode produzir melodias prazerosas. Vibrações podem também ser maléficas ao corpo humano, a exemplo temos o martelo pneumático, que exerce um grande impacto fisiológico no corpo humano, gerando desconforto e lesões. As lesões ocasionadas por vibrações podem ser localizadas ou abranger diversos órgãos [15]. Por este aspecto fisiológico, o estudo da exposição às vibrações tem um alvo de muitos estudos. Como exemplo, destacam-se:

**G Conway et al. (2006)** estudou e identificou alguns destes efeitos fisiológicos dos movimentos oscilatórios sobre o corpo humano [16].

**C. Druga, D Barbu et al (2007)** conduziram um estudo semelhante, apresentaram os principais problemas que ocorrem quando o corpo humano fica sujeito a determinadas vibrações e os principais aspectos a ter em conta quando isso acontece [17].

**J. Abercombry et al (2007)** avaliaram quantitativamente as respostas biodinâmicas do corpo humano quando sujeito a um exercício intencional de vibrações de todo o corpo humano [18].

**FL Marcu et al. (2008)** estudaram as vibrações sobre outro aspecto no corpo humano. Suas propostas eram determinar até que limites vibrações funcionam em caráter terapêutico nos órgãos internos [15].

**A. Ismail et al (2010)** estudaram os efeitos das vibrações transmitidas por um meio de transporte de massa, um trem, aos passageiros [19].

## 2.3 Modelagem e análise de vibrações

A natureza da vibração é uma característica essencial no estudo de seus impactos no corpo humano. É importante saber, por exemplo, em que tipo de equipamento, veículo e ambiente a vibração foi produzida, bem como seu espectro de frequências. Um dos estudos experimentais que pode ser realizado consiste em impor os objetos de estudo sob as condições de análise e medir as variáveis de interesse, por exemplo, a amplitude das acelerações nos eixos xyz. Em seguida, as condições são alteradas e as novas variáveis medidas novamente para serem então comparadas com os dados iniciais. Outra abordagem é a modelagem de um modelo físico representativo e consistente com o sistema estudado [20].

**J. Krodkiewski (2008)** apresenta uma análise bastante detalhada sobre como modelar modelos físicos em sistemas lineares para um e mais graus de liberdade. No seu trabalho

além da modelação também a análise de modelos físicos é abordada tanto para um como para mais graus de liberdade [21].

**T. Yoshimura et al (2005)** estudaram os impactos das vibrações impostas por um veículo sobre o corpo humano, levando em conta dez graus de liberdade e a medida de vibrações transmitidas à coluna vertebral e à cabeça. Os resultados foram comparados com valores de referência [22].

**L. A. Furtado (2014)** estudou as vibrações induzidas ao corpo humano em prática de ciclismo indoor. A ideia do projeto foi propor um modelo matemático baseado no mecanismo quatro barras para a simulação da atividade de pedalar e um modelo massa-mola-amortecedor para o corpo do ciclista e, assim, estudar os efeitos da vibração no corpo humano [23].

## Capítulo 03

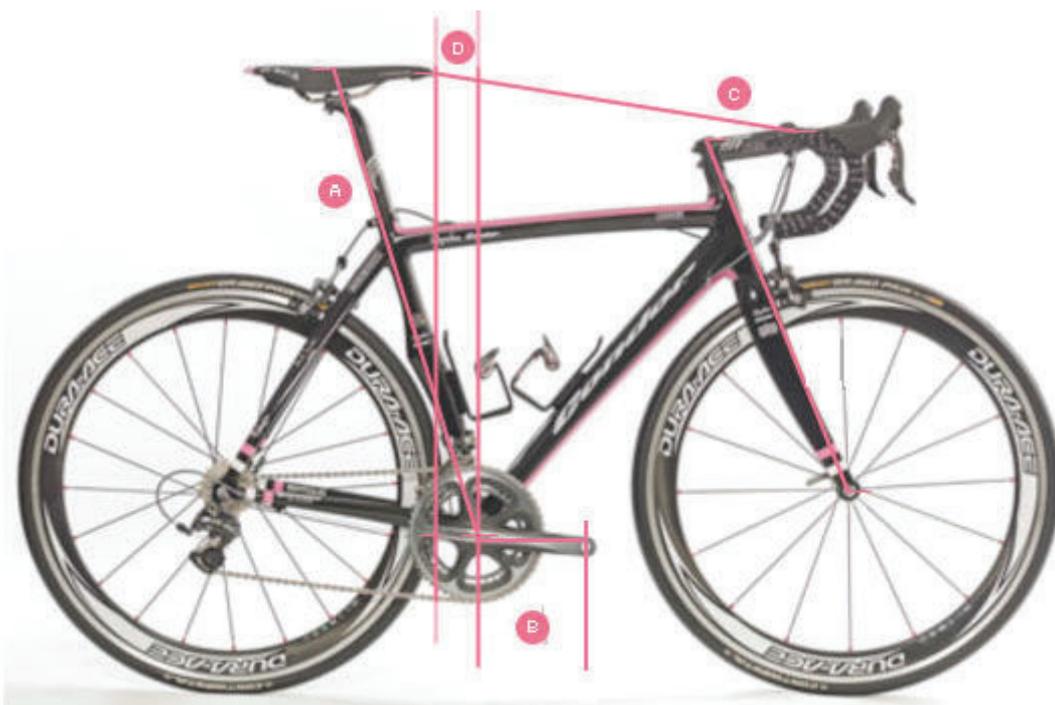
### Parâmetros da Bicicleta

O objetivo deste capítulo é contextualizar o uso da bicicleta, bem como os parâmetros de ajuste que devem ser adotados para a boa prática do ciclismo. É necessário o conhecimento dos ajustes a serem feitos antes de se começar a prática do ciclismo, para assim mitigar os possíveis desconfortos e vibrações causadas pelos maus ajustes da bicicleta.

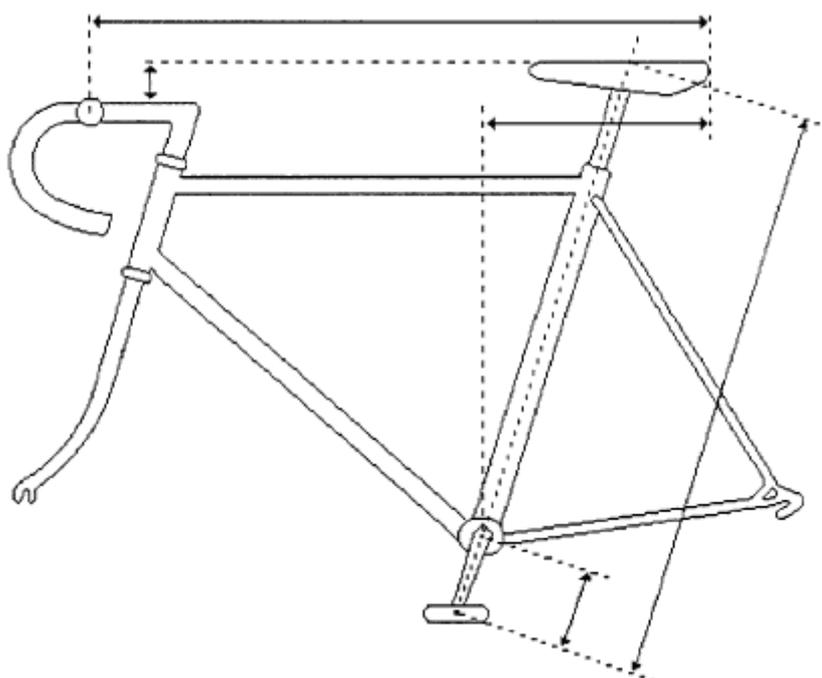
#### 3.1 Bicicleta

Devido à falta de informação, muitos ciclistas ajustam a bicicleta na base da tentativa e erro. O que pode causar desconforto, lesões, maior gasto energético ao pedalar e até o abandono da prática do ciclismo [24].

Segundo Metsdagh (1998), o ajuste da bicicleta pode ser dividido em duas categorias: altura da postura e comprimento da postura. Altura da postura são os ajustes relacionados à altura do selim, comprimento da manivela, posição da presilha do sapato e recuo do selim (Figura 2). O comprimento da postura é caracterizado pelo alcance, nível do guidão e largura do guidão (Figura 3). Ao abordar tanto os ajustes do comprimento quanto o da altura da postura se pode ter uma visão abrangente dos ajustes adequados do selim e do guidão. Essas duas variáveis tanto independentes quanto relacionadas são de importância fundamental para o correto ajuste da postura do ciclista [25].



**Figura 2:** Medidas de altura da postura: (A) altura do selim; (B) comprimento da manivela; (C) alcance; (D) recuo do selim [26].



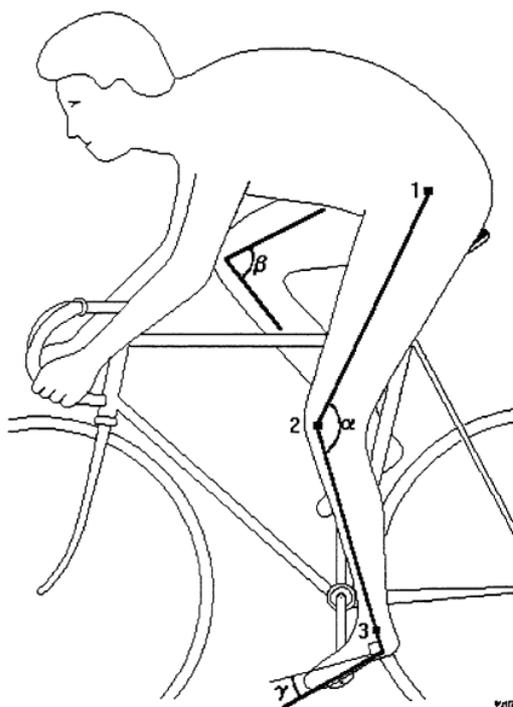
**Figura 3:** Ajuste do selim e do guidão - variáveis cruciais para a postura correta do ciclista [25].

## 3.2 Altura da Postura

O objetivo de se fazer o correto ajuste na altura da postura (altura do selim, comprimento da manivela, posição da presilha do sapato e recuo do selim) é gerar conforto ao ciclista na realização do exercício.

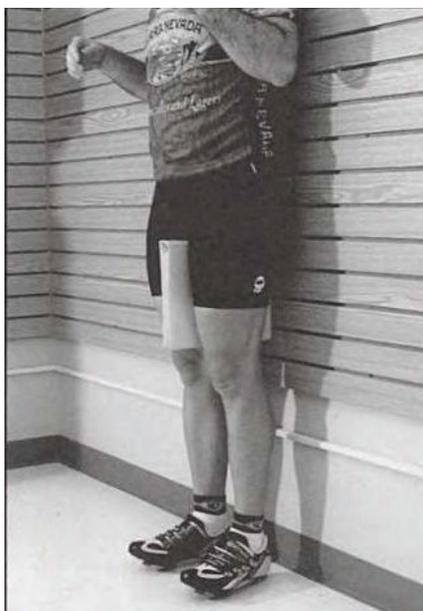
### 3.2.1 Altura do Selim

A flexão e extensão das articulações do quadril, joelhos e tornozelos devem ocorrer dentro de certos limites para se obter potência ao pedalar através de um movimento suave. A mudança da altura do selim influencia os ângulos formados por essas articulações durante a rotação dos pedais. Quando a altura do selim se desvia da posição ideal, o efeito para o ciclista será de consumir mais oxigênio e mais trabalho será exigido, o que resulta na diminuição da eficiência da atividade. Testes comprovam que o ângulo do joelho na posição mais baixa ao pedalar BDC (*bottom dead centre*) é de no máximo  $150^\circ$  e o ângulo na posição mais alto ao pedalar TDC (*top dead centre*) não pode ser inferior a  $65^\circ$  [27] [28]. O ângulo de flexão do tornozelo, ou seja, o ângulo formado entre a planta do pé e o tornozelo, quando na posição BDC deve ser de aproximadamente  $13^\circ$  (Figura 4).



**Figura 4:** Ângulo do joelho na posição BDC ( $\alpha$ ) de no máximo  $150^\circ$  e na posição TDC ( $\beta$ ) não inferior a  $65^\circ$ . Ângulo de flexão do tornozelo na posição BDC ( $\gamma$ ) é de  $13^\circ$  [25].

Determinar a melhor altura do selim é uma questão de balanço entre eficácia e eficiência ao pedalar. Um grupo de ergonômistas de Loughborough College of Physical Education encontrou, em 1965, que a altura do selim deveria ser 109% do comprimento interno da perna [25]. Anos mais tarde os testes foram replicados e se obteve o mesmo resultado. Essa altura de 109% do comprimento interno da perna é chamada de altura máxima do selim. O comprimento interno da perna deve ser medido precisamente, o que é possível através de um método simples: com os tênis que se costuma pedalar, ficar em posição vertical contra uma parede, deixar os pés separados por 2 polegadas, colocar um livro na posição horizontal entre as pernas e segurar firmemente, medir a distância entre o chão e a parte superior do livro, multiplicar essa distância por 1,09 [5].



**Figura 5:** Medindo o comprimento interno das pernas para estimar a altura do selim [5].

No entanto, Nordeen-Snyder (1977) concluiu que a melhor altura do selim é o comprimento interno da perna multiplicado por 1,07; pois é onde se tem o menor consumo de oxigênio e, conseqüentemente, maior eficiência. Essa medida de 107% do comprimento interno da perna é conhecida como *altura ótima do selim* [29].

Uma maneira simples de conferir se a altura do selim está correta é montar na bicicleta e ver se no ponto onde o pedal fica mais afastado do selim a perna do ciclista está totalmente esticada, como mostra a Figura 6.



**Figura 6:** Conferindo se a altura do selim está correta [5].

### 3.2.2 Comprimento da manivela

O comprimento da manivela é outra variável importante. O braço da manivela determina o tamanho do círculo do pedal e, por isso, afeta a flexão dos joelhos e quadris. Porém, é uma medida mais complexa de ser avaliada, pois depende de vários fatores como o comprimento interno da perna, atrito do solo e resistência do vento, ou seja, a altura da manivela está diretamente ligada ao ritmo da pedalada. Com a altura do selim determinada, o comprimento da manivela deverá ser avaliado. No entanto, a modificação no braço da manivela também produz uma variação na altura do selim. Por isso, ambas as medidas devem ser avaliadas conjuntamente [25].

Apesar da complexidade da determinação do comprimento ótimo da manivela e da falta de dados nessa área, Hull e Gonzalez (1988) desenvolveram uma pesquisa que determina esse parâmetro baseando-se apenas no comprimento interno da perna (Tabela 1). Pois, de acordo com os autores, o comprimento da manivela das bicicletas que se encontram em vendas no varejo (lojas comuns) varia entre 165 mm e 180 mm, com passos de 2.5 mm, o que coincide relativamente bem com os resultados da sua pesquisa, que avalia a relação entre a mínima altura da manivela e o mínimo estresse muscular [30].

**Tabela 1:** Comprimento da manivela com relação ao comprimento interno da perna [30].

<b>Comprimento interno da perna (cm)</b>	<b>Comprimento da manivela (cm)</b>
≥ 75	16,50
≥ 78	16,75
≥ 81	17,00
≥ 84	17,25
≥ 87	17,50
≥ 90	17,75
≥ 93	18,00

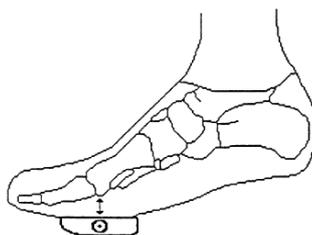
### 3.2.3 Posição da presilha do sapato

Comprimento interno da perna, de longe, é o parâmetro mais importante para determinar adequadamente a altura da postura, mas para uma determinação mais precisa é necessário levar em consideração o tamanho do pé do ciclista. Uma porção do comprimento do pé deve ser levada em conta devido à flexão do tornozelo de 13° (ver Figura 4), o que corresponde aproximadamente a 20° com a horizontal (Tabela 2) [25].

**Tabela 2:** Porção do comprimento do pé que deve ser levado em conta na altura do selim [25].

<b>Comprimento do pé (cm)</b>	<b>Altura do selim (cm)</b>
23	-0,8
24	-0,6
25	-0,4
26	-0,2
27	+0,2
28	+0,4
29	+0,6
30	+0,8

A posição da presilha do sapato do ciclista é importante para manter o correto posicionamento do pé no pedal ao pedalar. A base do primeiro metatarso do pé, ou seja, a parte posterior da planta do pé deve ficar diretamente sobre o eixo do pedal, otimizando assim a alavanca formada pela parte central e traseira do pé (Figura 7).



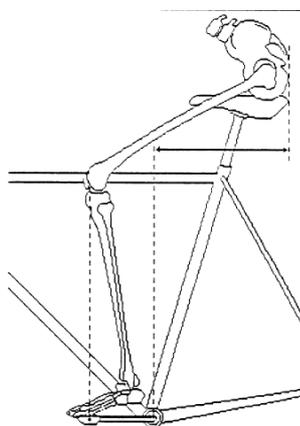
**Figura 7:** Posição correta da presilha do sapato [25].

Não há problema em mover um pouco a parte posterior do pé para trás. No entanto, a posição mais adiantada da parte posterior do pé com relação ao eixo do pedal pode gerar tensões excessivas no tendão de Aquiles e no músculo gastrocnêmico<sup>1</sup>.

### 3.2.4 Recuo do selim

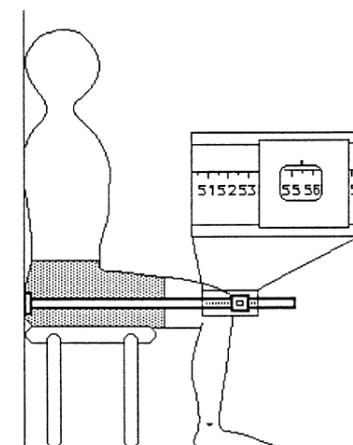
O correto posicionamento do recuo do selim é aquele que permite que a patela (osso localizado no joelho) fique na direção do eixo do pedal (Figura 8). Esse correto posicionamento permite melhor flexão e extensão dos joelhos e quadril, minimizando a pressão sobre a articulação do joelho.

Para um exato posicionamento do recuo do selim, o comprimento da parte superior da perna deve ser levado em conta: sentado com o fêmur e a fíbula formando um ângulo de 90°, mede-se o comprimento entre a extremidade do sacro e a parte anterior da patela (Figura 9) e, assim, Mestdagh (1998) determinou a distância do recuo de acordo com esse comprimento (Tabela 3).



**Figura 8:** Posição correta do recuo do selim [25].

<sup>1</sup> “O gastrocnêmico é um músculo que fica na região posterior da perna abaixo dos joelhos e recobre outro músculo chamado Sóleo (todo este conjunto é chamado de Tríceps Sural ou Panturrilha). Agem como flexores plantares, ou seja, fletem o pé para baixo.” [19]



**Figura 9:** Medindo o comprimento da parte posterior da perna [25].

**Tabela 3:** Recuo do selim de acordo com o comprimento da parte posterior da perna [25].

<b>Comprimento da parte posterior da perna (cm)</b>	<b>Recuo do selim (cm)</b>
56	31
58	32
60	33
62	34
64	35
66	36

### 3.3 Comprimento da Postura

O comprimento da postura (alcance, nível do guidão e largura do guidão) é o segundo grupo de ajustes que, se utilizado corretamente, inibe desconforto e vibrações nocivas ao ciclista.

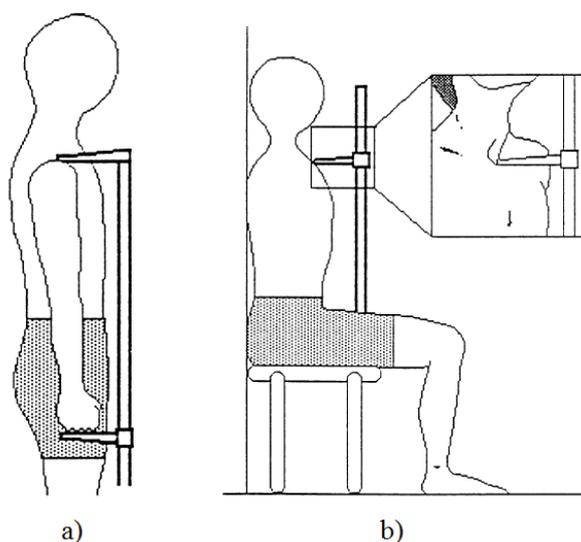
#### 3.3.1 Alcance

Não importa a posição adotada pelo ciclista, a posição da parte superior do corpo é usada de maneira não natural ao pedalar. Normalmente, os músculos do pescoço, costas e abdominais são usados para manter a coluna vertebral reta, por isso é preciso que os mesmos sejam bem desenvolvidos de modo a fornecer uma postura ótima ao pedalar. Os braços e os músculos que o compõem também são importantes, uma vez que essa estrutura é responsável por prover estabilidade e suporte ao tronco. Dessa maneira a parte inferior das costas e o pescoço devem estar os mais relaxados possível. Caso o alcance seja muito curto, muita pressão será colocada na coluna vertebral, em especial na parte lombar e cervical, gerando dor na parte inferior das costas e desconforto no pescoço.

Para se determinar corretamente o alcance, distância entre o guidão e a parte traseira do selim, é necessário levar em conta o comprimento completo do braço juntamente com o comprimento da parte superior do corpo (Tabela 4). A Figura 10 mostra como essas medidas devem ser feitas.

**Tabela 4:** Comprimento do alcance com relação ao comprimento do tronco e do braço [25].

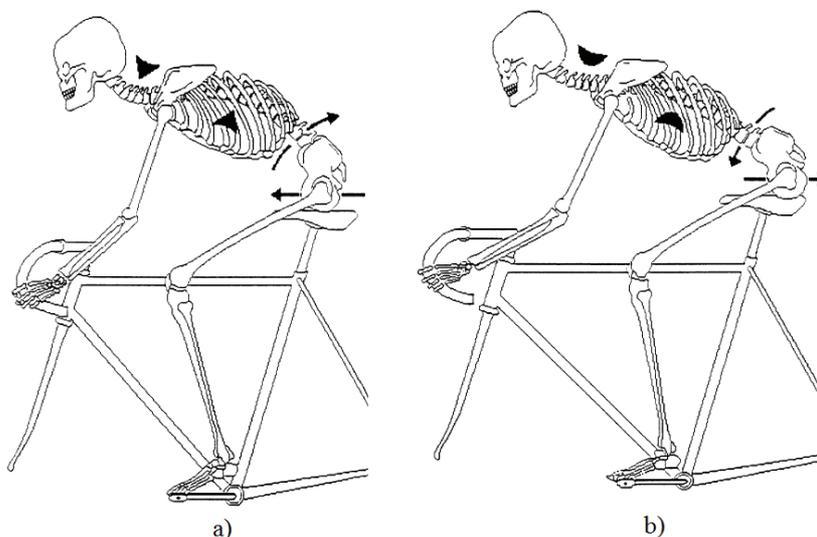
Comprimento do tronco + braço (cm)	Alcance (cm)
122	78
124	79
126	80
128	81
130	82
132	83
134	84
136	85
138	86
140	87
142	88



**Figura 10:** a) Comprimento do braço; b) comprimento da parte superior do corpo [25].

Mesmo após o correto dimensionamento do alcance a postura do ciclista deve ser levada em conta. Caso a parte pélvica esteja inclinada para frente, o ciclista poderá sofrer câibras na região lombar, aumento da pressão na coluna vertebral, má posicionamento do pescoço e abdômen. Já a inclinação da parte pélvica para trás é a posição correta, pois

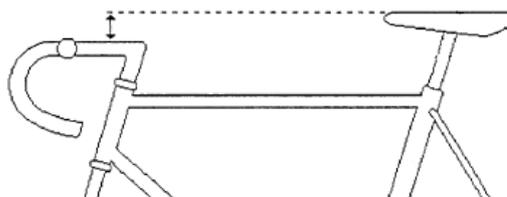
permite que a posição fisiológica da coluna vertebral seja mantida no decorrer do exercício (Figura 11).



**Figura 11:** a) Postura errada - inclinação pélvica para frente; b) Postura correta - inclinação pélvica para trás [25].

### 3.3.2 Nível e largura do guidão

O nível do guidão é a distância entre o tubo do guidão e o topo do selim (Figura 12).



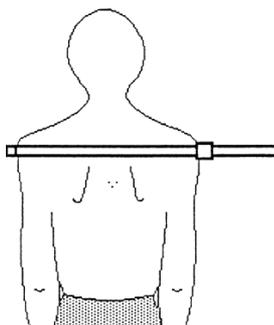
**Figura 12:** Nível do guidão [25].

Este parâmetro depende, assim como o alcance, do comprimento do braço e do tronco e as recomendações de distância podem ser encontradas na Tabela 5.

**Tabela 5:** Nível do guidão de acordo com o comprimento do braço e do tronco [25].

Comprimento do tronco + braço (cm)	Nível do Guidão (cm)
122	5,5
124	6,0
126	6,5
128	7,0
130	7,5
132	8,0
134	8,5
136	9,0
138	9,5
140	10,0
142	10,5

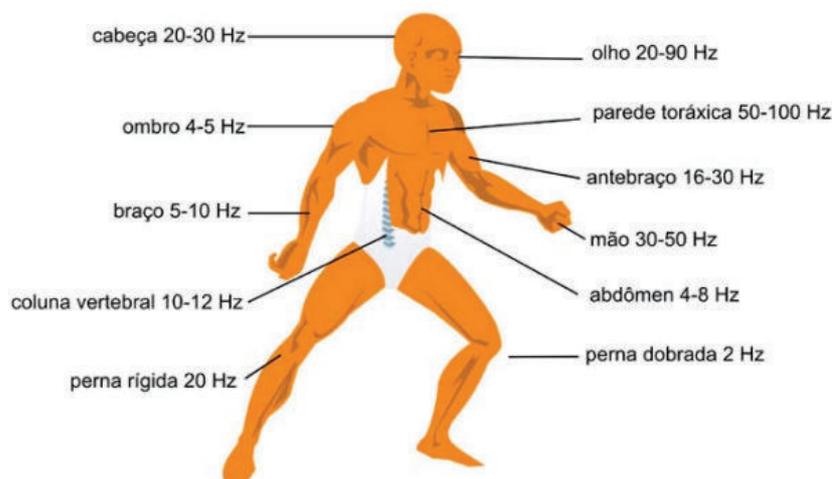
A largura do guidão deve ser levada em conta para que os ombros do ciclista fiquem na posição correta e para que a respiração não seja prejudicada. Com isso, a medida dos ombros dá uma indicação satisfatória da largura do guidão (Figura 13).

**Figura 13:** Medida dos ombros - indicação satisfatória da largura do guidão [25].

### 3.4 Vibrações características do corpo humano

Vibração é quando um corpo descreve um movimento oscilatório em relação a uma posição de referência. A frequência de vibração é a quantidade de vezes que o ciclo completo do movimento ocorre em um segundo, ou seja, a frequência é a medida de ciclos por segundos ou Hertz (Hz). Todos os corpos são dotados de uma vibração natural e o corpo humano não poderia ser diferente: cada parte do corpo humano possui uma frequência natural. Quando uma fonte externa vibra na mesma faixa de frequência do que a do corpo, ocorre o fenômeno conhecido como ressonância, que amplifica o movimento de vibração. Porém parte da energia de vibração é absorvida pelo corpo (tecidos e órgãos), atenuando o

seu efeito. O corpo humano possui diferentes frequências de ressonância, como mostra a Figura 14 [31].



**Figura 14:** Frequências de ressonância do corpo humano [31].

O corpo humano tem uma resposta diferente dependendo da direção da vibração. Por exemplo, a sensibilidade do corpo com relação à vibração longitudinal (direção da coluna vertebral - eixo z) é totalmente diferente da sensibilidade transversal (ao longo dos braços e tórax – eixos x e y) [31].

Basicamente, existem dois tipos de vibração: a de corpo inteiro e a do sistema mão-braço. A vibração de corpo inteiro é causada quando a superfície onde o corpo se encontra está em vibração. Já a vibração do sistema mão-braço ocorre ao se manusear materiais ou ferramentas em vibração. A exposição do corpo humano à vibrações diretas pode causar danos irreversíveis, nos casos mais graves e, também, desconforto e mal-estar, nos casos iniciais ou menos graves [32]. A Tabela 6 mostra, resumidamente, os efeitos das vibrações no corpo humano.

**Tabela 6:** Efeitos da vibração no corpo inteiro e no sistema mão-braço [32].

<b>Vibração no Corpo Inteiro</b>	<b>Vibração no sistema mão-braço</b>
Danos físicos irreversíveis: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lombalgia Isquêmica;</li> <li>• Sistema Circulatório;</li> <li>• Sistema Urológico.</li> </ul>	Síndrome dos dedos brancos: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Falta de sensibilidade e controle;</li> <li>• Tremor dos dedos;</li> <li>• Destruição das artérias e nervos das mãos</li> </ul>
Distúrbios no Sistema Nervoso Central: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Fadiga;</li> <li>• Insônia;</li> <li>• Dor de cabeça;</li> <li>• Tremores.</li> </ul>	Danos nos tendões e músculos entre o pulso e o cotovelo.

### 3.5 Norma ISO 2631-1 – Vibração mecânica e choque – Avaliação da exposição humana a vibração de corpo inteiro

A norma ISO 2631-1 [6] define os métodos para as medidas de vibrações de corpo inteiro periódicas, aleatórias e de curto período (transientes), determinando o grau a qual cada exposição é aceitável. A faixa de frequências consideradas é:

- 0,5 Hz a 80 Hz para condições de saúde, conforto e percepção;
- 0,1 Hz a 0,5 Hz para enjoos causados pela vibração.

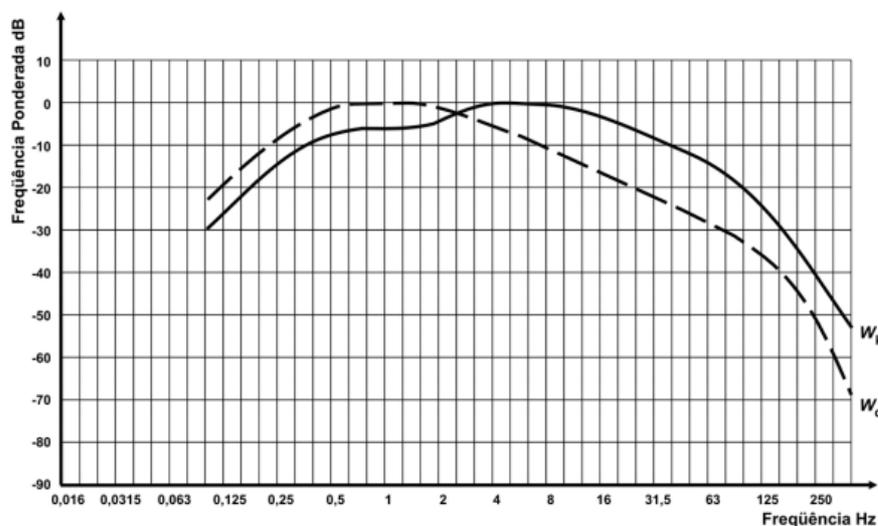
O método básico é a aceleração ponderada  $a_v$  (em  $m/s^2$ ) é calculada pela Equação 1:

$$a_v = \sqrt{k_x^2 a_{wx}^2 + k_y^2 a_{wy}^2 + k_z^2 a_{wz}^2} \quad (\text{Equação 1})$$

onde:

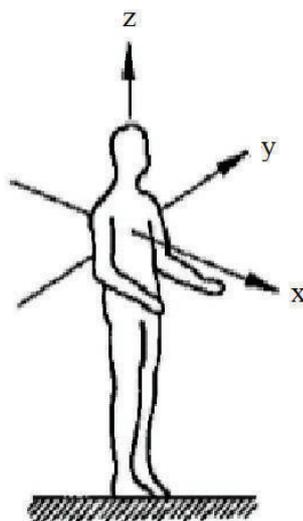
- $a_{wx}$ ,  $a_{wy}$  e  $a_{wz}$  São as acelerações ponderadas dos respectivos eixos ortogonais x, y e z;
- $k_x$ ,  $k_y$  e  $k_z$  são os fatores multiplicadores ( $k_x = k_y = 1,4$  e  $k_z = 1,0$ ).

Dependendo da faixa de frequência, a vibração pode afetar de maneira diferente o corpo humano. As curvas de frequências utilizadas são  $W_k$  para o eixo z (coluna vertebral) e  $W_d$  para os eixos x e y, como mostra a Figura 15.



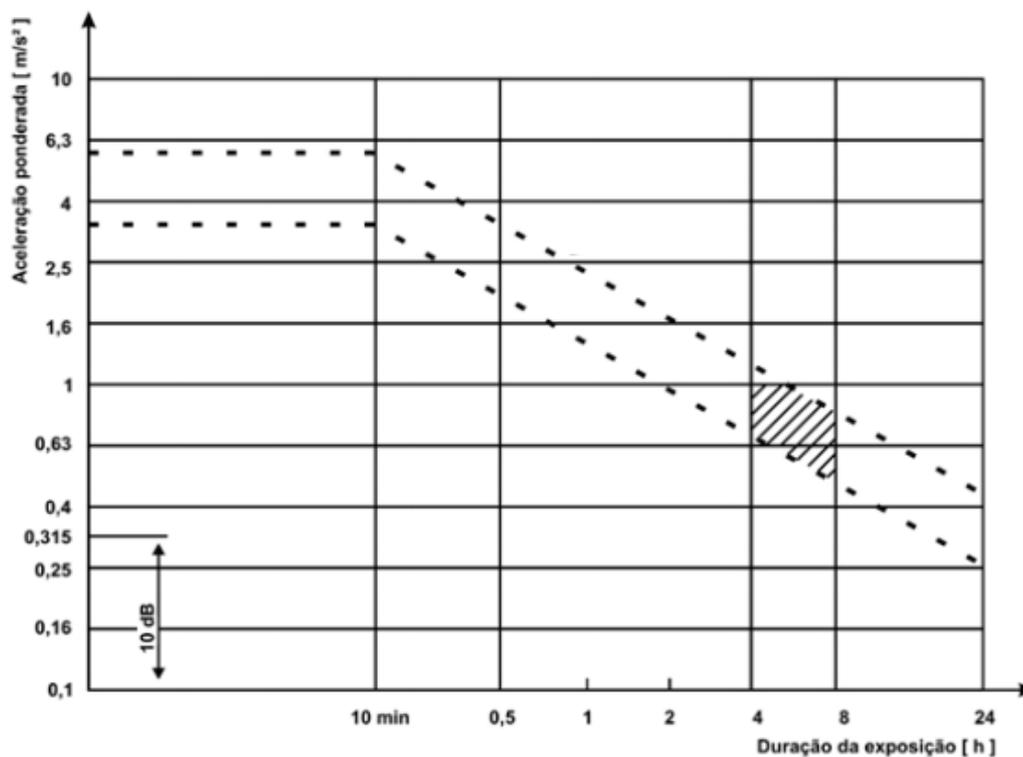
**Figura 15:** Curva de Frequência Ponderada (dB) por Frequência (Hz) para o eixo z e os eixos x e y [6].

O sistema de coordenadas adotados na ISO 2631-1 é o mostrado na Figura 16.



**Figura 16:** Eixos do corpo humano [33].

Os valores obtidos na avaliação da exposição da vibração no corpo humano devem ser comparados com o guia de saúde, representado pelo gráfico na Figura 17.



**Figura 17:** Zonas de precaução - Guia de Saúde [6].

A zona hachurada da Figura 17 representa o potencial risco à saúde. Para exposição acima da zona hachurada os danos à saúde são bastante prováveis. Para exposições abaixo da zona, não há efeitos que tenham sido documentados e/ou os seus efeitos não foram observados. Essas recomendações são para exposições com duração entre 4 a 8 horas. No entanto, durações mais curtas devem ser tratadas com extrema precaução [6].

## Capítulo 04

### Abordagem Experimental

Descrever os parâmetros, hipóteses adotadas, o desenvolvimento do experimento, o experimento propriamente dito é de suma importância para que se possa reproduzir o mesmo quando necessário e para validar modelagens que possam ser feitas. Esse capítulo abordará os requisitos necessários à realização do experimento.

#### 4.1 A bicicleta e o ciclista

Para que o experimento seja válido a mesma bicicleta foi utilizada para todos os experimentos. Trata-se de uma bicicleta simples, antiga, sem suspensão dianteira ou traseira, apenas com amortecedores no selim (Figura 18). Esse tipo de bicicleta era facilmente encontrado com estudantes da Universidade de Lund, Suécia, onde o experimento foi realizado. O objetivo de utilizá-la foi devido a reclamações de desconforto causado pela vibração ao se pedalar por alguns tipos de terrenos.



**Figura 18:** Bicicleta utilizada no experimento.

A massa da bicicleta era de 16,8 kg, aro do pneu 26", 7 marchas, freio dianteiro e no pedal. Como comentado anteriormente, a bicicleta não possui suspensão nas rodas, apenas amortecimento na parte inferior do selim.

Assim como a bicicleta, o ciclista de teste se manteve o mesmo durante todo o experimento: sexo masculino, 176 cm e 82 kg. O comprimento interno da perna foi medido,

dando um valor de 84 cm. Através desse valor e considerando a altura ótima do selim de 107% do comprimento interno da perna do ciclista, obteve-se o valor de 89,9 cm. Considerando todos os parâmetros para o correto ajuste da bicicleta da seção 2.1.2 deste trabalho tem-se:

- De acordo com a Tabela 1, a manivela deveria ter 17 cm, porém não era possível modificar o seu comprimento, deixando o seu comprimento original de 20 cm;
- O uso de presilha não se aplica ao modelo de bicicleta utilizado. No entanto, o tamanho do pé do ciclista influencia no ajuste do selim. Como visto na Tabela 2, para um pé com comprimento de 27 cm é necessário se o acréscimo de 0,2 cm à altura do selim;
- O comprimento posterior da perna do ciclista foi medido em 62 cm. Segundo a Tabela 3, o recuo do selim é de 34 cm;
- O alcance é medido tendo como parâmetros o comprimento do braço e do tronco. Para um conjunto braço + tronco de 130 cm é necessário se ter um alcance de 82 cm (Tabela 4);
- Para o nível do guidão os mesmos parâmetros usados no alcance são levados em consideração. E com base na Tabela 5 obtém-se que o nível do guidão deverá ser de 7,5 cm;
- Para finalizar, é necessário se ter a medida da largura do guidão. Para isso mediu-se a distância entre os ombros do ciclista de 55 cm, o que condiz com a largura do guidão de 62 cm.

Todas essas medidas, quando possível, foram ajustadas à bicicleta de modo a se ter o correto ajuste e a aumento da eficiência ao pedalar. Esse levantamento dos parâmetros foi feito a fim de tentar reduzir ao máximo o desconforto devido ao mau ajuste da bicicleta de acordo com a anatomia do ciclista, de modo a avaliar apenas o desconforto causado pela vibração devido à rugosidade do solo. O ciclista de teste era saudável, sem queixas causadas por câimbras, flexões/tensões excessivas e ferimento antes ou após os testes. Um resumo dos parâmetros da bicicleta e do ciclista pode ser encontrado na Tabela 7.

**Tabela 7:** Resumo dos parâmetros da bicicleta e do ciclista.

<u>Ciclista</u> 176 cm e 82 kg		<u>Bicicleta</u> 16,8 “kg, pneu 26”, marchas, freio dianteiro e contrapedal	
Comprimento interno da perna	84 cm	Altura ótima do selim	89,9 cm
Comprimento do pé	27 cm	Comprimento da manivela	17 cm*
Comprimento da parte posterior da perna	62 cm	Altura do selim	+0,2 cm**
Comprimento do tronco+braço	130 cm	Recuo do selim	34 cm
Comprimento dos ombros	55 cm	Comprimento do alcance	82 cm
		Nível do guidão	7,5 cm
		Largura do guidão	62 cm

## 4.2 Diferentes solos e inclinações

A queixa inicial, a qual esse trabalho foi baseado, foi a vibração excessiva ao se pedalar por ciclovias de paralelepípedos ou com inclinações excessivas. Por isso, decidiu-se fazer os testes por alguns tipos de solos e inclinações diferentes. Foi considerado o solo de asfalto, cimento (calçada), paralelepípedo e pedras bem pequenas (durante o presente trabalho este tipo de solo será chamado de pedrinhas), como pode ser visto na Figura 19. Todos os testes foram realizados em Lund, cidade universitária ao sul da Suécia.

---

\* Manteve-se o comprimento original da manivela de 20 cm.

\*\* Altura total do selim 90,1 cm.



a)



b)



c)



d)

**Figura 19:** Tipos de solos a) asfalto; b) cimento; c) paralelepípedo; d) pedrinhas.

Para facilitar a identificação dos testes que foram feitos, tem-se a Tabela 8. No entanto, devido ao grande volume de dados, apenas os solos planos serão estudados, como mostra a Tabela 9. Para verificação de todos os dados coletados como consta na Tabela 8 ver APÊNDICE B – Estudo de vibração dos dados coletados.

**Tabela 8:** Tipos de solos para os testes.

Tipo de Superfície	Solo Plano	Solo Inclinado	
		Subida	Descida
Pedras pequenas	✓	✓	✓
Paralelepípedo	✓	✓	✓
Asfalto	✓	✓	✓
Calçada (Cimento)	✓	✓	✓

**Tabela 9:** Tipos de solos apresentados no trabalho.

Tipo de Superfície	Solo Plano
Pedras pequenas	✓
Paralelepípedo	✓
Asfalto	✓
Calçada (Cimento)	✓

### 4.3 Acelerômetro

Para se medir a vibração no selim da bicicleta devido à rugosidade do solo, foi necessário desenvolver um dispositivo composto basicamente por um acelerômetro e arduíno. O desenvolvimento desse dispositivo foi feito pelo aluno de doutorado em Física do Estado Sólido da UFRJ Renato Teixeira Mourão, em intercâmbio estudantil na Universidade de Lund, na Suécia.

O acelerômetro é um dispositivo capaz de medir a aceleração de um objeto ao qual está acoplado. O sensor utilizado é composto por uma estrutura de polissilício construída em

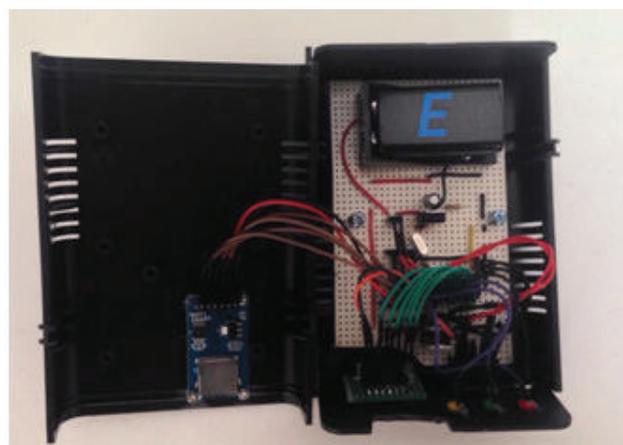
uma base de silício. O polissilício age como molas, que estão suspensas sobre a superfície de base, de forma a fornecer resistência a forças de aceleração e, dessa forma, medir a aceleração do objeto [34]. Para mais informações a respeito do acelerômetro vide ANEXO A – *Datasheet* ADXL335.



**Figura 20:** Acelerômetro

A Figura 20 mostra o acelerômetro usado no projeto e sua dimensão comparado a uma moeda de R\$1,00. Como se pode observar, o acelerômetro mede as acelerações nos três eixos (x, y e z) e consegue medir amplitudes de vibrações de  $\pm 3g$ , onde  $g$  é a gravidade ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ).

Para a gravação dos dados foi utilizada uma memória *SD card* acoplada a um microcontrolador Arduino® Uno. Uma bateria de 9 V foi suficiente para fornecer energia elétrica ao sistema.



**Figura 21:** Dispositivo para medir a vibração.

A Figura 21 mostra a caixa onde foi instalado o dispositivo para medir a vibração da bicicleta em movimento. A direita tem-se a caixa fechada e, a esquerda, como foi feita a montagem dentro da caixa.

Para se medir a aceleração a qual o sistema bicicleta+ciclista estava exposto foi necessário usar a caixa preta da Figura 21, um cabo para ligar a caixa preta ao acelerômetro, o acelerômetro e um *sd card*, como mostra a Figura 22.



