



ISEL

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Departamento de Engenharia Mecânica

Análise de Conforto de Ciclistas por Simulação Multicorpo

JOÃO PAULO DO CARMO FERREIRA
(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre
em Engenharia Mecânica

Orientadores:

Doutor João Pedro Castro Gonçalves

Júri:

Presidente: Doutor João Carlos Quaresma Dias

Vogais:

Doutor Miguel Pedro Tavares da Silva

Doutor João Milho

Doutor João Pedro Castro Gonçalves

Doutor Joaquim Infante Barbosa

Setembro de 2011

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar e de forma especial aos meus pais por todo o apoio que demonstraram não só ao longo da realização deste trabalho como ao longo de toda a minha vida. Foram um suporte indispensável para a elaboração deste trabalho pelo que apresento aqui toda a minha gratidão.

Ao meu irmão Miguel que foi igualmente uma ajuda muito importante. Estou grato pelo seu companheirismo e amizade.

Ao meu orientador, Eng.º João Gonçalves pela sua dedicação e por todos os esforços feitos para que fosse possível a realização deste trabalho.

Por fim, agradeço à minha família e amigos por todo o apoio prestado durante o período de realização deste trabalho.

FERREIRA, J. Análise de Conforto de Ciclistas por simulação Multicorpo, Dissertação – curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2011.

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre o comportamento dinâmico das bicicletas com o principal objectivo de quantificar o conforto de um ciclista. Neste trabalho serão estudados dois tipos de bicicletas: uma apenas com suspensão dianteira e outra com suspensão dianteira e traseira (ou suspensão total), e três classes de pavimento: um mais sinuoso, um mais suave e um intermédio. Para cada uma destas situações o que se pretende é analisar a quantidade de vibração que é transmitida para o corpo do ciclista através dos três pontos de contacto existentes entre ambos: Assento, guiador e pedais. Os valores obtidos são comparados entre os vários casos e também com valores referência, fornecidos por normas, afim de analisar a situação de conforto do ciclista. Após a realização dos estudos o que se verificou é que o ciclista está numa situação mais desconfortável em pisos mais sinuosos, e que nesta situação se utilizar uma bicicleta de suspensão total está sujeito a vibrações inferiores. No entanto, o mais importante a concluir é que em qualquer uma das situações estudadas o ciclista encontra-se sempre dentro de uma zona conforto segundo as normas utilizadas.

PALAVRAS-CHAVE: Análise de conforto de ciclistas, Medição de vibração em bicicletas, Exposição humana à vibração, Transmissão de vibrações

ABSTRACT

This paper presents a study off the dynamic behavior of bicycles with the objective of quantifying the comfort of a rider. This paper will study two types of bicycles (one with only front suspension and another one with both front and rear suspension) and three classes of surface: a more sinuous one, a softer one and an intermediate one. For each of these situations the aim is to analyze the amount of vibration that is transmitted to the rider's body through the three points of contact: seat, handlebars and pedals. The values obtained are then compared among themselves and with reference values, provided by standards in order to analyze the situation of the rider's comfort.

Several simulations were run. The results obtained show that for the more sinuous road, where the rider faces less confort, the use of full suspension reduces the overall accelerations peak and has higher confort. However, in any one of the situations studied the rider is always within a zone confort according to the standards used, and his capable of riding the bicycle for long time.

KEYWORDS: Comfort analysis of cyclists, Vibration measurement on bicycles, Human exposure to vibration, Transmission of vibrations

Índice

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	vii
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJECTIVO	2
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
3.1 Ciclismo	2
3.2 Exposição do corpo humano a vibrações	3
3.3 Vibrações: Modelação e Análise de modelos físicos	4
4. ANÁLISE DE CONFORTO DE UM CICLISTA POR SIMULAÇÃO MULTICORPO	6
4.1 A bicicleta	6
4.2 Vibrações & Conforto	8
4.3 Norma ISO 2631 – Guia para avaliação da exposição humana a vibrações de corpo inteiro 10	
4.4 Modelação dos corpos	12
4.4.1 Modelação do ciclista	12
4.4.2 Modelação da bicicleta	14
4.5 Realização dos estudos	19
4.5.1 Definição de parâmetros	19
4.5.2 Cálculo de um perfil de estrada aleatório	21
4.6 Análise de Resultados	27
5. RESULTADOS	31
5.1 Resultados para os três pontos de contacto: Guiador; Assento e Pedal em cada tipo de bicicleta.	31
5.1.1 Bicicleta apenas com suspensão dianteira	32
5.1.2 Bicicleta de suspensão dianteira e traseira	35
5.2 Comparação dos resultados entre os vários pavimentos	38
5.2.1 Resultados obtidos para Pavimento Classe A	38
5.2.2 Resultados obtidos para Pavimento Classe C	42
5.2.3 Resultados obtidos para Pavimento Classe E	46
6. CONCLUSÃO	53