**Figura 22:** Caixa preta, cabo, acelerômetro e sd card.

O Arduino® é uma plataforma de desenvolvimento que utiliza um microcontrolador ATMEGA328P para automatizar processos programados pelo usuário. A linguagem de programação a ser utilizada é a C/C++, onde o próprio microcontrolador faz o processo de compilação e transferência do código do computador para o microcontrolador, tornando-o uma ferramenta de programação e prototipagem bem rápida e versátil. O microcontrolador já possui memória para o programa, memória RAM para os dados e unidade de processamento [35].

A taxa de aquisição de dados do Arduino® e o tempo de resposta do acelerômetro irão ditar a faixa de frequência da aquisição de dados. Quanto mais rápida a aquisição de dados, maior a faixa de frequência que pode ser gravada na memória do *sd card*.

#### 4.4 Procedimento Experimental

Para a realização do experimento foi necessário ajustar a bicicleta da maneira estudada e recomendada, para que os problemas causados pelos parâmetros não influenciassem na medida de vibração e conforto do ciclista; realizar o acoplamento do acelerômetro ao Arduino® e a sua fixação; ajustar o acelerômetro o mais perto possível do selim da bicicleta; percorrer a cidade de Lund, na Suécia, de modo a obter dados de

diferentes tipos de superfícies (pedrinhas, paralelepípedo, asfalto e calçada); e obter dados de superfícies inclinadas, para cada percurso inclinado tomou-se dados de inclinação nas extremidades e no meio do caminho. No final, foi tirada a média da inclinação do percurso.

#### **4.5 Análise de dados**

De posse dos dados e através de um programa feito em Matlab® (APÊNDICE A) foi possível obter as bandas de frequência de 1/3 de oitava, como a norma ISO 2631 [6] solicita. Os gráficos de bandas de 1/3 de oitava foram traçados através do software Microsoft Excel®. Como as posições dos eixos x, y e z do acelerômetro não ficaram posicionados conforme senso comum, ao invés de adotar os nomes dos eixos x, y e z, foi adotada a nomenclatura vertical, lateral e longitudinal, respectivamente.

## Capítulo 05

### Abordagem Experimental - Resultados, Discussão e Conclusão

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos no experimento e uma breve discussão a respeito dos mesmos. No entanto, é importante salientar que devido ao grande volume de informação coletada experimentalmente, apenas os dados dos solos (calçada, asfalto, pedrinhas e paralelepípedos) sem inclinação serão expostos no presente capítulo. Um estudo aprofundado com todos os dados coletados a partir do experimento do acelerômetro no selim pode ser encontrado no *Apêndice B - Estudo de vibração dos dados coletados*.

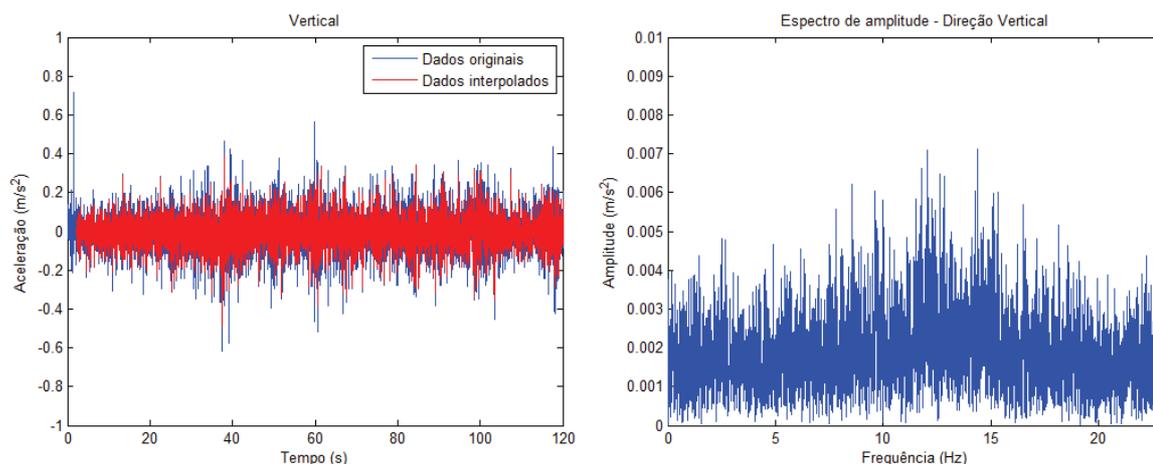
#### 5.1 Resultados

Para a obtenção da Transformada de Fourier Rápida (FFT) foi necessário a interpolação dos dados, para assim se impetrar dados igualmente espaçados. Para a obtenção dos gráficos de acordo com a norma ISO 2631-1 [6], foi necessário tratar os dados a partir de bandas de 1/3 de oitava.

Por falta de janela boa de clima, as medidas foram realizadas em tempo chuvoso. Com isso, os dados em solos arenosos e/ou terrosos (solo de pedrinhas, por exemplo) devem ser considerados com certa parcimônia, pois dessa forma o solo apresentava maior aderência à roda da bicicleta.

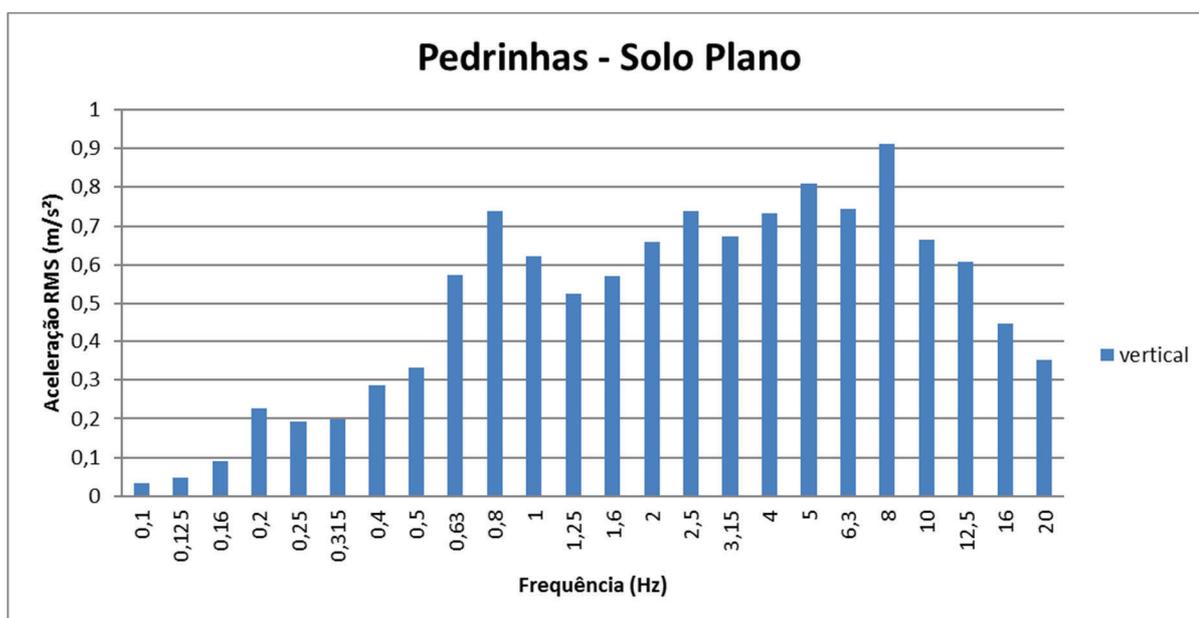
##### 5.1.1 Pedrinhas

O primeiro tipo de solo avaliado foi o de pedrinhas, sem inclinação. Os dados extraídos do acelerômetro podem ser vistos na Figura 23. É importante salientar que estes dados foram colhidos após dias chuvosos e, o solo de pedrinhas, por se tratar de um solo terroso, encontrava-se mais úmido, causando maior aderência na roda da bicicleta.



**Figura 23:** Solo de pedrinhas plano. À esquerda, dados originais e interpolados da Aceleração ( $m/s^2$ ) pelo tempo (s). À direita, o espectro de Frequência da vibração no eixo vertical.

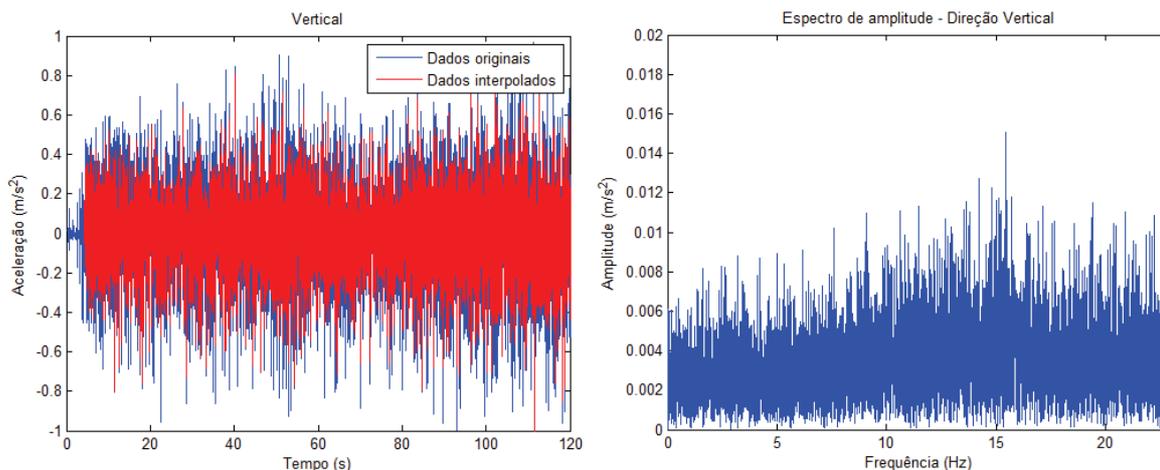
Através de um programa em Matlab® e uma planilha em Microsoft Excel® foi possível obter o gráfico de bandas de 1/3 de oitavas (Figura 24).



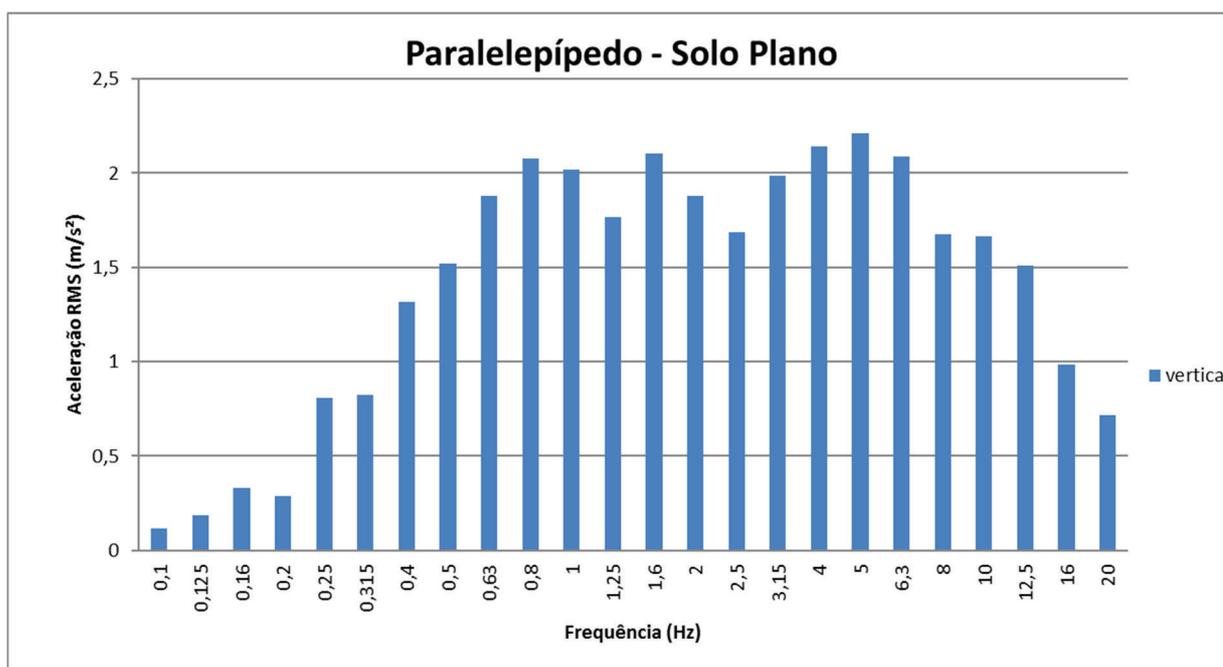
**Figura 24:** Bandas de 1/3 de oitava para superfície plana de pedrinhas.

### 5.1.2 Paralelepípedo

O solo seguinte a ser avaliado foi o de paralelepípedos. O mesmo procedimento foi feito para a sua avaliação: tomou-se os dados da superfície de paralelepípedos plana (Figura 25 e Figura 26).



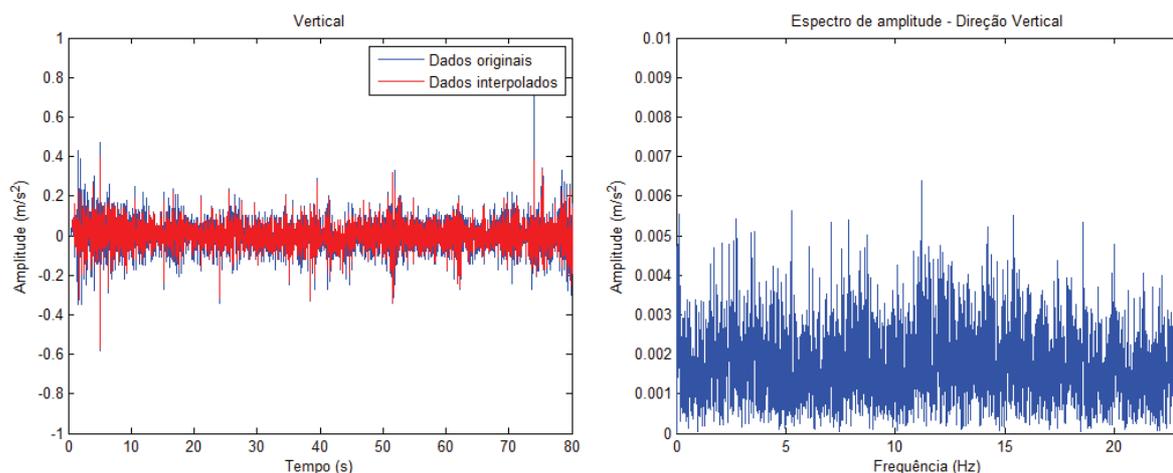
**Figura 25:** Solo de paralelepípedo plano. À esquerda, dados originais e interpolados da Aceleração ( $m/s^2$ ) pelo tempo (s). À direita, o espectro de Frequência da vibração no eixo vertical.



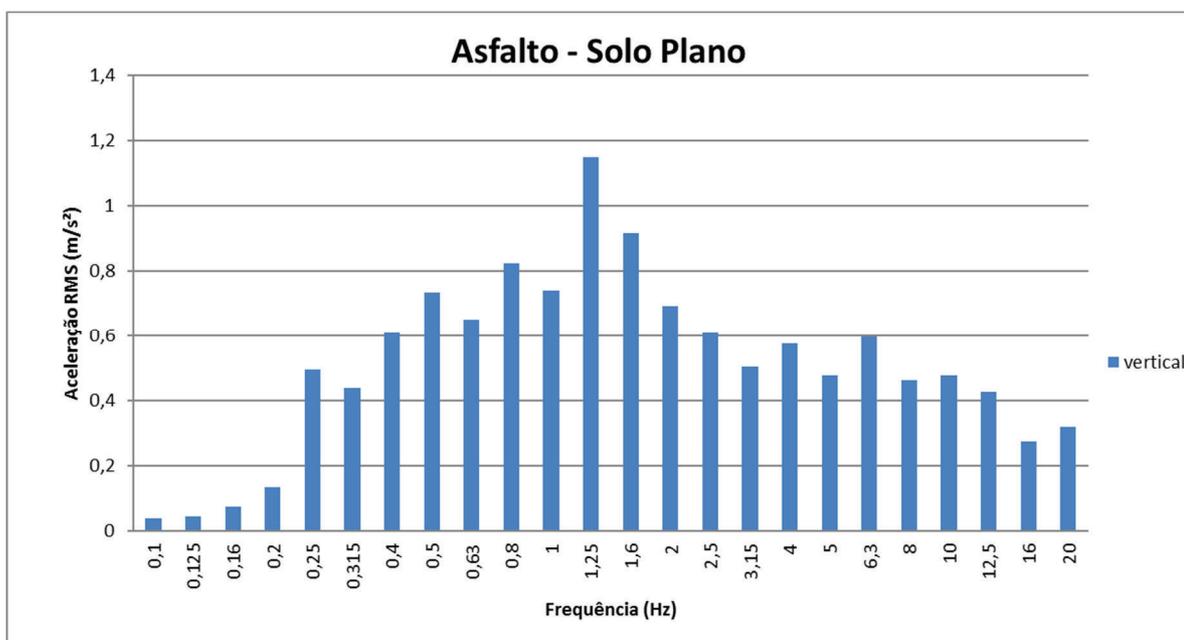
**Figura 26:** Espectro de bandas de 1/3 de oitava - paralelepípedo - solo plano

### 5.1.3 Asfalto

O asfalto foi o seguinte solo a ver avaliado. O mesmo procedimento foi feito para a sua avaliação: tomou-se os dados da superfície de asfalto plano (Figura 27 e Figura 28).



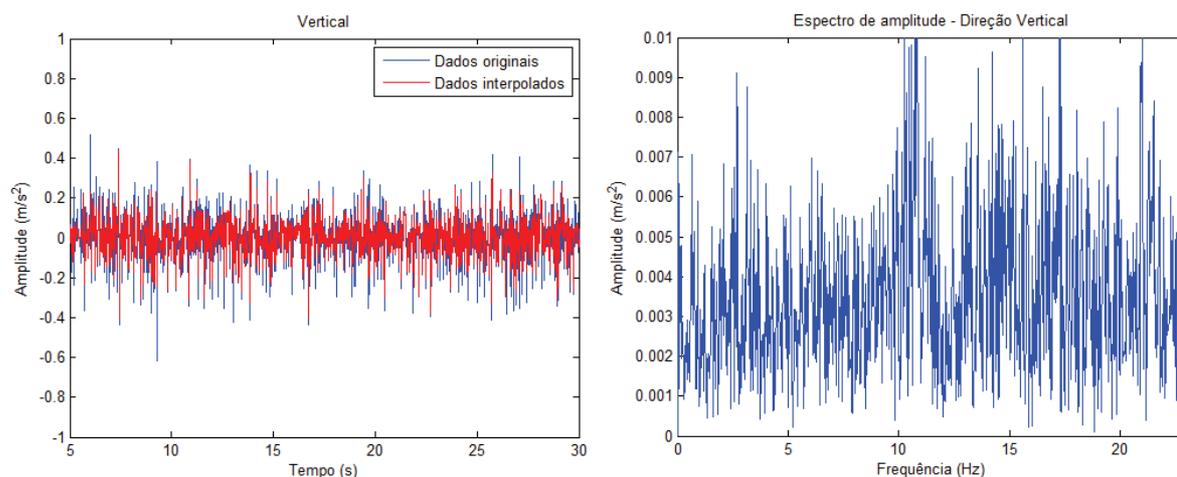
**Figura 27:** Solo de asfalto plano. À esquerda, dados originais e interpolados da Aceleração ( $m/s^2$ ) pelo tempo (s). À direita, o espectro de Frequência da vibração no eixo vertical.



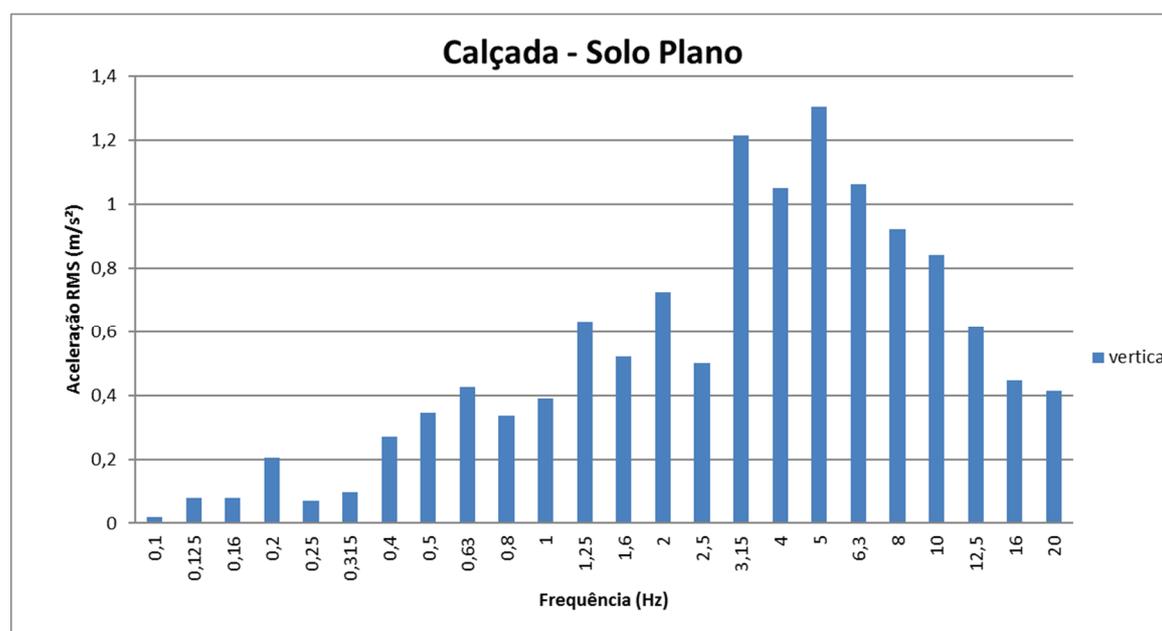
**Figura 28:** Espectro de bandas de 1/3 de oitava - asfalto - solo plano

### 5.1.4 Calçada

O solo seguinte a ser avaliado foi a calçada. O mesmo procedimento foi feito para a sua avaliação: tomou-se os dados da superfície da calçada plano (Figura 29 e Figura 30).



**Figura 29:** Solo calçada plana. À esquerda, dados originais e interpolados da Aceleração ( $m/s^2$ ) pelo tempo (s). À direita, o espectro de Frequência da vibração no eixo vertical.



**Figura 30:** Espectro de bandas de 1/3 de oitava - calçada - solo plano

## 5.2 Comparação e Discussão

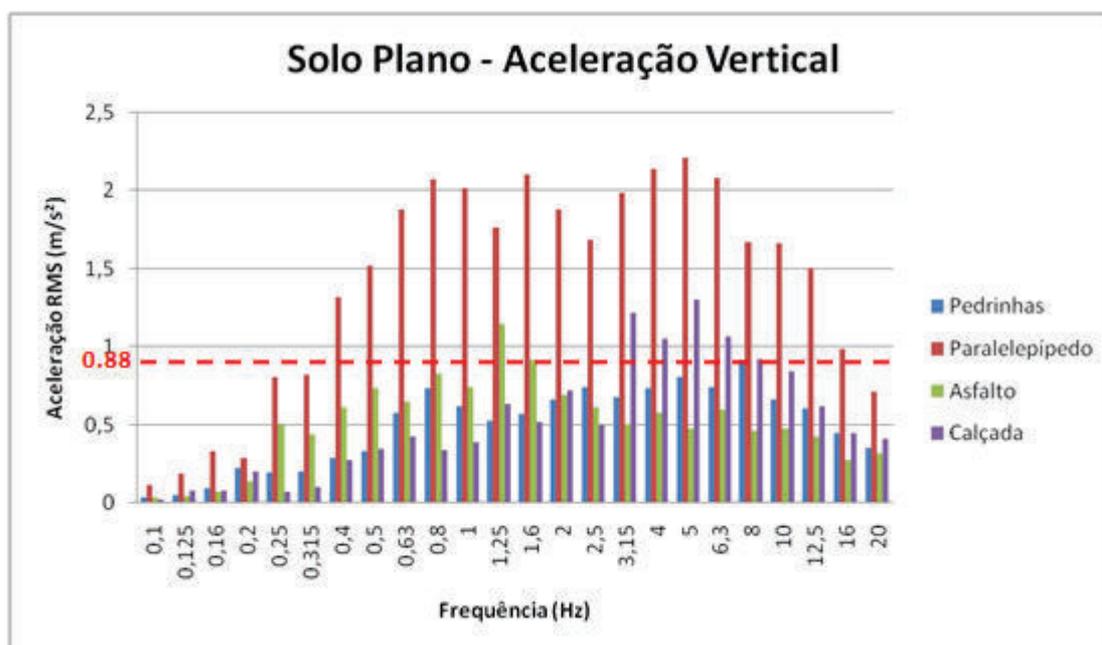
Segundo a norma ISO 2631-1 [6]:

- O limite de conforto está localizado na faixa entre 4 e 8 Hz na vibração vertical e de magnitude de no máximo  $0,88 m/s^2$ ;
- Para as outras direções, o limite de conforto situa-se entre 0,5 a 2 Hz;

- Frequências na direção vertical abaixo de 0,5 Hz podem causar enjoos;
- A magnitude total da aceleração pode ser calculada pela Equação 1;
- No entanto, a reação a magnitudes de aceleração depende de pessoa para pessoa e do tempo de duração da atividade;
- A área hachurada da Figura 17 indica potencial de risco à saúde.

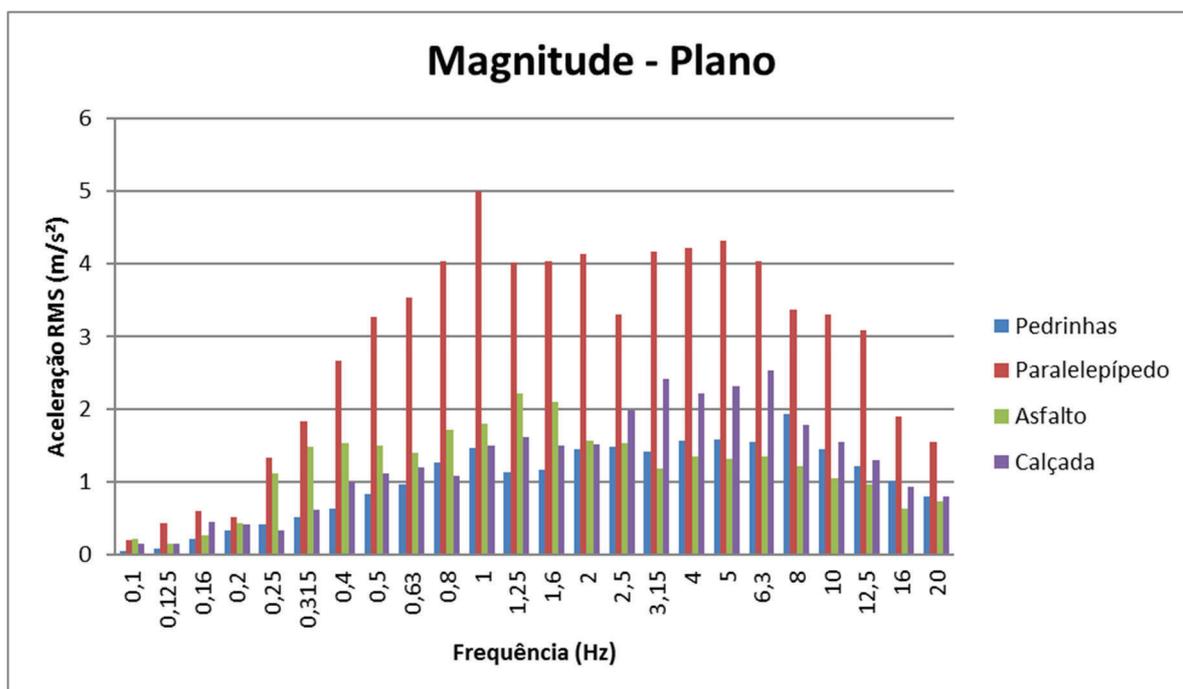
### 5.2.1 Aceleração Vertical

A representação dos dados em barras, como mostra o gráfico da Figura 31, foi obtido a fim de comparar os tipos de solos com a mesma componente da aceleração: os quatro tipos de solo (pedrinhas, paralelepípedo, asfalto e calçada) tem o seu espectro de bandas de 1/3 de oitava comparados, onde a linha tracejada em vermelho representa o limite aceitável.



**Figura 31:** Solo plano – Aceleração vertical

Com relação à Figura 31, a superfície de paralelepípedos tem os maiores picos de aceleração, seguido por calçada e asfalto. Os dados referentes à superfície de pedras pequenas (pedrinhas) foram coletados em um dia chuvoso. Por conta disso, esses dados deveriam ser obtidos novamente, visto que é razoável pensar que o solo terroso fica mais aderente quando molhado, afetando os resultados.



**Figura 32:** Magnitude da aceleração em solo plano.

Por meio das vibrações vertical, longitudinal e transversal (ver Apêndice B) é possível obter a magnitude da aceleração da vibração do selim. Como mostra a Figura 32, a magnitude de vibração do solo de paralelepípedos é superior à dos outros tipos de solos estudados.

A fim de facilitar a comparação e leitura dos resultados obtidos, resolveu-se uni-los em uma única tabela como segue na Tabela 10.

**Tabela 10:** Resumo dos Resultados do Experimento – Solo Plano.

Tipos de Solos	Aceleração RMS (m/s <sup>2</sup> ) x Frequência (Hz)	
	Aceleração Vertical (Figura 31)	Aceleração Vertical (Figura 32)
Asfalto	1,19 m/s <sup>2</sup> x 1,25 Hz	2,2 m/s <sup>2</sup> x 1,25 Hz
Paralelepípedo	2,2 m/s <sup>2</sup> x 5 Hz	5 m/s <sup>2</sup> x 1 Hz
Pedrinhas	0,98 m/s <sup>2</sup> x 8 Hz	1,5 m/s <sup>2</sup> x 4 Hz
Calçada	1,3 m/s <sup>2</sup> x 5 Hz	2,2 m/s <sup>2</sup> x 1,25 Hz

### 5.3 Conclusão

Quando as componentes da aceleração são analisadas separadamente, as superfícies que apresentam melhor resultado quanto ao conforto do ciclista são: calçada (cimento) e asfalto, como visto na Figura 31. Todos os dados foram coletados no mesmo dia ou em dias consecutivos. Por falta de janela boa de clima, as medidas foram realizadas em tempo

chuvoso. E, desta forma, os dados com relação as medidas do solo de pedrinhas se tornam duvidosos, pois o solo estava úmido e com isso os resultados podem ter sido comprometidos.

Ao analisar com relação à magnitude, a mesma conclusão é tirada: os solos de asfalto e cimento são os que apresentam menores amplitude de vibração, uma vez que os dados do solo de pedrinhas não são considerados. No entanto, os resultados da superfície de paralelepípedo são muito maiores que as demais, deixando claro que paralelepípedo não é uma superfície que deveria ser usada em ciclovias.

Observou-se que o asfalto tem melhor resposta para frequências acima de 2,5 Hz, enquanto que a calçada responde melhor para frequências abaixo de 2,5 Hz. Porém observa-se que para frequências perto de 20 Hz ambos têm comportamento semelhante. No entanto, não há como comprovar o comportamento acima de 20 Hz dada à taxa de aquisição de dados que não permitiu a obtenção de dados acima do valor citado.

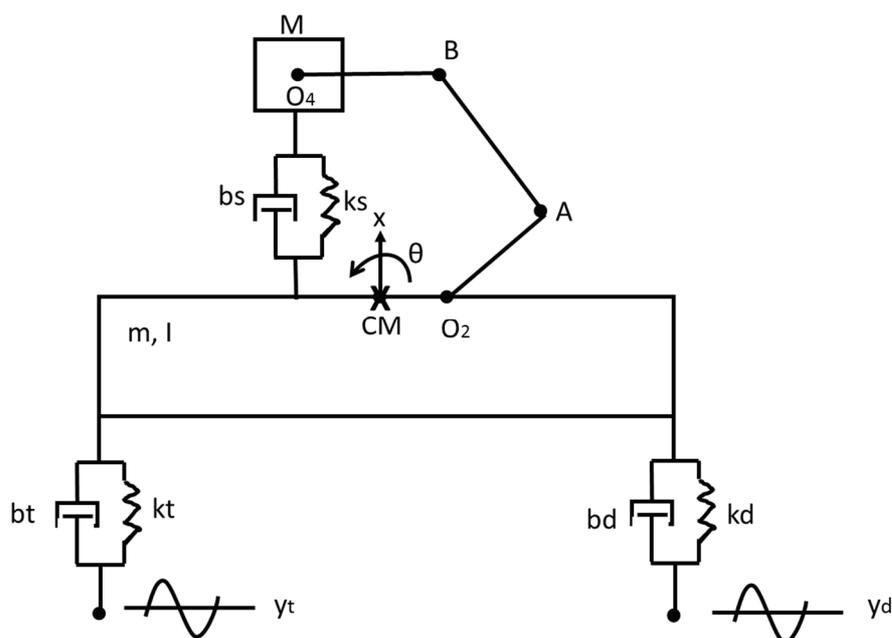
## Capítulo 06

### Modelo Físico Idealizado

Este capítulo tem como objetivo a modelagem matemática e computacional do problema vibracional ao qual o ciclista está exposto ao pedalar.

#### 6.1 Modelo Completo

O modelo elaborado para o estudo de vibração do selim consiste em um conjunto de mecanismo 4 barras conectado a um sistema de vibrações de três graus de liberdade, como mostra a Figura 33.



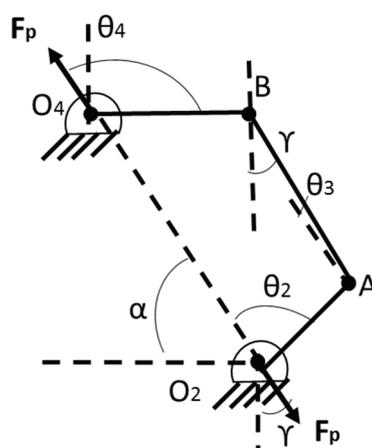
**Figura 33:** Modelo físico idealizado da bicicleta.

O mecanismo 4-barras consiste das barras  $O_2$ -A-B- $O_4$ , onde  $M$  é a massa do ciclista, a massa  $m$  e o momento de inércia  $I$  são os parâmetros da bicicleta. As constantes de rigidez da mola e amortecimento são representadas pelas letras  $k$  e  $b$ , respectivamente. Os índices relacionados as constantes de amortecimento e rigidez correspondem à  $s$  (selim),  $t$  (traseira) e  $d$  (dianteira). O conjunto mola-amortecedor com índice  $s$  ( $k_s$  e  $b_s$ ) é a representação do modelo de vibração para o selim. O conjunto mola-amortecedor com índice  $t$  ( $k_t$  e  $b_t$ )

representa a roda traseira da bicicleta e o conjunto d (kd e bd) representa a roda dianteira. As excitações de base  $y_t$  e  $y_d$  são as representações para a rugosidade do solo.

## 6.2 Mecanismo 4-barras

O modelo utilizado para simular o movimento de pedalar do ciclista foi o 4-barras, como mostra a Figura 34, para assim estimar a força  $F_p$  aplicada ao pedal.



**Figura 34:** Mecanismo 4-barras.

Baseado no mecanismo representado pela Figura 34, tem-se que: a parte superior da perna do ciclista (coxa) é a barra  $O_4B$ ; a parte inferior da perna do ciclista é a barra  $AB$ ; a manivela da bicicleta é representada pela barra  $O_2A$ ; o ponto  $O_4$  é a junção entre o tronco e o fêmur do ciclista; o ponto  $B$  é o joelho do ciclista; o ponto  $A$  é o pedal da bicicleta;  $O_2$  é o eixo da manivela; o mecanismo está defasado do eixo  $x$  por um ângulo  $\alpha$ ;  $\theta_2$  é o ângulo entre a manivela e barra  $O_2O_4$ ;  $\theta_3$  é o ângulo que a barra  $AB$  faz com uma reta paralela a barra  $O_2O_4$ ;  $\theta_4$  é o ângulo entre a barra  $O_2O_4$  e a coxa do ciclista;  $\gamma$  é o ângulo que a barra  $AB$  faz com a vertical e será essencial para o cálculo da força  $F_p$  aplicada ao pedal. O mecanismo considerado tem como pontos fixos  $O_2$  e  $O_4$ .

Segundo Norton [36], as equações para um mecanismo 4-barras são:

$$A_x = a \cos(\theta_2) \quad (\text{Equação 2})$$

$$A_y = a \sin(\theta_2) \quad (\text{Equação 3})$$

$$B_x = S - \frac{2A_y B_y}{2(A_x - d)} \quad (\text{Equação 4})$$

$$B_y = \frac{-Q \pm \sqrt{Q^2 - 4PR}}{2P} \quad (\text{Equação 5})$$

$$\theta_3 = \tan^{-1} \left( \frac{B_y - A_y}{B_x - A_x} \right) \quad (\text{Equação 6})$$

$$\theta_4 = \tan^{-1} \left( \frac{B_y}{B_x - d} \right) \quad (\text{Equação 7})$$

Onde:

$$P = \frac{A_y^2}{(A_x - d)^2} + 1 \quad (\text{Equação 8})$$

$$Q = \frac{2A_y(d - S)}{A_x - d} \quad (\text{Equação 9})$$

$$R = (d - S)^2 - c^2 \quad (\text{Equação 10})$$

$$S = \frac{a^2 - b^2 + c^2 - d^2}{2(A_x - d)} \quad (\text{Equação 11})$$

As equações 2 a 11 serão implementadas no Matlab®, com o intuito de simular o movimento de pedalar e obter o ângulo  $\gamma$ . Para aplicação do problema proposto foi considerado que a força no pedal  $F_p$  era de 20% da força peso do ciclista (Equação 12) e o ângulo  $\gamma$  dado pela Equação 13:

$$F_p = 0,2 Mg \quad (\text{Equação 12})$$

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - (\alpha + \theta_3) \quad (\text{Equação 13})$$

O movimento de pedalar foi simulado supondo que a partir de um certo ângulo inicial e um final uma perna do ciclista é responsável pelo movimento e, que, a outra perna do ciclista estaria defasada de  $\pi$  com relação ao movimento da primeira. Sendo assim, estipulou-se que o ciclista começaria com a perna direita e que os ângulos inicial e final seriam como se segue:

$$\theta_2(\text{inicial}) = \frac{\pi}{2} - \alpha \quad (\text{Equação 14})$$

$$\theta_2(\text{final}) = \frac{3\pi}{2} - \alpha \quad (\text{Equação 15})$$

### 6.3 Modelo de Vibração

O modelo de vibração aplicado ao problema foi um sistema de três graus de liberdade, onde a bicicleta tinha movimento linear e angular e o ciclista apenas movimento linear. Levando em consideração os amortecimentos e rigidez inerentes ao sistema real tem-se:

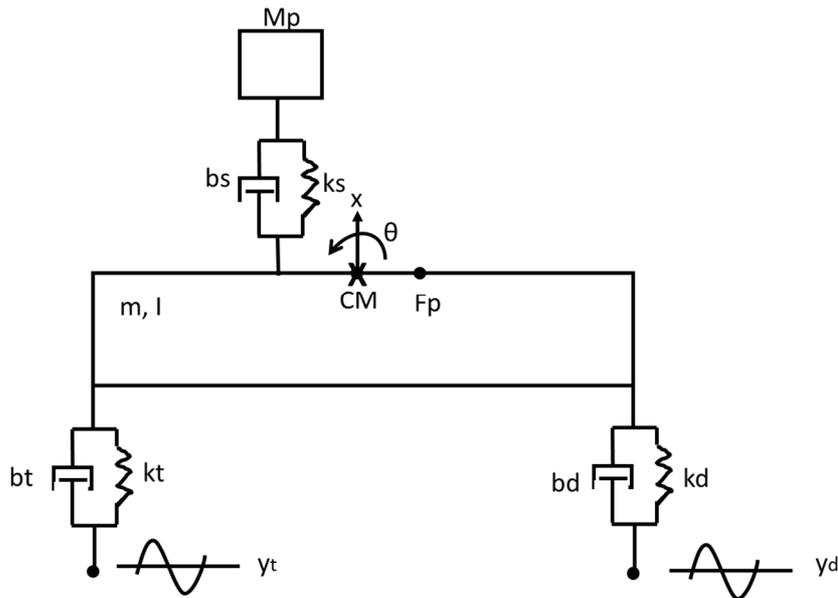


Figura 35: Modelo de vibrações de três graus de liberdade.

Com base no esquemático representado na Figura 35 e escrevendo as equações de vibrações, obteve-se:

$$\mathbf{M}\ddot{\underline{x}} + \mathbf{B}\dot{\underline{x}} + \mathbf{K}\underline{x} = \overline{\mathbf{B}}\dot{\underline{y}} + \overline{\mathbf{K}}\underline{y} + \mathbf{F} \quad (\text{Equação 16})$$

onde:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & M_p \end{bmatrix}; \quad (\text{Equação 17})$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} bd + bt + bs & bd * ld - bt * lt - bs * ls & -bs \\ bd * ld - bt * lt - bs * ls & bd * ld^2 + bt * lt^2 + bs * ls^2 & bs * ls \\ -bs & bs * ls & bs \end{bmatrix}; \quad (\text{Equação 18})$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} kd + kt + ks & kd * ld - kt * lt - ks * ls & -ks \\ kd * ld - kt * lt - ks * ls & kd * ld^2 + kt * lt^2 + ks * ls^2 & ks * ls \\ -ks & ks * ls & ks \end{bmatrix}; \quad (\text{Equação 19})$$

$$\overline{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} bd & bt & 0 \\ bd * ld & -bt * lt & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad \overline{\mathbf{K}} = \begin{bmatrix} kd & kt & 0 \\ kd * ld & -kt * lt & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad (\text{Equação 20})$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ Fp * \cos(\gamma) \\ Fp * \cos(\gamma) * lp \\ Mp g - Fp * \cos(\gamma) \end{bmatrix}; \quad (\text{Equação 21})$$

$$\underline{\ddot{x}} = \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{x}_p \end{bmatrix}; \quad \underline{\dot{x}} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\theta} \\ \dot{x}_p \end{bmatrix}; \quad \underline{x} = \begin{bmatrix} x \\ \theta \\ x_p \end{bmatrix}; \quad (\text{Equação 22})$$

$$\underline{\dot{y}} = \begin{bmatrix} \dot{y}_d \\ \dot{y}_t \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \underline{y} = \begin{bmatrix} y_d \\ y_t \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (\text{Equação 23})$$

Onde:

$m$  = massa da bicicleta [kg];

$I$  = momento de inércia da bicicleta [kg.m<sup>2</sup>];

$Mp$  = massa do passageiro [kg];

$bd$  = constante de amortecimento para a roda dianteira da bicicleta [N.s/m];

$bt$  = constante de amortecimento para a roda traseira da bicicleta [N.s/m];

$bs$  = constante de amortecimento do selim da bicicleta [N.s/m];

$ld$  = distância entre o centro de massa e a roda dianteira [m];

$lt$  = distância entre o centro de massa e a roda traseira [m];

$ls$  = distância entre o centro de massa e o selim [m];

$kd$  = constante de rigidez da roda dianteira da bicicleta [N/m];

$kt$  = constante de rigidez da roda traseira da bicicleta [N/m];

$ks$  = constante de rigidez do selim da bicicleta [N/m];

$x$  = deslocamento linear da bicicleta [m];

$\theta$  = deslocamento angular da bicicleta [rad];

$x_p$  = deslocamento do passageiro [m];

$\dot{x}$  = velocidade linear da bicicleta [m/s];

$\dot{\theta}$  = velocidade angular da bicicleta [rad/s];

$\dot{x}_p$  = velocidade linear do passageiro [m/s];

$\ddot{x}$  = aceleração linear da bicicleta [m/s<sup>2</sup>];

$\ddot{\theta}$  = aceleração angular da bicicleta [rad/s<sup>2</sup>];

$\ddot{x}_p$  = aceleração do passageiro [m/s<sup>2</sup>];

$y_d$  = perfil de rugosidade para a roda dianteira [m];

$y_t$  = perfil de rugosidade para a roda traseira [m];

$\dot{y}_d$  = perfil de velocidade da rugosidade para a roda dianteira [m/s];

$\dot{y}_t$  = perfil de velocidade da rugosidade para a roda traseira [m/s].

Para que o programa de Matlab® resolva a equação diferencial de segunda ordem representada pelas matrizes acima é necessário realizar redução de ordem da equação diferencial. Seja:

$$\underline{\dot{x}} = \underline{v} \quad (\text{Equação 24})$$

Então

$$\underline{\ddot{x}} = \underline{\dot{v}} \quad (\text{Equação 25})$$

Logo a Equação 16 fica:

$$\underline{M}\underline{\dot{v}} + \underline{B}\underline{v} + \underline{K}\underline{x} = \underline{\bar{B}}\underline{\dot{y}} + \underline{\bar{K}}\underline{y} + \underline{F} \quad (\text{Equação 26})$$

Reescrevendo, tem -se:

$$\underline{\dot{v}} = -\underline{M}^{-1}\underline{B}\underline{v} - \underline{M}^{-1}\underline{K}\underline{x} + \underline{M}^{-1}\underline{\bar{B}}\underline{\dot{y}} + \underline{M}^{-1}\underline{\bar{K}}\underline{y} + \underline{M}^{-1}\underline{F} \quad (\text{Equação 27})$$

E

$$\begin{bmatrix} \underline{\dot{x}} \\ \underline{\dot{v}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\mathbf{0}]_{3 \times 3} & [I]_3 \\ -\underline{M}^{-1}\underline{K} & -\underline{M}^{-1}\underline{B} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{x} \\ \underline{v} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [\mathbf{0}]_{3 \times 3} & [\mathbf{0}]_{3 \times 3} \\ -\underline{M}^{-1}\underline{\bar{K}} & -\underline{M}^{-1}\underline{\bar{B}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{y} \\ \underline{\dot{y}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [\mathbf{0}]_{3 \times 1} \\ -\underline{M}^{-1}\underline{F} \end{bmatrix} \quad (\text{Equação 28})$$

Todas as equações descritas nesta seção foram usadas para a compilação do programa que simula a vibração na bicicleta (ver Apêndice A).

## 6.4 Rugosidade do solo

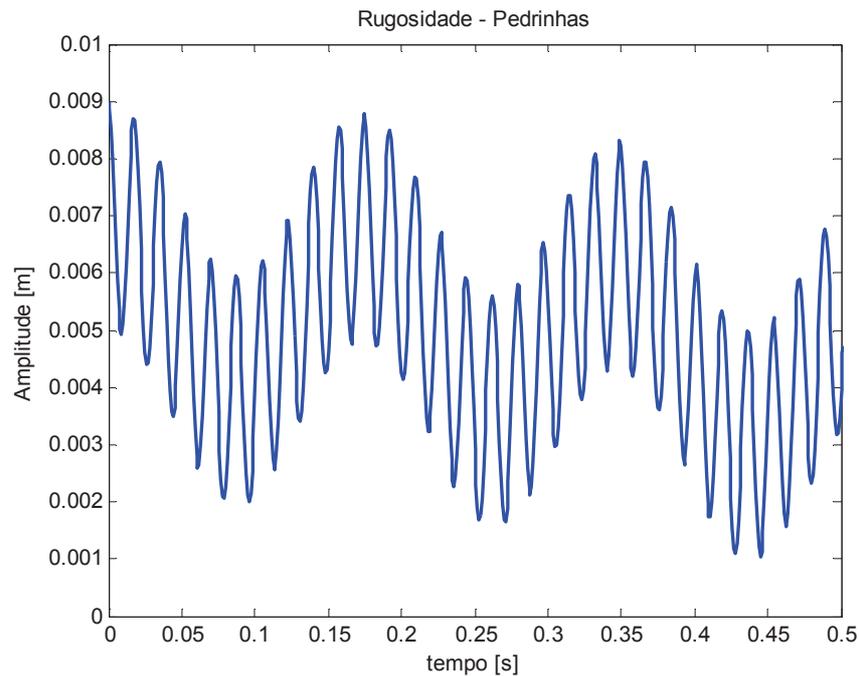
Por meio de experimentação, observou-se que era razoável fazer a representação da rugosidade ( $y_d$  e  $y_t$ ) do solo por meio de harmônicos. Para isto, utilizou-se três harmônicos (frequência alta) e alguns parâmetros ( $u_0$ ,  $u_1$  e  $u_2$  amplitude da rugosidade; velocidade angular da coroa maior – manivela ( $w_c$ ); tempo  $t$ ; e tempo  $t_a$ , que é o tempo em que a roda traseira demora para passar pelo mesmo ponto que a dianteira). As equações utilizadas para a representação da rugosidade do solo podem ser observadas pelas Equação 29 e Equação 30.

$$y_d = u_0 \cos(w_c t) + u_1 \cos(10w_c t) + u_2 \cos(100w_c t) \quad (\text{Equação 29})$$

$$y_t = u_0 \cos(w_c(t + t_d)) + u_1 \cos(10w_c(t + t_d)) + u_2 \cos(100w_c(t + t_d)) \quad (\text{Equação 30})$$

### 6.4.1 Pedrinhas

Os seguintes parâmetros foram utilizados:  $u_0=0,001$  m;  $u_1=0,0015$  m e  $u_2=0,002$  m.

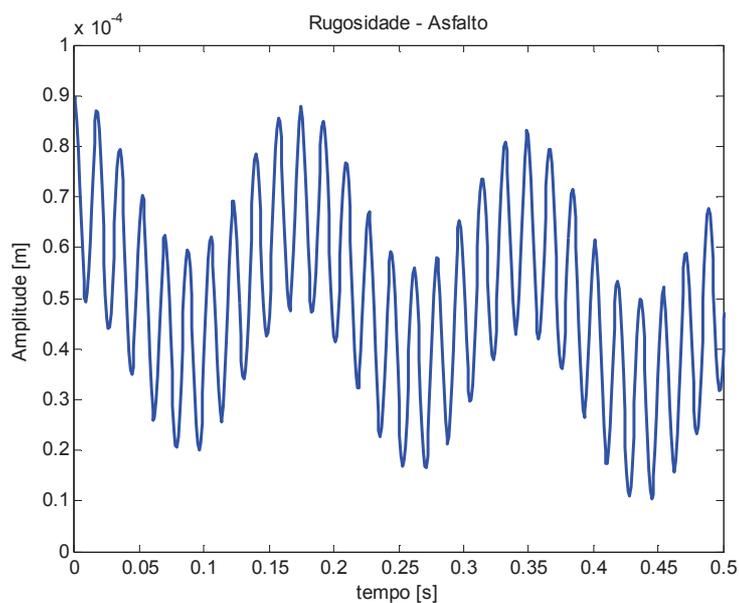


**Figura 36:** Rugosidade - pedrinhas.

Como pode ser verificado na Figura 36 a rugosidade para o solo pedrinhas tem amplitude menor que 9 mm.

### 6.4.2 Asfalto

O mesmo raciocínio do programa do solo das pedrinhas foi utilizado para a simulação do asfalto. No entanto, utilizou-se “grãos” ( $u_0$ ,  $u_1$  e  $u_2$ ) menores ( $u_0=0,00001$  m;  $u_1=0,000015$  m e  $u_2=0,00002$  m).

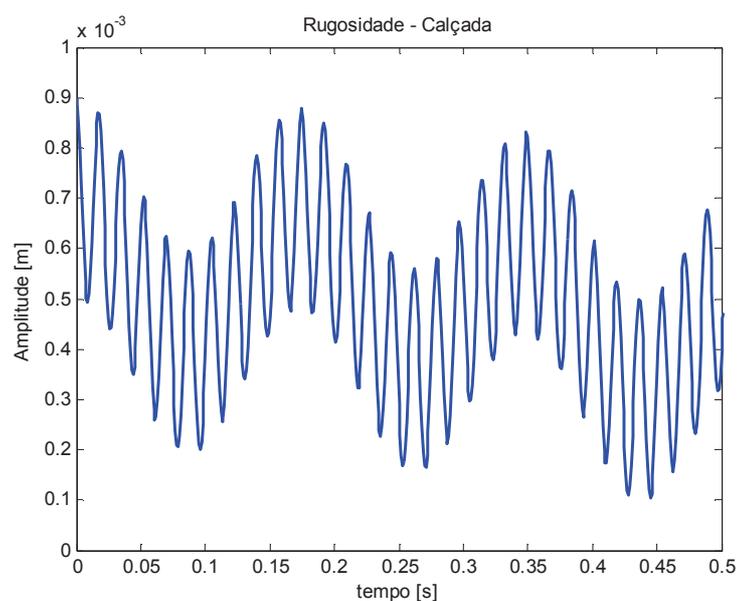


**Figura 37:** Rugosidade - Asfalto.

A Figura 37 mostra que a altura máxima para os parâmetros utilizados para simular o asfalto é de 0,09 mm.

### 6.4.3 Calçada

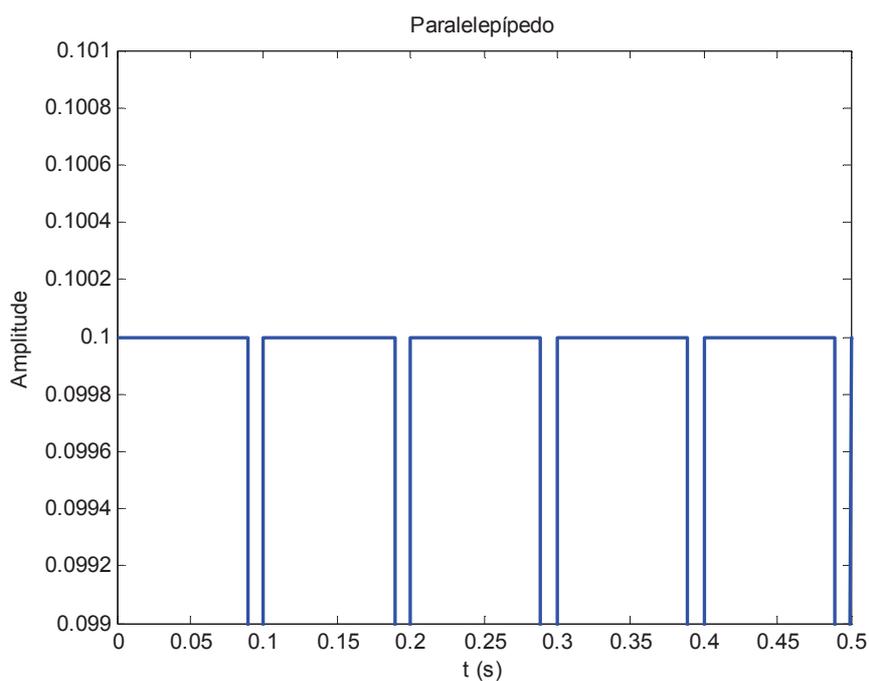
Os parâmetros de amplitude para a simulação do solo calçada foram intermediários entre o asfalto e o solo de pedrinhas ( $u_0=0,0001$  m;  $u_1=0,00015$  m e  $u_2=0,0002$  m). A Figura 38 mostra que a amplitude máxima para esta simulação foi de 1 mm. A amplitude máxima é 9 vezes maior do solo de pedrinhas para calçada.



**Figura 38:** Rugosidade – Calçada.

### 6.4.4 Paralelepípedo

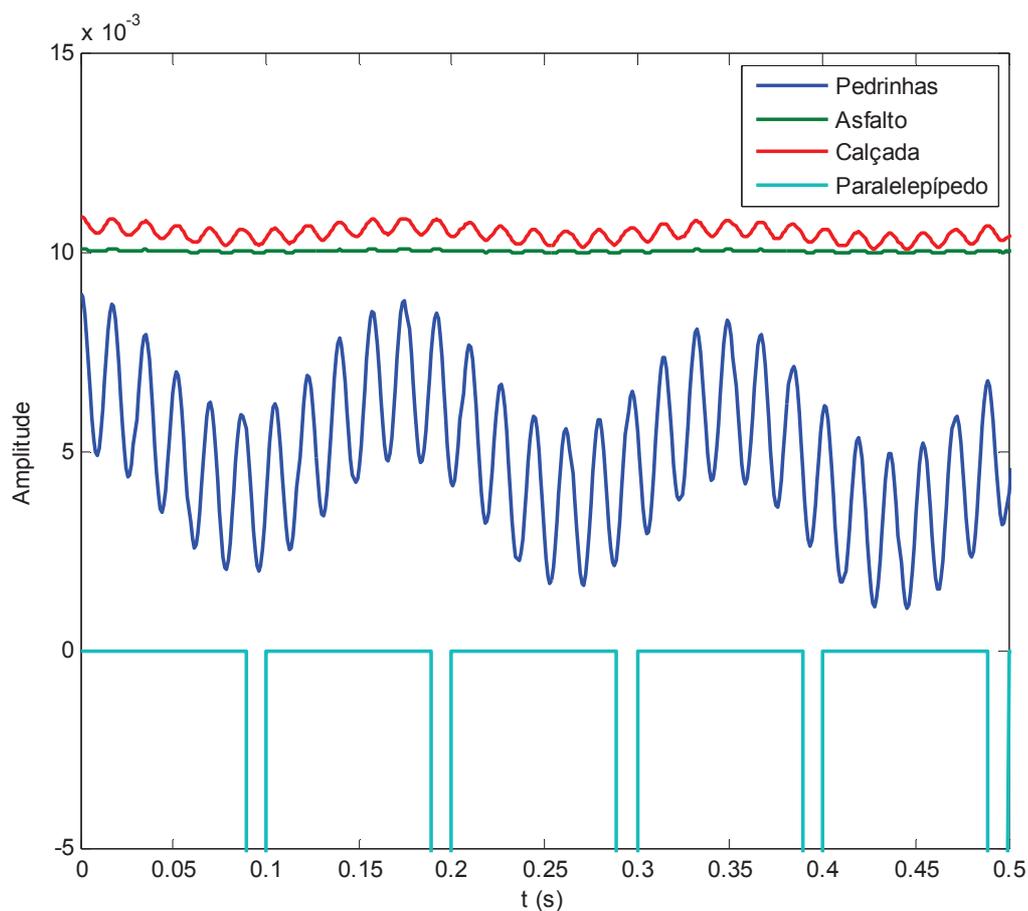
Para o solo de paralelepípedo outra estratégia de simulação foi necessária: usou-se a função de geração de onda quadrada do Matlab®, conforme mostra a Figura 39. Para conferir o código utilizado para a geração de rugosidade ver Apêndice A.2.



**Figura 39:** Rugosidade - Paralelepípedo.

### 6.4.5 Todas as Rugosidades

Todos as excitações geradas para as rugosidades foram esquematizadas em um mesmo gráfico (Figura 40), a fim de elucidar as diferenças entre as mesmas.



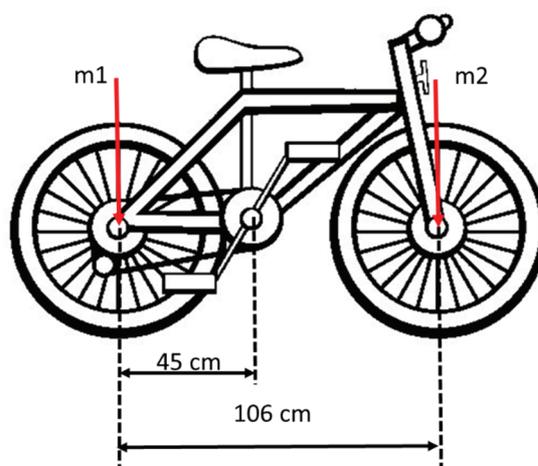
**Figura 40:** Rugosidades simuladas.

## 6.5 Centro de Massa

O centro de massa foi estimado de duas formas: por aproximação de que  $2/3$  da massa da bicicleta está na roda traseira e  $1/3$  na dianteira; e içando a bicicleta por diferentes pontos até que a mesma se mantivesse estática e medição desse ponto de equilíbrio.

### 6.5.1 Distribuição da Força Peso

Como mencionado anteriormente, a bicicleta possui 16,8 kg. Supondo que  $2/3$  da massa da bicicleta esteja na roda traseira e  $1/3$  na roda dianteira como mostra a Figura 41, onde pode-se ver as distâncias entre a manivela e as rodas traseira e dianteira:



**Figura 41:** Esquemático de distribuição de massa na bicicleta.

Sendo assim:

$$m_1 = \frac{2}{3} * m_{bicicleta} = \frac{2}{3} * 16.8 = 11.2 \text{ kg}$$

$$m_2 = \frac{1}{3} * m_{bicicleta} = \frac{1}{3} * 16.8 = 5.6 \text{ kg}$$

As fórmulas abaixo foram aplicadas para que o centro de massa fosse estimado.

$$d_1 = \frac{m_2}{m_{bicicleta}} * d_{total} = \frac{5.6}{16.8} * 106 = 34.7 \text{ cm}$$

$$d_2 = d_{total} - d_1 = (106 - 34.7) \text{ cm} = 71.3 \text{ cm}$$

Assim, a distância entre o centro de massa e as rodas pode ser descrita como mostram as equações acima, nas quais  $d_1$  é a distância do centro de massa para a roda dianteira e  $d_2$  a distância entre a roda traseira e o centro de massa.

### 6.5.2 Ponto de Equilíbrio

Outra forma de estimar o centro de massa é por meio do içamento da bicicleta por um único ponto, o qual será determinado quando atingir o equilíbrio de momento. O descrito foi realizado e obteve-se as seguintes dimensões:

$$d_1 = (62 \pm 1) \text{ cm}$$

$$d_2 = (44 \pm 1) \text{ cm}$$

Onde:  $d_1$  é a distância do centro de massa para a roda dianteira e  $d_2$  a distância entre a roda traseira e o centro de massa. A incerteza da medida foi considerada uma unidade do medido devido ao erro associado a medição (0,5 cm – segundo a escala da trena usada para medir) e ao fato do içamento poder ter erros associados à sua ação.

O centro de massa obtido por meio do ponto de equilíbrio foi o escolhido a ser usado por esse trabalho.

## 6.6 Momento de Inércia

Para o cálculo do momento de inércia da bicicleta considerou-se que esta é composta apenas por uma estrutura cilíndrica tubular de alumínio e duas rodas.

Roda da bicicleta – considerando uma massa de 2,0 kg e um aro de 26”

$$I = \frac{M * R^2}{2} = \frac{2 * 0,33^2}{2} = 0,1089 \text{ kg. m}^2$$

Quadro – estrutura tubular de alumínio de 40mm de diâmetro – 106 cm – densidade 2697 kg/m<sup>3</sup>

$$\begin{aligned} I &= \frac{1}{2}mr^2 + \frac{1}{12}ml^2 = \\ &= \frac{1}{2} \left( 2697 * \pi * \frac{0,04^2}{4} * 1,06 \right) * 0,04^2 + \frac{1}{12} \left( 2697 * \pi * \frac{0,04^2}{4} * 1,06 \right) * 1,06^2 = \\ &= 2,87e - 3 + 0,336 = 0,339 \text{ kg. m}^2 \end{aligned}$$

Usando o teorema dos eixos paralelos ou Teorema de Steiner para obter o momento de inércia no centro de massa:

$$I = I_{cm} + Md^2$$

Roda dianteira:

$$I_d = 0,1089 + 2 * 0,62^2 = 0,878 \text{ kg. m}^2$$

Roda traseira:

$$I_t = 0,1089 + 2 * 0,44^2 = 0,496 \text{ kg. m}^2$$

Com isso, o momento de inércia total da bicicleta é a soma dos momentos de inércia no centro de massa:

$$I = 0,878 + 0,496 + 0,339 = 1,713 \text{ kg. m}^2$$

## 6.7 Constantes de Rigidez e Amortecimento

Para se estimar as constantes de rigidez um método simples foi utilizado: subiu-se na bicicleta e mediu-se os deslocamentos causados pela força peso do indivíduo nas rodas e no selim.

Observou-se que ao ser submetida ao peso do ciclista (82 kg) a bicicleta apresentou as seguintes configuração:

- Altura do selim ao chão = 85,5 cm  
Após o Peso do ciclista = 82 cm
- Altura da roda traseira ao chão = 65 cm  
Após o Peso do Ciclista = 63 cm
- Altura da roda dianteira ao chão = 65 cm  
Após o Peso do Ciclista = 64,5 cm

Levando-se em conta que os pneus da bicicleta são idênticos e por isso apresentam a deformação devido à força peso a qual estão submetidos, decidiu-se que a roda dianteira estará sujeita a  $\frac{1}{4}$  do peso do ciclista, enquanto a roda traseira estará sujeita a  $\frac{3}{4}$ . Deste modo foi possível realizar os seguintes cálculos, usando que a força de uma mola é igual a k (constante de rigidez) multiplicado pela deformação:

$$F_D = k_D x_D \Rightarrow k_D = \frac{F_D}{x_D} = \frac{\frac{1}{4} * 82 * 9,81}{0,005} = 40221 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

$$F_T = k_T x_T \Rightarrow k_T = \frac{F_T}{x_T} = \frac{\frac{3}{4} * 82 * 9,81}{0,02} = 30166 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

Onde  $k_d$  é a constante de mola da roda dianteira e  $k_t$  a constante de mola da roda traseira.

Para o cálculo da constante de mola do selim foi necessário realizar a diminuição que o deslocamento das rodas sofreu. Sendo assim por aproximação linear chegou-se à conclusão de que a altura do selim ao chão considerando a deformação das rodas é de 63,35 cm. A variação de altura no ponto do selim foi de 1,65 cm. No entanto, a variação do selim foi de 3,5 cm, subtraindo-se da diminuição de altura causada pela deformação das rodas, tem-se que a variação de altura do selim ao chão, causada pela deformação da mola do selim foi de  $(3,5 - 1,65) \text{ cm} = 1,85 \text{ cm}$  e o selim está sujeito a força peso total do ciclista. Logo:

$$F = k_s x_s \Rightarrow k_s = \frac{F}{x_s} = \frac{82 * 9,81}{0,0185} = 43482 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

As constantes de amortecimento podem ser definidas por meio do coeficiente de amortecimento  $\xi$  [37]:

$$\xi = \frac{b}{2\sqrt{km}} \quad (\text{Equação 31})$$

Onde:

$b$  = constante de amortecimento [N.s/m];

$k$  = constante de rigidez de mola [N/m];

$m$  = massa [kg];

$\xi > 1$  – superamortecimento;  $\xi = 1$  – Criticamente amortecido;  $\xi < 1$  – subamortecido.

Para a estimativa dos amortecimentos tem-se:

$m$  = massa da bicicleta = 16,8 kg;

$Mp$  = massa do ciclista = 82 kg;

$b_d$  = constante de amortecimento da roda dianteira [N.s/m];

$b_t$  = constante de amortecimento da roda traseira [N.s/m];

$b_s$  = constante de amortecimento do selim [N.s/m];

$k_d$  = constante de rigidez da roda dianteira = 40221 N/m;

$k_t$  = constante de rigidez da roda traseira = 30166 N/m;

$k_s$  = constante de rigidez do selim = 43481 N/m.

Após uma análise paramétrica com relação ao coeficiente de amortecimento decidiu-se que os seguintes parâmetros eram razoáveis:

$$\xi_d = \text{coeficiente de amortecimento da roda dianteira} = 0,20;$$

$$\xi_t = \text{coeficiente de amortecimento da roda traseira} = 0,35;$$

$$\xi_s = \text{coeficiente de amortecimento do selim} = 0,08.$$

Utilizou-se parâmetros diferentes para as rodas, pois as mesmas não eram idênticas. No experimento, a roda traseira era mais robusta que a dianteira. Aplicando a Equação 31 e utilizando os parâmetros já mencionados no texto, tem-se:

$$b_d = 322 \text{ N.s/m}$$

$$b_t = 496 \text{ N.s/m}$$

$$b_s = 289 \text{ N.s/m}$$

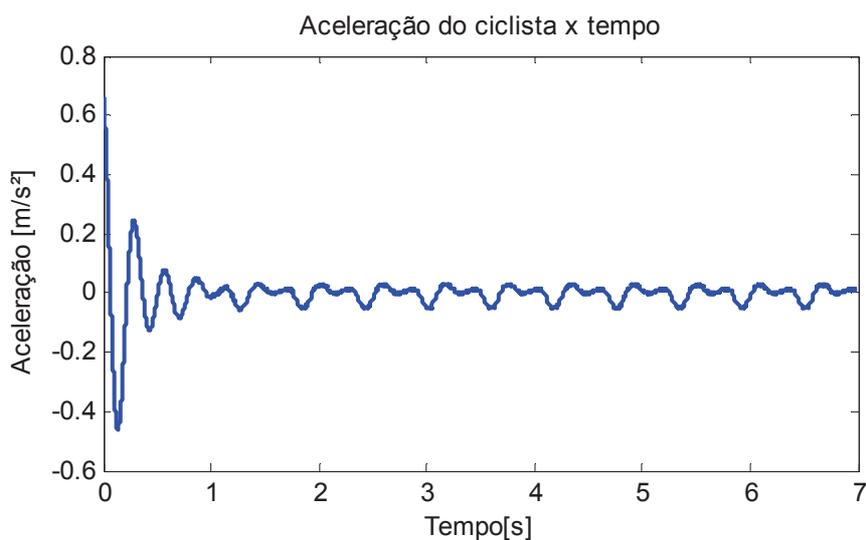
## Capítulo 07

### Resultados e Discussão do Modelo

O objetivo deste capítulo é apresentar os resultados do modelo computacional e conduzir uma breve discussão sobre os mesmos.

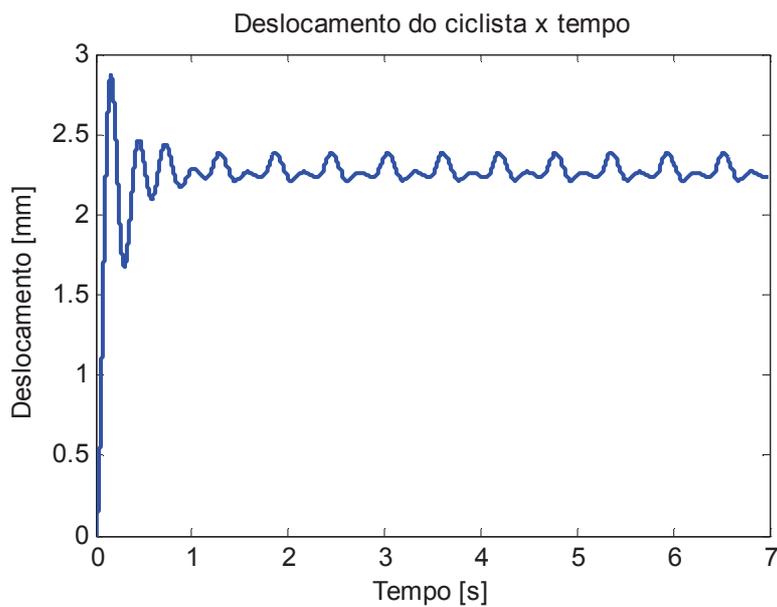
#### 7.1 Solo de Pedrinhas

Utilizando as configurações citadas na seção 6.4.1 a respeito de rugosidade do solo de pedrinhas, foi possível obter os gráficos que seguem.



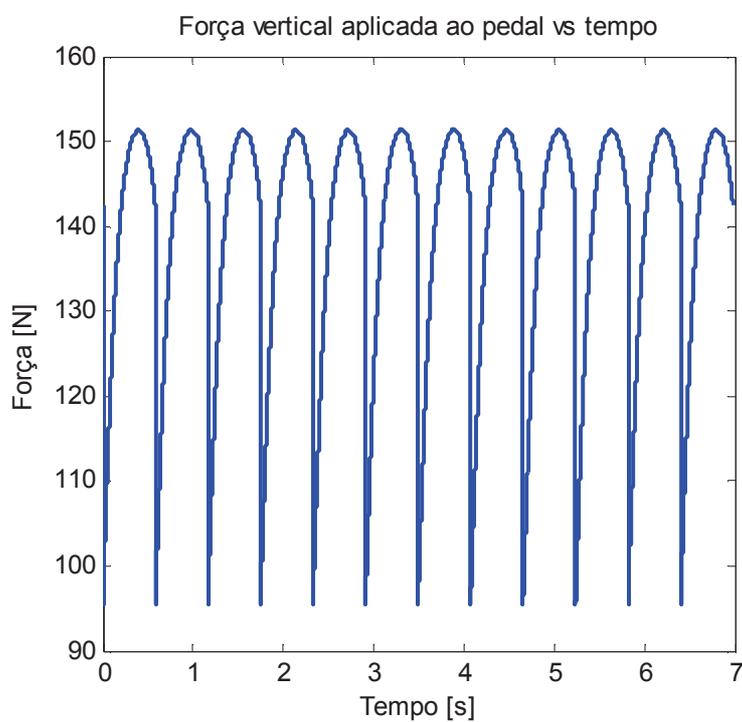
**Figura 42:** Perfil de Aceleração do ciclista - Solo Pedrinhas

A Figura 42 mostra que após 1 segundo de simulação a vibração do ciclista na direção vertical se mantém variando entre  $0,1 \text{ m/s}^2$  e  $-0,1 \text{ m/s}^2$ .



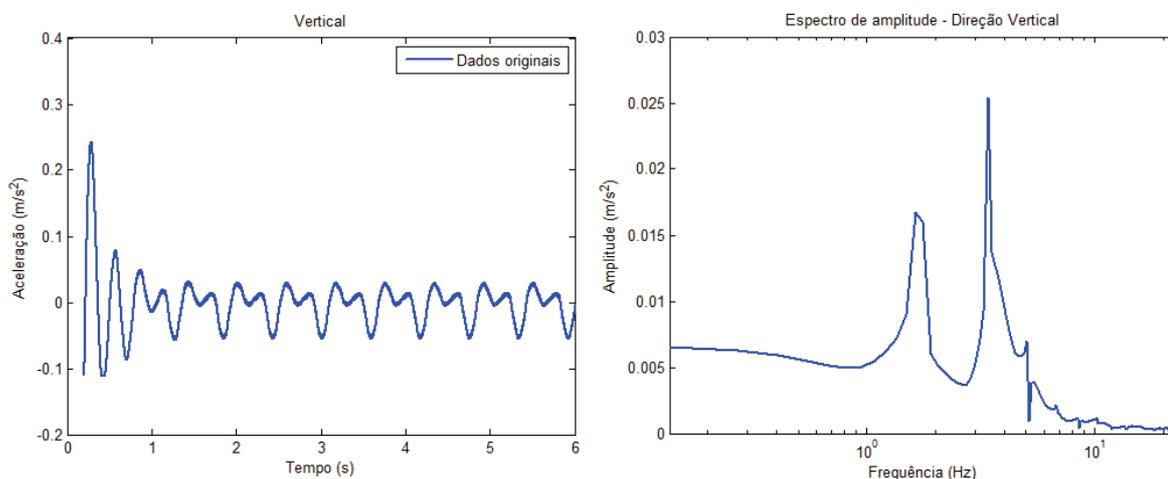
**Figura 43:** Perfil de deslocamento do ciclista na direção vertical - Solo Pedrinhas.

A Figura 43 mostra que o ciclista é deslocado em aproximadamente 2 mm da sua posição inicial para compensar os efeitos da vibração ao qual está exposto.



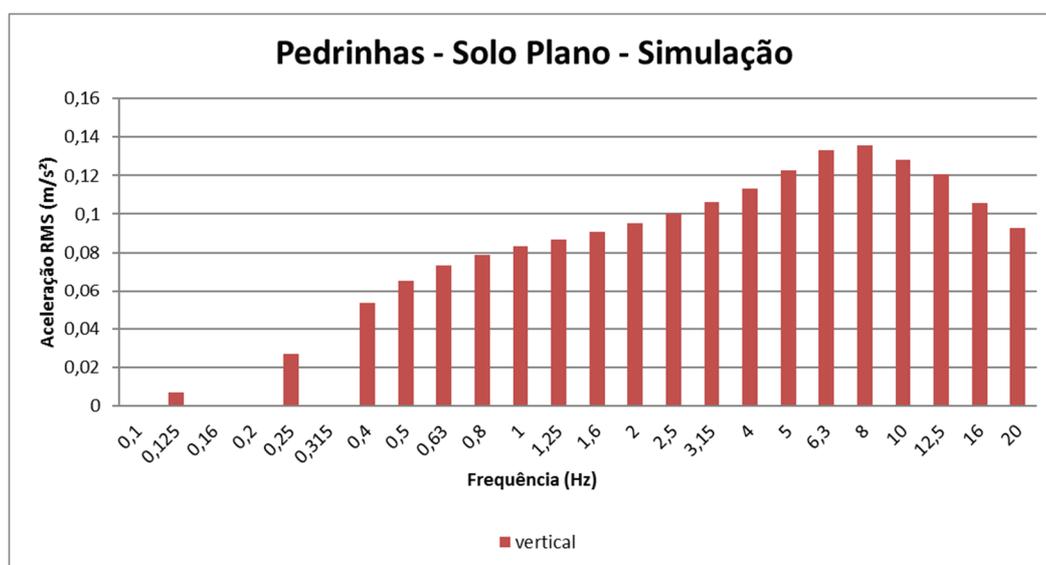
**Figura 44:** Força vertical aplicada ao pedal da bicicleta - Solo Pedrinhas

O perfil esperado para a força do pedal é uma variação senoidal com o máximo de amplitude em 20% da força peso do ciclista. Sendo assim, o perfil da força do pedal da Figura 44 condiz com o esperado.



**Figura 45:** Simulação Solo de pedrinhas plano. À esquerda, dados obtidos pela simulação - Aceleração ( $m/s^2$ ) pelo tempo (s). À direita, o espectro de Frequência da vibração no eixo vertical.

A Figura 45 mostra a aceleração do ciclista e o espectro da sua frequência de vibração.

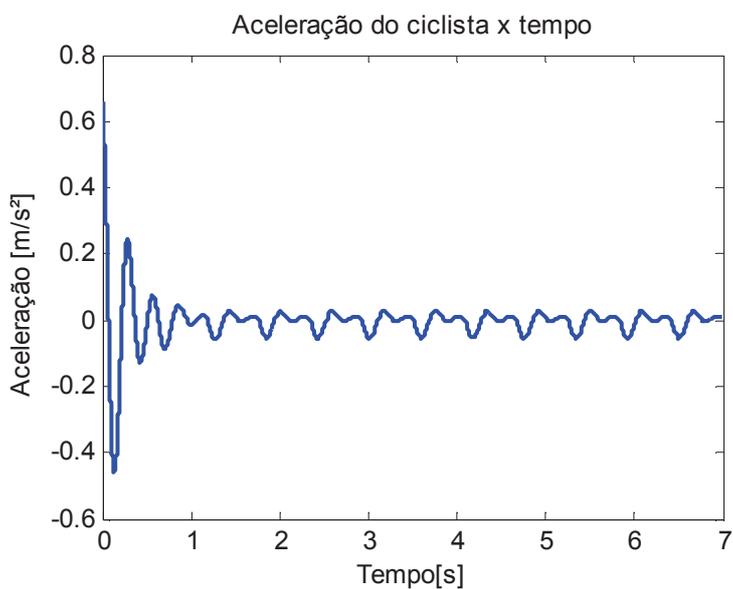


**Figura 46:** Bandas de 1/3 de oitava para superfície plana de pedrinhas - Simulação.

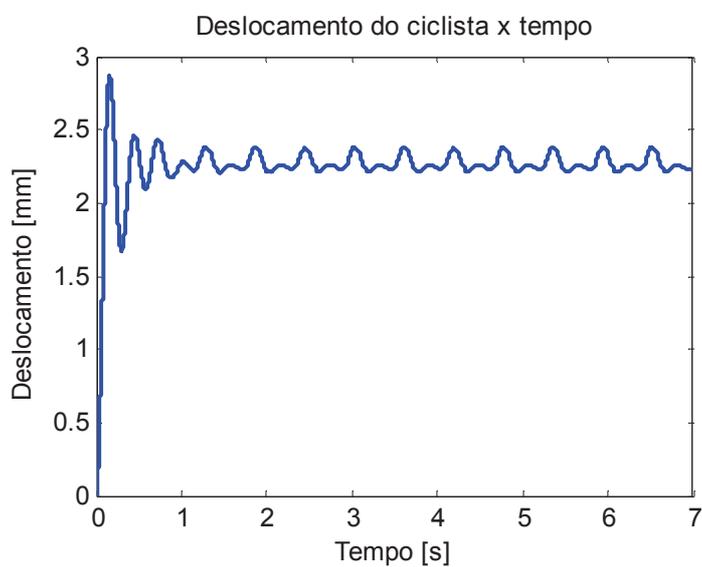
A Figura 46 mostra o gráfico de 1/3 de oitava de frequência, onde pode-se verificar que a amplitude máxima é encontrada em 8 Hz.

## 7.2 Solo de Asfalto

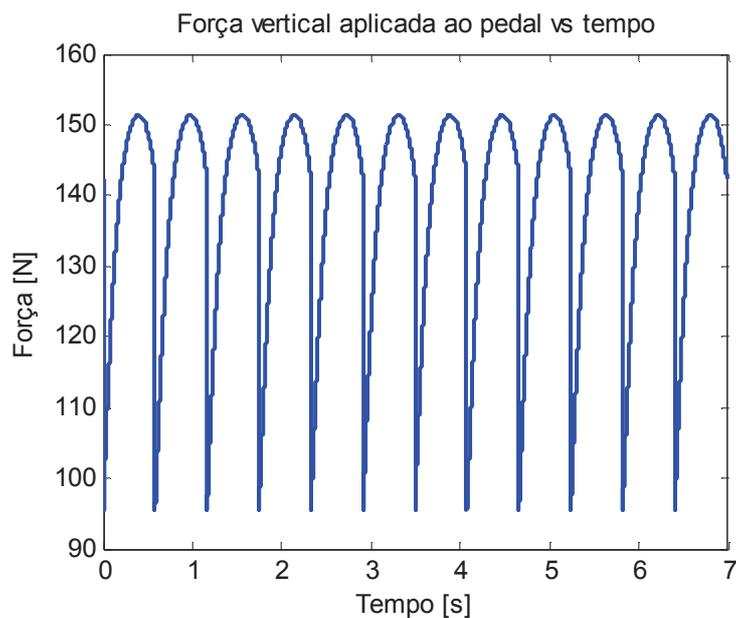
As Figura 47 e Figura 48 mostram o perfil de aceleração e deslocamento aos quais o ciclista está sujeito, utilizando uma superfície rugosa que simula o asfalto.



**Figura 47:** Perfil de Aceleração do ciclista - Solo Asfalto.

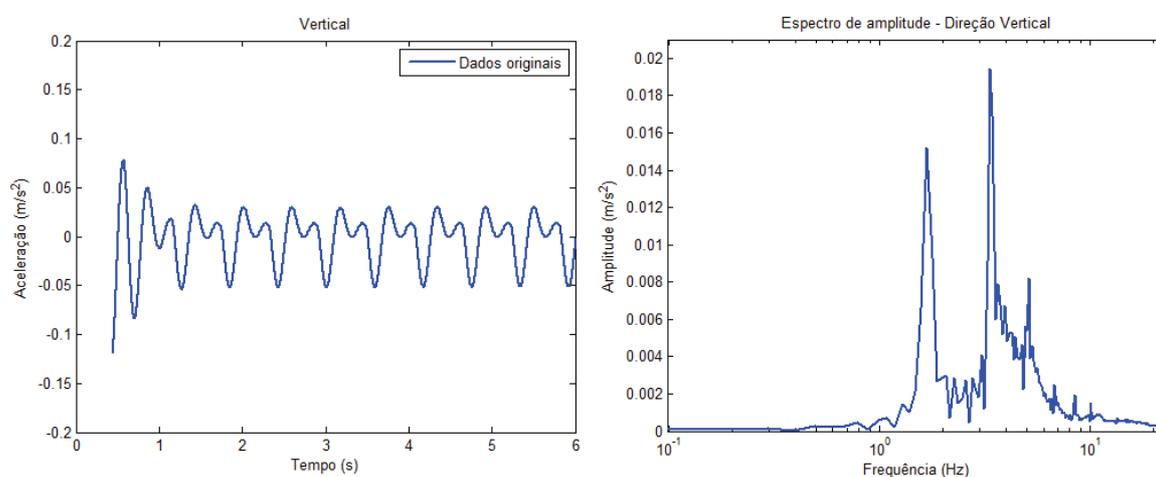


**Figura 48:** Perfil de deslocamento do ciclista na direção vertical – Asfalto.



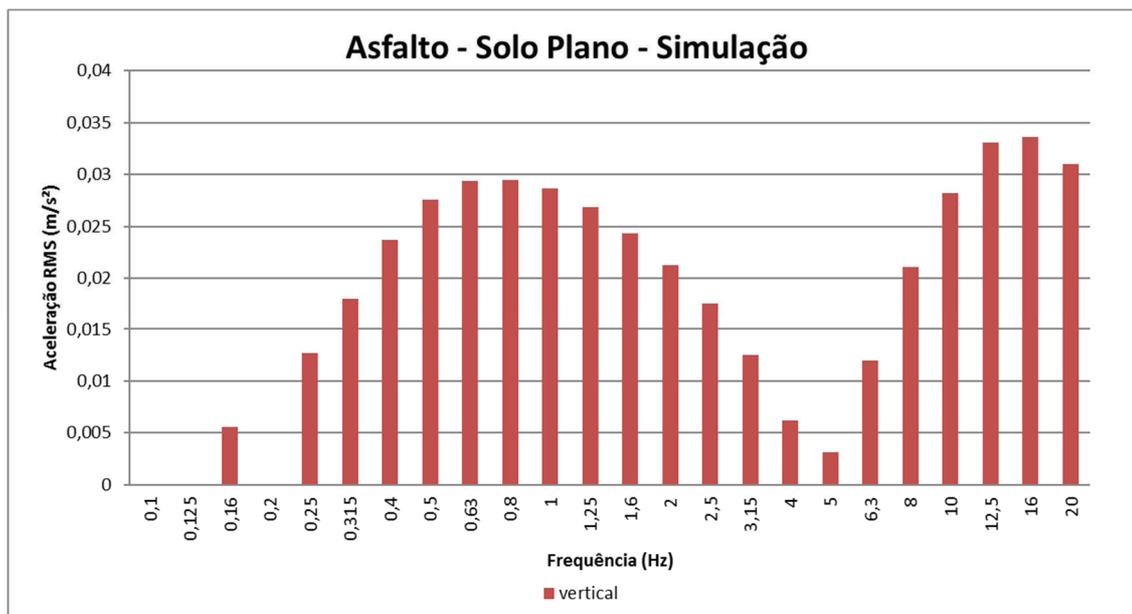
**Figura 49:** Força vertical aplicada ao pedal da bicicleta - Solo Asfalto.

A Figura 49 mostra o perfil da força no pedal. Como era de se esperar, não há nenhuma mudança com relação a ela, uma vez que a força não depende de parâmetros de rugosidade do solo (único parâmetro modificado nas simulações).



**Figura 50:** Simulação Solo asfalto plano. À esquerda, dados obtidos pela simulação - Aceleração ( $m/s^2$ ) pelo tempo (s). À direita, o espectro de Frequência da vibração no eixo vertical.

Na Figura 50 pode-se conferir a aceleração do ciclista e o espectro de frequência obtido para a mesma.

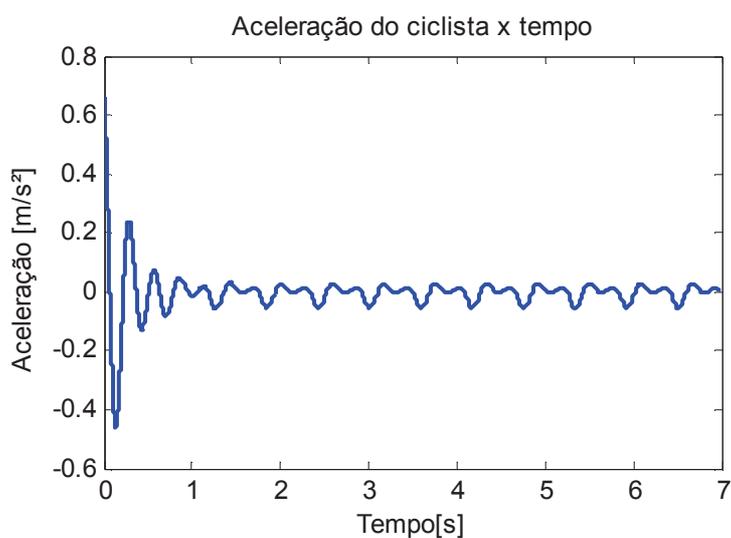


**Figura 51:** Bandas de 1/3 de oitava para superfície plana asfalto - Simulação.

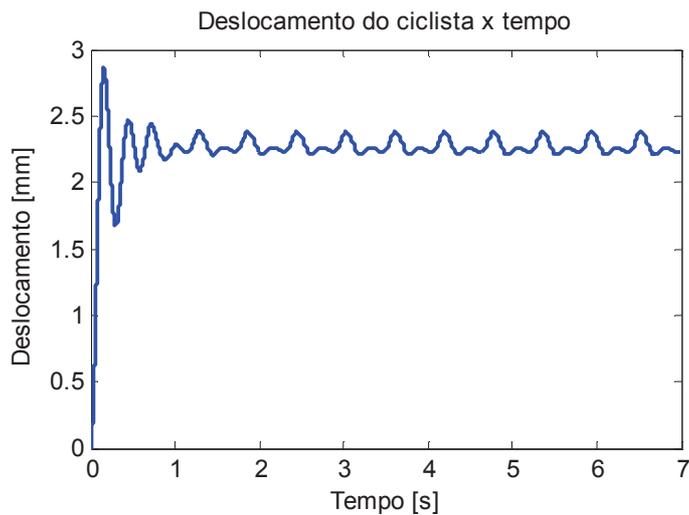
Como pode-se ver pela Figura 51, as frequências com maiores amplitudes para o asfalto, segundo a simulação, são: 0,63 Hz; 0,8 Hz; 12,5 Hz e 16 Hz.