7. REFERÊNCIAS	54
ANEXO I.....	56
ANEXO II.....	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Celerifero [15].....	7
Figura 2 – Drasiana [15].....	7
Figura 3 - Tipos de bicicletas [15].....	8
Figura 4 - Caracterização da Vibração	9
Figura 5 - Sistema de eixos considerado no estudo de vibrações no corpo humano [16].....	11
Figura 6 - Modelos a criar	12
Figura 7 - Modelação do corpo do ciclista	13
Figura 8 - Pontos de Rotação no corpo do ciclista	13
Figura 9 - Modelo apenas com suspensão dianteira - Bicicleta MSC [17].....	14
Figura 11 - Modelação do quadro da bicicleta com suspensão dianteira.....	15
Figura 10 - Quadro da Bicicleta com suspensão dianteira (Dimensões) [17].....	15
Figura 12 - Componentes da bicicleta de suspensão dianteira	16
Figura 13 - Modelo com suspensão dianteira e traseira- Bicicleta MSC [17]	16
Figura 16 - Componentes da bicicleta de suspensão dianteira e traseira	17
Figura 15 - Comparação de quadros.....	17
Figura 17 – Comparação entre os modelos criados	18
Figura 18 - Suspensão dianteira.....	19
Figura 19 - Classificação dos vários tipos de pavimento [18].....	22
Figura 20 - Pavimento classe A.....	23
Figura 21 - Pavimento classe C	23
Figura 22 - Pavimento classe C	24
Figura 23 - Comparação entre as várias classes de pavimento.....	24
Figura 24 - Parâmetros da suspensão da bicicleta de suspensão dianteira.....	25
Figura 25 - Parâmetros da suspensão da bicicleta de suspensão total	26
Figura 26 - Procedimento para realização de estudos.....	26
Figura 27 - Estudos realizados	27
Figura 28- Processo para cálculo do RMS	29
Figura 29 - Aceleração - Bicicleta suspensão dianteira em Classe A.....	32
Figura 30 - Acelerações - Bicicleta suspensão dianteira em Classe C.....	33
Figura 31 - Acelerações - Bicicleta suspensão dianteira em Classe E.....	34
Figura 32 - Acelerações - Bicicleta suspensão total em Classe A	35
Figura 33 - Acelerações - Bicicleta suspensão total em Classe C	36
Figura 34 - Acelerações - Bicicleta suspensão Total em Classe E	37
Figura 35 - Vibração no Guiador - Classe A	38
Figura 36 - Vibração no Assento - Classe A	39
Figura 37 - Vibração no Pedal - Classe A	40
Figura 38 - Vibração no Guiador - Classe C	42
Figura 39 - Vibração no Assento - Classe C.....	43
Figura 40 - Vibração no Pedal - Classe C.....	44
Figura 41 - Vibração no Guiador - Classe E.....	46
Figura 42 - Vibração no Assento - Classe E.....	47
Figura 43 - Vibração no Pedal - Classe E.....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros necessários para a obtenção de um perfil de estrada.....	23
Tabela 2 - Transmissão de vibração da bicicleta de suspensão dianteira - Classe A.....	32
Tabela 3 - Transmissão de vibração da bicicleta de suspensão dianteira - Classe C.....	33
Tabela 4 - Transmissão de vibração da bicicleta de suspensão dianteira - Classe E.....	34
Tabela 5 - Transmissão de vibração da bicicleta de suspensão total - Classe A.....	36
Tabela 6 - Transmissão de vibração da bicicleta de suspensão total - Classe C.....	37
Tabela 7 - Transmissão de vibração da bicicleta de suspensão Total - Classe E.....	38
Tabela 8 - Vibração no guidador - Classe A.....	39
Tabela 9 - Vibração no Assento - Classe A.....	40
Tabela 10 - Vibração no Pedal - Classe A.....	41
Tabela 11 - Valores de RMS nos vários pontos de contacto - Classe A.....	41
Tabela 12- Vibração no Guiador - Classe C.....	43
Tabela 13 - Vibração no Assento - Classe C.....	44
Tabela 14 - Vibração no Pedal - Classe C.....	45
Tabela 15 - Valores de RMS nos vários pontos de contacto - Classe C.....	45
Tabela 16 - Vibração no guidador - Classe E.....	47
Tabela 17 - Vibração no Assento - Classe E.....	48
Tabela 18 - Vibração no Pedal - Classe E.....	49
Tabela 19 - Valores de RMS nos vários pontos de contacto - Classe E.....	49
Tabela 20 - Comparação entre os vários valores obtidos.....	50
Tabela 21 - Valores globais de vibração nos vários pavimentos.....	50
Tabela 22 - Limites de conforto aproximados.....	51

1. INTRODUÇÃO

A bicicleta é nos dias que correm um dos meios de transporte mais utilizados. A bicicleta é utilizada tanto em cicloturismo como em modalidades de alta competição (ciclismo de estrada, btt, entre outras) ou ainda utilizada como meio de transporte para ir para trabalhar. Devido à subida dos combustíveis, ao aumento da preocupação com os níveis de poluição que o planeta está a atingir e ao facto de vários estudos indicarem que é necessário praticar cada vez mais desporto, faz com que o ciclismo seja uma modalidade em crescimento.

No entanto, o corpo humano durante a prática da modalidade de ciclismo fica exposto a vibrações transmitidas através da bicicleta e que advêm do facto de existirem irregularidades nos pavimentos sobre os quais o veículo se desloca. Já vários estudos indicaram que a transmissão de vibrações para o corpo humano podem ter variadas consequências: lesões em zonas específicas do corpo, desconforto, dores ou até doenças de maior gravidade. No caso do ciclismo o corpo humano pode ficar exposto a vibrações durante longos períodos de tempo pelo que um dos aspectos mais importante a estudar será mesmo o conforto do ciclista. Assim, é tema deste trabalho perceber o comportamento dinâmico da bicicleta e quantificar o conforto do ciclista quando sujeito a transmissão de vibrações.

Este trabalho vai consistir na modelação de um corpo humano no qual se pretende analisar a transmissão de vibrações através de uma bicicleta. A análise será feita a modelos de bicicletas distintos e tendo em conta a modelação de diferentes componentes, bem como a análise em diferentes tipos de pavimentos. Da análise, surgiram valores de vibração transmitida que serão comparados com valores referência presentes em normas. Da comparação de valores será possível chegar à conclusão do conforto de um ciclista.

2. OBJECTIVO

É objectivo deste trabalho é estudar o comportamento dinâmico de bicicletas, quantificar o conforto de um ciclista e a percepção através de métricas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Ciclismo

Nos últimos anos tem subido o número de praticantes de ciclismo, tanto a nível de competição como de lazer. Muitas são as pessoas que devido à subida dos preços dos combustíveis têm também optado por este meio de transporte para se deslocarem por exemplo para o trabalho.

O ciclismo é uma modalidade que traz benefícios nas mais variadas áreas. Por exemplo, a nível da saúde, esta é uma modalidade que trás benefícios tanto a nível físico como mental. A nível económico, têm apenas um custo inicial e de manutenção não necessitando de qualquer tipo de combustível o que é uma grande vantagem. Relacionado com este facto, deve dizer-se que é uma modalidade amiga do ambiente pois não emite qualquer tipo de poluição. Além destes benefícios tem muitos outros como a qualidade de vida ou inclusão social [1].

Neste seguimento, têm surgido alguns estudos na área do ciclismo nos últimos anos.

Jonathan Dingwell et al. (2008) estudaram a fadiga muscular em ciclistas que levam o seu esforço até à exaustão em ciclistas de alta competição. Realizaram este estudo para verificar qual a influência da fadiga muscular em lesões por repetidos esforços [2].

Felipe Carpes et al (2009) estudaram a influência da posição do tronco e do design do assento na pressão exercida sobre esse mesmo componente da bicicleta. Neste estudo, analisaram dois designs diferentes para o assento bem como duas posições distintas para o tronco do ciclista. Foram utilizados ciclistas tanto do sexo feminino como masculino e os resultados obtidos foram comparados com valores de referência [3].

Felipe Carpes et al (2009) estudaram também a pressão exercida no selim mas tendo em conta o design desse componente e a carga aplicada sobre o pedal. Mediram assim na superfície do assento da bicicleta a pressão exercida por ciclistas (também ciclistas

de ambos os sexos) para dois tipos de selins diferentes e duas cargas distintas aplicadas sobre os pedais. Analisaram e compararam os resultados dos vários testes [4].

Aline Tamborindéguy e Rodrigo Bini (2009) analisaram qual a influência da altura do selim na força exercida no joelho de um ciclista. Neste estudo, utilizaram uma altura de selim como referência e mediram a força a que o joelho ficou sujeito. Repetiram depois o teste para uma altura superior e uma altura inferior à referência e compararam os resultados [5].

Daniel Savionek (2010) desenvolveu um trabalho sobre a medição e avaliação da exposição humana à vibração transmitida ao sistema mão-braço durante a prática de ciclismo. Este foi um estudo experimental onde foram analisados diferentes tipos de pavimentos e modelos de bicicletas também distintos. De uma outra forma, foi também estudado o tipo de conforto nos mais variados tipos de pavimento [6].