### 7.3 Solo de Cimento - Calçada

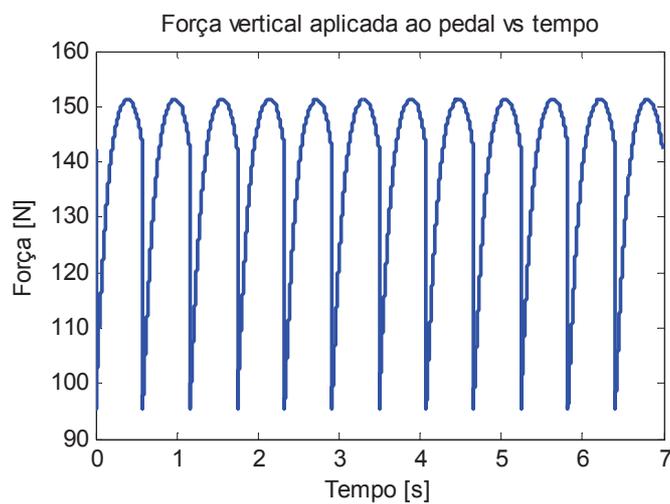
As Figura 52, Figura 53 e Figura 54 mostram, respectivamente, o perfil de aceleração ao qual o ciclista está submetido, o deslocamento causado pela vibração e o perfil de força no pedal da bicicleta, que como observado anteriormente, não muda.



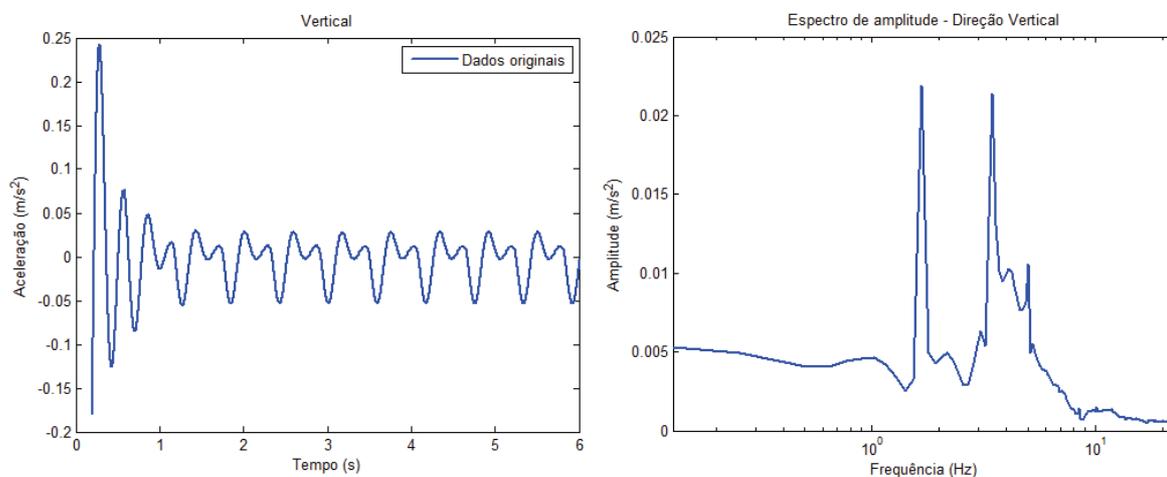
**Figura 52:** Perfil de Aceleração do ciclista - Solo Cimento - Calçada.



**Figura 53:** Perfil de deslocamento do ciclista na direção vertical – Calçada.

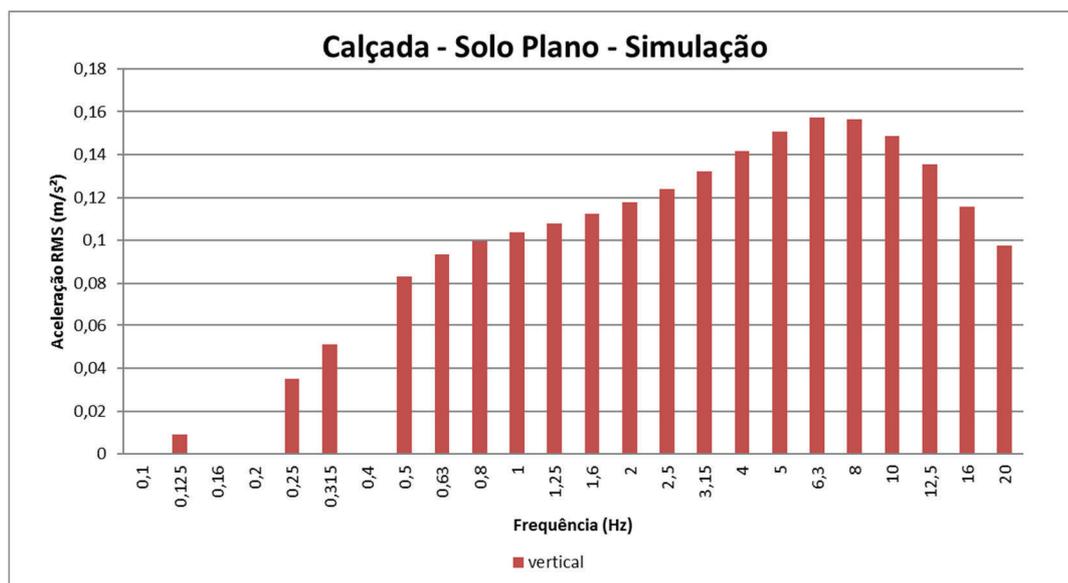


**Figura 54:** Força vertical aplicada ao pedal da bicicleta - Solo Asfalto.



**Figura 55:** Simulação Solo - Calçada. À esquerda, dados obtidos pela simulação - Aceleração ( $m/s^2$ ) pelo tempo (s). À direita, o espectro de Frequência da vibração no eixo vertical.

O espectro de frequência de vibração para a simulação de calçada pode ser verificado na Figura 55.

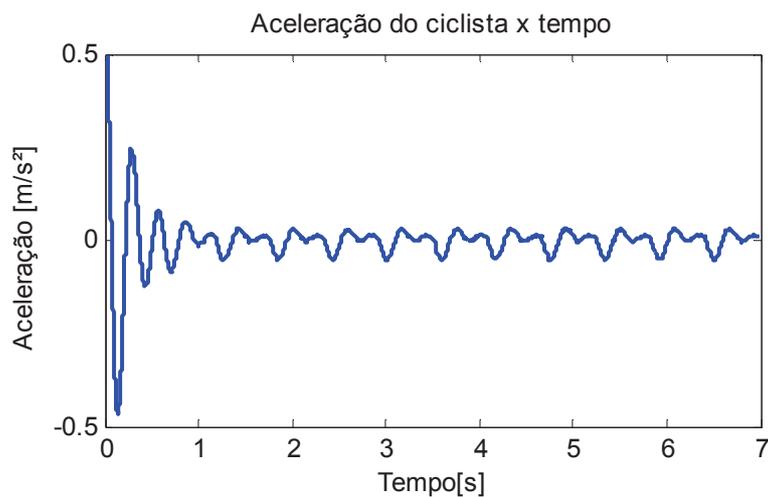


**Figura 56:** Bandas de 1/3 de oitava para superfície plana cimento - calçada.

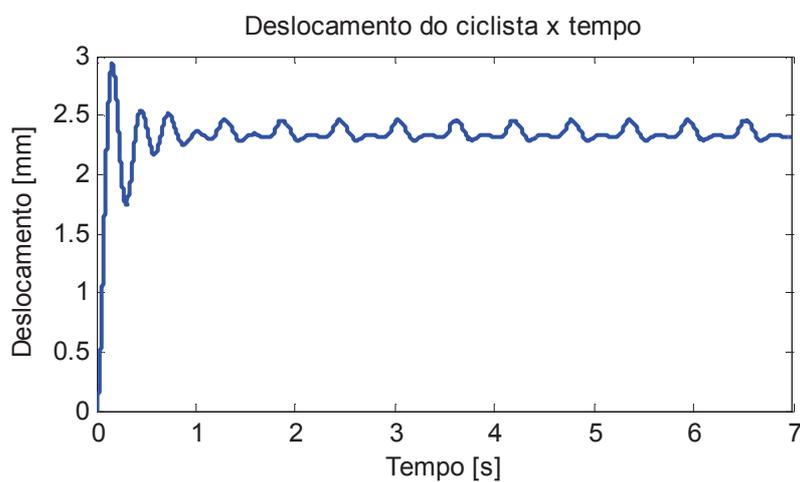
Como pode ser verificado por meio da Figura 56, as frequências com maiores amplitudes para a simulação de solo de calçada são para 6,3 Hz e 8Hz.

## 7.4 Solo de Paralelepípedo

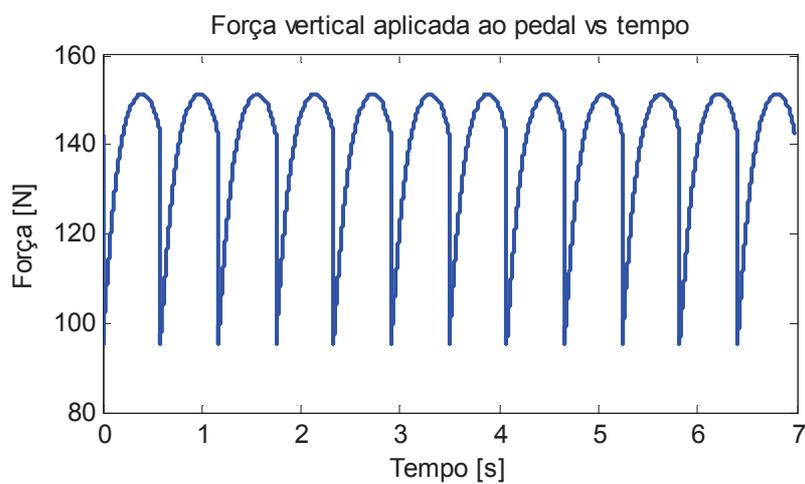
As Figura 57, Figura 58 e Figura 59 mostram, respectivamente, o perfil de aceleração ao qual o ciclista está submetido quando a rugosidade do solo é de paralelepípedo, o deslocamento causado pela vibração e o perfil de força no pedal da bicicleta, que como observado anteriormente, não muda.



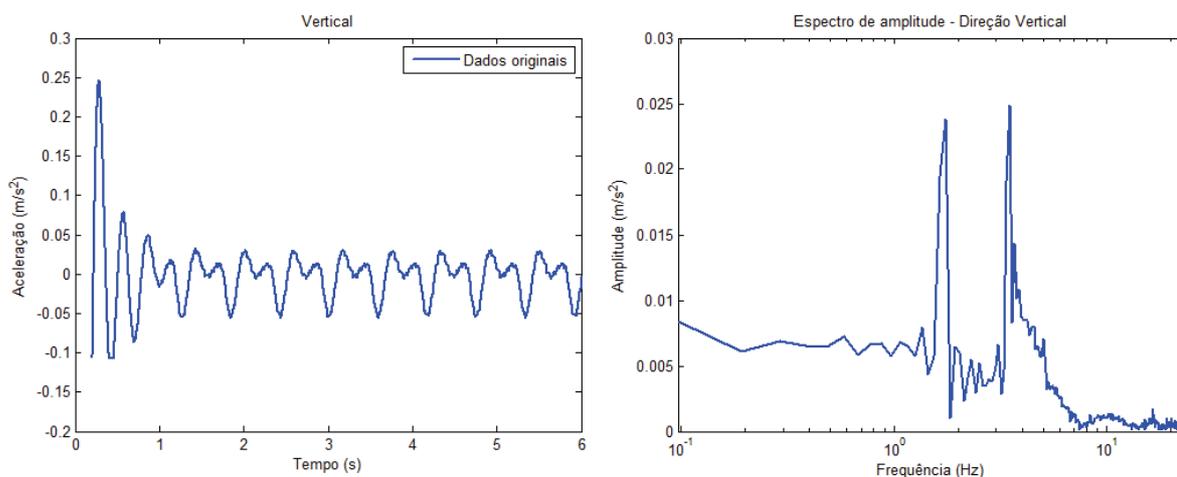
**Figura 57:** Perfil de Aceleração do ciclista - Solo Paralelepípedo.



**Figura 58:** Perfil de deslocamento do ciclista na direção vertical – Paralelepípedo.

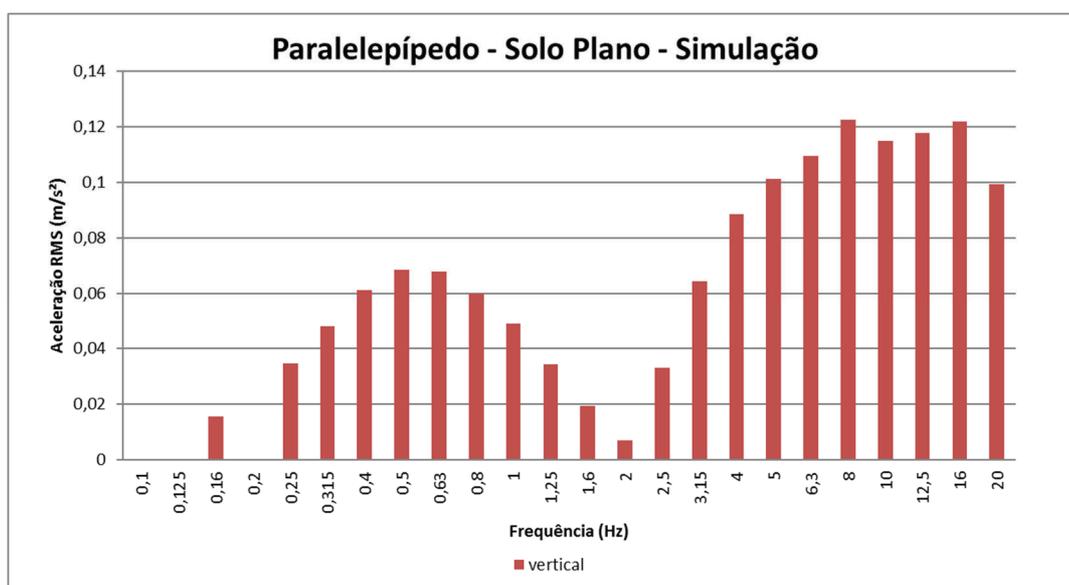


**Figura 59:** Força vertical aplicada ao pedal da bicicleta – Paralelepípedo.



**Figura 60:** Simulação Solo de paralelepípedo no plano. À esquerda, dados obtidos pela simulação - Aceleração ( $m/s^2$ ) pelo tempo (s). À direita, o espectro de Frequência da vibração no eixo vertical.

A Figura 60 mostra o espectro de frequência para a simulação do movimento em paralelepípedos. Como pode-se ver há bastante variação.



**Figura 61:** Bandas de 1/3 de oitava para superfície plana de paralelepípedo.

As frequências 0,5 Hz e 0,63 Hz juntamente com as frequências de 4 Hz a 20 Hz apresentam amplitude maiores se comparadas com as outras frequências (Figura 61).

## 7.5 Frequências Naturais

Por meio de programa em Matlab® (vide Apêndice A.7), foi possível determinar as frequências naturais do modelo físico idealizado:

$$f_1 = 16,96 \text{ Hz}$$

$$f_2 = 83,33 \text{ Hz}$$

$$f_3 = 114,87 \text{ Hz}$$

## 7.6 Conclusão

Pelas discussões a respeito do modelo físico idealizado deste capítulo conclui-se que: os parâmetros utilizados precisam de ajustes para que a amplitude de vibração fique mais próxima da observada no experimento, reproduzindo assim o experimento mais fielmente; as formas quanto as bandas de 1/3 de oitava de frequência se mostraram semelhantes com as do experimento; o solo paralelepípedo tem como maior amplitude a frequência de 16 Hz, o que é bem próxima da primeira frequência natural do modelo físico. Deste modo, observa-se que uma análise paramétrica se faz necessária para os trabalhos futuros, de modo a melhorar os resultados obtidos na simulação.

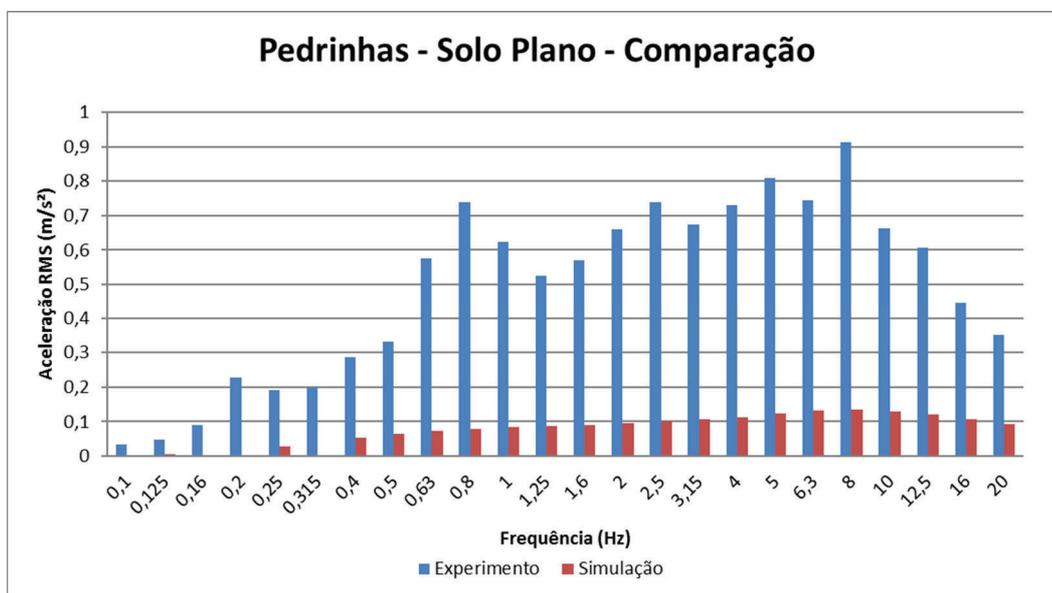
## Capítulo 08

### Comparação – Experimento vs Modelo

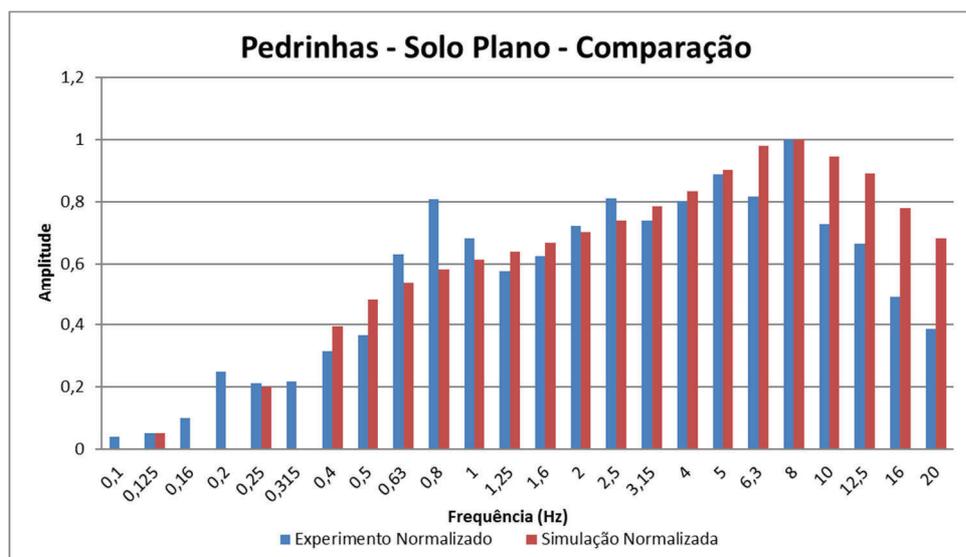
O objetivo deste capítulo é realizar análise comparativa entre o experimento realizado e o modelo físico idealizado gerado por meio do presente trabalho.

#### 8.1 Solo Pedrinhas

A Figura 62 exibe a comparação das frequências de 1/3 de oitava entre o experimento e a simulação do solo de pedrinhas. No entanto, como pode-se observar, fica difícil realizar uma análise comparativa entre os gráficos visto que os mesmos estão em diferentes ordens de grandeza. Por isso, a nível qualitativo, decidiu-se normalizar as amplitudes de modo que a comparação quanto a forma de distribuição das frequências foi possível.



**Figura 62:** Comparação entre os gráficos de 1/3 de oitava do Experimento e da Simulação - Solo Pedrinhas Plano.

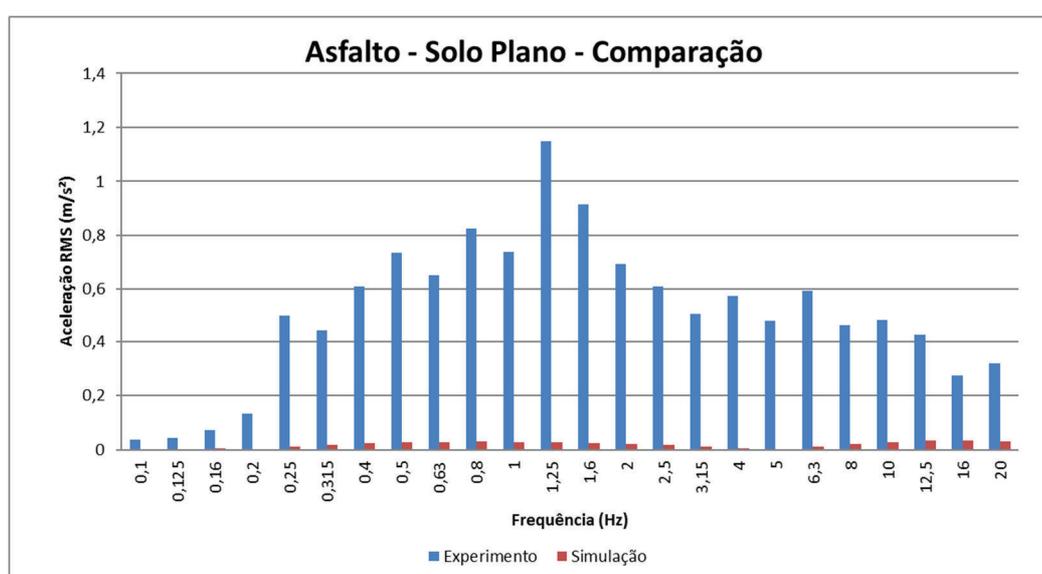


**Figura 63:** Comparação entre os gráficos de 1/3 de oitava da Amplitude Normalizada do Experimento e da Simulação - Solo Pedrinhas Plano.

Ao se considerar a amplitude normalizada dos dados e dos resultados obtidos pela simulação, pode-se ver que o modelo consegue representar, quanto à forma, os dados obtidos por experimentação. Desse modo, observa-se que apenas uma modificação no modelo quanto a amplitude de vibração se faz necessária.

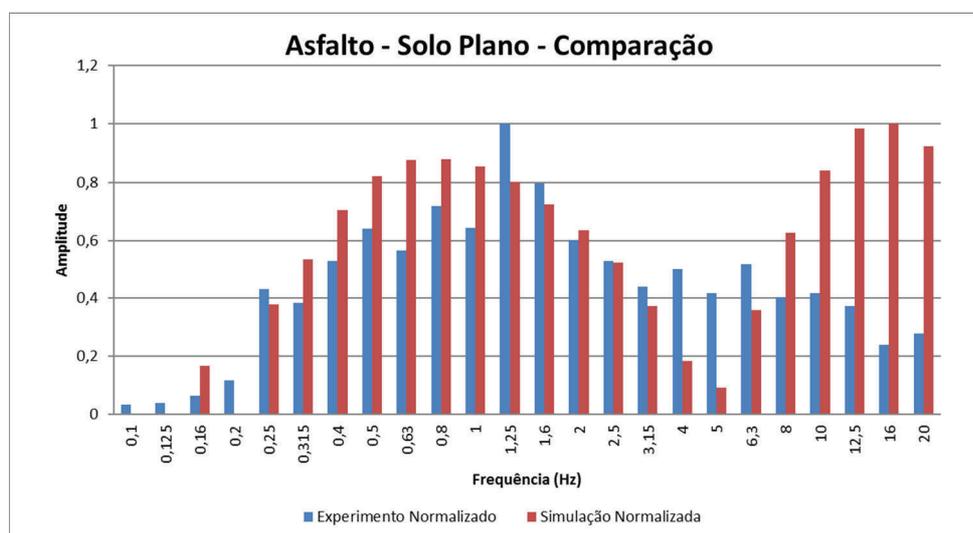
## 8.2 Solo Asfalto

Como sugerido na seção 8.1, considera-se a normalização dos dados e dos resultados obtidos, pois como pode ser visto na Figura 64 não há como comparar os dois resultados visto que estão em diferentes ordens de grandeza.



**Figura 64:** Comparação entre os gráficos de 1/3 de oitava do Experimento e da Simulação - Solo Asfalto Plano.

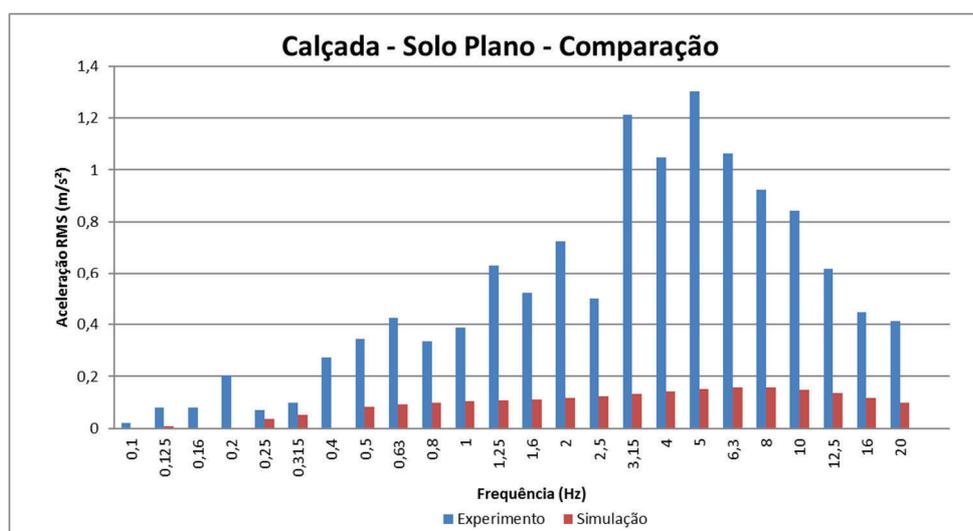
A Figura 65 mostra a comparação entre o experimento e a simulação para o solo de asfalto, considerando os dados normalizados. Como pode-se ver há semelhança entre o perfil gerado e o experimentado.



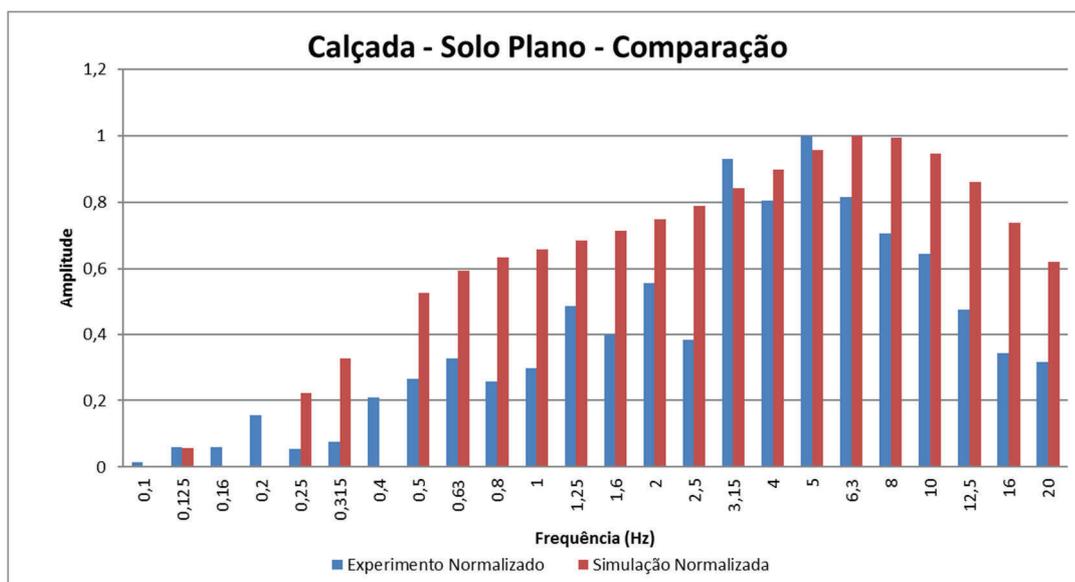
**Figura 65:** Comparação entre os gráficos de 1/3 de oitava da Amplitude Normalizada do Experimento e da Simulação - Solo Asfalto Plano.

### 8.3 Solo Cimento – Calçada

A Figura 66 compara as amplitudes de 1/3 de oitava de frequência para o caso onde a rugosidade do solo é de cimento, representando a calçada.



**Figura 66:** Comparação entre os gráficos de 1/3 de oitava do Experimento e da Simulação - Solo Calçada Plana.

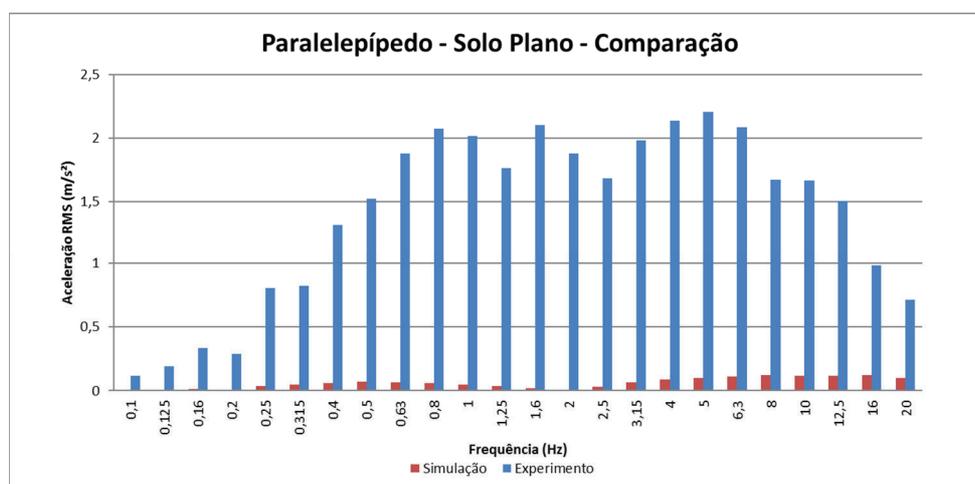


**Figura 67:** Comparação entre os gráficos de 1/3 de oitava da Amplitude Normalizada do Experimento e da Simulação - Solo Calçada Plana.

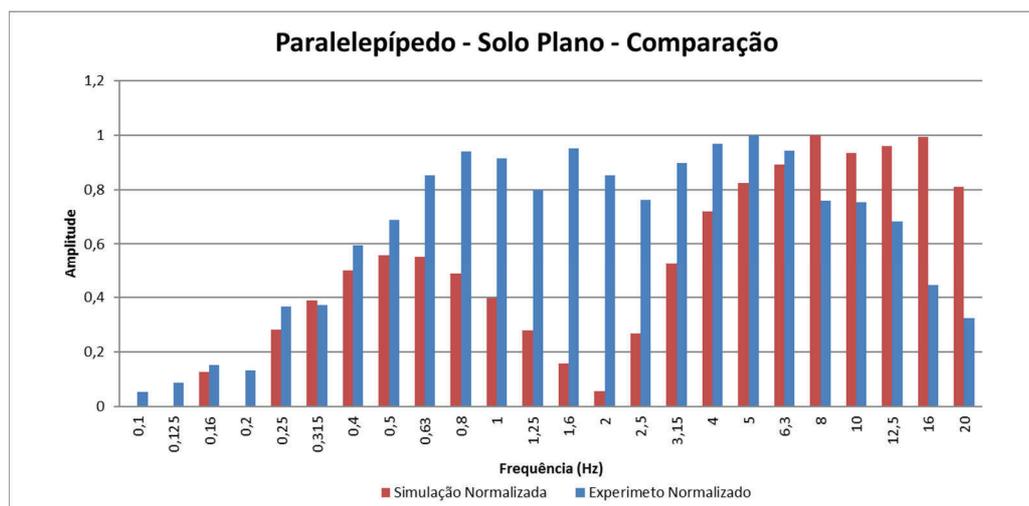
Conforme observado na Figura 67 o sinal do modelo se aproxima do sinal obtido pelo experimento.

## 8.4 Solo Paralelepípedo

A Figura 68 e a Figura 69 mostram, respectivamente, a comparação entre o modelo e o experimento; e a amplitude de aceleração do modelo e do experimento normalizados. Como pode ser verificado na Figura 69 o perfil gerado pela simulação é semelhante ao gerado experimentalmente.



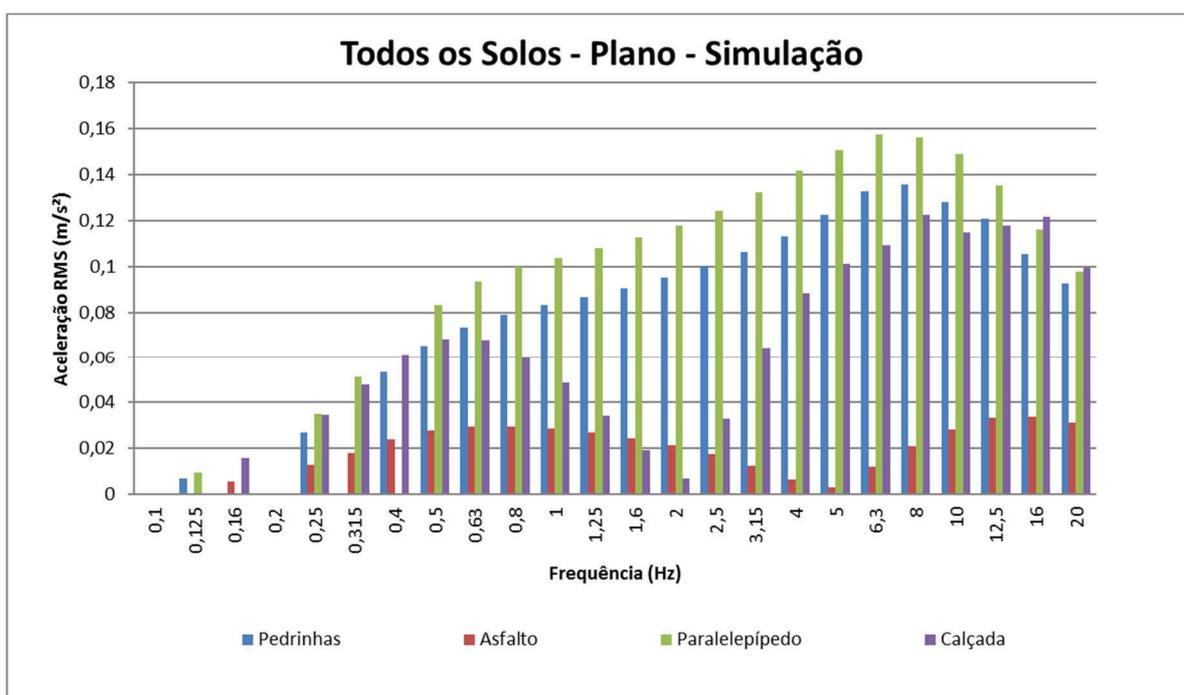
**Figura 68:** Comparação entre os gráficos de 1/3 de oitava do Experimento e da Simulação - Solo Paralelepípedo Plano.



**Figura 69:** Comparação entre os gráficos de 1/3 de oitava da Amplitude Normalizada do Experimento e da Simulação - Solo Paralelepípedo Plano.

## 8.5 Solos - Simulação

A fim de verificar qual tipo de solo gera maiores amplitudes de vibração, na simulação, plotou-se todos os resultados da simulação em um gráfico, como pode ser visto na Figura 70. O sinal gerado pela rugosidade de paralelepípedos é o mais crítico entre os sinais gerados, seguido pelo solo de pedrinhas, calçada e, por último, o asfalto.



**Figura 70:** Comparação dos gráficos de 1/3 de frequência de oitava de todos os tipos de solos - Simulação.

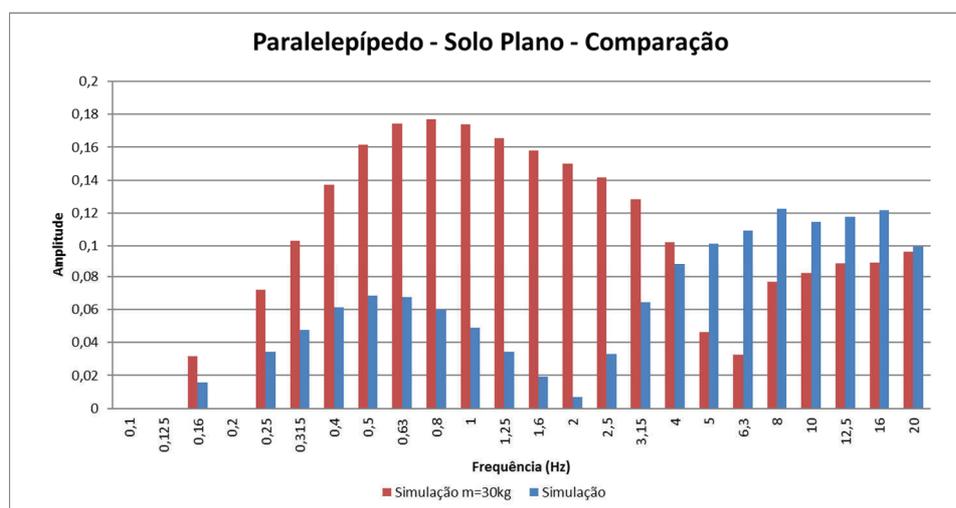
A fim de facilitar a leitura dos resultados obtidos, resolveu-se unir os dados em uma única tabela, como segue na Tabela 11.

**Tabela 11:** Resumo dos Resultados da Simulação – Solo Plano.

Tipos de Solos	Asfalto	Praielepípedo	Pedrinhas	Calçada
Aceleração	-0,05 m/s <sup>2</sup> - 0,05 m/s <sup>2</sup>	-0,15 m/s <sup>2</sup> - 0,15 m/s <sup>2</sup>	-0,1 m/s <sup>2</sup> - 0,1 m/s <sup>2</sup>	-0,07 m/s <sup>2</sup> - 0,07 m/s <sup>2</sup>
Deslocamento	2,3 mm - 2,4 mm	2,2 mm - 2,5 mm	2,2 mm - 2,4 mm	2,2 mm - 2,4 mm
Força no Pedal	151 N	151 N	151 N	151 N
Bandas de 1/3 de oitava	0,034 m/s <sup>2</sup> x 12,5 Hz	0,125 m/s <sup>2</sup> x 8 Hz	0,135 m/s <sup>2</sup> x 8 Hz	0,15 m/s <sup>2</sup> x 6,3 Hz
Rugosidade (Amplitude Máx)	0,09 mm	10,0 mm	9,0 mm	0,9 mm

## 8.6 Diferentes Variáveis

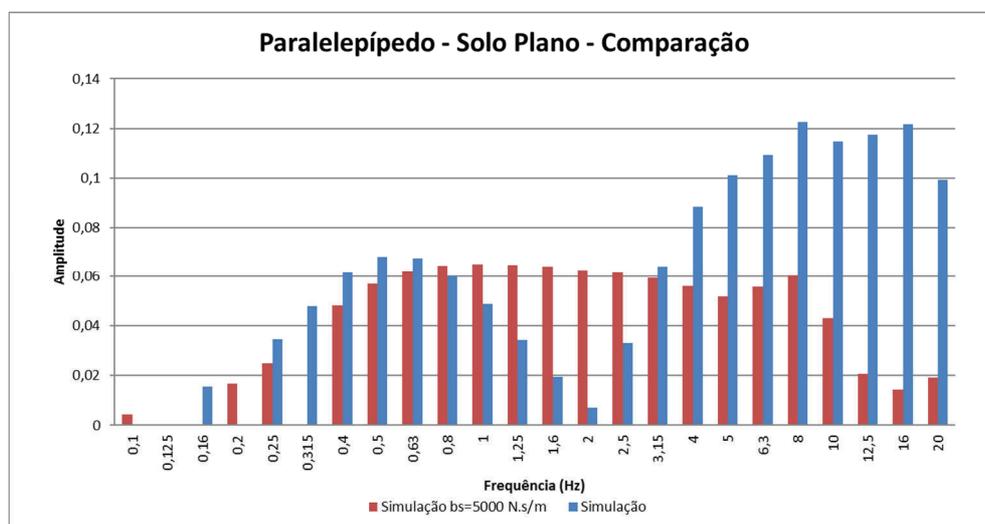
A fim de gerar uma discussão do ponto de vista de engenharia, escolheu-se o pior dos casos para a exposição da vibração – paralelepípedo – e modificou-se alguns parâmetros (massa da bicicleta, constantes de amortecimento e rigidez) com o objetivo de verificar qual seria a relação dos mesmos com a amplitude de vibração.



**Figura 71:** Comparação do Modelo original com o Modelo considerando a massa da bicicleta 30 kg.

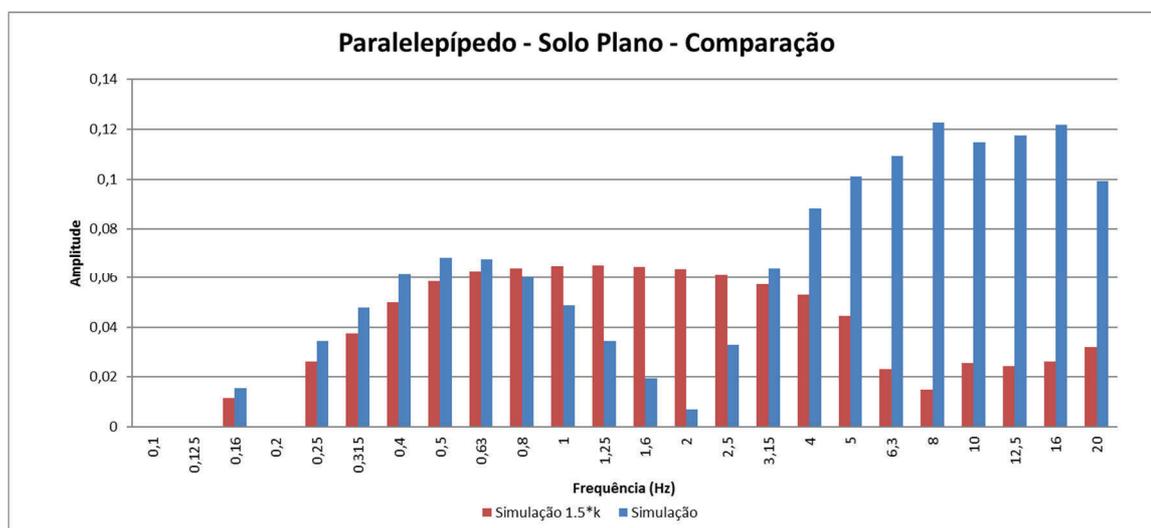
Para a verificação da representatividade da mudança de massa no modelo, aumentou-se a massa da bicicleta em 56% (de 16,8 kg usou-se 30 kg). Como pode ser visto pela Figura

71 o aumento de massa da bicicleta gera maiores amplitudes, não sendo assim uma modificação viável do ponto de vista de redução de vibração e conforto do ciclista.



**Figura 72:** Comparação do Modelo original com o Modelo considerando a constante de amortecimento do selim 17 vezes maior.

A Figura 72 mostra como o aumento da constante de amortecimento do selim pode ajudar na redução da amplitude de vibração do sistema e, conseqüentemente, ajuda a melhorar o conforto sentido pelo ciclista.



**Figura 73:** Comparação do Modelo original com o Modelo considerando as constantes de rigidez das molas do modelo vibracional 1.5 vezes maior.

Outra forma de reduzir as amplitudes das freqüências que geram desconforto ao ciclista é aumentando a rigidez das molas do sistema (Figura 73). Para isso, pode-se levar em consideração o uso de outros tipos de borrachas para os pneus e outros materiais para a confecção da mola do selim.

## Capítulo 09

### Discussão e Conclusão do Trabalho

Segundo a ISO 2631-1 [6], o limite de conforto de vibração está localizado na faixa entre 4 Hz e 8 Hz na vibração vertical e de magnitude de no máximo  $0,88 \text{ m/s}^2$ . Como verificado experimentalmente no presente trabalho, a superfície de paralelepípedos tem os maiores picos de aceleração, seguida pela calçada e pelo asfalto. Os dados com relação ao solo composto por pedrinhas foram desconsiderados na avaliação experimental, pois se trata de um solo terroso, que estava úmido devido as condições de tempo em que os dados foram coletados e, por isso, a reprodução fiel do que a rugosidade desse tipo de superfície foi comprometida, uma vez que foi observado que havia maior aderência dos pneus da bicicleta durante o processo experimental. Visto isso, conclui-se que os dados com relação a esse solo deveriam ser obtidos novamente.

Ao analisar os dados experimentais com relação à magnitude, a mesma conclusão é obtida: os solos de asfalto e cimento são os que apresentam menores amplitude de vibração, uma vez que os dados do solo de pedrinhas não são considerados. No entanto, os resultados da superfície de paralelepípedo são muito maiores que as demais. Deixando claro que paralelepípedo não é uma superfície que deveria ser usada em ciclovias.

Os modelos matemático-computacionais proposto pelo presente trabalho conseguiram reproduzir o perfil de 1/3 de oitava de frequência dos quatro tipos de solo. Avaliando, segundo o modelo, qual seria o melhor e o pior solo para ser usado como ciclovia, chega-se à seguinte conclusão: o solo de paralelepípedos é o pior, com as maiores amplitudes de vibração; o melhor solo para a construção de ciclovias é o que é composto por asfalto, seguido pelo de cimento (calçada). No modelo, foi possível verificar que as amplitudes de vibração do solo de pedrinhas são quase tão altas quanto as do solo de paralelepípedo, corroborando assim para o argumento de que os dados experimentais do solo de pedrinhas haviam sido comprometidos pela umidade.

Quando se modifica parâmetros como a massa da bicicleta, constantes de amortecimento e rigidez da mola pode-se observar diferentes resultados para o mesmo tipo de solo. Selecionou-se o caso mais crítico de amplitude de vibração (paralelepípedos) e ao se elevar a massa da bicicleta observou-se que as amplitudes se tornam maiores, não sendo viável assim aumentar a massa da bicicleta para reduzir os efeitos vibracionais do sistema.

No entanto, ao se aumentar as constantes de amortecimento e rigidez da mola do sistema, pode-se verificar que as amplitudes de vibração foram atenuadas. Desse modo, para a construção de bicicletas deve-se levar em conta a substituição da borracha utilizada nos pneus por uma borracha com maiores constantes mola-amortecedor e selins com maiores capacidades de absorver as vibrações por meio do sistema de molas a eles acoplados.

## Capítulo 10

### Trabalhos Futuros

Para trabalhos futuros, observa-se as seguintes necessidades:

- Analisar os dados coletados com o modelo de maior aquisição de dados e avaliar as frequências maiores de 20 Hz;
- Analisar os dados coletados no guidão da bicicleta, para assim estudar o impacto que as vibrações podem causar no conjunto pulso-braço do ciclista;
- Ajustar o modelo físico idealizado de modo a reproduzir fidedignamente os dados obtidos pelos experimentos;
- Realizar análise experimental para determinar os coeficientes de amortecimento das rodas e do selim da bicicleta;
- Fazer a representação da bicicleta em *softwares* gráficos (SolidWorks, por exemplo), a fim de extrair informações quanto ao centro de massa e momento de inércia;
- Realizar estudo de como a calibração dos pneus da bicicleta influenciam no amortecimento de vibração causado pelo movimento de pedalar;
- Realizar estudo paramétrico mais aprofundado, a fim de constatar como a variação dos mesmos influenciam na vibração do ciclista.

## Referências Bibliográficas

- [1]. MOUTINHO, P. Bikes e o Aquecimento Global. **Rebas do Cerrado**, dezembro 2004. Disponível em: <<http://www.rebasdocerrado.com.br/indexInterno.php?url=artigos/textos/BikeseoAquecimentoGlobal.htm>>. Acesso em: 21 maio 2015.
- [2]. CICLOTURISMO , 09 março 2015. Disponível em: <<http://www.apaixonadoorbike.com.br/bike-como-meio-de-transporte-conheca-5-cidades-pelo-mundo-onde-bicicleta-supera-os-carros-em-escala-superior/>>. Acesso em: 16 maio 2015.
- [3]. SMAC. **Secretaria Municipal do Meio Ambiente - Rio de Janeiro**, 11 dezembro 2014. Disponível em: <<http://thecityfixbrasil.com/files/2014/12/11.-Altamirando-Fernandes-Moraes-Rio-Capital-da-Bicicleta1.pdf>>. Acesso em: 16 maio 2015.
- [4]. CET SP, 2007. Disponível em: <<http://www.cetsp.com.br/consultas/bicicleta/bicicleta-um-meio-de-transporte.aspx>>. Acesso em: 16 maio 2015.
- [5]. BURKE, E. R.; PRUITT, A. L. Body Positioning for Cycling. In: BURKE, E. R. **High-Tech Cycling**. 2 ed. ed. [S.l.]: Human Kinetics, 2003. Cap. 3, p. 69-92.
- [6]. ISO 2631. Genebra: International Organization for Standardization, 1997, 2000.
- [7]. PROBLEMAS na ciclovia de Moema. **Blog do Amarelinho SP**, 2012. Disponível em: <<http://colunas.radioglobo.globo.com/platb/blogdoamarelinho/2012/09/18/problemas-na-ciclovia-de-moema/>>. Acesso em: 07 junho 2015.
- [8]. CITY Bikes. **LUNDAHOJ**, 2014. Disponível em: <<http://lundahoj.se/en/>>. Acesso em: 01 junho 2015.
- [9]. VALUING the benefits of cycling, A report to Cycling England. **SQW**, 2007. Disponível em: <<http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/20110407094607/http://www.dft.gov.uk/cyclingengland/site/wp-content/uploads/2008/08/valuing-the-benefits-of-cycling->

full.pdf>. Acesso em: 21 maio 2015.

- [10]. DINGWELL, J. et al. Changes in muscle activity and kinematics of highly trained cyclists during fatigue. **IEEE Transactions on Biomedical Engineering**, n. 55, p. 2666-2674, 2008.
- [11]. CARPES, F. et al. Bicycle saddle pressure: effects of trunk position and saddle design on healthy subjects. **Urologia Internationalis**, v. 82, p. 8-11, 2009.
- [12]. CARPES, F. et al. Effects of workload on seat pressure while cycling with two different saddles. **The**, 2009.
- [13]. BINI, R.; TAMBORINDEGUY, F. Does saddle height affect patellofemoral and. **Journal of Bodywork and**, 2009.
- [14]. D., S. Medição e avaliação à exposição humana à vibração transmitida. **22f. Monografia (Trabalho)**, 2010.
- [15]. MARCU, F. E. A. The Limits of using mechanical vibrations in human pathology, Fascicle of Management and Technological Engineering, v. VII (XVII), 2008.
- [16]. CONWAY, G. E. E. A. The effects of whole-body vibration on human performance: a meta-analytic examinations, Proceedings of the human factors and ergonomics society 50th annual meeting, Orlando, 2006.
- [17]. DRUGA C, B. D. L. S. Vibrations and the human body, Fascicle of Management and Technological Engineering, Brasov, v. IV, 2007.
- [18]. ABERCROMBY, A. F. E. A. Vibration Exposure and Biodynamic Responses during Whole-Body Vibration Training. **Med. Sci. Sports Exerc**, v. 39, p. 1794-1800, 2007.
- [19]. WHOLE Body Vibration Exposure to Train Passenger. **American Journal of Applied Sciences**, 2010.
- [20]. GRIFFIN, M. J. **Handbook of human vibration**. Londres: Elsevier, 2004.
- [21]. KRODKIEWSKI, J. M. . **Mechanical Vibration**. [S.l.]: The University of Melbourn, v.

Unit 2, 436-431 Mechanics, 2008.

- [22]. YOSHIMURA T., N. K. . T. G. Multi-body Dynamics Modelling of Seated Human Body under Exposure to Whole-Body Vibration. **Industrial Health**, v. 43, p. 441–447, 2005.
- [23]. FURTADO, L. A. **VIBRAÇÕES INDUZIDAS AO CORPO HUMANO EM PRÁTICA DE CICLISMO**. CEFET/RJ. Rio de Janeiro. 2014.
- [24]. MARTINS, E. A. et al. Avaliação do Posicionamento Corporal no Ciclismo Competitivo e Recreacional. **Revista Brasileira de Cineantropometria & Desempenho Humano**, v. 9(2), p. 183-188, Janeiro 2007. ISSN 1980-0037.
- [25]. MESTDAGH, K. D. V. Personal perspective: in search of an optimum cycling posture. **Applied Ergonomics - Elsevier Science Ltd**, v. 29, p. 325-334, 1998. ISSN PII: S0003-6870(97)00080-X.
- [26]. WORKSHOP TIPS BY ANDY VERRALL: MAKE A NOTE OF YOUR BIKE SET-UP. **Cycling Club**, 2009. Disponível em: <<http://www.raphacondor.cc/club/workshop-tips-by-andy-verrall-make-a-note-of-your-bike-set-up>>. Acesso em: 24 Maio 2015.
- [27]. BOHLMANN, J. T. Injuries in competitive cycling. **Physician Sportsmed**, v. 9(5), p. 117-124, 1981.
- [28]. CAVANAGH, P. R.; SANDERSON, D. J. The biomechanics of cycling: studies of the pedaling mechanics of elite pursuit riders, 1986.
- [29]. NORDEEN-SNYDER, K. S. The effect of bicycle seat height variation upon oxygen consumption and lower limb kinematics. **Medicine and Science in Sports**, 1977. 113-117.
- [30]. HULL, M. L.; GONZALEZ, H. Bivariate optimization of pedalling rate and crank arm length in cycling. **Journal of Biomechanics**, v. 21, n. 10, p. 839-849, 1988.
- [31]. VENDRAME, A. C. Vibrações Ocupacionais. **Vendrame - Segurança no Trabalho, Saúde e Meio Ambiente**, 2012. Disponível em:

- <[http://www.vendrame.com.br/novo/artigos/vibracoes\\_ocupacionais.pdf](http://www.vendrame.com.br/novo/artigos/vibracoes_ocupacionais.pdf)>. Acesso em: 01 julho 2015.
- [32]. AFONSO, E. Efeitos das Vibrações na Saúde e Segurança do Trabalhador. **Grupo 4Work**, 2012. Disponível em: <[http://www.4work.pt/cms/index.php?id=98&no\\_cache=1&tx\\_ttnews%5Btt\\_news%5D=133&tx\\_ttnews%5BbackPid%5D=100&cHash=6b648f5780](http://www.4work.pt/cms/index.php?id=98&no_cache=1&tx_ttnews%5Btt_news%5D=133&tx_ttnews%5BbackPid%5D=100&cHash=6b648f5780)>. Acesso em: 01 julho 2015.
- [33]. Disponível em: <<http://www.smartwalk.com.br/#/duvidas/4573486394>>. Acesso em: 24 maio 2015.
- [34]. SMALL, Low Power, 3-Axis  $\pm 3$  g - ADXL335. **Analog Devices**, 2009.
- [35]. O que é e para que serve o Arduino. **Mundo dos Hackers**. Disponível em: <<http://www.mundodoshackers.com.br/o-que-e-e-para-que-serve-o-arduino>>. Acesso em: 22 junho 2015.
- [36]. NORTON, R. L. **Cinemática e Dinâmica dos Mecanismos**. Porto Alegre: AMGH Editora LTDA, 2011.
- [37]. CRAIG, R. R.; KURDILA, A. J. **Fundamentals of Structural Dynamics**. 2a. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2006.
- [38]. MARTENS, S. Bicycles measure the quality of cycle paths in Belgium. **Eltis - The urban mobility observatory**, 22 maio 2015. Disponível em: <<http://www.eltis.org/discover/case-studies/bicycles-measure-quality-cycle-paths-belgium>>. Acesso em: 30 maio 2015.
- [39]. SILVA, D. F. S. Stop às lesões no desporto, 2011.
- [40]. MÚSCULO gastrocnêmio. **Wikipédia - A enciclopédia livre**, 2013. Disponível em: <[https://pt.wikipedia.org/wiki/M%C3%BAsculo\\_gastrocn%C3%AAmio](https://pt.wikipedia.org/wiki/M%C3%BAsculo_gastrocn%C3%AAmio)>. Acesso em: 01 jul. 2015.

## APÊNDICE A – Programas em Matlab®

### A.1 – Tratamento de dados do acelerômetro

```

% Gabriela Negreiros
% Aceleração em solo plano - CALÇADA

close all
clear all
clc

data=importdata('12 Calçada plana.txt');

t=data(:,1);          % tempo
vertical=data(:,2);  % componente x - positivo para baixo
lateral=data(:,3);   % componente y - positivo para direita
frente=data(:,4);    % componente z - positivo para frente

%%
% Tempo médio do intervalo de tempo entre dois dados consecutivos

L=length(t);        % numero de linhas do arquivo

for i=1:L-1
    intervalo(i,1) = t(i+1)-t(i);
end

intervalo=mean(intervalo);

%% Interpolando dados para se ter um intervalo igualmente espaçado

t_new=t(100):intervalo:t(L-250);

% Interpolando dados nas tres direcoes
vertical_new=interp1(t,vertical,t_new);
lateral_new=interp1(t,lateral,t_new);
frente_new=interp1(t,frente,t_new);

% Tirando o valor medio do sinal original e do interpolado
vertical=vertical-mean(vertical);
lateral=lateral-mean(lateral);
frente=frente-mean(frente);

vertical_new=vertical_new-mean(vertical_new);
lateral_new=lateral_new-mean(lateral_new);
frente_new=frente_new-mean(frente_new);

% Traçando os dados originais com os dados interpolados
figure(1)
subplot(3,1,1)
plot(t,vertical,'-b',t_new,vertical_new,'-r')
legend('Dados originais', 'Dados interpolados')
title('Vertical')
axis([5 30 -1 1])

```

```

subplot(3,1,2)
plot(t,lateral,'-b',t_new,lateral_new,'-r')
legend('Dados originais', 'Dados interpolados')
title('Lateral')
ylabel('Aceleração (m/s^2)')
axis([5 30 -1 1])

subplot(3,1,3)
plot(t,frente,'-b',t_new,frente_new,'-r')
legend('Dados originais', 'Dados interpolados')
title('Frente')
xlabel('Tempo (s)')
axis([5 30 -1 1])

%% Programando fft

Fs = 1/intervalo; % Frequência do caso

NFFT = 2^nextpow2(L); % função que retorna os expoentes para as menores
potências de 2 que satisfaz cada elemento de L

% Transformada de fourier das três direções
VERTICAL = fft(vertical_new',NFFT)/L;
LATERAL = fft(lateral_new',NFFT)/L;
FRENTE = fft(frente_new',NFFT)/L;

f = Fs/2*linspace(0,1,NFFT/2+1);

% Traçando fft só de um lado (lado positivo do espectro)
figure(2)
subplot(3,1,1)
plot(f,2*abs(VERTICAL(1:NFFT/2+1)))
title('Espectro de amplitude - Direção Vertical')
axis([0 23 0 0.01])

subplot(3,1,2)
plot(f,2*abs(LATERAL(1:NFFT/2+1)))
title('Direção lateral')
ylabel('Amplitude (m/s^2)')
axis([0 23 0 0.01])

subplot(3,1,3)
plot(f,2*abs(FRENTE(1:NFFT/2+1)))
title('Direção frente')
xlabel('Frequência (Hz)')
axis([0 23 0 0.01])

%% 1/3 oitava

freq=[0.1 0.125 0.16 0.2 0.25 0.315 0.4 0.5 0.63 0.8 1 1.25 1.6 2 2.5 3.15
4 5 6.3 8 10 12.5 16 20 25];
W=[62.4 97.2 158 243 364 527 708 843 929 972 991 1000 1007 1012 1017 1022
1024 1013 974 891 776 647 512 409 325]/1000;

range=length(f);

for i=1:length(freq)-1
    soma01=0;
    soma02=0;

```

```

soma03=0;

k=0;

for j=1:range
    if f(j)>=freq(i) && f(j)<freq(i+1)
        soma01=soma01+(W(i)*vertical_new(j))*(W(i)*vertical_new(j));
        soma02=soma02+(W(i)*lateral_new(j))*(W(i)*lateral_new(j));
        soma03=soma03+(W(i)*frente_new(j))*(W(i)*frente_new(j));
        k=k+1;
    end

    media01(i)=soma01/k;
    media01(i)=sqrt(media01(i));

    media02(i)=soma02/k;
    media02(i)=sqrt(media02(i));

    media03(i)=soma03/k;
    media03(i)=sqrt(media03(i));
end
end

[media01' media02' media03']

```

## A2 – Rugosidade

```

% Gabriela Negreiros
%
% Gerando rugosidade

close all
clear all
clc

% Declaração das variáveis
uope = 0.001; % uo = 0.00001; %asfalto % uo = 0.001; %pedrinhas% altura do
rugosidade
u1pe = 0.0015;% u1 = 0.000015;% u1=0.0015;
u2pe = 0.002; % u2 = 0.00002; % u2=0.002;

% Asfalto
uoa = 0.00001;
u1a = 0.000015;
u2a = 0.00002;

% Calçada
uoc = 0.0001;
u1c = 0.00015;
u2c = 0.0002;

% Paralelepípedo
uopa = 0.1; % amplitude de pico
% Programa para gerar uma onda quadrada
f0 = 10; % frequência fundamental em Hz
cr = 90; % onda quadrada simétrica em %
fs = 1000; % frequência de amostragem em Hz

```

```

t = 0:1/fs:10; % gera o eixo do tempo
onda_quad = uopa*square(2*pi*f0*t,cr);

dC = 0.19; % diâmetro da coroa maior - manivela
dc = 0.08; % diâmetro da coroa menor - pneu traseiro
dR = 0.65; % diâmetro do pneu da bicicleta
f = 1000/3600; % fator de conversão [km/h] - [m/s]
v = 10; % velocidade da bicicleta em km/h
wc = v*f/(dR/2); % velocidade angular da coroa dentada menor - roda
traseira
% Como as duas coroas dentadas (da roda traseira e da manivela) estão
% ligadas por uma correia, a velocidade linear das duas é igual. Sendo
% assim vel_coroa_menor = vel_coroa_maior
vc = wc*(dc/2); % vel_Coroa_menor = w_coroa_menor*raio_coroa_menor
vC = vc; % vel_coroa_maior = vel_coroa_menor
wC = vC/(dC/2); % velocidade angular da coroa maior

l = 1.5; % distância entre as duas rodas
td=l/(v*f); % tempo em que a roda traseira demora para passar pelo mesmo
ponto que a dianteira

% Harmônicos Pedrinhas
ydpe = uope*cos(wC*t) + ulpe*cos(10*wC*t) + u2pe*cos(100*wC*t);
ytpe = uope*cos(wC*(t+td)) + ulpe*cos(10*wC*(t+td)) +
u2pe*cos(100*wC*(t+td));

upe = uope+ulpe+u2pe;
ytpe=ytpe+upe; % nivel de offset
ydpe=ydpe+upe;

% Harmônicos Asfalto
yda = uoa*cos(wC*t) + ula*cos(10*wC*t) + u2a*cos(100*wC*t);
yta = uoa*cos(wC*(t+td)) + ula*cos(10*wC*(t+td)) + u2a*cos(100*wC*(t+td));

ua = uoa+ula+u2a;
yta=yta+ua; % nivel de offset
yda=yda+ua;

% Harmônicos Calçada
ydc = uoc*cos(wC*t) + ulc*cos(10*wC*t) + u2c*cos(100*wC*t);
ytc = uoc*cos(wC*(t+td)) + ulc*cos(10*wC*(t+td)) + u2c*cos(100*wC*(t+td));

uc = uoc+ulc+u2c;
ytc=ytc+uc; % nivel de offset
ydc=ydc+uc;

figure(1)
plot(t, ydpe, 'LineWidth',2)
title('Rugosidade - Pedrinhas')
xlabel('tempo [s]')
ylabel('Amplitude [m]')
axis([0 0.5 0 1e-2])

figure(2)
plot(t, yda, 'LineWidth',2)
title('Rugosidade - Asfalto')
xlabel('tempo [s]')
ylabel('Amplitude [m]')

```

```

axis([0 0.5 0 1e-4])

figure(3)
plot(t, ydc, 'LineWidth',2)
title('Rugosidade - Calçada')
xlabel('tempo [s]')
ylabel('Amplitude [m]')
axis([0 0.5 0 1e-3])

figure(4)
plot(t,onda_quad, 'LineWidth',2)
xlabel('t (s)')
ylabel('Amplitude')
title('Paralelepípedo')
axis([0 0.5 0.099 0.101]);

figure(5)
plot(t, ydpe, t, yda+0.01, t, ydc+0.01, t, onda_quad-0.1, 'LineWidth',2)
xlabel('t (s)')
ylabel('Amplitude')
legend('Pedrinhas', 'Asfalto', 'Calçada', 'Paralelepípedo')
axis([0 0.5 -0.005 0.015]);

```

### A3 – Simulação Solo de Pedrinhas

```

%-----
-
% Gabriela Negreiros - 2016-1
%
% Programa de simulação de mecanismo quatro barras associado à modelo de
% vibração - Modelagem de vibrações no selim de uma bicicleta
%
% Parte obrigatório para a obtenção do grau de bacharel em Engenharia
% Mecânica - CEFET/RJ
%-----
-

close all
clear
clc

global ax bx FP w F a b c d alfa uo u1 u2 lp Mg wC td FR

% Declaração das variáveis
m = 16.8;      % massa da bicicleta [kg]
I = 1.713;    % momento de inércia da bicicleta [kg.m^2]
Mp = 82;      % massa do passageiro [kg]

bd = 322;     % amortecimento para a roda dianteira [N.s/m]
bt = 496;     % amortecimento para a roda traseira [N.s/m]
bs = 289;     % amortecimento para o selim [N.s/m]

kd = 40221;   % rigidez para a roda dianteira [N/m]
kt = 31637;   % rigidez para a roda traseira [N/m]
ks = 43482;   % rigidez para o selim [N/m]

ld = 0.62;    % distância entre o CM e a roda dianteira 54.63 cm
lt = 0.44;    % distância entre o CM e a roda traseira 43.89 cm

```

```

lp = 0;          % distância entre o CM e o pedal 1.38 cm
ls = 0.13;      % distância entre o CM e o selim, onde o passageiro se encontra
                % 20.93 cm

g = 9.81;       % gravidade g=9.81 m/s^2
Mg = Mp*g;     % peso do passageiro

% Rugosidade
uo = 0.001;    % altura do rugosidade
u1=0.0015;
u2=0.002;
dC = 0.19;    % diâmetro da coroa maior - manivela
dc = 0.08;    % diâmetro da coroa menor - pneu traseiro
dR = 0.65;    % diâmetro do pneu da bicicleta
f = 1000/3600; % fator de conversão [km/h] - [m/s]
v = 15;       % velocidade da bicicleta em km/h
wc = v*f/(dR/2); % velocidade angular da coroa dentada menor - roda
traseira
% Como as duas coroas dentadas (da roda traseira e da manivela) estão
% ligadas por uma correia, a velocidade linear das duas é igual. Sendo
% assim vel_coroa_menor = vel_coroa_maior
vc = wc*(dc/2); % vel_Coroa_menor = w_coroa_menor*raio_coroa_menor
vC = vc; % vel_coroa_maior = vel_coroa_menor
wC = vC/(dC/2); % velocidade angular da coroa maior

l = 1.06; % distância entre as duas rodas
td=l/(v*f); % tempo em que a roda traseira demora para passar pelo mesmo
ponto que a dianteira

% Movimento da Bicicleta
w = wC; %Velocidade Angular da Bicicleta [rot/s]
p = 2*pi/w; % período de rotação da bicicleta [s]
T = 6*p; % tempo escolhido
FP = 0.2*Mg; % força no pedal 20% do peso do passageiro

% Mecanismo 4 barras
% Posição de O2 e O4
xo2 = 0;
yo2 = 0;
xo4 = 0.13;
yo4 = 0.67;
alfa = atan(yo4/xo4); % ângulo entre o eixo de rotação da manivela e o
selim
%
a = 0.200; % manivela [m]
b = 0.50;
c = 0.56;
d = sqrt(xo4*xo4 + yo4*yo4);

% Modelo de Vibrações
% Declarando as matrizes de massa, rigidez e amortecimento
M = [m 0 0;
     0 I 0;
     0 0 Mp];

B = [bd+bt+bs bd*ld-bt*lt-bs*ls -bs;
     bd*ld-bt*lt-bs*ls bd*ld.^2+bt*lt.^2+bs*ls.^2 bs*ls;
     -bs bs*ls bs];

```

```

K = [kd+kt+ks kd*ld-kt*lt-ks*ls -ks;
     kd*ld-kt*lt-ks*ls kd*ld.^2+kt*lt.^2+ks*ls.^2 ks*ls;
     -ks ks*ls ks];

B_barra = [bd bt 0;
           bd*ld -bt*lt 0;
           0 0 0];

K_barra = [kd kt 0;
           kd*ld -kt*lt 0;
           0 0 0];

% Escrevendo a matriz do vetor de estado a e a matriz de adequação das
% entradas b para o cálculo das derivadas do vetor de estado
ax = [zeros(3) eye(3);
     -M\K -M\B];

bx = [zeros(3) zeros(3);
     M\K_barra M\B_barra];

% Resolvendo a EDO
tspan=[0 T]; % tempo
y0=[0 0 0 0 0 0]; % condições iniciais

[t,y]=ode45('equacao01',tspan,y0); % resolvendo a EDO através do comando
ode45
n = length(t);

% Solução da EDO
% Deslocamentos
xb = y(1:n,1); % linear da bicicleta
theta = y(1:n,2); % angular da bicicleta
xp = y(1:n,3); % do passageiro

% Velocidades
xb_ponto = y(1:n,4); % linear da bicicleta
theta_ponto = y(1:n,5); % angular da bicicleta
xp_ponto = y(1:n,6); % linear do passageiro

tet_ini = pi/2 - alfa; % ângulo de início do movimento
tet_inie = tet_ini + pi; %- alfa;
tet2 = tet_ini + w*t; % incremento do ângulo teta 2
tet2e = tet_inie + w*t;

for i=1:n
    tet=tet2(i);

    voltas_d = fix(tet/(2*pi));
    tet = tet - voltas_d*2*pi;
    tet_teste(i)=tet;

    tete=tet2e(i);

    voltas_e = fix(tete/(2*pi));
    tete = tete - voltas_e*2*pi;
    tete_teste(i)=tete;

% Perna direita
    Ax_d(i) = a*cos(tet);

```

```

Ay_d(i) = a*sin(tet);
P_d = ((Ay_d(i)*Ay_d(i))/((Ax_d(i) - d)^2)) + 1;
S_d = (a*a - b*b + c*c - d*d)/(2*(Ax_d(i) - d));
Q_d = (2*Ay_d(i)*(d - S_d))/(Ax_d(i) - d);
R_d = ((d - S_d)^2) - c*c;
By_d(i)=(-Q_d + sqrt(Q_d*Q_d - 4*P_d*R_d))/(2*P_d);
Bx_d(i)= S_d - ((Ay_d(i)*By_d(i))/(Ax_d(i) - d));
tet3(i) = atan((By_d(i) - Ay_d(i))/(Bx_d(i) - Ax_d(i)));

gama_d(i) = pi/2 - (alfa + tet3(i));

% Perna esquerda
Ax_e(i) = a*cos(tete);
Ay_e(i) = a*sin(tete);
P_e = Ay_e(i)*Ay_e(i)/((Ax_e(i) - d)^2) + 1;
S_e = (a*a - b*b + c*c - d*d)/(2*(Ax_e(i) - d));
Q_e = 2*Ay_e(i)*(d - S_e)/(Ax_e(i) - d);
R_e = (d - S_e)^2 - c*c;
By_e(i)=(-Q_e + sqrt(Q_e*Q_e - 4*P_e*R_e))/(2*P_e);
Bx_e(i)= S_e - ((Ay_e(i)*By_e(i))/(Ax_e(i) - d));
tet3_e(i) = atan((By_e(i) - Ay_e(i))/(Bx_e(i) - Ax_e(i)));

gama_e(i) = pi/2 - (alfa + tet3_e(i));

if tet <= 3*pi/2 - alfa && tet > pi/2 - alfa %pi/2 - (alfa +
tet3(i))%pi/2 - 2*alfa
    F(i)=FP*cos(gama_d(i));
    Fd(i)=F(i);
else
    F(i)=FP*cos(gama_e(i));
    Fe(i)=F(i);
end

FR(i) = Mg - F(i);
a_p(i)=(1/Mp) * (bs*xb_ponto(i)-bs*ls*theta_ponto(i)-
bs*xp_ponto(i)+ks*xb(i)-ks*ls*theta(i)-ks*xp(i) + FR(i));

end

for i=2:n-1
    acel(i)=(xp(i+1)-xp(i-1))/(t(i+1)-t(i-1));
end

% Gráficos
figure(1)
plot(t, (a_p - mean(a_p))/1000)
title('Aceleração do ciclista x tempo')
xlabel('Tempo[s]')
ylabel('Aceleração [m/s²] ')

figure(2)
plot(t,xp)
title('Deslocamento do ciclista x tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Deslocamento [mm] ')

figure(3)
plot(t,F)
title('Força aplicada no eixo vertical vs tempo')

```

```

xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Força [N]')
% axis([0 4 -500 500])

% Resolvendo a equação diferencial

function yp=equacao01(t,y)
global ax bx FP w F a b c d alfa uo u1 u2 lp Mg wC td FR

% Harmônicos
yt = uo*cos(wC*t) + u1*cos(10*wC*t) + u2*cos(100*wC*t);
yd = uo*cos(wC*(t+td)) + u1*cos(10*wC*(t+td)) + u2*cos(100*wC*(t+td));

yt_ponto = -uo*wC*sin(wC*t) - u1*10*wC*sin(10*wC*t) -
u2*100*wC*sin(100*wC*t);
yd_ponto = -uo*wC*sin(wC*(t+td)) - u1*10*wC*sin(10*wC*(t+td)) -
u2*100*wC*sin(100*wC*(t+td));

u0 = uo+u1+u2;
yt=yt+u0; % nivel de offset
yd=yd+u0;

u=[yd yt 0 yd_ponto yt_ponto 0]';

tet_ini = pi/2 - alfa; % ângulo de início do movimento
tet_inie = tet_ini + pi; %- alfa;
tet2 = tet_ini + w*t; % incremento do ângulo teta 2
tet2e = tet_inie + w*t;

tet=tet2;

voltas_d = fix(tet/(2*pi));
tet = tet - voltas_d*2*pi;
tet_teste=tet;

tete=tet2e;

voltas_e = fix(tete/(2*pi));
tete = tete - voltas_e*2*pi;
tete_teste=tete;

% Perna direita
Ax_d = a*cos(tet);
Ay_d = a*sin(tet);
P_d = ((Ay_d*Ay_d)/((Ax_d - d)^2)) + 1;
S_d = (a*a - b*b + c*c - d*d)/(2*(Ax_d - d));
Q_d = (2*Ay_d*(d - S_d))/(Ax_d - d);
R_d = ((d - S_d)^2) - c*c;
By_d=(-Q_d + sqrt(Q_d*Q_d - 4*P_d*R_d))/(2*P_d);
Bx_d= S_d - ((Ay_d*By_d)/(Ax_d - d));
tet3 = atan((By_d - Ay_d)/(Bx_d - Ax_d));

gama_d = pi/2 - (alfa + tet3);

% Perna esquerda
Ax_e = a*cos(tete);
Ay_e = a*sin(tete);
P_e = Ay_e*Ay_e/((Ax_e - d)^2) + 1;

```

```

S_e = (a*a - b*b + c*c - d*d)/(2*(Ax_e - d));
Q_e = 2*Ay_e*(d - S_e)/(Ax_e - d);
R_e = (d - S_e)^2 - c*c;
By_e=(-Q_e + sqrt(Q_e*Q_e - 4*P_e*R_e))/(2*P_e);
Bx_e= S_e - ((Ay_e*By_e)/(Ax_e - d));
tet3_e = atan((By_e - Ay_e)/(Bx_e - Ax_e));

gama_e = pi/2 - (alfa + tet3_e);

if tet <= 3*pi/2 - alfa && tet > pi/2 - alfa %pi/2 - (alfa +
tet3(i))%pi/2 - 2*alfa
    F=FP*cos(gama_d);
    Fd=F;
else
    F=FP*cos(gama_e);
    Fe=F;
end

FR = Mg - F;

Fy=[0; 0; 0; F; -F*lp; FR];

yp=ax*y+bx*u+Fy;

end

```

#### A4 – Simulação Solo Asfalto

```

%-----
-
% Gabriela Negreiros - 2016-1
%
% Programa de simulação de mecanismo quatro barras associado à modelo de
% vibração - Modelagem de vibrações no selim de uma bicicleta
%
% Parte obrigatório para a obtenção do grau de bacharel em Engenharia
% Mecânica - CEFET/RJ
%-----
-

close all
clear
clc

global ax bx FP w F a b c d alfa uo u1 u2 lp Mg wC td FR

% Declaração das variáveis
m = 16.8;      % massa da bicicleta [kg]
I = 1.713;    % momento de inércia da bicicleta [kg.m^2]
Mp = 82;      % massa do passageiro [kg]

bd = 322;     % amortecimento para a roda dianteira [N.s/m]
bt = 496;     % amortecimento para a roda traseira [N.s/m]
bs = 289;     % amortecimento para o selim [N.s/m]

kd = 40221;   % rigidez para a roda dianteira [N/m]
kt = 31637;   % rigidez para a roda traseira [N/m]
ks = 43482;   % rigidez para o selim [N/m]

```

```

ld = 0.62; % distância entre o CM e a roda dianteira 54.63 cm
lt = 0.44; % distância entre o CM e a roda traseira 43.89 cm
lp = 0; % distância entre o CM e o pedal 1.38 cm
ls = 0.13; % distância entre o CM e o selim, onde o passageiro se encontra
20.93 cm

g = 9.81; % gravidade g=9.81 m/s^2
Mg = Mp*g; % peso do passageiro

% Rugosidade
uo = 0.00001; % altura do rugosidade
u1=0.000015;
u2=0.00002;
dC = 0.19; % diâmetro da coroa maior - manivela
dc = 0.08; % diâmetro da coroa menor - pneu traseiro
dR = 0.65; % diâmetro do pneu da bicicleta
f = 1000/3600; % fator de conversão [km/h] - [m/s]
v = 15; % velocidade da bicicleta em km/h
wc = v*f/(dR/2); % velocidade angular da coroa dentada menor - roda
traseira
% Como as duas coroas dentadas (da roda traseira e da manivela) estão
% ligadas por uma correia, a velocidade linear das duas é igual. Sendo
% assim vel_coroa_menor = vel_coroa_maior
vc = wc*(dc/2); % vel_Coroa_menor = w_coroa_menor*raio_coroa_menor
vC = vc; % vel_coroa_maior = vel_coroa_menor
wC = vC/(dC/2); % velocidade angular da coroa maior

l = 1.06; % distância entre as duas rodas
td=l/(v*f); % tempo em que a roda traseira demora para passar pelo mesmo
ponto que a dianteira

% Movimento da Bicicleta
w = wC; %Velocidade Angular da Bicicleta [rot/s]
p = 2*pi/w; % período de rotação da bicicleta [s]
T = 6*p; % tempo escolhido
FP = 0.2*Mg; % força no pedal 20% do peso do passageiro

% Mecanismo 4 barras
% Posição de O2 e O4
xo2 = 0;
yo2 = 0;
xo4 = 0.13;
yo4 = 0.67;
alfa = atan(yo4/xo4); % ângulo entre o eixo de rotação da manivela e o
selim
%
a = 0.200; % manivela [m]
b = 0.50;
c = 0.56;
d = sqrt(xo4*xo4 + yo4*yo4);

% Modelo de Vibrações
% Declarando as matrizes de massa, rigidez e amortecimento
M = [m 0 0;
0 I 0;
0 0 Mp];

B = [bd+bt+bs bd*ld-bt*lt-bs*ls -bs;

```

```

    bd*ld-bt*lt-bs*ls bd*ld.^2+bt*lt.^2+bs*ls.^2 bs*ls;
    -bs bs*ls bs];

K = [kd+kt+ks kd*ld-kt*lt-ks*ls -ks;
     kd*ld-kt*lt-ks*ls kd*ld.^2+kt*lt.^2+ks*ls.^2 ks*ls;
     -ks ks*ls ks];

B_barra = [bd bt 0;
           bd*ld -bt*lt 0;
           0 0 0];

K_barra = [kd kt 0;
           kd*ld -kt*lt 0;
           0 0 0];

% Escrevendo a matriz do vetor de estado a e a matriz de adequação das
% entradas b para o cálculo das derivadas do vetor de estado
ax = [zeros(3) eye(3);
     -M\K -M\B];

bx = [zeros(3) zeros(3);
     M\K_barra M\B_barra];

% Resolvendo a EDO
tspan=[0 T]; % tempo
y0=[0 0 0 0 0 0]; % condições iniciais

[t,y]=ode45('equacao01',tspan,y0); % resolvendo a EDO através do comando
ode45
n = length(t);

% Solução da EDO
% Deslocamentos
xb = y(1:n,1); % linear da bicicleta
theta = y(1:n,2); % angular da bicicleta
xp = y(1:n,3); % do passageiro

% Velocidades
xb_ponto = y(1:n,4); % linear da bicicleta
theta_ponto = y(1:n,5); % angular da bicicleta
xp_ponto = y(1:n,6); % linear do passageiro

tet_ini = pi/2 - alfa; % ângulo de início do movimento
tet_inie = tet_ini + pi; %- alfa;
tet2 = tet_ini + w*t; % incremento do ângulo teta 2
tet2e = tet_inie + w*t;

for i=1:n
    tet=tet2(i);

    voltas_d = fix(tet/(2*pi));
    tet = tet - voltas_d*2*pi;
    tet_teste(i)=tet;

    tete=tet2e(i);

    voltas_e = fix(tete/(2*pi));
    tete = tete - voltas_e*2*pi;
    tete_teste(i)=tete;

```

```

% Perna direita
Ax_d(i) = a*cos(tet);
Ay_d(i) = a*sin(tet);
P_d = ((Ay_d(i)*Ay_d(i))/(Ax_d(i) - d)^2) + 1;
S_d = (a*a - b*b + c*c - d*d)/(2*(Ax_d(i) - d));
Q_d = (2*Ay_d(i)*(d - S_d))/(Ax_d(i) - d);
R_d = ((d - S_d)^2) - c*c;
By_d(i)=(-Q_d + sqrt(Q_d*Q_d - 4*P_d*R_d))/(2*P_d);
Bx_d(i)= S_d - ((Ay_d(i)*By_d(i))/(Ax_d(i) - d));
tet3(i) = atan((By_d(i) - Ay_d(i))/(Bx_d(i) - Ax_d(i)));

gama_d(i) = pi/2 - (alfa + tet3(i));

% Perna esquerda
Ax_e(i) = a*cos(tete);
Ay_e(i) = a*sin(tete);
P_e = Ay_e(i)*Ay_e(i)/((Ax_e(i) - d)^2) + 1;
S_e = (a*a - b*b + c*c - d*d)/(2*(Ax_e(i) - d));
Q_e = 2*Ay_e(i)*(d - S_e)/(Ax_e(i) - d);
R_e = (d - S_e)^2 - c*c;
By_e(i)=(-Q_e + sqrt(Q_e*Q_e - 4*P_e*R_e))/(2*P_e);
Bx_e(i)= S_e - ((Ay_e(i)*By_e(i))/(Ax_e(i) - d));
tet3_e(i) = atan((By_e(i) - Ay_e(i))/(Bx_e(i) - Ax_e(i)));

gama_e(i) = pi/2 - (alfa + tet3_e(i));

if tet <= 3*pi/2 - alfa && tet > pi/2 - alfa %pi/2 - (alfa +
tet3(i))%pi/2 - 2*alfa
    F(i)=FP*cos(gama_d(i));
    Fd(i)=F(i);
else
    F(i)=FP*cos(gama_e(i));
    Fe(i)=F(i);
end

FR(i) = Mg - F(i);
a_p(i)=(1/Mp)*(bs*xb_ponto(i)-bs*ls*theta_ponto(i)-
bs*xp_ponto(i)+ks*xb(i)-ks*ls*theta(i)-ks*xp(i) + FR(i));

end

for i=2:n-1
    acel(i)=(xp(i+1)-xp(i-1))/(t(i+1)-t(i-1));
end

% Gráficos
figure(1)
plot(t,(a_p - mean(a_p))/1000)
title('Aceleração do ciclista x tempo')
xlabel('Tempo[s]')
ylabel('Aceleração [m/s²] ')

figure(2)
plot(t,xp)
title('Deslocamento do ciclista x tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Deslocamento [mm] ')

```

```

figure(3)
plot(t,F)
title('Força vertical aplicada ao pedal vs tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Força [N]')

```

## A5 – Simulação Solo Calçada

```

%-----
-
% Gabriela Negreiros - 2016-1
%
% Programa de simulação de mecanismo quatro barras associado à modelo de
% vibração - Modelagem de vibrações no selim de uma bicicleta
%
% Parte obrigatório para a obtenção do grau de bacharel em Engenharia
% Mecânica - CEFET/RJ
%-----
-

close all
clear
clc

global ax bx FP w F a b c d alfa uo u1 u2 lp Mg wC td FR

% Declaração das variáveis
m = 16.8; % massa da bicicleta [kg]
I = 1.713; % momento de inércia da bicicleta [kg.m^2]
Mp = 82; % massa do passageiro [kg]

bd = 322; % amortecimento para a roda dianteira [N.s/m]
bt = 496; % amortecimento para a roda traseira [N.s/m]
bs = 289; % amortecimento para o selim [N.s/m]

kd = 40221; % rigidez para a roda dianteira [N/m]
kt = 31637; % rigidez para a roda traseira [N/m]
ks = 43482; % rigidez para o selim [N/m]

ld = 0.62; % distância entre o CM e a roda dianteira 54.63 cm
lt = 0.44; % distância entre o CM e a roda traseira 43.89 cm
lp = 0; % distância entre o CM e o pedal 1.38 cm
ls = 0.13; % distância entre o CM e o selim, onde o passageiro se encontra
20.93 cm

g = 9.81; % gravidade g=9.81 m/s^2
Mg = Mp*g; % peso do passageiro

% Rugosidade
uo = 0.0001; % altura do rugosidade
u1=0.00015;
u2=0.0002;
dC = 0.19; % diâmetro da coroa maior - manivela
dc = 0.08; % diâmetro da coroa menor - pneu traseiro
dR = 0.65; % diâmetro do pneu da bicicleta
f = 1000/3600; % fator de conversão [km/h] - [m/s]
v = 15; % velocidade da bicicleta em km/h