3.2 Exposição do corpo humano a vibrações

Grande parte do movimento que existe no universo manifesta-se sobre a forma de oscilações ou vibrações. Estas têm muitas vezes um carácter desejável (ou benéfico) como por exemplo as vibrações das cordas de uma guitarra, as vibrações de um crivo ou as vibrações de um martelo pneumático. No entanto, em muitos outros casos, as vibrações não são de todo desejáveis como por exemplo a vibração em máquinas ou a vibração provocada por terremotos. No corpo humano também assim é, existem vibrações que são até utilizadas como terapias mas existem também vibrações que podem provocar desconforto ou provocar até lesões em diversos órgãos [7]. Por estas razões, a exposição do corpo humano a vibrações tem sido objecto de estudo aprofundado nos últimos anos.

G Conway et al . (2006) trabalharam na identificação dos principais efeitos das vibrações no corpo humano (visto como um todo) e os aspectos que maior influência têm na performance do corpo. Este trabalho residiu numa pesquisa literária na área acima referida [8].

C. Druga, D Barbu et al (2007) estudaram a influência das vibrações no corpo humano. Apresentaram de uma forma geral os principais problemas que ocorrem quando o corpo humano fica sujeito a determinado tipo de vibrações e os principais aspectos a ter em conta quando isso acontece [9].

J. Abercombry et al (2007) estudaram também a exposição do corpo humano a vibrações. Neste caso, quiseram avaliar quantitativamente a exposição a vibrações e respostas biodinâmicas do corpo humano quando sujeito a um exercício intencional de vibrações de todo o corpo humano [10].

FL Marcu et al. (2008) apresentaram um estudo onde abordaram as limitações do corpo humano quando sujeito à acção de vibrações. Neste estudo analisaram até que limites se podem utilizar as vibrações como terapia em determinados órgãos do corpo humano [7].

A. Ismail et al (2010) apresentaram um estudo sobre as vibrações transmitidas por um dos transportes mais utilizados em todo o mundo, o comboio, para o corpo humano. Este trabalho, foi um estudo experimental num comboio, e teve como objectivo verificar os efeitos causados pela transmissão de vibrações deste meio de transporte para o corpo humano (Corpo inteiro) [11].

3.3 Vibrações: Modelação e Análise de modelos físicos

Quando se pretende estudar vibrações, e neste caso, mais especificamente as vibrações transmitidas ao corpo humano, há que ter em conta quais as causas dessa vibração, como por exemplo o tipo de ambiente, o tipo de máquina ou veículo ou outras características que ajudam a definir o tipo de vibração, e ter em conta também as consequências dessa vibração como por exemplo lesões, desconforto ou doenças. Para estudar o binómio causa-efeito das vibrações existem dois tipos de estudos que se podem realizar: um estudo que se pode dizer mais experimental e que consiste em pegar no(s) objecto(s) que se pretende estudar e sob determinadas condições realizar medições das variáveis em análise, variando depois essas mesmas condições para poder comparar os resultados e verificar a relação causa-efeito. Outra forma de estudar um caso de

vibrações, e é sobre essa que este trabalho vai assentar, consiste em criar um modelo físico e estudá-lo dinamicamente sob as condições reais [12].

T. Yoshimura et al (2005) estudaram a exposição do corpo humano a vibrações transmitidas por um veículo. Neste trabalho, é mostrado ao detalhe a medição da resposta humana à vibração e é feita a modelação de um corpo humano na posição de sentado para avaliar o risco de transmissão de vibração. Neste estudo foi utilizado um modelo com dez graus de liberdade e medida a vibração transmitida à coluna vertebral e à cabeça o que comparando com valores de referência serviu para avaliar esse risco de transmissão de vibrações [13].

J. Krodkiewski (2008) escreveu sobre vibrações mecânicas nomeadamente uma vertente mais virada para a modelação e análise. Este autor 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 [14].

4. ANÁLISE DE CONFORTO DE UM CICLISTA POR SIMULAÇÃO MULTICORPO

4.1 A bicicleta

A bicicleta tem sido a máquina mais eficiente no que concerne ao converter energia em propulsão. Com pouca energia é possível facilmente fazer deslocar este veículo. Além desta, existem inúmeras razões para que a bicicleta seja um transporte muito utilizado a nível mundial. Em primeiro lugar porque andar de bicicleta tem uma forte ligação entre a actividade física e a saúde. A título de exemplo, existem estudos que indicam que andar de bicicleta previne o aparecimento de doenças crónicas como doenças relacionadas com o coração. Podem também reduzir o risco de aparecimento de obesidade. Estes estudos dizem que quanto mais tempo se praticar ciclismo ou algum tipo de modalidade relacionada com bicicletas menor é o risco de aparecimento de doenças [1].

Por outro lado tendo em conta todos os problemas que hoje são conhecidos relacionados com a poluição do planeta, o facto de a bicicleta ser um veículo “limpo” é uma grande vantagem. A poluição pode ter consequências a vários níveis como na saúde humana ou no clima pelo que quem opta por actividades relacionadas a bicicleta tem um contributo positivo no ambiente do nosso planeta. Este veículo não produz poluição porque não necessita de qualquer combustível o que indirectamente induz uma grande vantagem a nível económico para quem utiliza este transporte. Relacionado com outros, a bicicleta é um veículo barato que pode apresentar um custo inicial mais elevado mas que não necessita de combustível para se mover e tem baixos custos de manutenção.

É importante referir que a bicicleta nem sempre foi como hoje a conhecemos. A origem da bicicleta é ainda um pouco desconhecida tanto no seu criador como na data do seu aparecimento. Alguns apontam Leonardo da Vinci e o Conde Sirvac como os seus inventores, porém há quem pense que a bicicleta apareceu em determinadas zonas do Egipto e Babilónia ou em Pompeia. O que se sabe é que por volta do ano de 1790 o Conde Sirvac inventou um veículo composto por duas rodas de madeira e por um tronco com uma cabeça de animal, veículo este apelidado de celerífero.



Figura 1 – Celerifero [15]

Este era um modelo de “bicicleta” muito primitivo que não permitia sequer controlar a direcção. Isso foi possível a partir de 1816, quando o Barão Karl Drais von Sauerbronn, inventou a Drasiana, um veículo que já contava com um guiador e molas no selim para aumentar o conforto.



Figura 2 – Drasiana [15]

O facto de este barão ter criado uma bicicleta dirigível fez com que ficasse conhecido como o “pai espiritual da bicicleta”. Muitos foram os que a partir deste modelo fizeram as suas alterações, como o engenheiro Georg von Reichenbach que baixou o centro de gravidade e acolchoou o assento que também podia ser regulável.

Mais difícil foi arranjar um sistema que impulsionasse a bicicleta sem ser com os pés no solo. Essa invenção surgiu em 1821 quando o mecânico Nuremberg Bauer acoplou uma manivela e uma roda dentada que impulsionava a roda dianteira. A partir desta criação vários foram os sistemas imaginados para impulsionar a bicicleta mas foi já no ano de 1853 que Pierre Michaux pensou em colocar uns pedais. Seguiram-se uma série de invenções como os aros metálicos para as rodas, borracha para os pneus, os raios, a

corrente etc. Foi já nos finais dos anos 80 do séc. XIX que começaram a surgir as primeiras fábricas de bicicletas [15].