```

```

wc = v*f/(dR/2); % velocidade angular da coroa dentada menor - roda
traseira
% Como as duas coroas dentadas (da roda traseira e da manivela) estão
% ligadas por uma correia, a velocidade linear das duas é igual. Sendo
% assim vel_coroa_menor = vel_coroa_maior
vc = wc*(dc/2); % vel_Coroa_menor = w_coroa_menor*raio_coroa_menor
vC = vc; % vel_coroa_maior = vel_coroa_menor
wC = vC/(dC/2); % velocidade angular da coroa maior

l = 1.06; % distância entre as duas rodas
td=l/(v*f); % tempo em que a roda traseira demora para passar pelo mesmo
ponto que a dianteira

% Movimento da Bicicleta
w = wC; %Velocidade Angular da Bicicleta [rot/s]
p = 2*pi/w; % período de rotação da bicicleta [s]
T = 6*p; % tempo escolhido
FP = 0.2*Mg; % força no pedal 20% do peso do passageiro

% Mecanismo 4 barras
% Posição de O2 e O4
xo2 = 0;
yo2 = 0;
xo4 = 0.13;
yo4 = 0.67;
alfa = atan(yo4/xo4); % ângulo entre o eixo de rotação da manivela e o
selim
%
a = 0.200; % manivela [m]
b = 0.50;
c = 0.56;
d = sqrt(xo4*xo4 + yo4*yo4);

% Modelo de Vibrações
% Declarando as matrizes de massa, rigidez e amortecimento
M = [m 0 0;
      0 I 0;
      0 0 Mp];

B = [bd+bt+bs bd*ld-bt*lt-bs*ls -bs;
      bd*ld-bt*lt-bs*ls bd*ld.^2+bt*lt.^2+bs*ls.^2 bs*ls;
      -bs bs*ls bs];

K = [kd+kt+ks kd*ld-kt*lt-ks*ls -ks;
      kd*ld-kt*lt-ks*ls kd*ld.^2+kt*lt.^2+ks*ls.^2 ks*ls;
      -ks ks*ls ks];

B_barra = [bd bt 0;
            bd*ld -bt*lt 0;
            0 0 0];

K_barra = [kd kt 0;
            kd*ld -kt*lt 0;
            0 0 0];

% Escrevendo a matriz do vetor de estado a e a matriz de adequação das
% entradas b para o cálculo das derivadas do vetor de estado
ax = [zeros(3) eye(3)];

```

```

-M\K -M\B];

bx = [zeros(3) zeros(3);
      M\K_barra M\B_barra];

% Resolvendo a EDO
tspan=[0 T]; % tempo
y0=[0 0 0 0 0 0]; % condições iniciais

[t,y]=ode45('equacao01',tspan,y0); % resolvendo a EDO através do comando
ode45
n = length(t);

% Solução da EDO
% Deslocamentos
xb = y(1:n,1); % linear da bicicleta
theta = y(1:n,2); % angular da bicicleta
xp = y(1:n,3); % do passageiro

% Velocidades
xb_ponto = y(1:n,4); % linear da bicicleta
theta_ponto = y(1:n,5); % angular da bicicleta
xp_ponto = y(1:n,6); % linear do passageiro

tet_ini = pi/2 - alfa; % ângulo de início do movimento
tet_inie = tet_ini + pi; %- alfa;
tet2 = tet_ini + w*t; % incremento do ângulo teta 2
tet2e = tet_inie + w*t;

for i=1:n
    tet=tet2(i);

    voltas_d = fix(tet/(2*pi));
    tet = tet - voltas_d*2*pi;
    tet_teste(i)=tet;

    tete=tet2e(i);

    voltas_e = fix(tete/(2*pi));
    tete = tete - voltas_e*2*pi;
    tete_teste(i)=tete;

    % Perna direita
    Ax_d(i) = a*cos(tet);
    Ay_d(i) = a*sin(tet);
    P_d = ((Ay_d(i)*Ay_d(i))/((Ax_d(i) - d)^2)) + 1;
    S_d = (a*a - b*b + c*c - d*d)/(2*(Ax_d(i) - d));
    Q_d = (2*Ay_d(i)*(d - S_d))/(Ax_d(i) - d);
    R_d = ((d - S_d)^2) - c*c;
    By_d(i)=(-Q_d + sqrt(Q_d*Q_d - 4*P_d*R_d))/(2*P_d);
    Bx_d(i)= S_d - ((Ay_d(i)*By_d(i))/(Ax_d(i) - d));
    tet3(i) = atan((By_d(i) - Ay_d(i))/(Bx_d(i) - Ax_d(i)));

    gama_d(i) = pi/2 - (alfa + tet3(i));

    % Perna esquerda
    Ax_e(i) = a*cos(tete);
    Ay_e(i) = a*sin(tete);
    P_e = Ay_e(i)*Ay_e(i)/((Ax_e(i) - d)^2) + 1;

```

```

S_e = (a*a - b*b + c*c - d*d)/(2*(Ax_e(i) - d));
Q_e = 2*Ay_e(i)*(d - S_e)/(Ax_e(i) - d);
R_e = (d - S_e)^2 - c*c;
By_e(i)=(-Q_e + sqrt(Q_e*Q_e - 4*P_e*R_e))/(2*P_e);
Bx_e(i)= S_e - ((Ay_e(i)*By_e(i))/(Ax_e(i) - d));
tet3_e(i) = atan((By_e(i) - Ay_e(i))/(Bx_e(i) - Ax_e(i)));

gama_e(i) = pi/2 - (alfa + tet3_e(i));

if tet <= 3*pi/2 - alfa && tet > pi/2 - alfa %pi/2 - (alfa +
tet3(i))%pi/2 - 2*alfa
    F(i)=FP*cos(gama_d(i));
    Fd(i)=F(i);
else
    F(i)=FP*cos(gama_e(i));
    Fe(i)=F(i);
end

FR(i) = Mg - F(i);
a_p(i)=(1/Mp)*(bs*xb_ponto(i)-bs*ls*theta_ponto(i)-
bs*xp_ponto(i)+ks*xb(i)-ks*ls*theta(i)-ks*xp(i) + FR(i));

end

for i=2:n-1
    acel(i)=(xp(i+1)-xp(i-1))/(t(i+1)-t(i-1));
end

% Gráficos
figure(1)
plot(t, (a_p - mean(a_p))/1000)
title('Aceleração do ciclista x tempo')
xlabel('Tempo[s]')
ylabel('Aceleração [m/s²] ')

figure(2)
plot(t,xp)
title('Deslocamento do ciclista x tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Deslocamento [mm] ')

figure(3)
plot(t,F)
title('Força vertical aplicada ao pedal vs tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Força [N]')

```

## A6 – Simulação Solo Paralelepípedo

```

%-----
%
% Gabriela Negreiros - 2016-1
%
% Programa de simulação de mecanismo quatro barras associado à modelo de
% vibração - Modelagem de vibrações no selim de uma bicicleta
%
% Parte obrigatório para a obtenção do grau de bacharel em Engenharia

```

```

% Mecânica - CEFET/RJ
%-----

close all
clear
clc

global ax bx FP w F a b c d alfa uo u1 u2 lp Mg wC td FR

% Declaração das variáveis
m = 16.8;      % massa da bicicleta [kg]
I = 1.713;    % momento de inércia da bicicleta [kg.m^2]
Mp = 82;      % massa do passageiro [kg]

bd = 322;     % amortecimento para a roda dianteira [N.s/m]
bt = 496;     % amortecimento para a roda traseira [N.s/m]
bs = 289;     % amortecimento para o selim [N.s/m]

kd = 40221;   % rigidez para a roda dianteira [N/m]
kt = 31637;   % rigidez para a roda traseira [N/m]
ks = 43482;   % rigidez para o selim [N/m]

ld = 0.62;    % distância entre o CM e a roda dianteira 54.63 cm
lt = 0.44;    % distância entre o CM e a roda traseira 43.89 cm
lp = 0;       % distância entre o CM e o pedal 1.38 cm
ls = 0.13;   % distância entre o CM e o selim, onde o passageiro se encontra
20.93 cm

g = 9.81;     % gravidade g=9.81 m/s^2
Mg = Mp*g;    % peso do passageiro

% Rugosidade
uo = 0.1;     % altura do rugosidade
u1=0.00015;
u2=0.0002;
dC = 0.19;    % diâmetro da coroa maior - manivela
dc = 0.08;    % diâmetro da coroa menor - pneu traseiro
dR = 0.65;    % diâmetro do pneu da bicicleta
f = 1000/3600; % fator de conversão [km/h] - [m/s]
v = 15;       % velocidade da bicicleta em km/h
wC = v*f/(dR/2); % velocidade angular da coroa dentada menor - roda
traseira
% Como as duas coroas dentadas (da roda traseira e da manivela) estão
% ligadas por uma correia, a velocidade linear das duas é igual. Sendo
% assim vel_coroa_menor = vel_coroa_maior
vC = wC*(dc/2); % vel_Corua_menor = w_coroa_menor*raio_coroa_menor
vC = vC; % vel_coroa_maior = vel_coroa_menor
wC = vC/(dC/2); % velocidade angular da coroa maior

l = 1.06;     % distância entre as duas rodas
td=l/(v*f);  % tempo em que a roda traseira demora para passar pelo mesmo
ponto que a dianteira

% Movimento da Bicicleta
w = wC; %Velocidade Angular da Bicicleta [rot/s]
p = 2*pi/w;  % período de rotação da bicicleta [s]
T = 6*p;     % tempo escolhido
FP = 0.2*Mg; % força no pedal 20% do peso do passageiro

```

```

% Mecanismo 4 barras
% Posição de O2 e O4
xo2 = 0;
yo2 = 0;
xo4 = 0.13;
yo4 = 0.67;
alfa = atan(yo4/xo4); % ângulo entre o eixo de rotação da manivela e o
selim
%
a = 0.200; % manivela [m]
b = 0.50;
c = 0.56;
d = sqrt(xo4*xo4 + yo4*yo4);

% Modelo de Vibrações
% Declarando as matrizes de massa, rigidez e amortecimento
M = [m 0 0;
     0 I 0;
     0 0 Mp];

B = [bd+bt+bs bd*ld-bt*lt-bs*ls -bs;
     bd*ld-bt*lt-bs*ls bd*ld.^2+bt*lt.^2+bs*ls.^2 bs*ls;
     -bs bs*ls bs];

K = [kd+kt+ks kd*ld-kt*lt-ks*ls -ks;
     kd*ld-kt*lt-ks*ls kd*ld.^2+kt*lt.^2+ks*ls.^2 ks*ls;
     -ks ks*ls ks];

B_barra = [bd bt 0;
           bd*ld -bt*lt 0;
           0 0 0];

K_barra = [kd kt 0;
           kd*ld -kt*lt 0;
           0 0 0];

% Escrevendo a matriz do vetor de estado a e a matriz de adequação das
% entradas b para o cálculo das derivadas do vetor de estado
ax = [zeros(3) eye(3);
     -M\K -M\B];

bx = [zeros(3) zeros(3);
     M\K_barra M\B_barra];

% Resolvendo a EDO
tspan=[0 T]; % tempo
y0=[0 0 0 0 0 0]; % condições iniciais

[t,y]=ode45('equacao02',tspan,y0); % resolvendo a EDO através do comando
ode45
n = length(t);

% Solução da EDO
% Deslocamentos
xb = y(1:n,1); % linear da bicicleta
theta = y(1:n,2); % angular da bicicleta
xp = y(1:n,3); % do passageiro

```

```

% Velocidades
xb_ponto = y(1:n,4); % linear da bicicleta
theta_ponto = y(1:n,5); % angular da bicicleta
xp_ponto = y(1:n,6); % linear do passageiro

tet_ini = pi/2 - alfa; % ângulo de início do movimento
tet_inie = tet_ini + pi; %- alfa;
tet2 = tet_ini + w*t; % incremento do ângulo teta 2
tet2e = tet_inie + w*t;

for i=1:n
    tet=tet2(i);

    voltas_d = fix(tet/(2*pi));
    tet = tet - voltas_d*2*pi;
    tet_teste(i)=tet;

    tete=tet2e(i);

    voltas_e = fix(tete/(2*pi));
    tete = tete - voltas_e*2*pi;
    tete_teste(i)=tete;

% Perna direita
    Ax_d(i) = a*cos(tet);
    Ay_d(i) = a*sin(tet);
    P_d = ((Ay_d(i)*Ay_d(i))/((Ax_d(i) - d)^2)) + 1;
    S_d = (a*a - b*b + c*c - d*d)/(2*(Ax_d(i) - d));
    Q_d = (2*Ay_d(i)*(d - S_d))/(Ax_d(i) - d);
    R_d = ((d - S_d)^2) - c*c;
    By_d(i)=(-Q_d + sqrt(Q_d*Q_d - 4*P_d*R_d))/(2*P_d);
    Bx_d(i)= S_d - ((Ay_d(i)*By_d(i))/(Ax_d(i) - d));
    tet3(i) = atan((By_d(i) - Ay_d(i))/(Bx_d(i) - Ax_d(i)));

    gama_d(i) = pi/2 - (alfa + tet3(i));

% Perna esquerda
    Ax_e(i) = a*cos(tete);
    Ay_e(i) = a*sin(tete);
    P_e = Ay_e(i)*Ay_e(i)/((Ax_e(i) - d)^2) + 1;
    S_e = (a*a - b*b + c*c - d*d)/(2*(Ax_e(i) - d));
    Q_e = 2*Ay_e(i)*(d - S_e)/(Ax_e(i) - d);
    R_e = (d - S_e)^2 - c*c;
    By_e(i)=(-Q_e + sqrt(Q_e*Q_e - 4*P_e*R_e))/(2*P_e);
    Bx_e(i)= S_e - ((Ay_e(i)*By_e(i))/(Ax_e(i) - d));
    tet3_e(i) = atan((By_e(i) - Ay_e(i))/(Bx_e(i) - Ax_e(i)));

    gama_e(i) = pi/2 - (alfa + tet3_e(i));

    if tet <= 3*pi/2 - alfa && tet > pi/2 - alfa %pi/2 - (alfa +
tet3(i))%pi/2 - 2*alfa
        F(i)=FP*cos(gama_d(i));
        Fd(i)=F(i);
    else
        F(i)=FP*cos(gama_e(i));
        Fe(i)=F(i);
    end
end

```

```

        FR(i) = Mg - F(i);
        a_p(i)=(1/Mp) * (bs*xb_ponto(i)-bs*ls*theta_ponto(i)-
bs*xp_ponto(i)+ks*xb(i)-ks*ls*theta(i)-ks*xp(i) + FR(i));

end

for i=2:n-1
    acel(i)=(xp(i+1)-xp(i-1))/(t(i+1)-t(i-1));
end

% Gráficos
figure(1)
plot(t, (a_p - mean(a_p))/1000)
title('Aceleração do ciclista x tempo')
xlabel('Tempo[s]')
ylabel('Aceleração [m/s²] ')

figure(2)
plot(t,xp)
title('Deslocamento do ciclista x tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Deslocamento [mm] ')

figure(3)
plot(t,F)
title('Força vertical aplicada ao pedal vs tempo')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Força [N]')

%% Equação

function yp=equacao02(t,y)
global ax bx FP w F a b c d alfa uo u1 u2 lp Mg wC td FR

% Harmônicos
f0 = 10; % frequência fundamental em Hz
cr = 90; % onda quadrada simétrica em %
fs = 1000; % frequência de amostragem em Hz

yd = uo*square(2*pi*f0*t,cr);
yt = uo*square(2*pi*f0*(t+td),cr);

yd_ponto = 0;
yt_ponto = 0;

u=[yd yt 0 yd_ponto yt_ponto 0]';

tet_ini = pi/2 - alfa; % ângulo de início do movimento
tet_inie = tet_ini + pi; %- alfa;
tet2 = tet_ini + w*t; % incremento do ângulo teta 2
tet2e = tet_inie + w*t;

tet=tet2;

    voltas_d = fix(tet/(2*pi));
    tet = tet - voltas_d*2*pi;

```

```

tet_teste=tet;

tete=tet2e;

voltas_e = fix(tete/(2*pi));
tete = tete - voltas_e*2*pi;
tete_teste=tete;

% Perna direita
Ax_d = a*cos(tet);
Ay_d = a*sin(tet);
P_d = ((Ay_d*Ay_d)/((Ax_d - d)^2)) + 1;
S_d = (a*a - b*b + c*c - d*d)/(2*(Ax_d - d));
Q_d = (2*Ay_d*(d - S_d))/(Ax_d - d);
R_d = ((d - S_d)^2 - c*c);
By_d=(-Q_d + sqrt(Q_d*Q_d - 4*P_d*R_d))/(2*P_d);
Bx_d= S_d - ((Ay_d*By_d)/(Ax_d - d));
tet3 = atan((By_d - Ay_d)/(Bx_d - Ax_d));

gama_d = pi/2 - (alfa + tet3);

% Perna esquerda
Ax_e = a*cos(tete);
Ay_e = a*sin(tete);
P_e = Ay_e*Ay_e/((Ax_e - d)^2) + 1;
S_e = (a*a - b*b + c*c - d*d)/(2*(Ax_e - d));
Q_e = 2*Ay_e*(d - S_e)/(Ax_e - d);
R_e = (d - S_e)^2 - c*c;
By_e=(-Q_e + sqrt(Q_e*Q_e - 4*P_e*R_e))/(2*P_e);
Bx_e= S_e - ((Ay_e*By_e)/(Ax_e - d));
tet3_e = atan((By_e - Ay_e)/(Bx_e - Ax_e));

gama_e = pi/2 - (alfa + tet3_e);

if tet <= 3*pi/2 - alfa && tet > pi/2 - alfa %pi/2 - (alfa +
tet3(i))%pi/2 - 2*alfa
    F=FP*cos(gama_d);
    Fd=F;
else
    F=FP*cos(gama_e);
    Fe=F;
end

FR = Mg - F;

Fy=[0; 0; 0; F; -F*lp; FR];

yp=ax*y+bx*u+Fy;

end

```

## A7 – Determinação das Frequências Naturais do Modelo Físico idealizado

```

%%
% Modes and Natural Frequencies. Sketch the modes shapes and the
% corresponding angular frequencies

```

```

% L=eigenvalues=(w_n)^2| X=eigenvectors or eigen modes| w_n=natural
%frequencies
[L,X]=eigen(K,M);
disp('The natural frequencies are');
w_n=sqrt(L)
disp('The Eigenvectors are');

% Programa CALFEM da Universidade de Lund
function [L,X]=eigen(K,M,b)
% [L]=eigen(K,M)
% [L]=eigen(K,M,b)
% [L,X]=eigen(K,M)
% [L,X]=eigen(K,M,b)
%-----
% PURPOSE
% Solve the generalized eigenvalue problem
% [K-LM]X = 0, considering boundary conditions.
%
% INPUT:
%   K : global stiffness matrix, dim(K)= nd x nd
%   M : global mass matrix, dim(M)= nd x nd
%   b : boundary condition matrix
%       dim(b)= nb x 1
% OUTPUT:
%   L : eigenvalues stored in a vector with length (nd-nb)
%   X : eigenvectors dim(X)= nd x nfdof, nfdof : number of dof's
%-----

% LAST MODIFIED: H Carlsson 1993-09-21
% Copyright (c) Division of Structural Mechanics and
%                Department of Solid Mechanics.
%                Lund Institute of Technology
%-----

[nd,nd]=size(K);
fdof=[1:nd]';
%
if nargin==3
    pdof=b(:);
    fdof(pdof)=[];
    if nargout==2
        [X1,D]=eig(K(fdof,fdof),M(fdof,fdof));
        [nfdof,nfdof]=size(X1);
        for j=1:nfdof;
            mnorm=sqrt(X1(:,j)'*M(fdof,fdof)*X1(:,j));
            X1(:,j)=X1(:,j)/mnorm;
        end
        d=diag(D);
        [L,i]=sort(d);
        X2=X1(:,i);
        X=zeros(nd,nfdof);
        X(fdof,:)=X2;
    else
        d=eig(K(fdof,fdof),M(fdof,fdof));
        L=sort(d);
    end
else
    if nargout==2
        [X1,D]=eig(K,M);
        for j=1:nd;
            mnorm=sqrt(X1(:,j)'*M*X1(:,j));
            X1(:,j)=X1(:,j)/mnorm;
        end
    end
end

```

```
end
d=diag(D);
[L,i]=sort(d);
X=X1(:,i);
else
d=eig(K,M);
L=sort(d);
end
end
%-----end-----
```

## APÊNDICE B – Estudo de vibração dos dados coletados

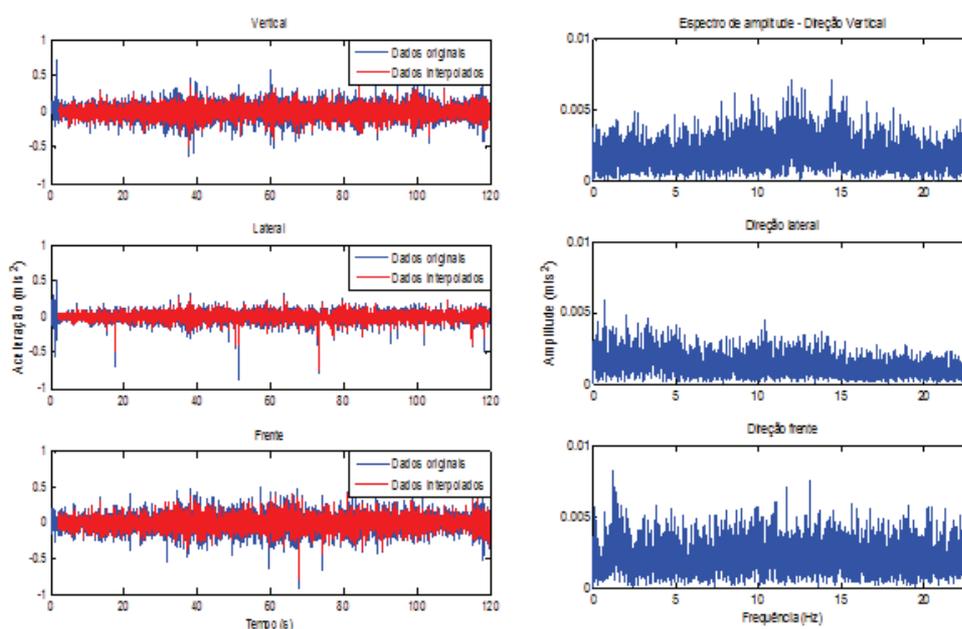
Neste apêndice serão apresentados todos os resultados obtidos no experimento e uma breve discussão a respeito dos mesmos.

### B.1 - Resultados

Para a obtenção da Transformada de Fourier (FFT) foi necessário a interpolação dos dados, pois foi preciso dados igualmente espaçados. Para a obtenção dos gráficos de acordo com a norma ISO 2631-1 [6], foi necessário tratar os dados a partir de bandas de 1/3 de oitava.

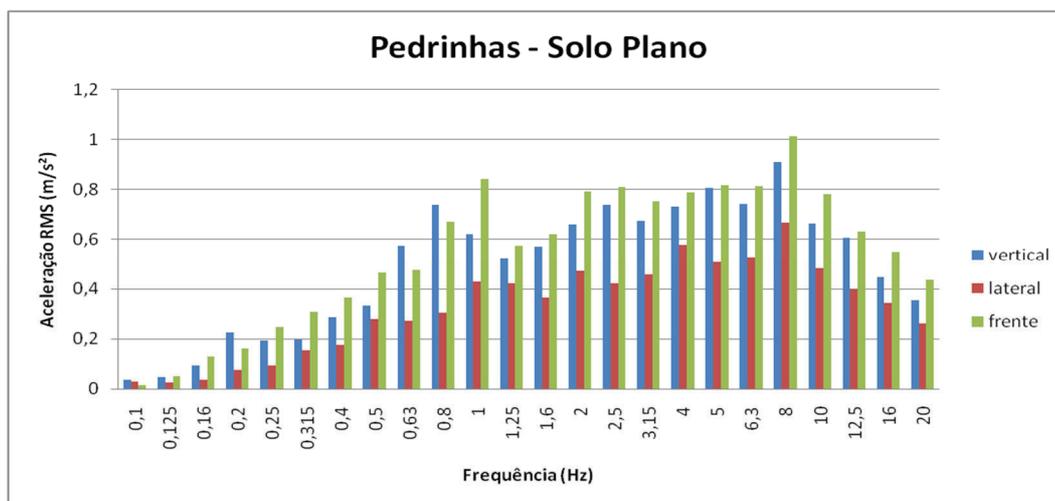
#### B.1.1) Pedrinhas

O primeiro tipo de solo avaliado foi o de pedrinhas, sem inclinação. Os dados extraídos do acelerômetro podem ser vistos na Figura B. 1.



**Figura B. 1:** Solo de pedrinhas plano. À esquerda, dados originais e interpolados da Aceleração ( $m/s^2$ ) pelo tempo (s). À direita, o espectro de Frequência da vibração nos três eixos.

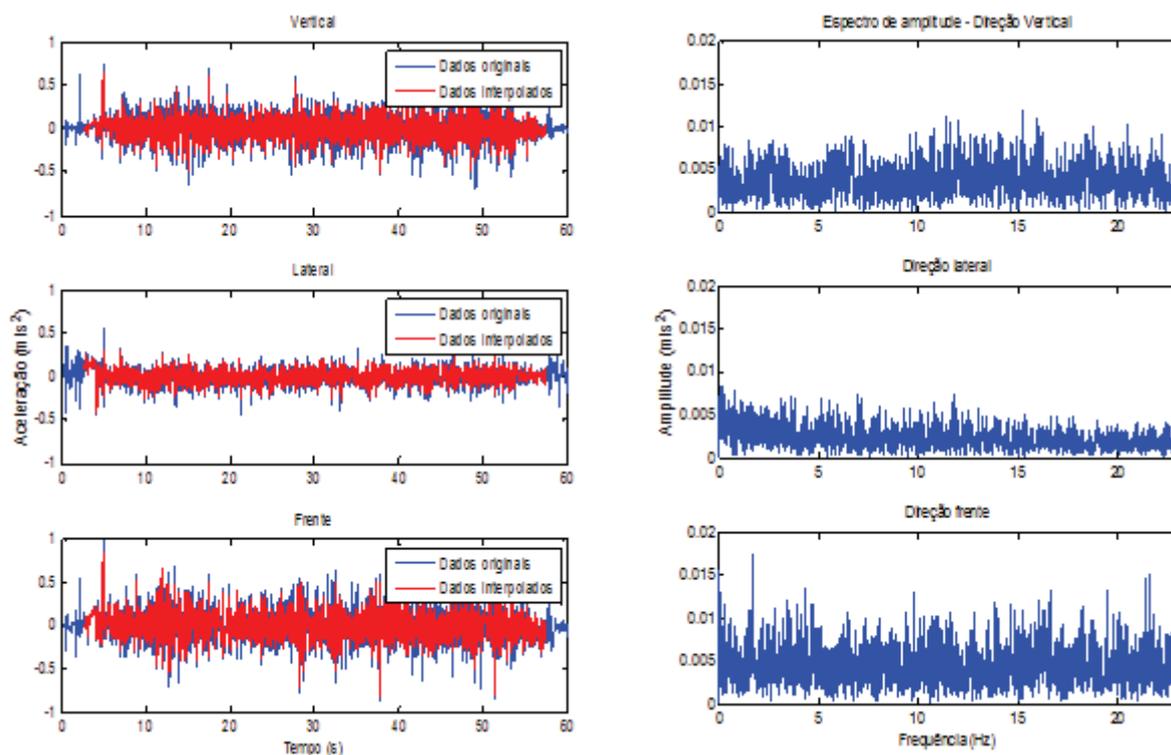
Através de um programa em Matlab® e uma planilha em Microsoft Excel® foi possível obter o gráfico de bandas de 1/3 de oitavas (Figura B. 2).



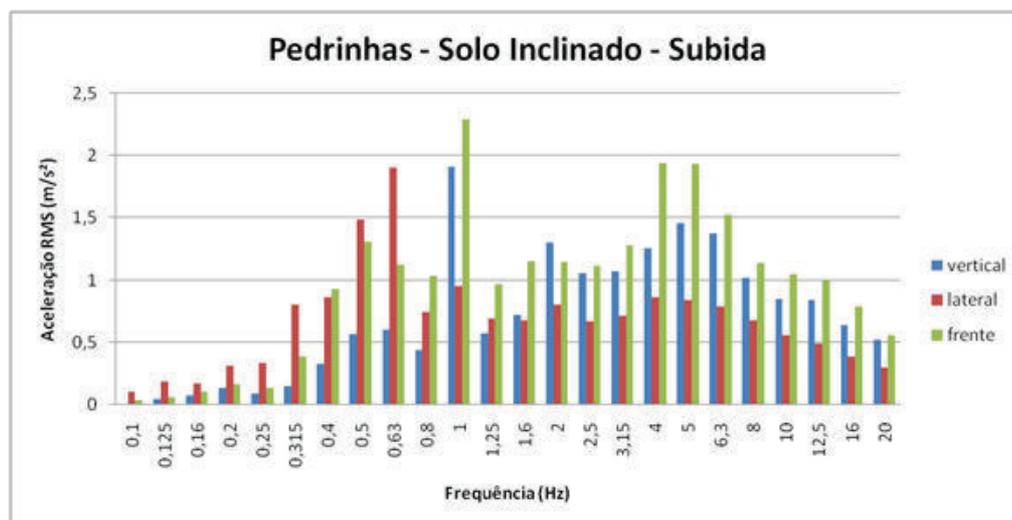
**Figura B. 2:** Bandas de 1/3 de oitava para superfície plana de pedrinhas.

Para o mesmo tipo de solo (pedrinhas) obteve-se dados de um plano inclinado, tanto na subida quanto na descida. A Figura B. 2 mostra os dados originais e interpolados, além do espectro de frequências.

A Figura B. 4 mostra o espectro de bandas de 1/3 de oitavas da superfície inclinada de pedrinhas, inclinação média do terreno de 1,5°.

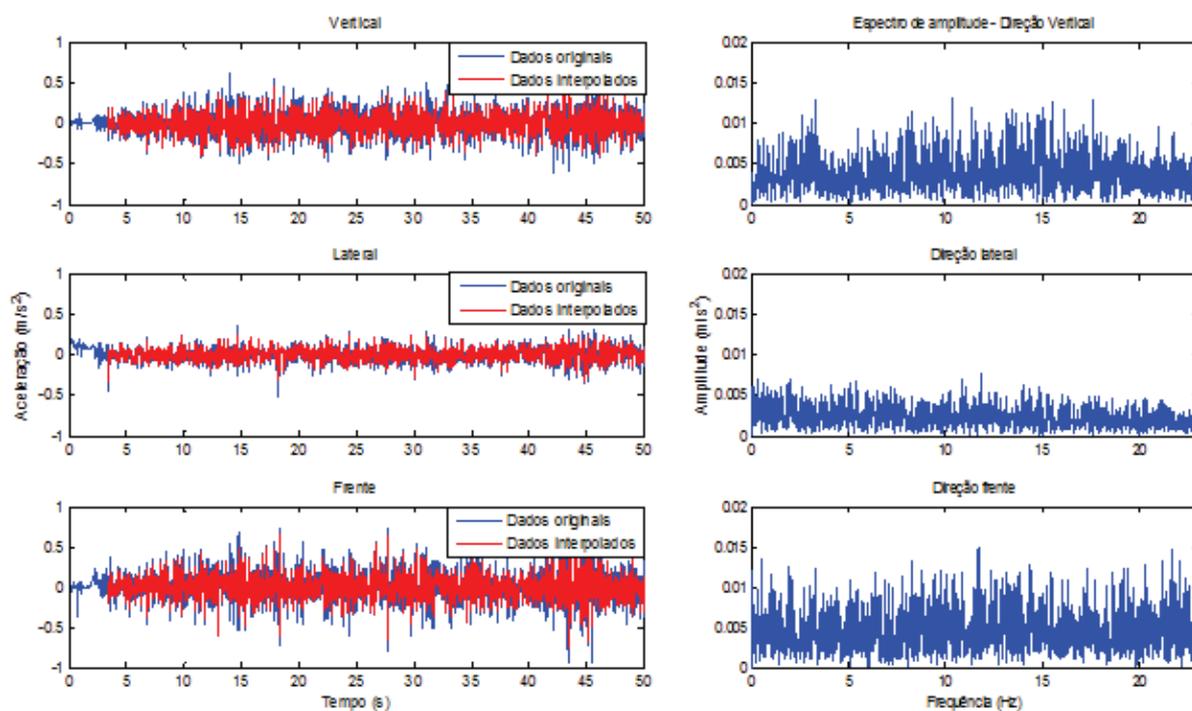


**Figura B. 3:** Dados de uma superfície de pedrinhas de 1,5° de inclinação – SUBIDA



**Figura B. 4:** Espectro de bandas de 1/3 de oitava - pedrinhas - solo inclinado - SUBIDA

A fim de avaliar qual o percurso mais ruidoso, tomaram-se os dados da descida para o mesmo terreno estudado acima. A Figura B. 5 mostra os dados obtidos pelo acelerômetro e o espectro de frequências. A Figura B. 6 mostra o espectro de bandas de 1/3 de oitavas.



**Figura B. 5:** Dados de uma superfície de pedrinhas de 1,5° de inclinação – DESCIDA

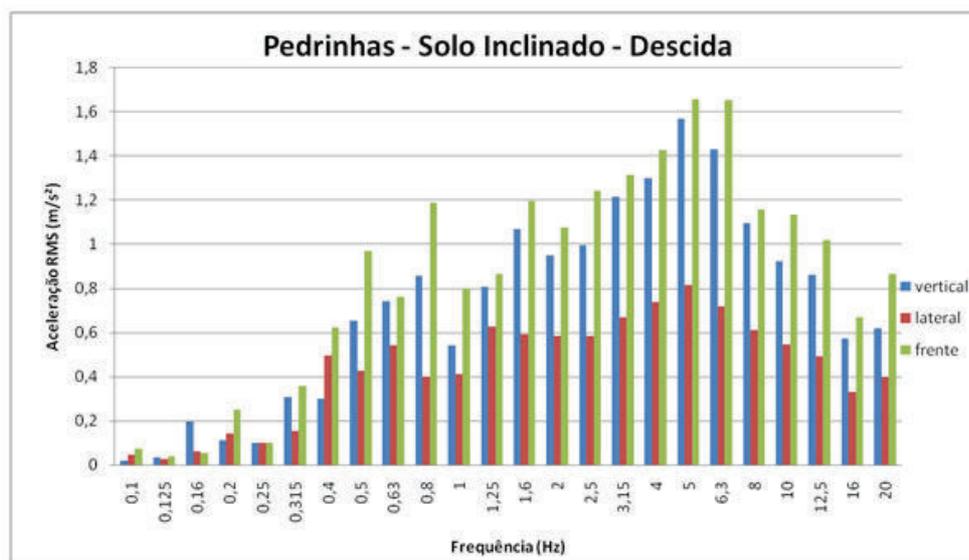


Figura B. 6: Espectro de bandas de 1/3 de oitava - pedrinhas - solo inclinado - DESCIDA

### B.1.2) Paralelepípedo

O solo seguinte a ser avaliado foi o de paralelepípedos. O mesmo procedimento foi feito para a sua avaliação. Primeiro tomou-se os dados da superfície de paralelepípedos plana (Figura B.7 e Figura B.8) e depois inclinada (inclinação média de  $1,2^\circ$ ): subida (Figura B.9 e Figura B.10) e descida (Figura B.11 e Figura B.12).

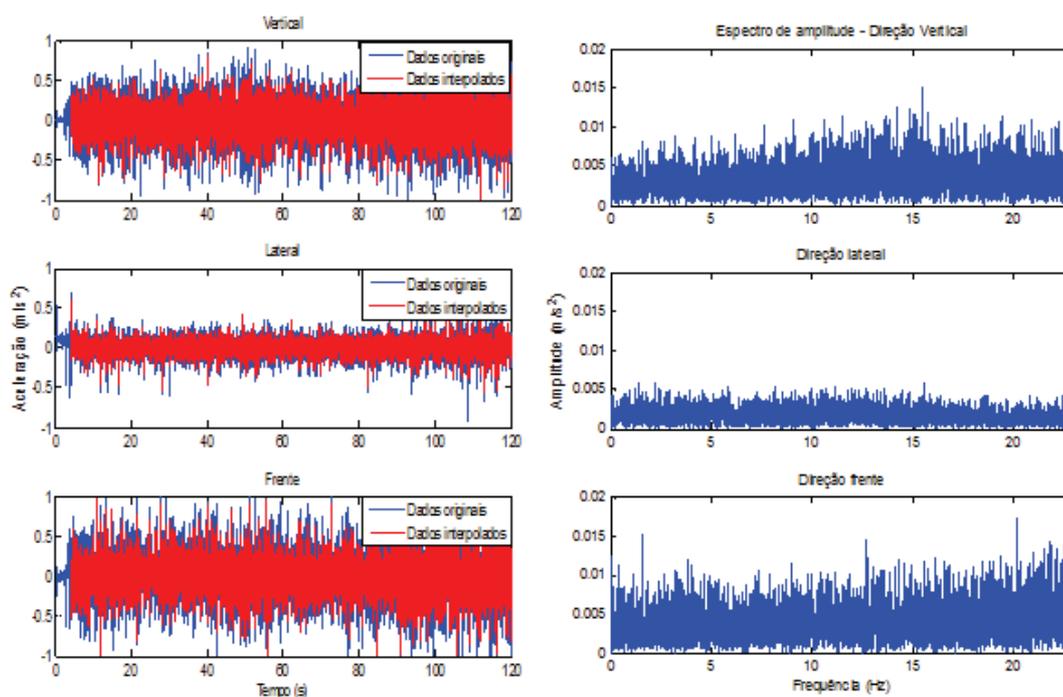


Figura B.7: Solo de paralelepípedo plano. À esquerda, dados originais e interpolados da Aceleração ( $m/s^2$ ) pelo tempo (s). À direita, o espectro de Frequência da vibração nos três eixos.

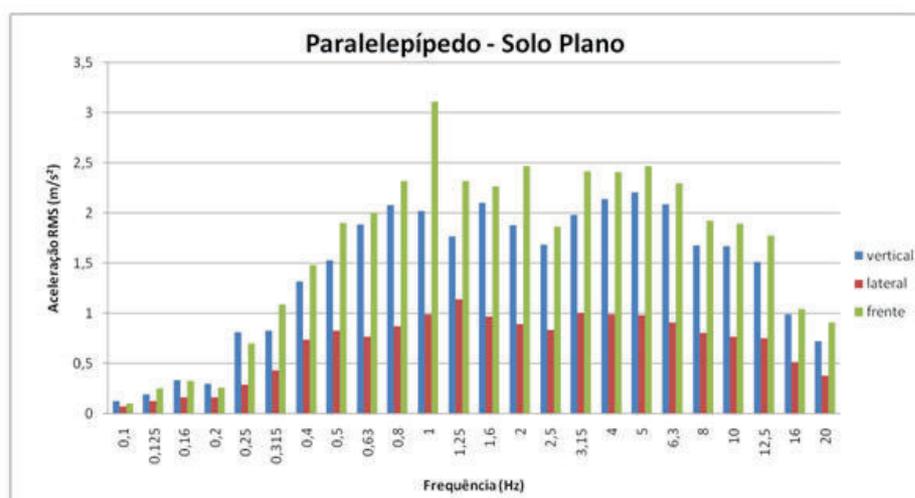


Figura B.8: Espectro de bandas de 1/3 de oitava - paralelepípedo - solo plano

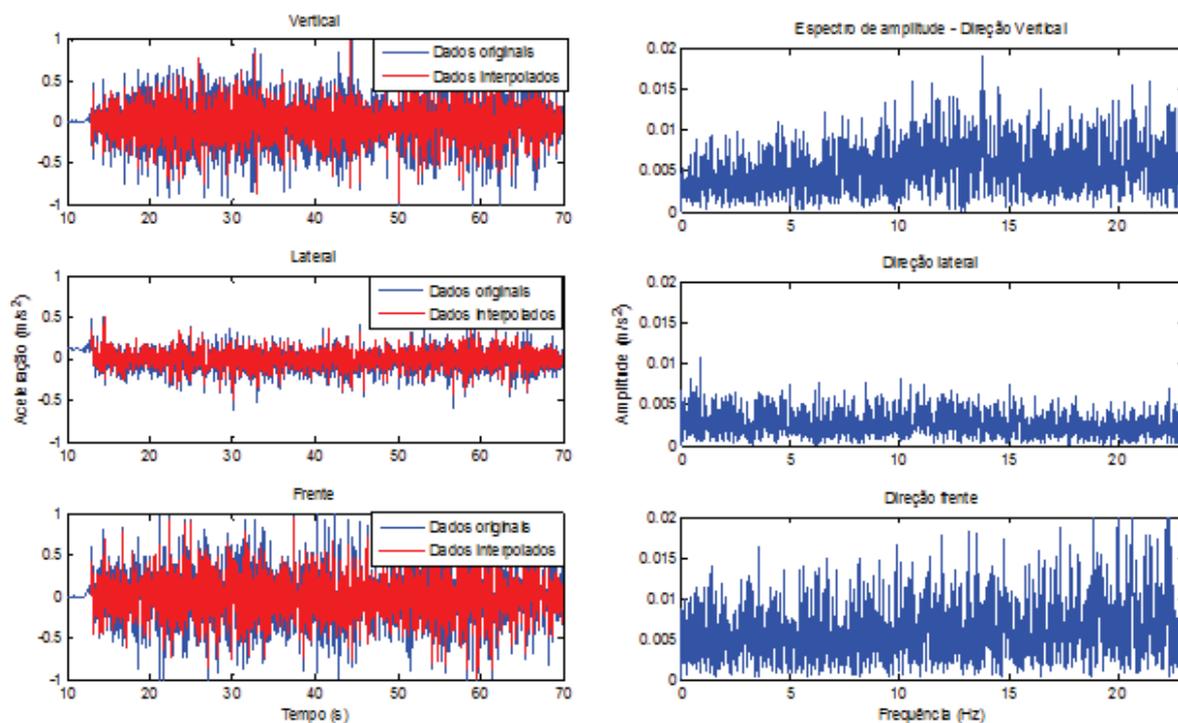


Figura B.9: Dados de uma superfície de paralelepípedo de  $1,2^\circ$  de inclinação – SUBIDA

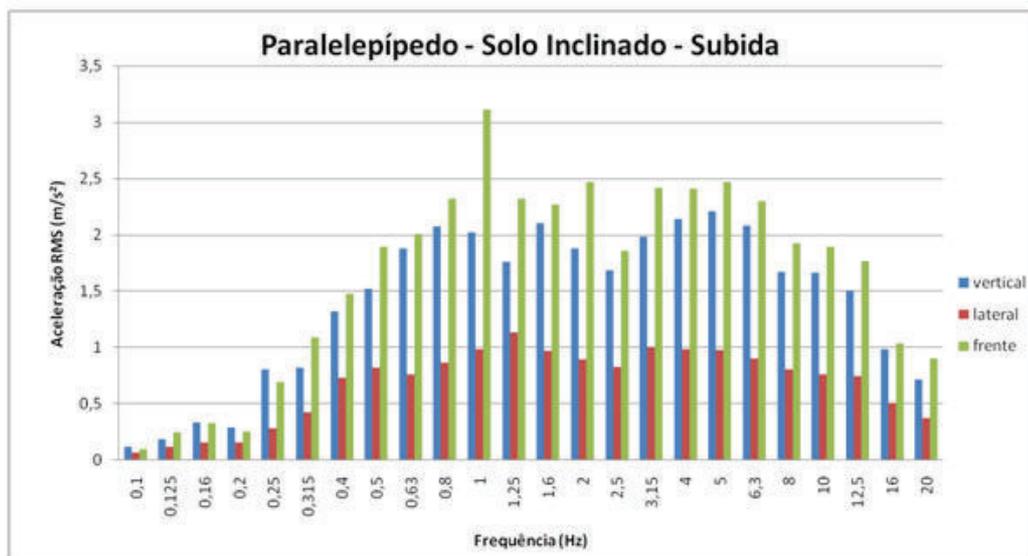


Figura B.10: Espectro de bandas de 1/3 de oitava - paralelepípedo - solo inclinado - SUBIDA

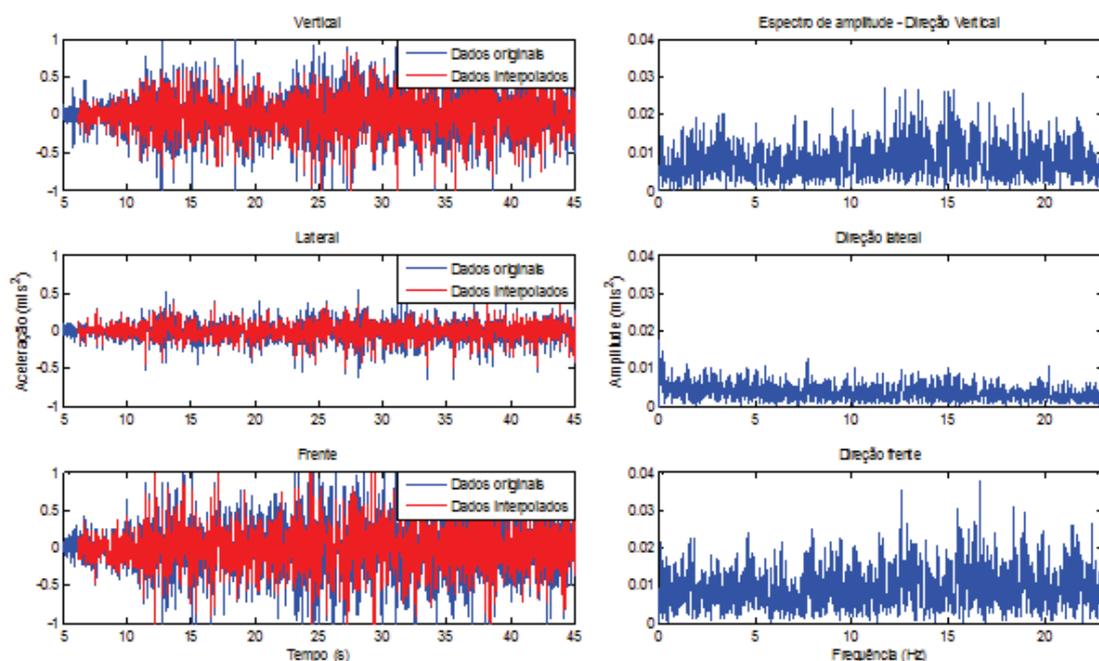
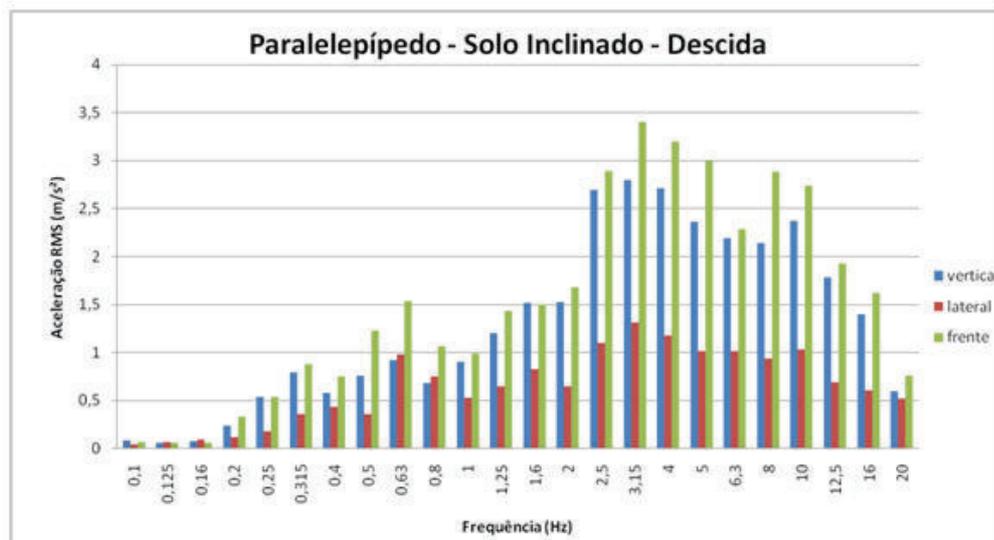


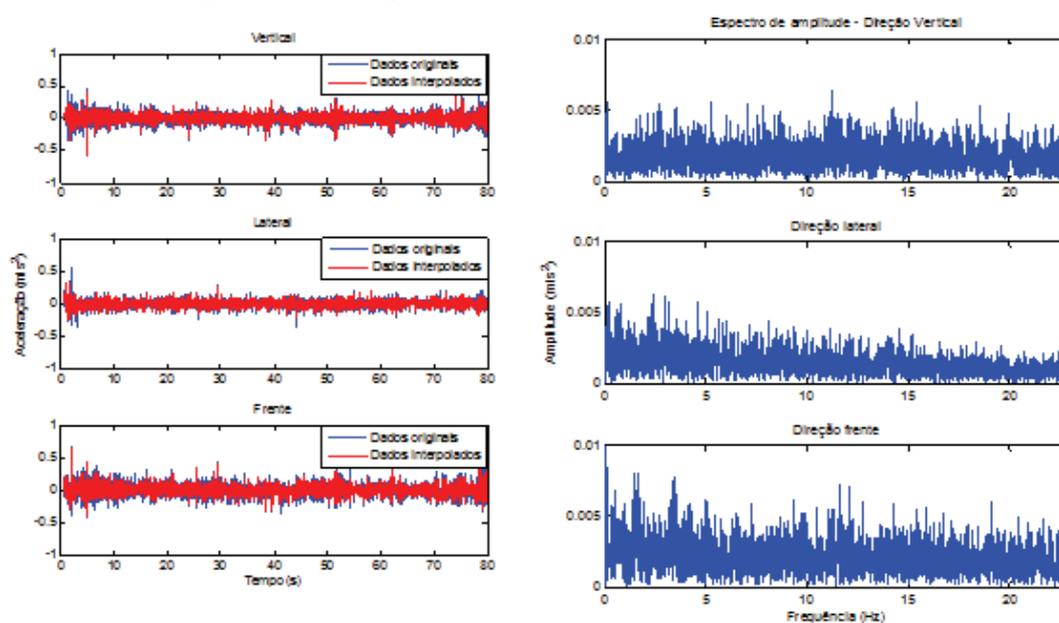
Figura B.11: Dados de uma superfície de paralelepípedos de  $1,2^\circ$  de inclinação – DESCIDA



**Figura B.12:** Espectro de bandas de 1/3 de oitava - paralelepípedo - solo inclinado – DESCIDA

### B.1.3 - Asfalto

O solo seguinte a ser avaliado foi o asfalto. O mesmo procedimento foi feito para a sua avaliação. Primeiro tomou-se os dados da superfície de asfalto plano (Figura B.13 e Figura B.14) e depois inclinada (inclinação média de 1,5°): subida (Figura B.15 e Figura B.16) e descida (Figura B.17 e Figura B.18).



**Figura B.13:** Solo de asfalto plano. À esquerda, dados originais e interpolados da Aceleração (m/s<sup>2</sup>) pelo tempo (s). À direita, o espectro de Frequência da vibração nos três eixos.

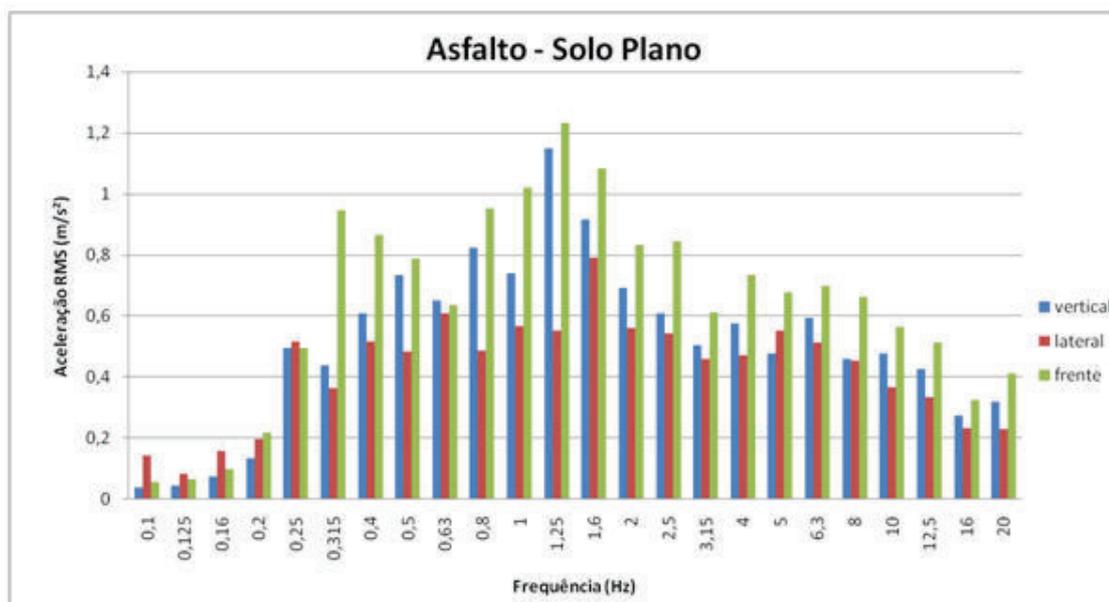


Figura B.14: Espectro de bandas de 1/3 de oitava - asfalto - solo plano

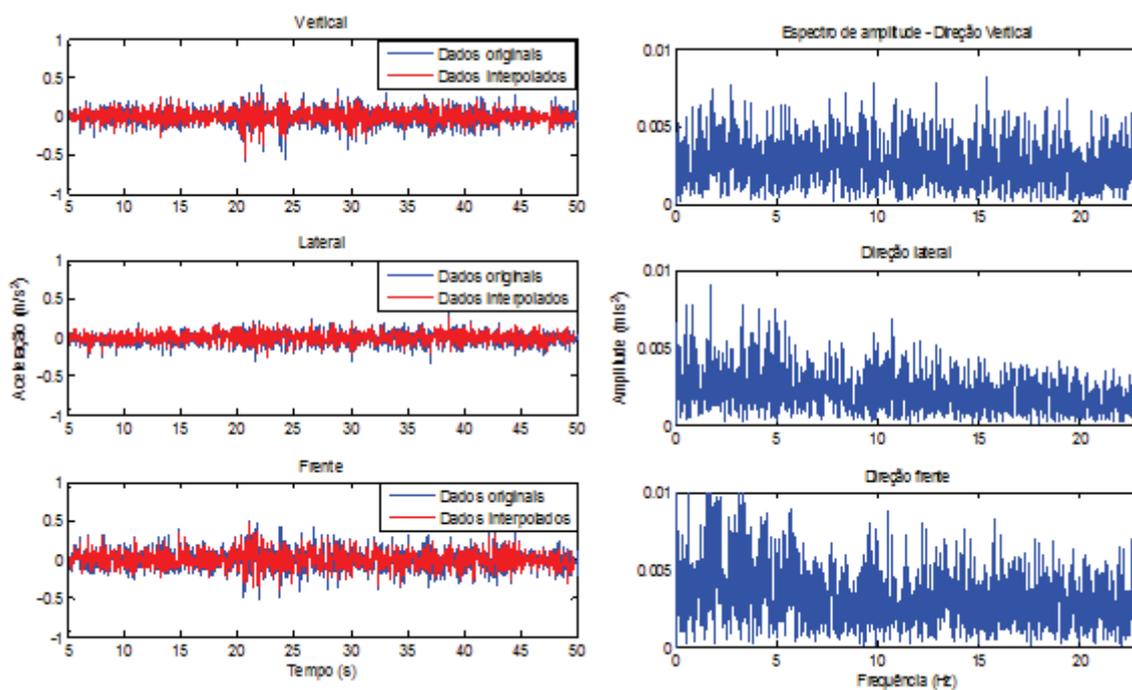


Figura B.15: Dados de uma superfície de asfalto de 1,5° de inclinação – SUBIDA

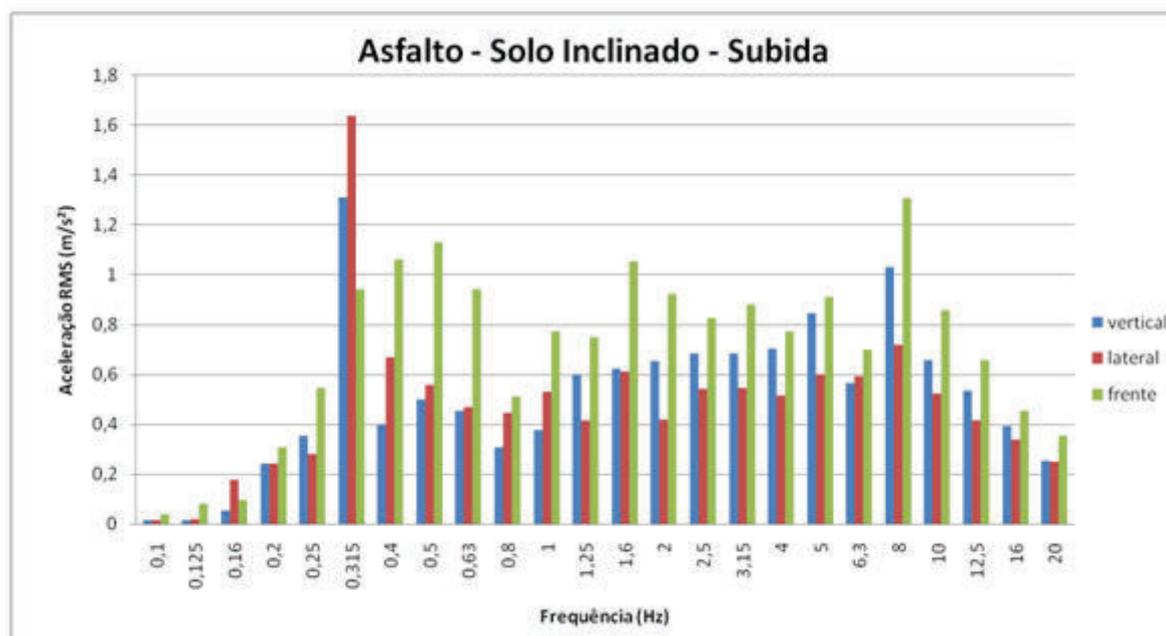


Figura B.16: Espectro de bandas de 1/3 de oitava - asfalto - solo inclinado - SUBIDA

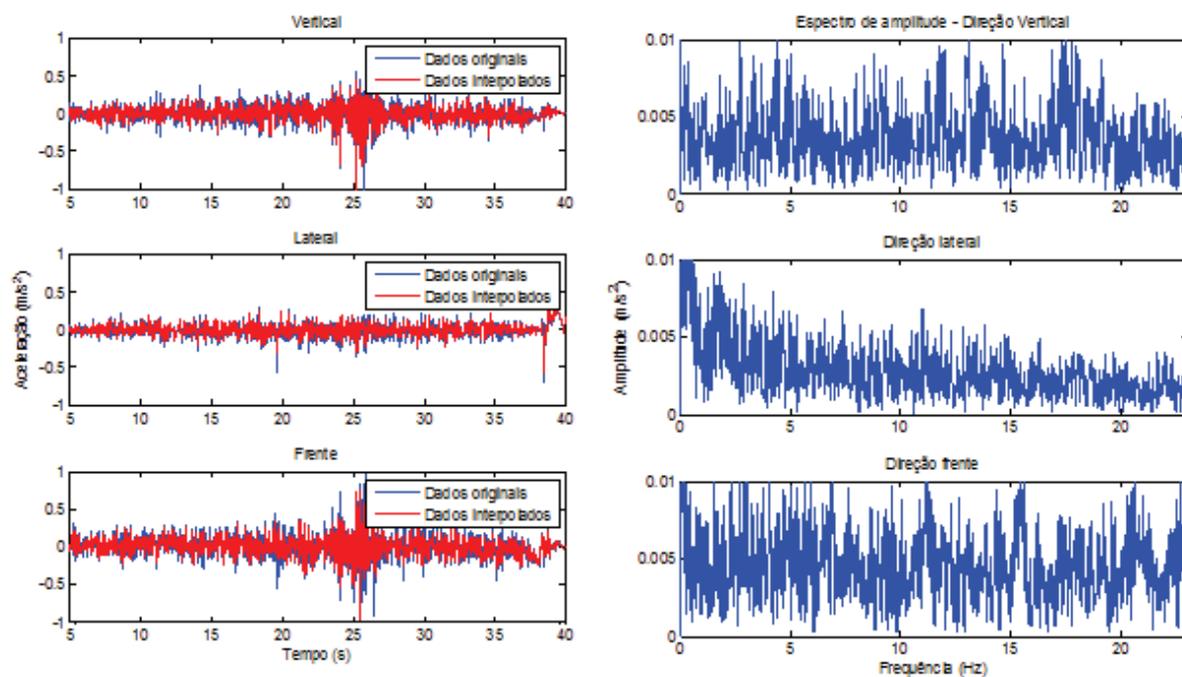
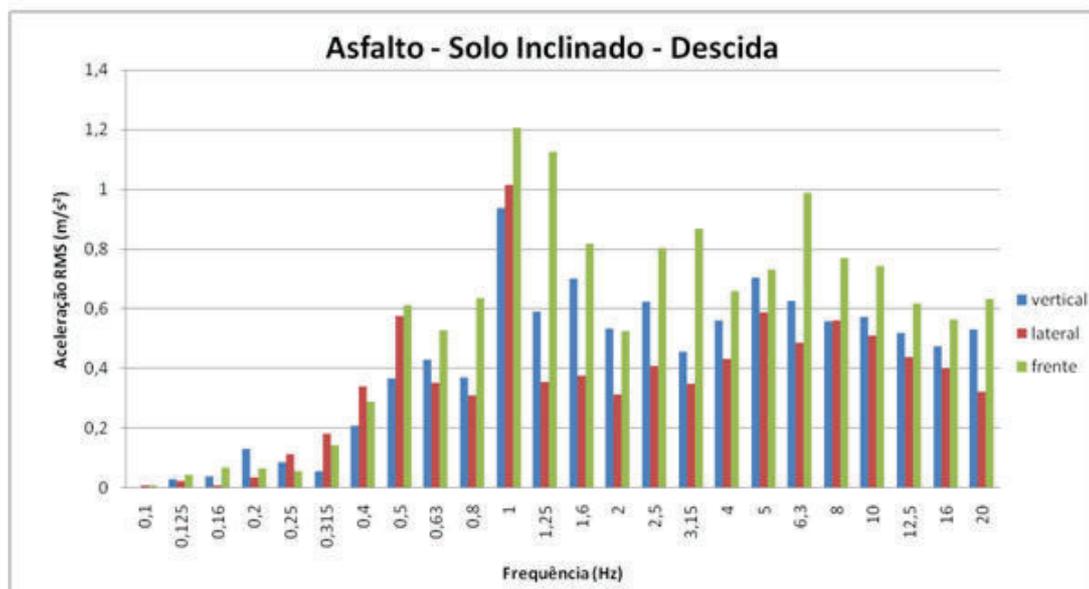


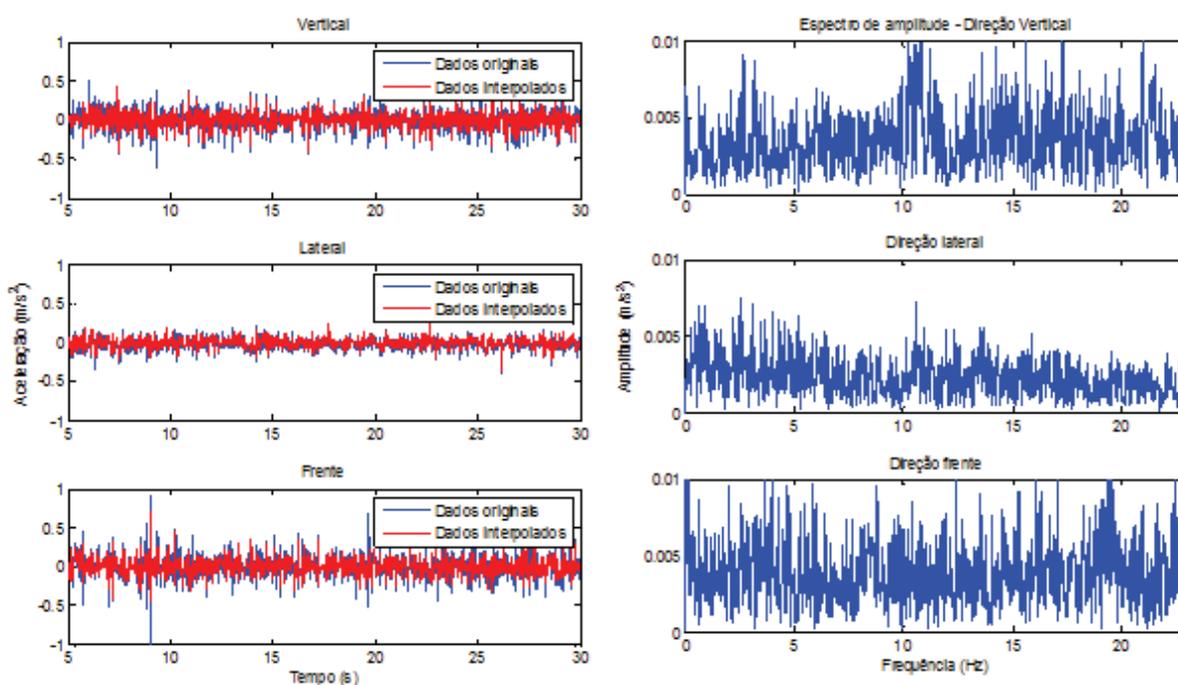
Figura B.17: Dados de uma superfície de asfalto de  $1,5^\circ$  de inclinação – DESCIDA



**Figura B.18:** Espectro de bandas de 1/3 de oitava - asfalto - solo inclinado – DESCIDA

### B.1.4 - Calçada

O solo seguinte a ser avaliado foi a calçada. O mesmo procedimento foi feito para a sua avaliação. Primeiro tomou-se os dados da superfície da calçada plano (Figura B.19 e Figura B.20) e depois inclinada (inclinação média de 1,4°): subida (Figura B.21 e Figura B.22) e descida (Figura B.23 e Figura B.24).



**Figura B.19:** Solo calçada plana. À esquerda, dados originais e interpolados da Aceleração (m/s<sup>2</sup>) pelo tempo (s). À direita, o espectro de Frequência da vibração nos três eixos.

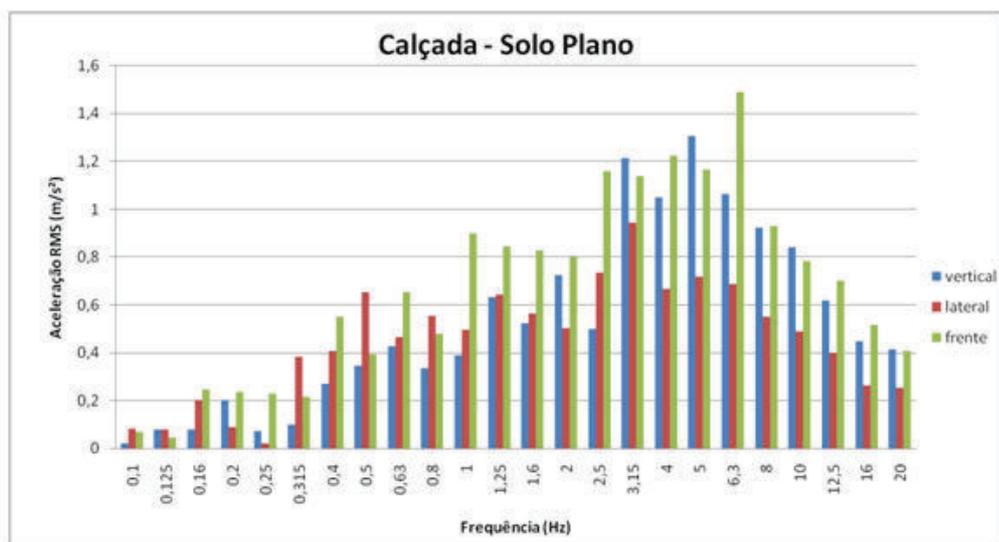


Figura B.20: Espectro de bandas de 1/3 de oitava - calçada - solo plano

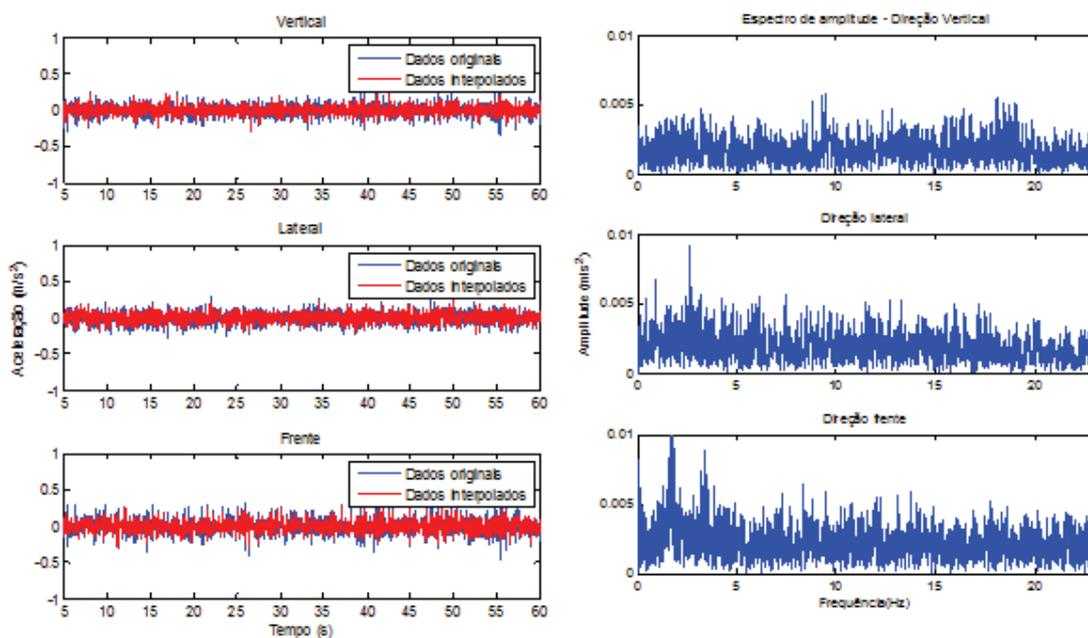


Figura B.21: Dados de uma superfície calçada de 1,4° de inclinação – SUBIDA

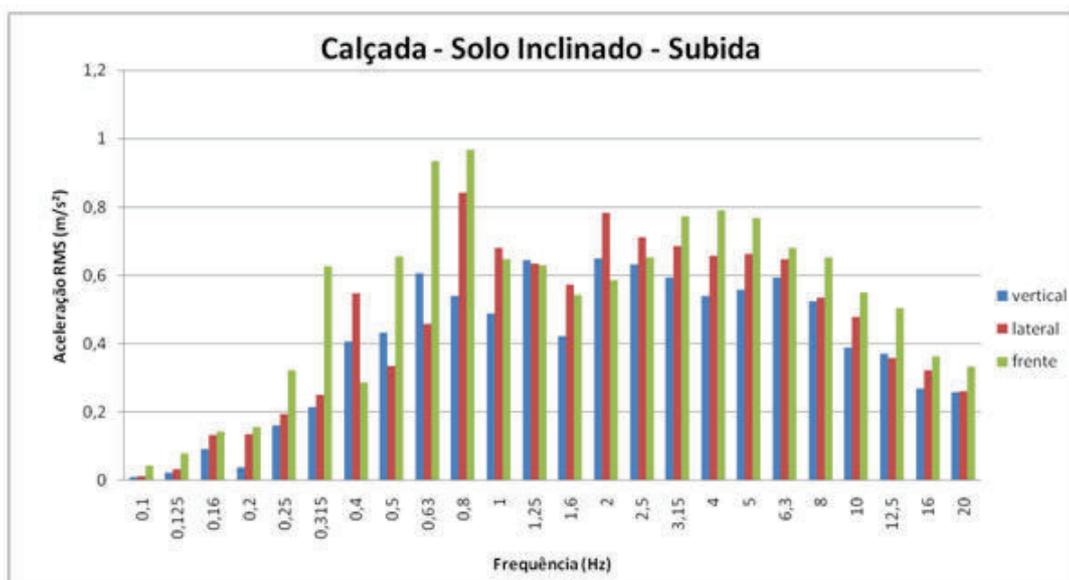


Figura B.22: Espectro de bandas de 1/3 de oitava - calçada - solo inclinado - SUBIDA

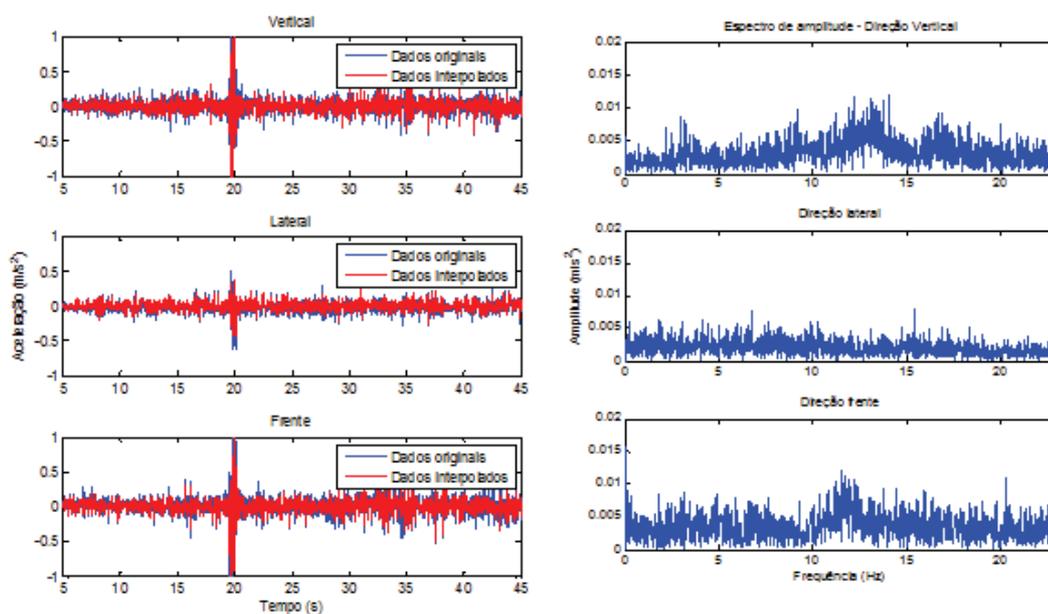
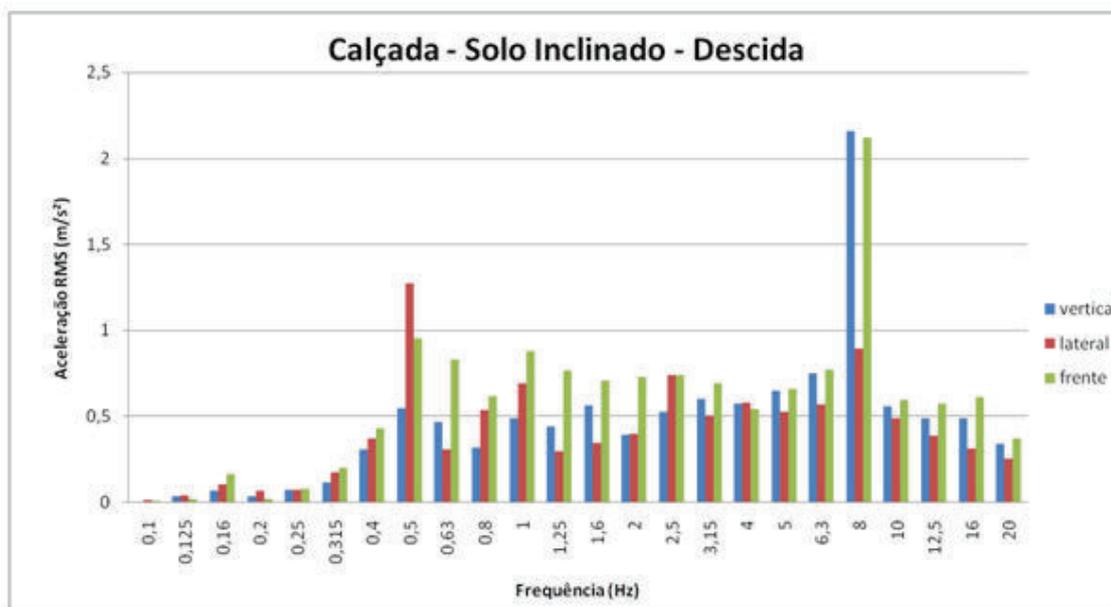


Figura B.23: Dados de uma superfície calçada de  $1,4^\circ$  de inclinação – DESCIDA



**Figura B.24:** Espectro de bandas de 1/3 de oitava - calçada - solo inclinado – DESCIDA

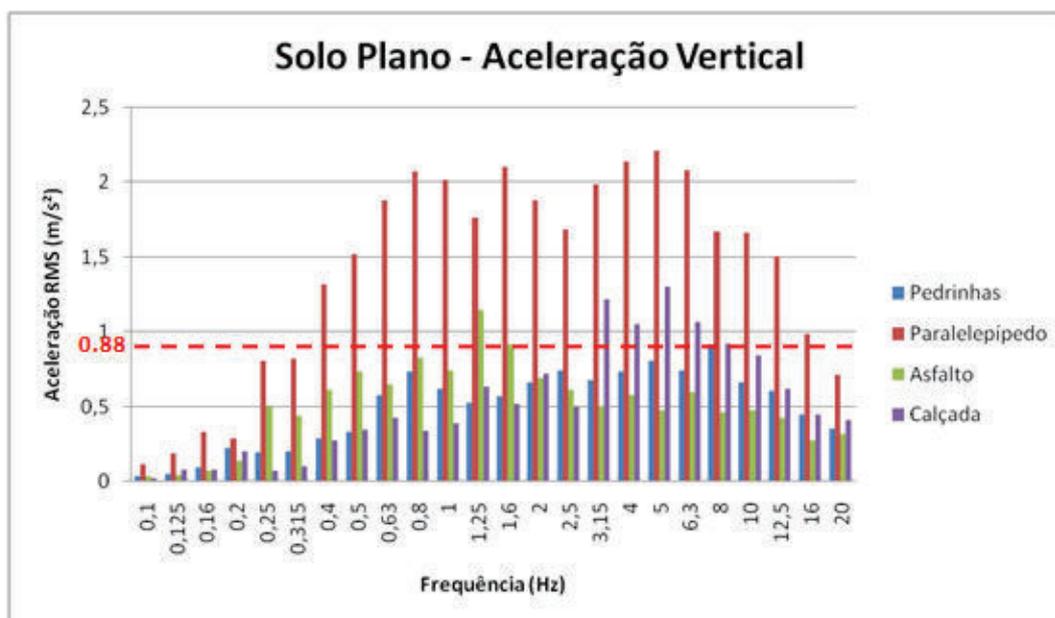
## B.2 - Comparação e Discussão

Segundo a norma ISO 2631-1 [6]:

- O limite de conforto está localizado na faixa entre 4 e 8 Hz na vibração vertical e de magnitude de no máximo 0.88 m/s<sup>2</sup>;
- Para as outras direções, o limite de conforto situa-se entre 0,5 a 2 Hz;
- Frequências na direção vertical abaixo de 0,5 Hz podem causar enjoos;
- A magnitude total da aceleração pode ser calculada pela Equação 1;
- No entanto, a reação a magnitudes de aceleração depende de pessoa para pessoa e do tempo de duração da atividade;
- A área hachurada da Figura 17 indica potencial de risco à saúde.

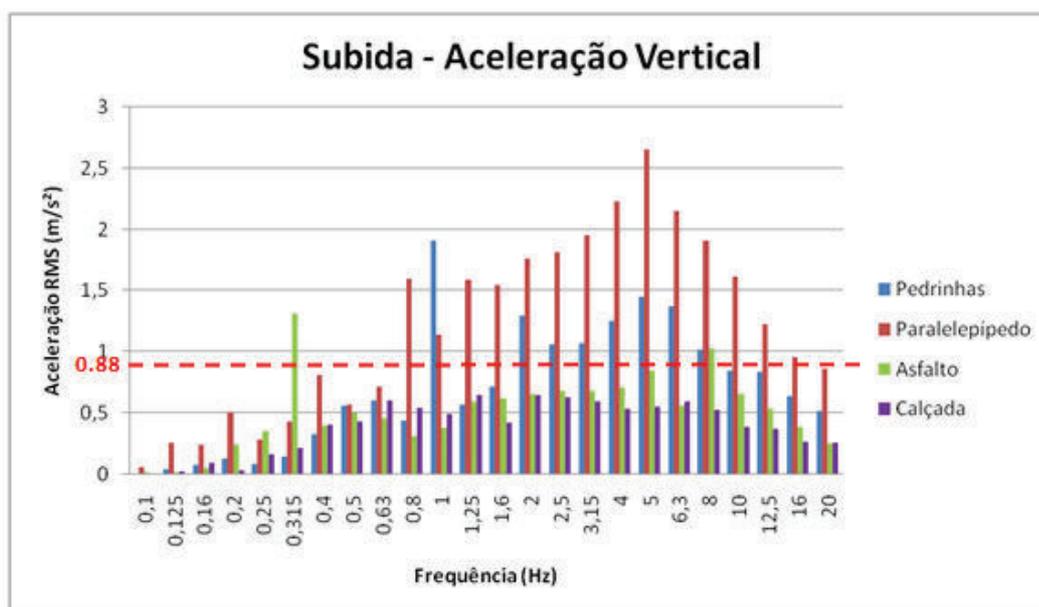
### B.2.1 - Aceleração Vertical

A fim de comparar os tipos de solos com a mesma componente da aceleração o tipo de gráfico na Figura B.25 foi obtido: os quatro tipos de solo (pedrinhas, paralelepípedo, asfalto e calçada) tem o seu espectro de bandas de 1/3 de oitava comparados, onde a linha tracejada em vermelho representa o limite aceitável.



**Figura B.25:** Solo plano – Aceleração vertical

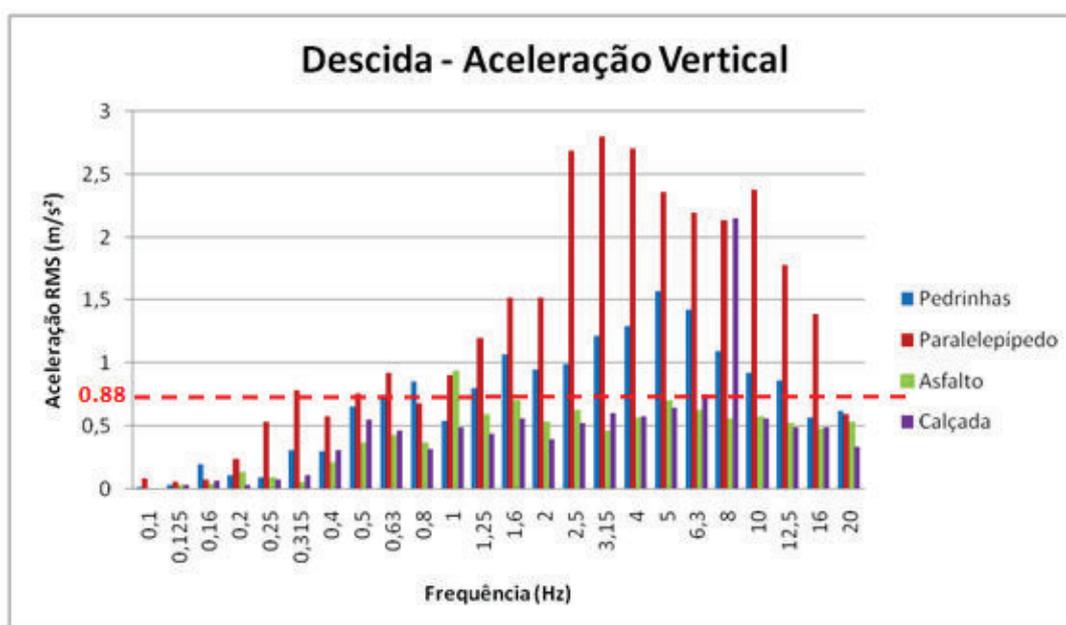
Com relação à Figura B.25, a superfície de paralelepípedos tem os maiores picos de aceleração, seguido por asfalto e calçada. Os dados referentes à superfície de pedras pequenas (pedrinhas) foram coletados em um dia chuvoso. Por conta disso, esses dados deveriam ser obtidos novamente, visto que é razoável pensar que o solo terroso fica mais aderente quando molhado, afetando os resultados.



**Figura B.26:** Solo inclinado – SUBIDA – Aceleração vertical

A Figura B.26 mostra que para as frequências que causam desconforto na direção vertical (4-8 Hz), vê-se que para as superfícies de pedrinhas e paralelepípedos os picos expressivos podem causar desconforto. Há, no entanto, a ocorrência de uma aceleração expressiva na frequência de 8 Hz para o asfalto.

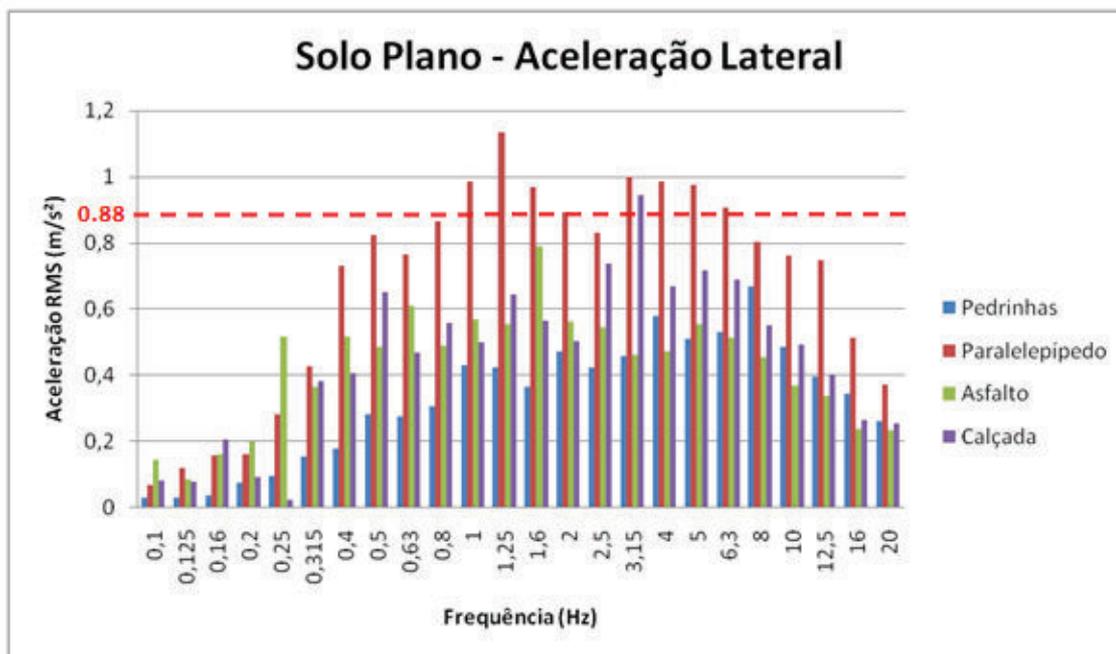
Vê-se na Figura B.27 que as superfícies de pedrinhas e de paralelepípedos apresentam expressivas magnitudes entre as frequências que causam desconforto (4-8 Hz). Pode-se ver que há um pico na frequência de 8 Hz para a superfície calçada, esse pico se deve a um buraco, pelo qual o ciclista não conseguiu desviar. Com isso, vemos como buracos na ciclovia podem aumentar drasticamente as componentes de aceleração, causando desconforto no ciclista.