Hoje em dia existem inúmeros tipos de bicicletas: para vários tipos de terrenos, homens ou mulheres, adultos ou crianças...



Figura 3 - Tipos de bicicletas [15]

Apesar de existirem vários tipos de bicicletas, cada uma adequada a um determinado tipo de situação, todos eles estão sujeitos a vibrações. Estas vibrações podem ser provocadas pelo piso (irregularidades no pavimento), que existem sempre, ou por determinados componentes no veículo.

4.2 Vibrações & Conforto

As vibrações são estímulos mecânicos caracterizados por movimentos oscilatórios em torno de uma posição de referência. A nível biomecânico as variáveis que determinam a intensidade de uma vibração são a frequência (Hz) e a amplitude. A amplitude pode definir-se como o afastamento do corpo relativamente à posição de referência, ao longo do tempo. A frequência pode ser definida como o número de oscilações completas durante um segundo. Um outro parâmetro também utilizado em vibrações é a fase que representa a posição inicial do corpo em relação à posição de referência.

Quando se pretende quantificar uma vibração existem também vários parâmetros que são importantes conhecer. Um dos mais importantes é o pico que indica o valor de maior amplitude da vibração, sendo que por vezes também se utiliza o valor pico-a-pico que representa o valor de amplitude entre dois picos. Um outro parâmetro não menos importante e também muito utilizado na quantificação de vibrações é o valor de RMS (Root mean Square) [14].

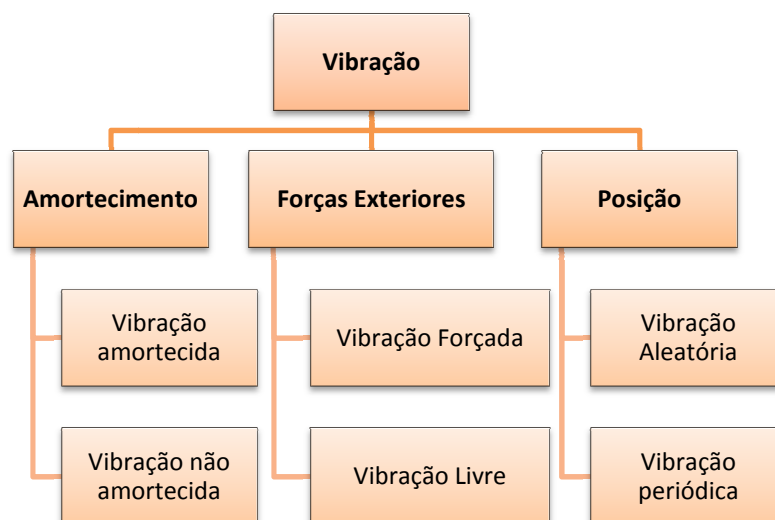


Figura 4 - Caracterização da Vibração

Existem, por outro lado, várias formas de caracterizar a vibração: pode ou não existir amortecimento pelo que pode diferenciar-se entre vibração amortecida ou vibração não amortecida; se existir uma força exterior a actuar continuamente no corpo o que se denomina por uma vibração forçada enquanto se essa força não existir é denominada vibração livre; um outro tipo de classificação pode ser em termos de previsão da posição: aleatória ou periódica.

Quando se pretende dar uma maior importância ao parâmetro frequência as vibrações devem ser medidas em unidades de aceleração (m/s^2). No caso de ser a amplitude o parâmetro mais relevante deve optar-se por uma medição em deslocamento (μm) enquanto se os parâmetros tiverem peso igual o mais adequado deve ser uma medição em unidades de velocidade (mm/s).

O estudo das vibrações no âmbito da actividade de ciclismo é importante devido às consequências que as mesmas podem ter no corpo do ciclista. No entanto este estudo é complexo devido à grande variedade de efeitos que a vibração pode ter no corpo humano. As consequências atrás referidas são normalmente dadas em três grupos: o conforto, a interferência com actividades ou a saúde. É no entanto muitas vezes difícil definir limites para cada um dos grupos sendo necessário analisar vários factores como o tempo de exposição, tipo de actividades, quantificar o conforto, ou seja é necessário analisar caso a caso. Neste trabalho, o estudo irá incidir sobre o campo do desconforto causado pelas vibrações.

Conforto pode ser definido como um sentimento de bem-estar. No que às vibrações diz respeito, pois existem outras fontes que podem causar desconforto (como o barulho, maus cheiros, calor, etc), vários têm sido os estudos realizados para analisar qual a

influência do movimento oscilatório no conforto humano. Existem variáveis extrínsecas e intrínsecas associadas à vibração que têm influência no desconforto do corpo humano. Variáveis extrínsecas são aquelas que estão directamente ligadas com a vibração como sejam a sua magnitude, a frequência, a direcção ou a duração. No caso das variáveis intrínsecas são as que estão directamente relacionadas com o corpo humano, como a sua posição, a postura, o peso, a altura, a idade ou o género. Como se pode ver, existe uma grande quantidade de variáveis que podem influenciar a transmissão de vibrações o que torna muito complicado analisar as respostas que um ser humano tem relativamente a essas vibrações. Muitas vezes, apenas o próprio ambiente pode alterar essas respostas, pelo que os estudos realizados nesta área indicam apenas uma tendência do que pode acontecer para uma determinada situação [12].

Devido às consequências que estas vibrações podem ter, foram criadas normas que definem valores limite da exposição humana a estes movimentos.

4.3 Norma ISO 2631 – Guia para avaliação da exposição humana a vibrações de corpo inteiro

Esta norma é uma das mais importantes quando o que se pretende é estudar vibrações no corpo humano. Surgiu com os objectivos de fornecer importantes informações na área da exposição humana a vibrações de corpo inteiro apresentando os níveis aceitáveis para situações de fadiga, conforto e saúde.

Este documento distingue três tipos de exposição à vibração mas foca-se sobretudo num deles: Vibrações transmitidas ao corpo como um todo através de superfícies de sustentação. Este tipo é aquele que se aplica normalmente quando se utilizam veículos, ou seja, é o tipo de exposição à vibração que um ciclista está sujeito. Por vezes, este tipo pode ser conjugado com algum dos outros dois que também são referidos nesta norma: Vibrações transmitidas simultaneamente à superfície total do corpo e/ou a partes substanciais dele e Vibrações aplicadas a partes específicas do corpo.

A norma ISO 2631 aplica-se apenas para gamas de frequência entre os 1Hz e os 80Hz em vibrações periódicas, não periódicas ou esporádicas. Como se referiu em cima, esta norma define os limites aceitáveis para três situações: a fadiga, que é também referida neste documento como o nível de eficiência reduzida (isto em termos de trabalho), o conforto e o limite de exposição (já ao nível de implicações na saúde humana). O que se

pretende neste trabalho é estudar o nível de conforto de um ciclista podendo assim consultar-se nesta norma os valores admissíveis para tal situação.

Segundo a norma que se está a abordar, existem quatro factores importantes quando se pretende determinar a resposta do ser humano a uma determinada vibração: a direcção; a intensidade; frequência e duração.

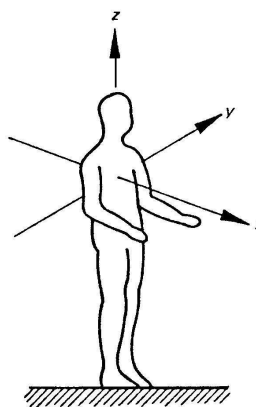


Figura 5 - Sistema de eixos considerado no estudo de vibrações no corpo humano [16]

Em termos de direcção considera-se um sistema coordenado ortogonal tendo como origem a zona do coração e com três eixos: o eixo X que tem como direcção das costas para o peito; o eixo do Y que se orienta do lado direito para o lado esquerdo e por ultimo o eixo Z que tem como direcção dos pés para a cabeça.

São apresentados os limites de vibração para cada um dos eixos. Esta apresentação está feita graficamente e em tabelas. Como se disse em cima e como é possível ver nos gráficos fornecidos pela norma existe uma dependência dos valores da vibração (medida em aceleração (rms)) com o tempo de exposição e a intensidade. Pelos gráficos é possível observar que quanto maior for o tempo de exposição (que está na norma definido entre 1 minuto e 24 horas) mais baixo será o limite de vibração aceitável. Por outro lado parece existir uma gama de frequências onde o ser humano é mais sensível, entre os 4Hz e os 8Hz aproximadamente. De referir que os valores apresentados na norma são para o caso de fadiga e que para se obterem os valores de conforto é necessário multiplicar um coeficiente que indicará que os níveis de conforto serão cerca de um terço dos níveis de fadiga [16].

4.4 Modelação dos corpos

Neste trabalho serão estudados dois tipos distintos de bicicletas. Para tal, será utilizado o Software SolidWorks que é um software de fácil utilização e que permitirá não só a modelação da bicicleta como estudá-la dinamicamente. O procedimento até se atingirem os resultados pretendidos poderá ser dividido em três fases. A primeira passará pela modelação de cada um dos componentes, tanto da bicicleta como do ciclista, sendo que a segunda fase a considerar é a montagem de todos esses componentes para a formação do veículo e do corpo do ciclista enquanto conjunto. Na terceira fase serão feitos os estudos sendo que esta pode dividir-se em duas etapas: A definição dos parâmetros e a obtenção de resultados.

Além dos modelos de bicicleta será necessário criar um modelo que represente o corpo do ciclista, sendo este o primeiro passo neste estudo. Uma primeira nota para assinalar que a modelação de todos os corpos, ciclista e bicicletas, será feita em duas dimensões, sendo que a terceira será apenas utilizada para dar uma certa espessura ao componente afim de ficar com a massa pretendida.

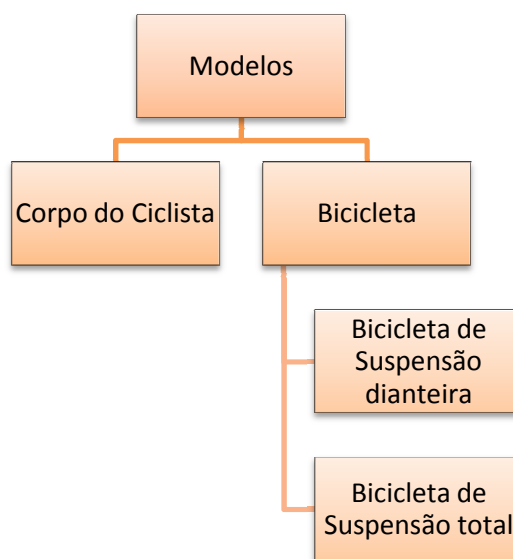


Figura 6 - Modelos a criar

4.4.1 Modelação do ciclista

O ciclista será modelado em três corpos distintos. O primeiro será composto pela cabeça e tronco. Este componente representará cerca de 50% do peso total do modelo completo. Outro componente, será o braço do ciclista que pesará aproximadamente 10% do peso total. A perna será o último componente, no entanto visto que o joelho tem um movimento importante na actividade ciclística, para aproximar o modelo o mais

possível à realidade este componente será dividido em dois. Estes dois corpos terão os restantes 40% do peso. A massa total do ciclista é de aproximadamente 80Kgs, sendo que 40Kgs estão representados na cabeça e tronco, 8Kgs no braço e 32Kgs na perna. Veja-se na imagem a seguir o corpo obtido após modelação em SolidWorks.

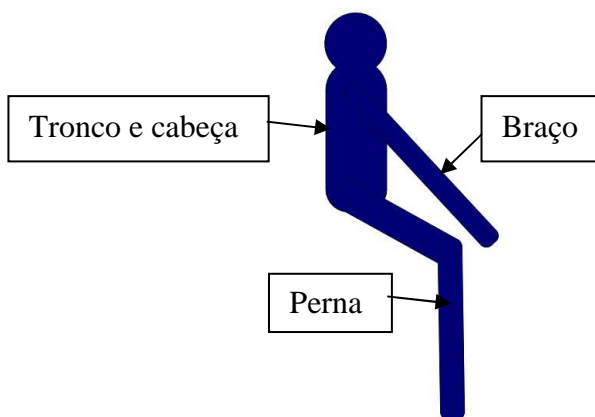


Figura 7 - Modelação do corpo do ciclista

Tal como foi dito em cima, a modelação foi feita em 2D, sendo que a terceira dimensão foi apenas utilizada para dar a espessura certa a cada componente para que ficasse com a massa pretendida.

A montagem dos vários componentes foi feita para que existisse um movimento de rotação entre os mesmos. Por exemplo, o braço tem a possibilidade de rodar em torno do tronco, bem como a perna que pode fazer esse mesmo movimento. O movimento do joelho foi também representado com um movimento de rotação entre os dois componentes que representam a perna.

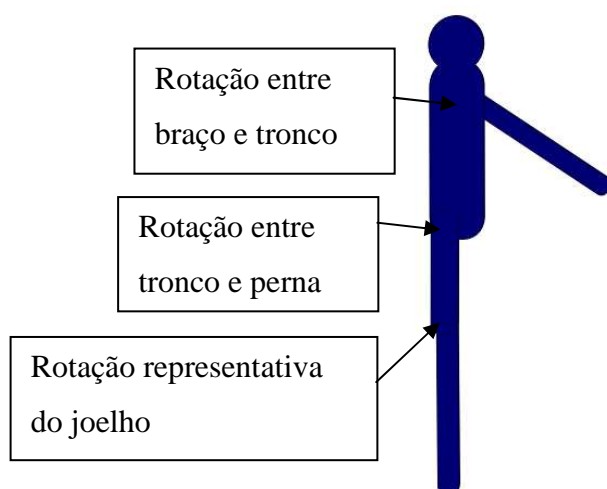


Figura 8 - Pontos de Rotação no corpo do ciclista

A modelação resultou num corpo com 80Kgs de massa e uma altura de 1,75m.