**Figura B.27:** Solo inclinado – DESCIDA – Aceleração vertical

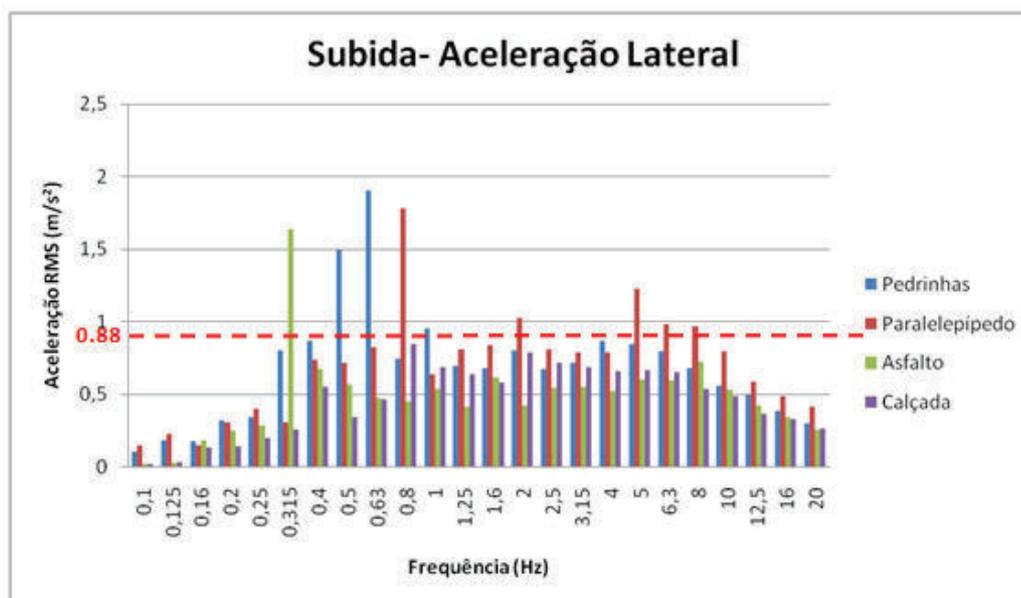
## B.2.2 - Aceleração Lateral

O mesmo procedimento usado para a aceleração vertical foi usado para analisar a componente lateral (ou eixo y) da aceleração, como mostra a Figura B.28. As frequências responsáveis por causar possíveis desconfortos nessa direção então entre 0,1 e 0,5 Hz e, como se pode ver, elas não têm a magnitude expressiva. A aceleração lateral pode ser resultado da rugosidade do solo ou de possíveis curvas. No entanto, não será desenvolvido o modelo de dinâmica lateral.



**Figura B.28:** Solo plano – Aceleração lateral

A Figura B.29 mostra que as frequências responsáveis por causar possíveis desconfortos nessa direção então entre 0,1 e 0,5 Hz e, como se pode ver, elas têm a magnitude expressiva para as superfícies de pedrinhas e asfalto.



**Figura B.29:** Solo inclinado – SUBIDA – Aceleração lateral

Pelo gráfico representado pela Figura B.30, vê-se que não há magnitudes expressivas entre 0,1 e 0,5 Hz que possa causar desconforto no ciclista.

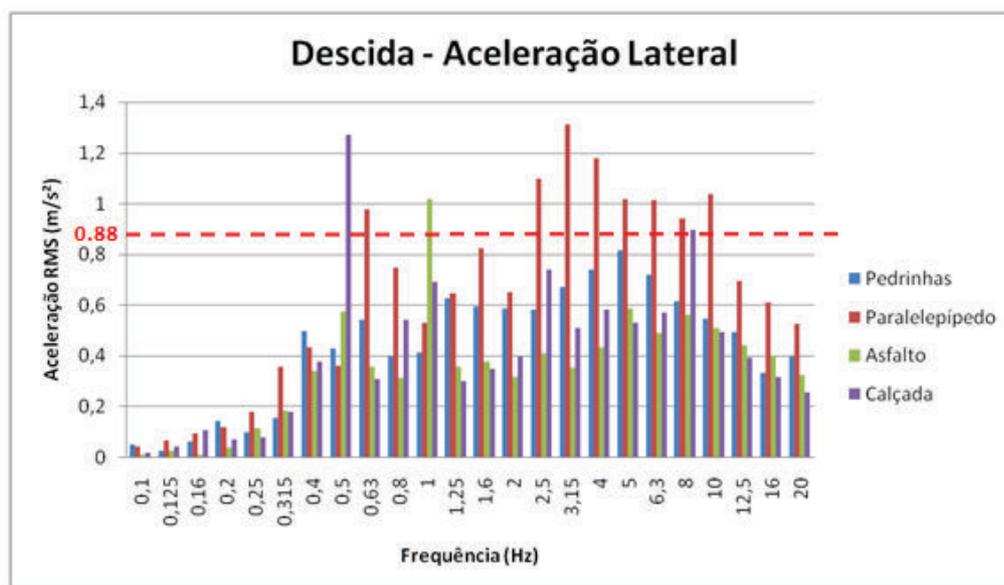


Figura B.30: Solo inclinado – DESCIDA – Aceleração lateral

### B.2.3 - Aceleração Longitudinal

O mesmo procedimento usado para as acelerações vertical e lateral foi usado para analisar a componente longitudinal (ou eixo x) da aceleração, como mostra a Figura B.31. A aceleração para frente é a componente da bicicleta que a coloca em movimento. Como na aceleração lateral, as frequências que poderiam causar desconforto para essa direção estão entre 0,1 e 0,5 Hz, que apresentam componentes expressivas somente para o paralelepípedo e para o asfalto nas frequências de 0,4 e 0,5 Hz.

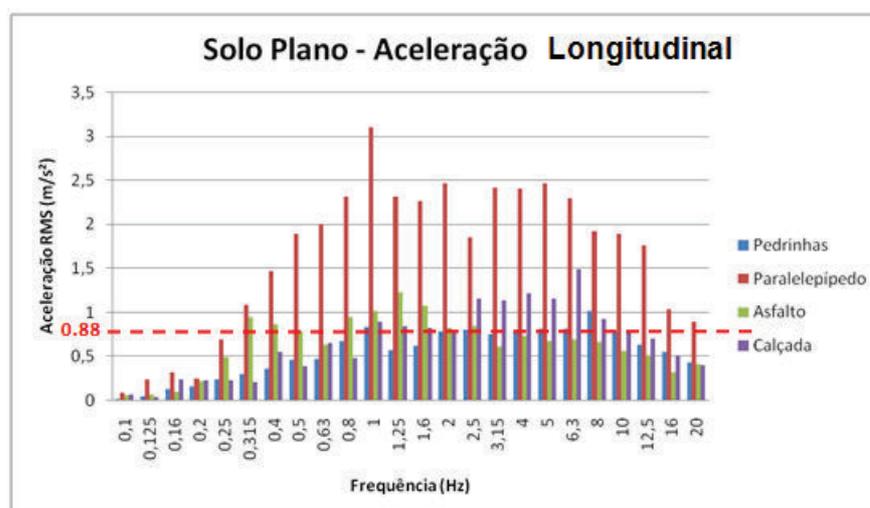
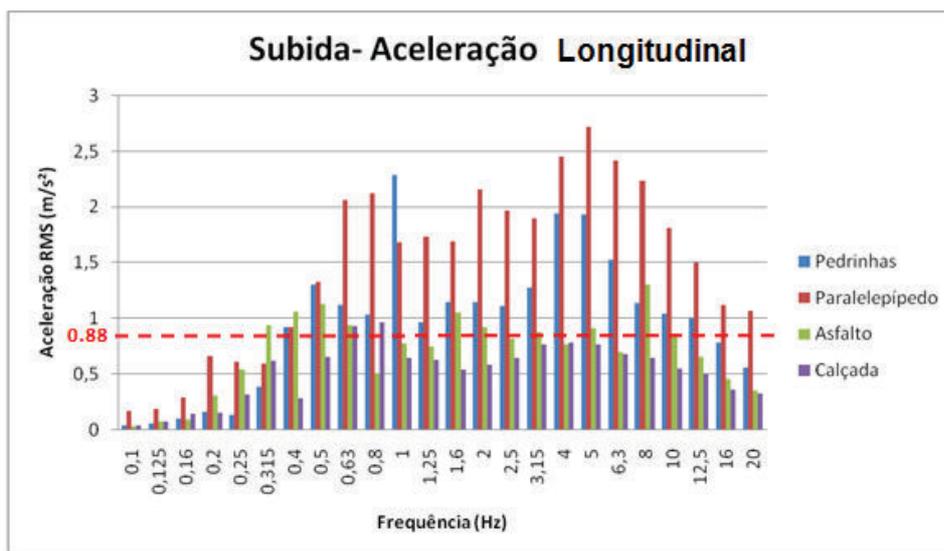
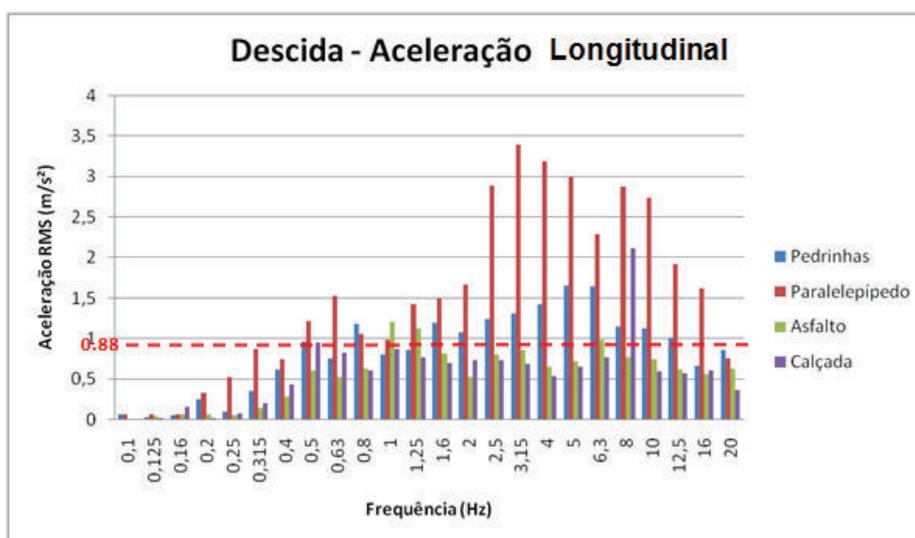


Figura B.31: Solo plano – Aceleração longitudinal



**Figura B.32:** Solo inclinado – SUBIDA – Aceleração longitudinal

Pelo gráfico da Figura B.32 é possível ver que as superfícies de pedrinhas, asfalto e paralelepípedo apresentam magnitudes expressivas, que podem causar desconforto no ciclista.



**Figura B.33:** Solo inclinado – DESCIDA – Aceleração longitudinal

Na Figura B.33 é possível ver que há magnitudes expressivas na frequência de 0,5 Hz para as superfícies de pedrinhas, paralelepípedos e calçada. E na frequência de 0,4 Hz para a superfície de paralelepípedos.

### **B.3 - Conclusão**

Quando as componentes da aceleração são analisadas separadamente, as superfícies que apresentam melhor resultado quanto ao conforto do ciclista são: calçada (cimento) e asfalto.

Ao analisar com relação à magnitude, a mesma conclusão é tirada. No entanto, os resultados da superfície de paralelepípedo são muito maiores que as demais. Deixando claro que paralelepípedo não é uma superfície que deveria ser usada em ciclovias.

Observou-se que o asfalto tem melhor resposta para frequências acima de 2,5 Hz, enquanto que a calçada responde melhor para frequências abaixo de 2,5 Hz. Porém, observa-se que para frequências perto de 20 Hz ambos têm comportamento semelhante. No entanto, não há como comprovar o comportamento acima de 20 Hz dada à taxa de aquisição de dados que não permitiu a obtenção de dados acima do valor citado.

**ANEXO A – Datasheet ADXL335**



# Small, Low Power, 3-Axis $\pm 3 g$ Accelerometer

## ADXL335

### FEATURES

- 3-axis sensing
- Small, low profile package
  - 4 mm  $\times$  4 mm  $\times$  1.45 mm LFCSP
- Low power: 350  $\mu$ A (typical)
- Single-supply operation: 1.8 V to 3.6 V
- 10,000 g shock survival
- Excellent temperature stability
- BW adjustment with a single capacitor per axis
- RoHS/WEEE lead-free compliant

### APPLICATIONS

- Cost sensitive, low power, motion- and tilt-sensing applications
  - Mobile devices
  - Gaming systems
  - Disk drive protection
  - Image stabilization
  - Sports and health devices

### GENERAL DESCRIPTION

The ADXL335 is a small, thin, low power, complete 3-axis accelerometer with signal conditioned voltage outputs. The product measures acceleration with a minimum full-scale range of  $\pm 3 g$ . It can measure the static acceleration of gravity in tilt-sensing applications, as well as dynamic acceleration resulting from motion, shock, or vibration.

The user selects the bandwidth of the accelerometer using the  $C_X$ ,  $C_Y$ , and  $C_Z$  capacitors at the  $X_{OUT}$ ,  $Y_{OUT}$ , and  $Z_{OUT}$  pins. Bandwidths can be selected to suit the application, with a range of 0.5 Hz to 1600 Hz for the X and Y axes, and a range of 0.5 Hz to 550 Hz for the Z axis.

The ADXL335 is available in a small, low profile, 4 mm  $\times$  4 mm  $\times$  1.45 mm, 16-lead, plastic lead frame chip scale package (LFCSP\_LQ).

### FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM

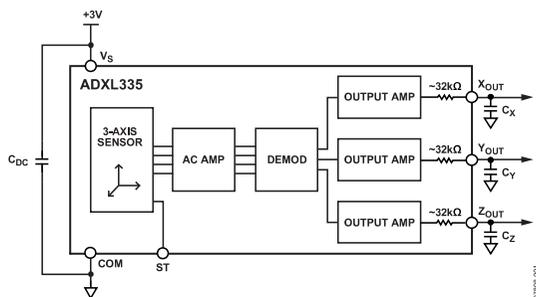


Figure 1.

## ADXL335

### TABLE OF CONTENTS

Features .....	1	Performance .....	10
Applications .....	1	Applications Information .....	11
General Description .....	1	Power Supply Decoupling .....	11
Functional Block Diagram .....	1	Setting the Bandwidth Using $C_X$ , $C_Y$ , and $C_Z$ .....	11
Revision History .....	2	Self Test .....	11
Specifications .....	3	Design Trade-Offs for Selecting Filter Characteristics:	
Absolute Maximum Ratings .....	4	The Noise/BW Trade-Off .....	11
ESD Caution .....	4	Use with Operating Voltages Other than 3 V .....	11
Pin Configuration and Function Descriptions .....	5	Axes of Acceleration Sensitivity .....	12
Typical Performance Characteristics .....	6	Layout and Design Recommendations .....	13
Theory of Operation .....	10	Outline Dimensions .....	14
Mechanical Sensor .....	10	Ordering Guide .....	14

### REVISION HISTORY

1/09—Revision 0: Initial Version

Rev. 0  
Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties that may result from its use. Specifications subject to change without notice. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

## ADXL335

### SPECIFICATIONS

$T_A = 25^\circ\text{C}$ ,  $V_S = 3\text{ V}$ ,  $C_X = C_Y = C_Z = 0.1\ \mu\text{F}$ , acceleration = 0 g, unless otherwise noted. All minimum and maximum specifications are guaranteed. Typical specifications are not guaranteed.

Table 1.

Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Unit
<b>SENSOR INPUT</b>					
Measurement Range	Each axis	$\pm 3$	$\pm 3.6$		g
Nonlinearity	% of full scale		$\pm 0.3$		%
Package Alignment Error			$\pm 1$		Degrees
Interaxis Alignment Error			$\pm 0.1$		Degrees
Cross-Axis Sensitivity <sup>1</sup>			$\pm 1$		%
<b>SENSITIVITY (RATIOMETRIC)<sup>2</sup></b>					
Sensitivity at $X_{OUT}$ , $Y_{OUT}$ , $Z_{OUT}$	Each axis $V_S = 3\text{ V}$	270	300	330	mV/g
Sensitivity Change Due to Temperature <sup>3</sup>	$V_S = 3\text{ V}$		$\pm 0.01$		%/ $^\circ\text{C}$
<b>ZERO g BIAS LEVEL (RATIOMETRIC)</b>					
0 g Voltage at $X_{OUT}$ , $Y_{OUT}$	$V_S = 3\text{ V}$	1.35	1.5	1.65	V
0 g Voltage at $Z_{OUT}$	$V_S = 3\text{ V}$	1.2	1.5	1.8	V
0 g Offset vs. Temperature			$\pm 1$		mg/ $^\circ\text{C}$
<b>NOISE PERFORMANCE</b>					
Noise Density $X_{OUT}$ , $Y_{OUT}$			150		$\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ rms
Noise Density $Z_{OUT}$			300		$\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ rms
<b>FREQUENCY RESPONSE<sup>4</sup></b>					
Bandwidth $X_{OUT}$ , $Y_{OUT}$ <sup>5</sup>	No external filter		1600		Hz
Bandwidth $Z_{OUT}$ <sup>5</sup>	No external filter		550		Hz
$R_{FLT}$ Tolerance			$32 \pm 15\%$		k $\Omega$
Sensor Resonant Frequency			5.5		kHz
<b>SELF-TEST<sup>6</sup></b>					
Logic Input Low			+0.6		V
Logic Input High			+2.4		V
ST Actuation Current			+60		$\mu\text{A}$
Output Change at $X_{OUT}$	Self-Test 0 to Self-Test 1	-150	-325	-600	mV
Output Change at $Y_{OUT}$	Self-Test 0 to Self-Test 1	+150	+325	+600	mV
Output Change at $Z_{OUT}$	Self-Test 0 to Self-Test 1	+150	+550	+1000	mV
<b>OUTPUT AMPLIFIER</b>					
Output Swing Low	No load		0.1		V
Output Swing High	No load		2.8		V
<b>POWER SUPPLY</b>					
Operating Voltage Range		1.8		3.6	V
Supply Current	$V_S = 3\text{ V}$		350		$\mu\text{A}$
Turn-On Time <sup>7</sup>	No external filter		1		ms
<b>TEMPERATURE</b>					
Operating Temperature Range		-40		+85	$^\circ\text{C}$

<sup>1</sup> Defined as coupling between any two axes.

<sup>2</sup> Sensitivity is essentially ratiometric to  $V_S$ .

<sup>3</sup> Sensitivity is the output change from ambient-to-maximum temperature or ambient-to-minimum temperature.

<sup>4</sup> Actual frequency response controlled by user-supplied external filter capacitors ( $C_X$ ,  $C_Y$ ,  $C_Z$ ).

<sup>5</sup> Bandwidth with external capacitors =  $1/(2 \times \pi \times 32\text{ k}\Omega \times C)$ . For  $C_X$ ,  $C_Y = 0.003\ \mu\text{F}$ , bandwidth = 1.6 kHz. For  $C_Z = 0.01\ \mu\text{F}$ , bandwidth = 500 Hz. For  $C_X$ ,  $C_Y$ ,  $C_Z = 10\ \mu\text{F}$ , bandwidth = 0.5 Hz.

<sup>6</sup> Self-test response changes cubically with  $V_S$ .

<sup>7</sup> Turn-on time is dependent on  $C_X$ ,  $C_Y$ ,  $C_Z$  and is approximately  $160 \times C_X$  or  $C_Y$  or  $C_Z + 1\text{ ms}$ , where  $C_X$ ,  $C_Y$ ,  $C_Z$  are in microfarads ( $\mu\text{F}$ ).

## ADXL335

### ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Table 2.

Parameter	Rating
Acceleration (Any Axis, Unpowered)	10,000 g
Acceleration (Any Axis, Powered)	10,000 g
$V_S$	-0.3 V to +3.6 V
All Other Pins	(COM - 0.3 V) to ( $V_S + 0.3\text{ V}$ )
Output Short-Circuit Duration (Any Pin to Common)	Indefinite
Temperature Range (Powered)	$-55^\circ\text{C}$ to $+125^\circ\text{C}$
Temperature Range (Storage)	$-65^\circ\text{C}$ to $+150^\circ\text{C}$

Stresses above those listed under Absolute Maximum Ratings may cause permanent damage to the device. This is a stress rating only; functional operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operational section of this specification is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

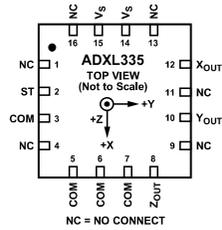
#### ESD CAUTION



**ESD (electrostatic discharge) sensitive device.** Charged devices and circuit boards can discharge without detection. Although this product features patented or proprietary protection circuitry, damage may occur on devices subjected to high energy ESD. Therefore, proper ESD precautions should be taken to avoid performance degradation or loss of functionality.

# ADXL335

## PIN CONFIGURATION AND FUNCTION DESCRIPTIONS



NOTES  
1. EXPOSED PAD IS NOT INTERNALLY CONNECTED BUT SHOULD BE SOLDERED FOR MECHANICAL INTEGRITY.

Figure 2. Pin Configuration

Table 3. Pin Function Descriptions

Pin No.	Mnemonic	Description
1	NC	No Connect <sup>1</sup> .
2	ST	Self-Test.
3	COM	Common.
4	NC	No Connect <sup>1</sup> .
5	COM	Common.
6	COM	Common.
7	COM	Common.
8	Z <sub>OUT</sub>	Z Channel Output.
9	NC	No Connect <sup>1</sup> .
10	Y <sub>OUT</sub>	Y Channel Output.
11	NC	No Connect <sup>1</sup> .
12	X <sub>OUT</sub>	X Channel Output.
13	NC	No Connect <sup>1</sup> .
14	V <sub>S</sub>	Supply Voltage (1.8 V to 3.6 V).
15	V <sub>S</sub>	Supply Voltage (1.8 V to 3.6 V).
16	NC	No Connect <sup>1</sup> .
EP	Exposed Pad	Not internally connected. Solder for mechanical integrity.

<sup>1</sup>NC pins are not internally connected and can be tied to COM pins, unless otherwise noted.

# ADXL335

## TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS

N > 1000 for all typical performance plots, unless otherwise noted.

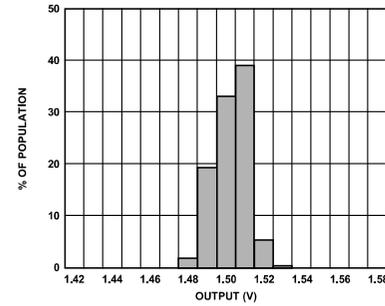


Figure 3. X-Axis Zero g Bias at 25°C, V<sub>S</sub> = 3 V

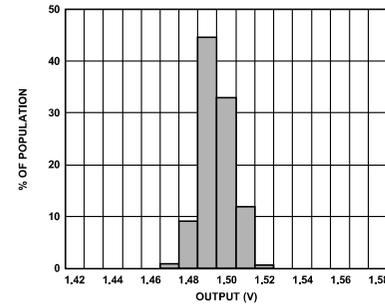


Figure 4. Y-Axis Zero g Bias at 25°C, V<sub>S</sub> = 3 V

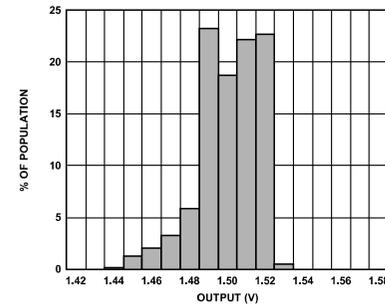


Figure 5. Z-Axis Zero g Bias at 25°C, V<sub>S</sub> = 3 V

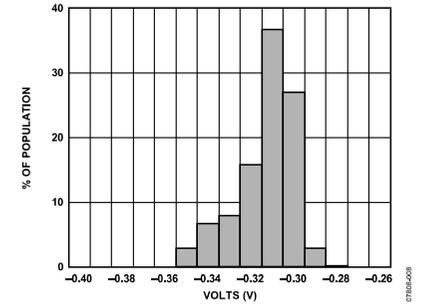


Figure 6. X-Axis Self-Test Response at 25°C, V<sub>S</sub> = 3 V

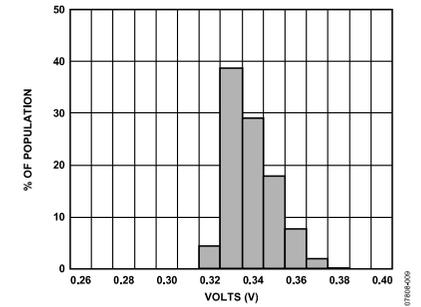


Figure 7. Y-Axis Self-Test Response at 25°C, V<sub>S</sub> = 3 V

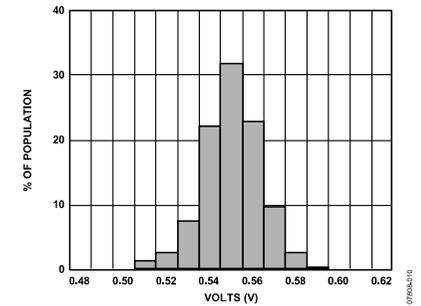


Figure 8. Z-Axis Self-Test Response at 25°C, V<sub>S</sub> = 3 V

# ADXL335

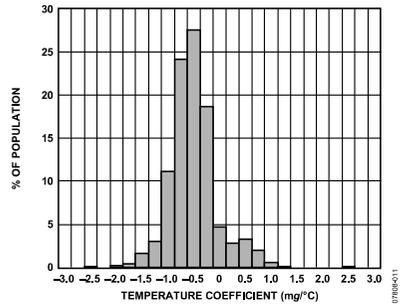


Figure 9. X-Axis Zero g Bias Temperature Coefficient,  $V_s = 3\text{ V}$

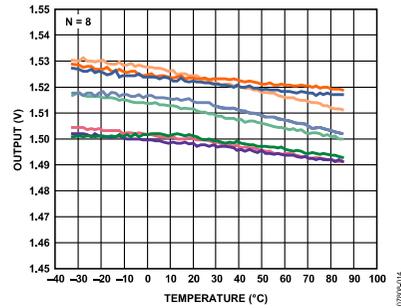


Figure 12. X-Axis Zero g Bias vs. Temperature—  
Eight Parts Soldered to PCB

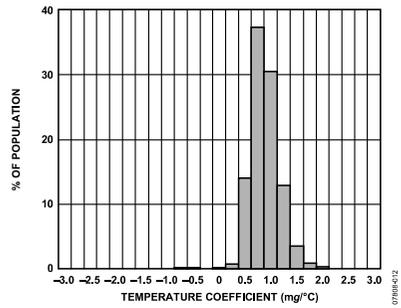


Figure 10. Y-Axis Zero g Bias Temperature Coefficient,  $V_s = 3\text{ V}$

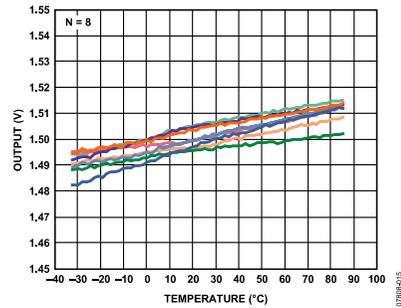


Figure 13. Y-Axis Zero g Bias vs. Temperature—  
Eight Parts Soldered to PCB

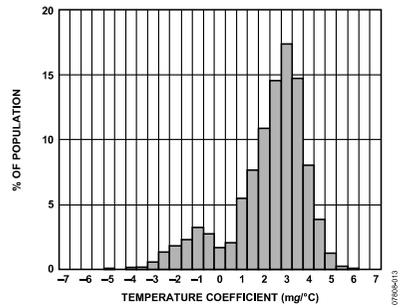


Figure 11. Z-Axis Zero g Bias Temperature Coefficient,  $V_s = 3\text{ V}$

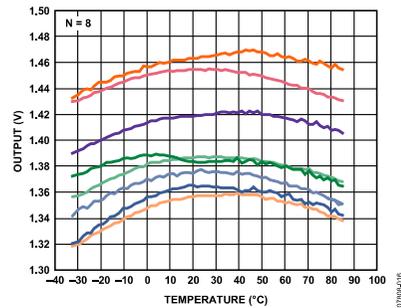


Figure 14. Z-Axis Zero g Bias vs. Temperature—  
Eight Parts Soldered to PCB

# ADXL335

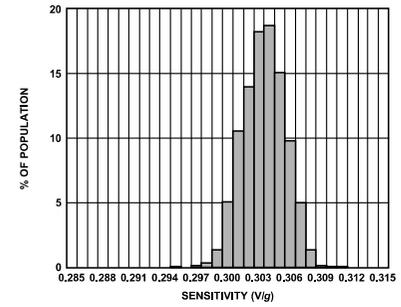


Figure 15. X-Axis Sensitivity at 25°C,  $V_s = 3\text{ V}$

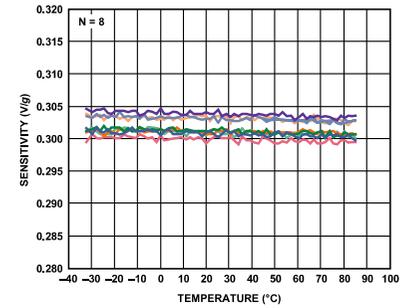


Figure 18. X-Axis Sensitivity vs. Temperature—  
Eight Parts Soldered to PCB,  $V_s = 3\text{ V}$

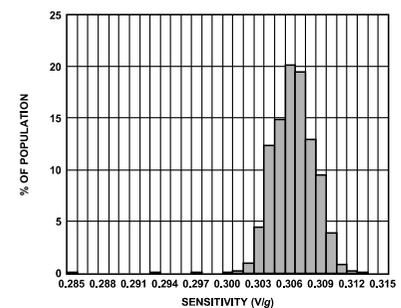


Figure 16. Y-Axis Sensitivity at 25°C,  $V_s = 3\text{ V}$

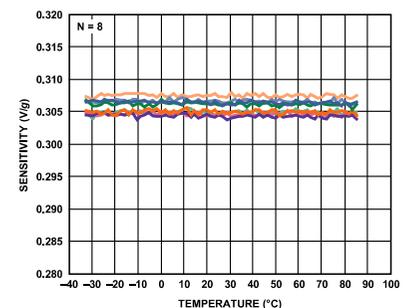


Figure 19. Y-Axis Sensitivity vs. Temperature—  
Eight Parts Soldered to PCB,  $V_s = 3\text{ V}$

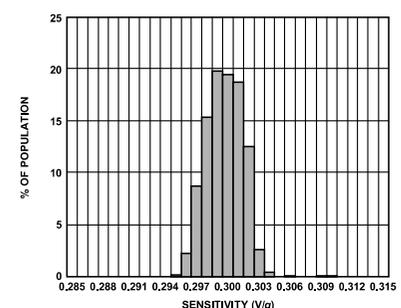


Figure 17. Z-Axis Sensitivity at 25°C,  $V_s = 3\text{ V}$

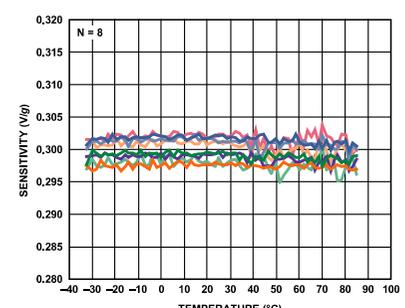


Figure 20. Z-Axis Sensitivity vs. Temperature—  
Eight Parts Soldered to PCB,  $V_s = 3\text{ V}$

## ADXL335

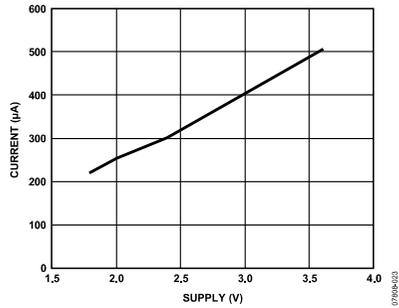


Figure 21. Typical Current Consumption vs. Supply Voltage

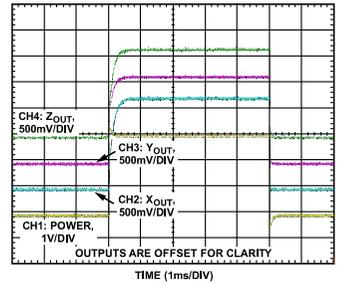


Figure 22. Typical Turn-On Time,  $V_S = 3\text{ V}$

## ADXL335

### THEORY OF OPERATION

The ADXL335 is a complete 3-axis acceleration measurement system. The ADXL335 has a measurement range of  $\pm 3\text{ g}$  minimum. It contains a polysilicon surface-micromachined sensor and signal conditioning circuitry to implement an open-loop acceleration measurement architecture. The output signals are analog voltages that are proportional to acceleration. The accelerometer can measure the static acceleration of gravity in tilt-sensing applications as well as dynamic acceleration resulting from motion, shock, or vibration.

The sensor is a polysilicon surface-micromachined structure built on top of a silicon wafer. Polysilicon springs suspend the structure over the surface of the wafer and provide a resistance against acceleration forces. Deflection of the structure is measured using a differential capacitor that consists of independent fixed plates and plates attached to the moving mass. The fixed plates are driven by  $180^\circ$  out-of-phase square waves. Acceleration deflects the moving mass and unbalances the differential capacitor resulting in a sensor output whose amplitude is proportional to acceleration. Phase-sensitive demodulation techniques are then used to determine the magnitude and direction of the acceleration.

The demodulator output is amplified and brought off-chip through a  $32\text{ k}\Omega$  resistor. The user then sets the signal bandwidth of the device by adding a capacitor. This filtering improves measurement resolution and helps prevent aliasing.

### MECHANICAL SENSOR

The ADXL335 uses a single structure for sensing the X, Y, and Z axes. As a result, the three axes' sense directions are highly orthogonal and have little cross-axis sensitivity. Mechanical misalignment of the sensor die to the package is the chief source of cross-axis sensitivity. Mechanical misalignment can, of course, be calibrated out at the system level.

### PERFORMANCE

Rather than using additional temperature compensation circuitry, innovative design techniques ensure that high performance is built in to the ADXL335. As a result, there is no quantization error or nonmonotonic behavior, and temperature hysteresis is very low (typically less than  $3\text{ mg}$  over the  $-25^\circ\text{C}$  to  $+70^\circ\text{C}$  temperature range).

APPLICATIONS INFORMATION

POWER SUPPLY DECOUPLING

For most applications, a single 0.1 μF capacitor, C<sub>DC</sub>, placed close to the ADXL335 supply pins adequately decouples the accelerometer from noise on the power supply. However, in applications where noise is present at the 50 kHz internal clock frequency (or any harmonic thereof), additional care in power supply bypassing is required because this noise can cause errors in acceleration measurement.

If additional decoupling is needed, a 100 Ω (or smaller) resistor or ferrite bead can be inserted in the supply line. Additionally, a larger bulk bypass capacitor (1 μF or greater) can be added in parallel to C<sub>DC</sub>. Ensure that the connection from the ADXL335 ground to the power supply ground is low impedance because noise transmitted through ground has a similar effect to noise transmitted through V<sub>S</sub>.

SETTING THE BANDWIDTH USING C<sub>X</sub>, C<sub>Y</sub>, AND C<sub>Z</sub>

The ADXL335 has provisions for band limiting the X<sub>OUT</sub>, Y<sub>OUT</sub>, and Z<sub>OUT</sub> pins. Capacitors must be added at these pins to implement low-pass filtering for antialiasing and noise reduction. The equation for the 3 dB bandwidth is

$$F_{-3dB} = 1/(2\pi(32\text{ k}\Omega) \times C_{(X,Y,Z)})$$

or more simply

$$F_{-3dB} = 5\ \mu\text{F}/C_{(X,Y,Z)}$$

The tolerance of the internal resistor (R<sub>INT</sub>) typically varies as much as ±15% of its nominal value (32 kΩ), and the bandwidth varies accordingly. A minimum capacitance of 0.0047 μF for C<sub>X</sub>, C<sub>Y</sub>, and C<sub>Z</sub> is recommended in all cases.

Table 4. Filter Capacitor Selection, C<sub>X</sub>, C<sub>Y</sub>, and C<sub>Z</sub>

Bandwidth (Hz)	Capacitor (μF)
1	4.7
10	0.47
50	0.10
100	0.05
200	0.027
500	0.01

SELF-TEST

The ST pin controls the self-test feature. When this pin is set to V<sub>S</sub>, an electrostatic force is exerted on the accelerometer beam. The resulting movement of the beam allows the user to test if the accelerometer is functional. The typical change in output is -1.08 g (corresponding to -325 mV) in the X-axis, +1.08 g (or +325 mV) on the Y-axis, and +1.83 g (or +550 mV) on the Z-axis. This ST pin can be left open-circuit or connected to common (COM) in normal use.

Never expose the ST pin to voltages greater than V<sub>S</sub> + 0.3 V. If this cannot be guaranteed due to the system design (for instance, if there are multiple supply voltages), then a low V<sub>F</sub> clamping diode between ST and V<sub>S</sub> is recommended.

DESIGN TRADE-OFFS FOR SELECTING FILTER CHARACTERISTICS: THE NOISE/BW TRADE-OFF

The selected accelerometer bandwidth ultimately determines the measurement resolution (smallest detectable acceleration). Filtering can be used to lower the noise floor to improve the resolution of the accelerometer. Resolution is dependent on the analog filter bandwidth at X<sub>OUT</sub>, Y<sub>OUT</sub>, and Z<sub>OUT</sub>.

The output of the ADXL335 has a typical bandwidth of greater than 500 Hz. The user must filter the signal at this point to limit aliasing errors. The analog bandwidth must be no more than half the analog-to-digital sampling frequency to minimize aliasing. The analog bandwidth can be further decreased to reduce noise and improve resolution.

The ADXL335 noise has the characteristics of white Gaussian noise, which contributes equally at all frequencies and is described in terms of μg/√Hz (the noise is proportional to the square root of the accelerometer bandwidth). The user should limit bandwidth to the lowest frequency needed by the application to maximize the resolution and dynamic range of the accelerometer.

With the single-pole, roll-off characteristic, the typical noise of the ADXL335 is determined by

$$rms\ Noise = Noise\ Density \times (\sqrt{BW} \times 1.6)$$

It is often useful to know the peak value of the noise. Peak-to-peak noise can only be estimated by statistical methods. Table 5 is useful for estimating the probabilities of exceeding various peak values, given the rms value.

Table 5. Estimation of Peak-to-Peak Noise

Peak-to-Peak Value	% of Time That Noise Exceeds Nominal Peak-to-Peak Value
2 × rms	32
4 × rms	4.6
6 × rms	0.27
8 × rms	0.006

USE WITH OPERATING VOLTAGES OTHER THAN 3 V

The ADXL335 is tested and specified at V<sub>S</sub> = 3 V; however, it can be powered with V<sub>S</sub> as low as 1.8 V or as high as 3.6 V. Note that some performance parameters change as the supply voltage is varied.

The ADXL335 output is ratiometric, therefore, the output sensitivity (or scale factor) varies proportionally to the supply voltage. At V<sub>S</sub> = 3.6 V, the output sensitivity is typically 360 mV/g. At V<sub>S</sub> = 2 V, the output sensitivity is typically 195 mV/g.

The zero g bias output is also ratiometric, thus the zero g output is nominally equal to V<sub>S</sub>/2 at all supply voltages.

The output noise is not ratiometric but is absolute in volts; therefore, the noise density decreases as the supply voltage increases. This is because the scale factor (mV/g) increases while the noise voltage remains constant. At V<sub>S</sub> = 3.6 V, the X-axis and Y-axis noise density is typically 120 μg/√Hz, whereas at V<sub>S</sub> = 2 V, the X-axis and Y-axis noise density is typically 270 μg/√Hz.

Self-test response in g is roughly proportional to the square of the supply voltage. However, when ratiometricity of sensitivity is factored in with supply voltage, the self-test response in volts is roughly proportional to the cube of the supply voltage. For example, at V<sub>S</sub> = 3.6 V, the self-test response for the ADXL335 is approximately -560 mV for the X-axis, +560 mV for the Y-axis, and +950 mV for the Z-axis.

At V<sub>S</sub> = 2 V, the self-test response is approximately -96 mV for the X-axis, +96 mV for the Y-axis, and -163 mV for the Z-axis.

The supply current decreases as the supply voltage decreases. Typical current consumption at V<sub>S</sub> = 3.6 V is 375 μA, and typical current consumption at V<sub>S</sub> = 2 V is 200 μA.

AXES OF ACCELERATION SENSITIVITY

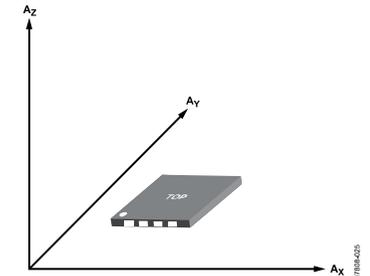


Figure 23. Axes of Acceleration Sensitivity; Corresponding Output Voltage Increases When Accelerated Along the Sensitive Axis.

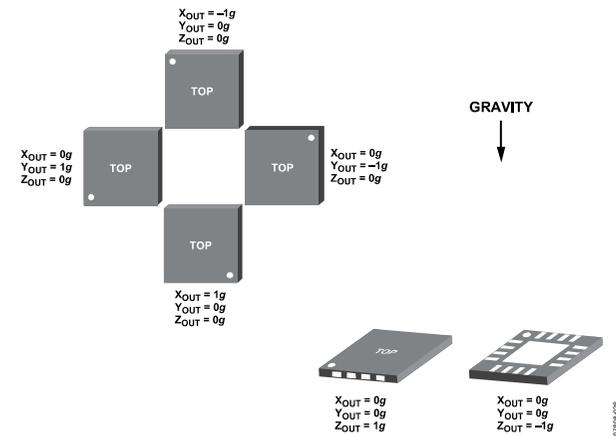


Figure 24. Output Response vs. Orientation to Gravity

# ADXL335

## LAYOUT AND DESIGN RECOMMENDATIONS

The recommended soldering profile is shown in Figure 25 followed by a description of the profile features in Table 6. The recommended PCB layout or solder land drawing is shown in Figure 26.

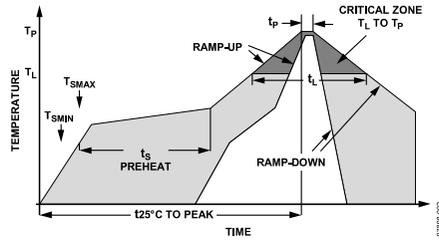


Figure 25. Recommended Soldering Profile

Table 6. Recommended Soldering Profile

Profile Feature	Sn63/Pb37	Pb-Free
Average Ramp Rate ( $T_L$ to $T_P$ )	3°C/sec max	3°C/sec max
Preheat		
Minimum Temperature ( $T_{SMIN}$ )	100°C	150°C
Maximum Temperature ( $T_{SMAX}$ )	150°C	200°C
Time ( $T_{SMIN}$ to $T_{SMAX}$ )( $t_s$ )	60 sec to 120 sec	60 sec to 180 sec
$T_{SMAX}$ to $T_L$		
Ramp-Up Rate	3°C/sec max	3°C/sec max
Time Maintained Above Liquidous ( $T_L$ )		
Liquidous Temperature ( $T_L$ )	183°C	217°C
Time ( $t_l$ )	60 sec to 150 sec	60 sec to 150 sec
Peak Temperature ( $T_P$ )	240°C + 0°C/-5°C	260°C + 0°C/-5°C
Time Within 5°C of Actual Peak Temperature ( $t_p$ )	10 sec to 30 sec	20 sec to 40 sec
Ramp-Down Rate	6°C/sec max	6°C/sec max
Time 25°C to Peak Temperature	6 minutes max	8 minutes max

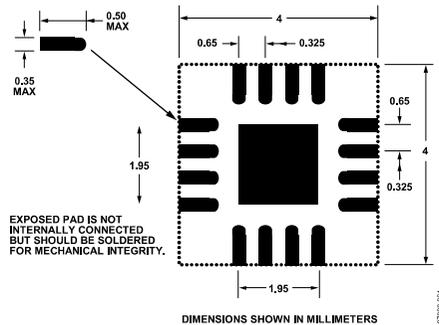


Figure 26. Recommended PCB Layout

# ADXL335

## OUTLINE DIMENSIONS

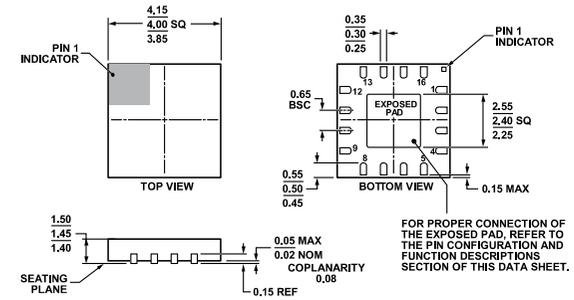


Figure 27. 16-Lead Lead Frame Chip Scale Package (LFCSP\_LQ)  
4 mm × 4 mm Body, 1.45 mm Thick Quad  
(CP-16-14)  
Dimensions shown in millimeters

## ORDERING GUIDE

Model	Measurement Range	Specified Voltage	Temperature Range	Package Description	Package Option
ADXL335BCPZ <sup>1</sup>	±3 g	3 V	-40°C to +85°C	16-Lead LFCSP_LQ	CP-16-14
ADXL335BCPZ-RL <sup>1</sup>	±3 g	3 V	-40°C to +85°C	16-Lead LFCSP_LQ	CP-16-14
ADXL335BCPZ-RL7 <sup>1</sup>	±3 g	3 V	-40°C to +85°C	16-Lead LFCSP_LQ	CP-16-14
EVAL-ADXL335Z <sup>1</sup>				Evaluation Board	

<sup>1</sup> Z = RoHS Compliant Part.

ADXL335

NOTES

ADXL335

NOTES