4.4.2 Modelação da bicicleta

Para a modelação da bicicleta o primeiro passo será obter uma referência dos modelos que se pretendem estudar. O que se pretende será analisar dois modelos distintos de bicicletas: um que terá apenas suspensão dianteira e um outro que além de suspensão dianteira tenha também uma suspensão traseira (também denominada suspensão total). A procura destas referências foi feita na Internet, em catálogos de marcas conceituadas. Os modelos mais interessantes, e com mais informação disponível, foram encontrados na marca MSC. (<http://www.mscbikes.com/home.php>).

O primeiro modelo a ser aqui tratado será o modelo apenas com uma suspensão dianteira. Na figura a seguir pode ver-se a bicicleta que serviu de referência para fazer a modelação em Solidworks.



Figura 9 - Modelo apenas com suspensão dianteira - Bicicleta MSC [17]

Esta bicicleta servirá apenas como referência para obter uma geometria que se aproxime o mais possível a um modelo real. Muitas simplificações serão feitas para facilitar a obtenção de resultados.

Este primeiro modelo será constituído por seis componentes de forma a facilitar o estudo. Um dos mais importantes será a modelação do quadro. Para esse efeito, seguiu-se a geometria indicada no catálogo para o modelo de bicicleta em cima apresentado (Figura10). Mais uma vez, a modelação foi feita em 2D sobrando a terceira dimensão para definir a massa do quadro (este valor também consta do catálogo da marca).

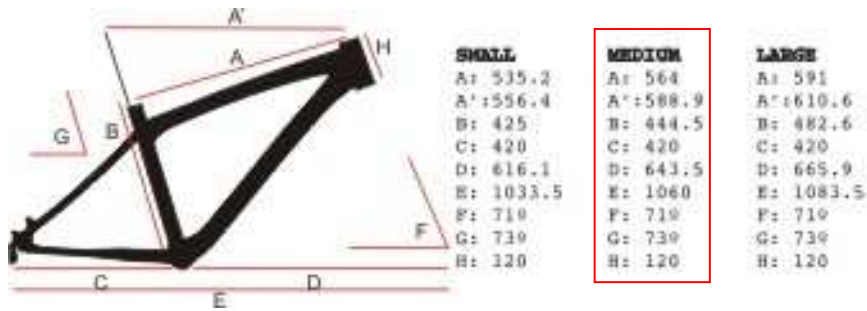


Figura 10 - Quadro da Bicicleta com suspensão dianteira (Dimensões) [17]

A escolha do tamanho do quadro é feita de acordo com a altura do ciclista. Neste caso, escolheu-se uma geometria intermédia porque é o caso que abrange uma maior amplitude de alturas (além disso, o modelo que representa o corpo do ciclista tem uma altura de 1,75m o que se enquadra neste tamanho de quadro). Para facilitar, o guiador será modelado juntamente com o quadro.

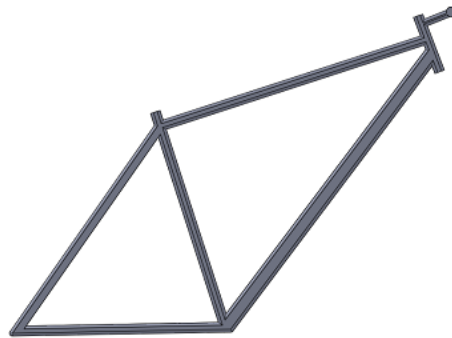


Figura 11 - Modelação do quadro da bicicleta com suspensão dianteira

Nesta imagem pode ver-se o quadro modelado. Pode ver-se que existiram algumas simplificações relativamente ao quadro da bicicleta de referência (Figura 9).

Os outros componentes serão o Selim, o pedal, a roda traseira e dianteira de diâmetro 650mm) e um componente de ligação da roda dianteira ao quadro.

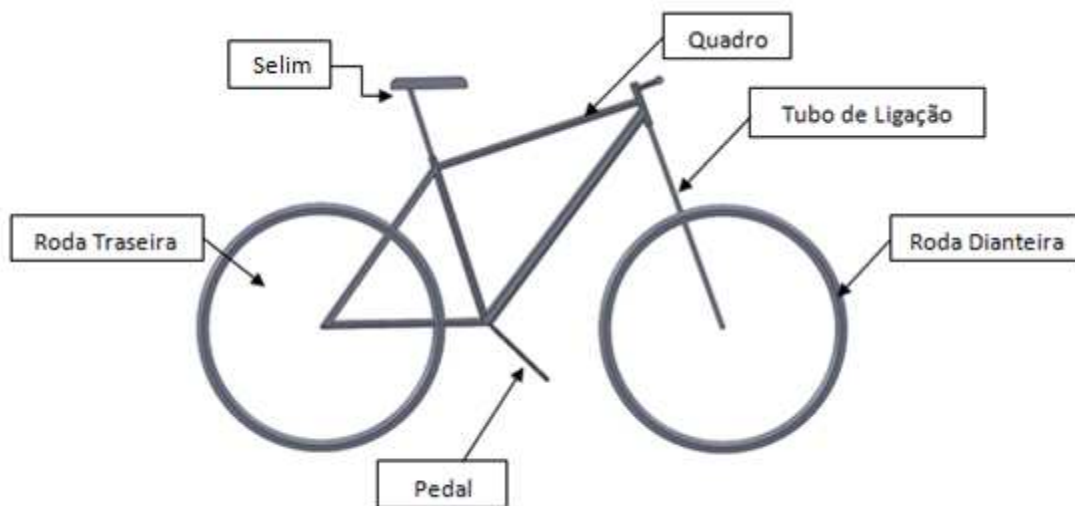


Figura 12 - Componentes da bicicleta de suspensão dianteira

O segundo modelo de bicicleta a ser estudado além de suspensão dianteira tem também uma suspensão traseira (bicicleta de suspensão total). Na figura a seguir pode ver-se a bicicleta que serviu de referência. De voltar a referir que a escolha da bicicleta foi feita de forma aleatória, tendo sido escolhido o modelo que tivesse mais informação disponível.



Figura 13 - Modelo com suspensão dianteira e traseira - Bicicleta MSC [17]

Mais uma vez, esta bicicleta serve apenas como referência para se obter um modelo que seja o mais realista possível. O procedimento para esta modelação é igual ao procedimento do modelo com apenas suspensão dianteira. Tal como nesse modelo, o quadro é o elemento mais importante e também será modelo em conjunto com o

guiador. Este quadro difere do anterior pois não é completamente rígido, sendo composto por várias partes que contêm movimento relativo entre si.

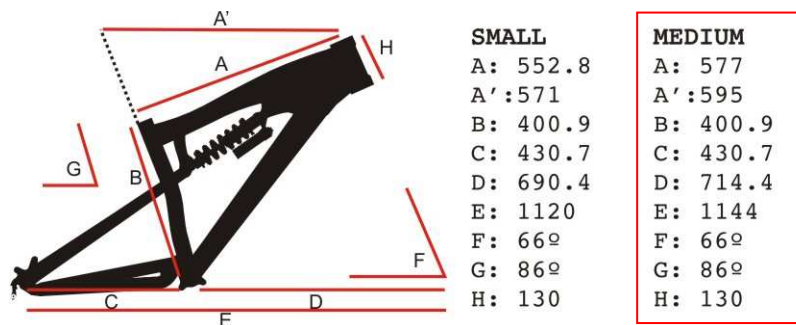


Figura 15 - Quadro da Bicicleta com suspensão dianteira e traseira [17]

Escolheu-se novamente um quadro de tamanho médio por abranger uma maior amplitude de alturas de ciclista, ou seja, o caso mais comum. Na imagem a seguir pode ver-se uma comparação entre o quadro real e o quadro modelado para se perceberem quais as simplificações que foram feitas.

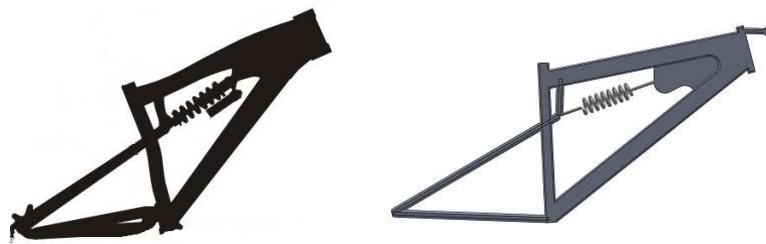


Figura 14 - Comparação de quadros

Além do quadro, os outros componentes são em tudo idênticos aos componentes que formam a bicicleta apenas com suspensão dianteira: Selim, roda traseira e dianteira, pedal e tubo de ligação da roda dianteira ao quadro.

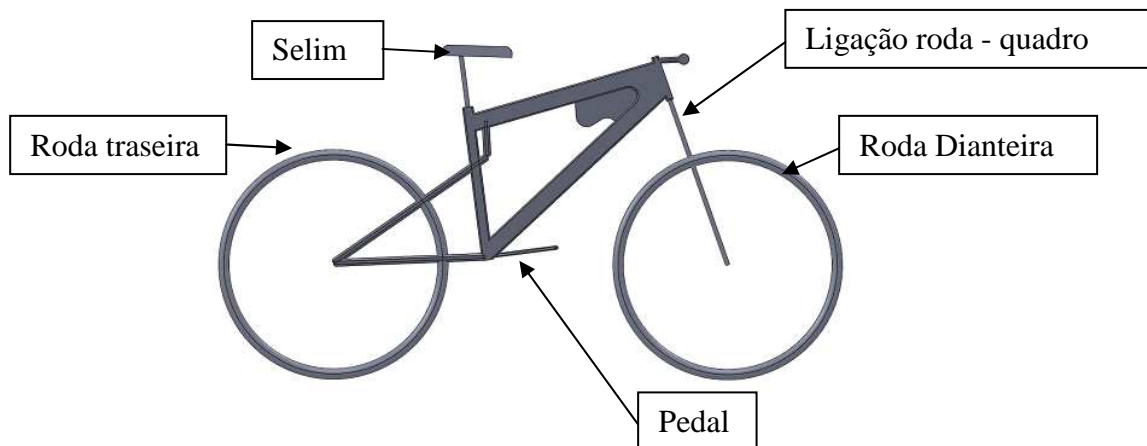


Figura 15 - Componentes da bicicleta de suspensão dianteira e traseira

Antes de se iniciarem os estudos é necessário criar um elemento adicional, o corpo chão. As dimensões deste corpo não são importantes, mas para este caso modelou-se um paralelepípedo com 2500mm de comprimento, 1000mm de largura e 150mm de espessura.

Tendo o modelo do ciclista, da bicicleta e do corpo chão pode formar-se um conjunto com estes três elementos, e a partir do qual se irão realizar os estudos dinâmicos.

Veja-se a imagem a seguir, onde são apresentados os dois conjuntos a serem estudados:



Figura 16 – Comparação entre os modelos criados

Nestas imagens podem ver-se os conjuntos formados pelo ciclista, pelos dois tipos de bicicleta e pelo corpo chão. Na imagem da esquerda pode ver-se o ciclista numa bicicleta de suspensão dianteira enquanto na imagem da direita está o ciclista com uma bicicleta de suspensão dianteira e traseira.

O ciclista encontra-se em contacto com a bicicleta em três pontos: no assento, no pedal e no guiador. Será nestes três pontos de contacto que irá haver transmissão de vibração da bicicleta para o ciclista, sendo aí que se irá focalizar todo o estudo.

De referir que há muitos factores que podem ter influência nas vibrações transmitidas da bicicleta para o ciclista e que não serão contemplados neste trabalho, tal como seja a posição do ciclista na bicicleta ou a altura do assento. Serão no entanto utilizadas as mesmas condições nos dois estudos.

4.5 Realização dos estudos

4.5.1 Definição de parâmetros

Visto que a modelação foi toda feita em SolidWorks será utilizada uma aplicação deste Software para se realizarem os estudos pretendidos – Estudos de dinâmica.

Tendo o modelo completamente definido, e antes da realização dos estudos, é necessário definir vários parâmetros. Em primeiro lugar, é preciso definir nas bicicletas as molas e os amortecedores. No primeiro modelo, será apenas inserida uma mola que representará a suspensão dianteira da bicicleta. Esta mola ficará na ligação da roda da frente ao quadro, tal como sugere a imagem.

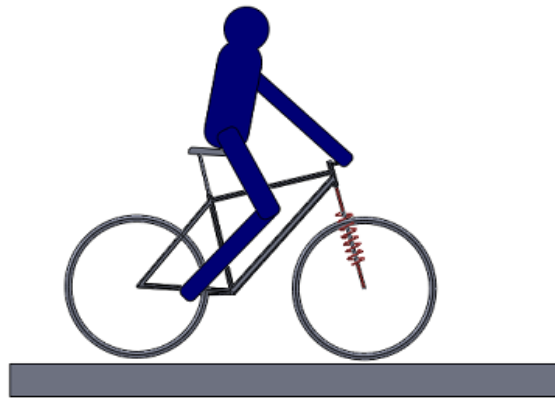


Figura 17 - Suspensão dianteira

É ainda necessário definir o valor de rigidez para este elemento. Visto que não existe muita informação disponível sobre os valores mais comuns para este tipo de molas será feito um cálculo muito simplista para se obter um valor que seja um ponto de partida. Caso se verifique que com esse valor a bicicleta não tem o comportamento esperado, podem fazer-se optimizações até o veículo ter um movimento normal.

Segundo a lei de Hooke, é possível calcular a rigidez de um corpo aplicando-lhe uma força e medindo o deslocamento provocado por essa mesma força. Isso é possível através da seguinte relação:

$$F = k \cdot \Delta x \quad (1)$$

Onde, F é a força aplicada no corpo, em Newton, k é a rigidez desse corpo, em Newton/metro, e Δx é o deslocamento provocado, em metros. No caso da mola da bicicleta, será considerada a força como sendo o peso do ciclista:

$$F = m \cdot g \text{ [N]} \quad (2)$$

A segunda lei de Newton refere que a força provocada por um corpo é igual ao produto da massa desse corpo pela aceleração da gravidade (neste caso para simplificar será considerado $g=10\text{m/s}^2$). Assim, sabendo que a massa do corpo do ciclista é de 80Kg calcula-se a força exercida obtendo-se o valor de 800N (cálculo conservador pois na realidade quando a bicicleta se encontra com as duas rodas em contacto com o solo o peso do ciclista está distribuído). Para se calcular a rigidez da mola, falta apenas saber o valor do deslocamento. Neste caso, será arbitrado um deslocamento de 4mm, um valor que à partida parece razoável, mas caso não seja poderá ser optimizado. Encontrados os valores da força exercida e do deslocamento, é agora possível calcular a rigidez da mola:

$$F = k \cdot \Delta x \leftrightarrow k = \frac{F}{\Delta x} = \frac{800}{4} = 200\text{N/m} \quad (3)$$

Uma rigidez de 200N/m será um valor de base para a mola da bicicleta que tem apenas suspensão à frente. Para a definição da suspensão é necessário ainda o valor do amortecimento. Tal como acontece com a rigidez também não existe muita informação disponível sobre os valores utilizados normalmente pelo que será necessário calcular através dos dados encontrados. Assim, para o cálculo factor de amortecimento, considerou-se um coeficiente de amortecimento de 0,05 [17]. Com este valor é possível efectuar o cálculo do parâmetro que falta para definir a suspensão dianteira.

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{K \cdot m}} \quad (4)$$

Onde ζ , representa o coeficiente de amortecimento, c , o factor de amortecimento, K , a rigidez da mola e m a massa do corpo. Sendo que todos os valores são conhecidos pode calcular-se o factor de amortecimento da suspensão a utilizar na bicicleta.

$$c = \zeta \cdot 2 \cdot \sqrt{K \cdot m} = 400 \left(\frac{\text{N}}{\left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)} \right) \quad (5)$$

Fica assim definida a suspensão para a bicicleta de suspensão dianteira já que os outros valores exigidos pelo software são apenas para dar aspecto ao elemento, não tendo qualquer interferência com os resultados que se pretendem obter.

Outro parâmetro que falta definir, é o contacto que existirá entre as rodas e o corpo chão. No software, o parâmetro contacto, previne que um corpo penetre no outro. Para o caso em estudo, o que se pretende é que as rodas, tanto a da frente como a de trás, não passem para baixo do corpo chão. O único aspecto a ter em atenção ao aplicar o contacto, é o material dos elementos, podendo alterar-se o das rodas para borracha.

Antes da realização dos estudos, existem ainda dois aspectos a ter em conta. O primeiro é simples e prende-se com o facto de ser necessário activar a gravidade, segundo o eixo vertical, no caso é o eixo do y e no sentido negativo. O último aspecto é a definição do movimento a dar às rodas para simular a passagem em determinado pavimento. Para esse efeito, irá adicionar-se um “motor” às rodas (um à roda da frente e outro à roda de trás), motor esse que irá criar o movimento pretendido. Este movimento será o perfil de estrada pelo que qual a bicicleta se desloca. Para este estudo será utilizado um perfil de estrada aleatório.

4.5.2 Cálculo de um perfil de estrada aleatório

Segundo o Professor Georg Rill [19], a obtenção de um perfil de estrada aleatório pode ser obtido através da soma de várias ondas sinusoidais, sendo expressa através da seguinte equação:

$$Z_s = \sum_{i=1}^N A_i \cdot \sin(\Omega_i \cdot s - \Psi_i) \text{ [m]} \quad (6)$$

Nesta equação, o A [m] representará a amplitude de cada uma das várias ondas sinusoidais e pode ser calculado através da seguinte expressão:

$$A_i = \sqrt{2 \cdot \Phi(\Omega_i) \cdot \Delta\Omega} \quad (7)$$

Onde i representará o número total de ondas sinusoidais que se pretendem somar. Para se encontrar a amplitude de cada onda, é em primeiro lugar necessário calcular um parâmetro denominado psd (Power Spectral Density), que na expressão apresentada em cima é representada por $\varphi(\Omega_i)$. O psd de cada onda pode ser obtido da seguinte forma:

$$\Phi(\Omega) = \Phi(\Omega_0) \cdot \left(\frac{\Omega}{\Omega_0}\right)^{-w} \left[\frac{m^2}{rad \cdot m}\right] \quad (8)$$

O valor $\varphi(\Omega_0)$ depende do tipo de pavimento que é pretendido. Será um valor mais elevado caso se pretenda um pavimento mais sinuoso ou um valor menor no caso de se querer um pavimento mais suave. Este valor pode ser consultado na norma ISO 8608 para várias classes de pavimentos. De referir, que este valor do parâmetro $\varphi(\Omega_0)$ foi obtido para uma frequência de referência $\Omega_0=0,01$ [rad/m]. O parâmetro Ω [rad/m] será

a frequência de cada uma das ondas sinusoidais. Por fim falta apenas definir o parâmetro w , que definirá a ondulação da curva psd, e que segundo a norma ISO 8608 pode ser considerado $w=2$.

O psd é um valor dado para um determinado intervalo de frequências que pode ser definido de Ω_1 até Ω_N frequências, onde N será o número total de curvas que se pretendem somar para obter o perfil de estrada. A discriminação destas frequências é dada pela seguinte equação:

$$\Delta\Omega = \frac{\Omega_N - \Omega_1}{N} \text{ [rad/m]} \quad (9)$$

Sabendo estes dois valores, psd e discriminação da frequência, é então possível calcular a amplitude de cada onda sinusoidal. Tendo este valor, falta apenas definir o ângulo de fase da curva, pois as frequências Ω_i são as frequências definidas anteriormente de Ω_1 até Ω_N . Segundo o Professor Rill, o ângulo de fase pode ser um qualquer valor aleatório variando entre 0 e 2π gerando assim perfis de estrada diferentes mas sempre com um aspecto semelhante.

Neste trabalho para a obtenção de um perfil de estrada, os valores a utilizar serão os sugeridos pelo mesmo Professor e os valores dados pela norma ISO 8608.

Serão estudados três tipos de pavimentos, um deles será um pavimento bom (classe A), ou seja, pouco sinuoso, outro, pelo contrário que será um pavimento muito irregular (Classe E – muito sinuoso) e ainda um pavimento intermédio (Classe C) relativamente aos dois anteriormente falados. Os valores para cada classe podem ser consultados na norma ISO 8608 [20].

Road class	Upper limit [10^{-6} m^3]	Geometric mean [10^{-6} m^3]
A (very good)	2^5	2^4
B (good)	2^7	2^6
C (average)	2^9	2^8
D (poor)	2^{11}	2^{10}
E (very poor)	2^{13}	2^{12}
F	2^{15}	2^{14}
G	2^{17}	2^{16}
H	-	2^{18}

Figura 18 - Classificação dos vários tipos de pavimento [18]

Além destes valores, os dados necessários para a obtenção dos três tipos de pisos são apresentados na tabela a seguir:

Tabela 1 - Parâmetros necessários para a obtenção de um perfil de estrada

Parâmetros	Valor
w	2
Ω_1	0,0628 rad/m
Ω_N	62,83 rad/m
N	200
s	0 a 100 m
Ψ_i	Aleatório

Utilizando estes valores, obtêm-se os seguintes perfis de estrada.

Classe A – Piso pouco sinuoso

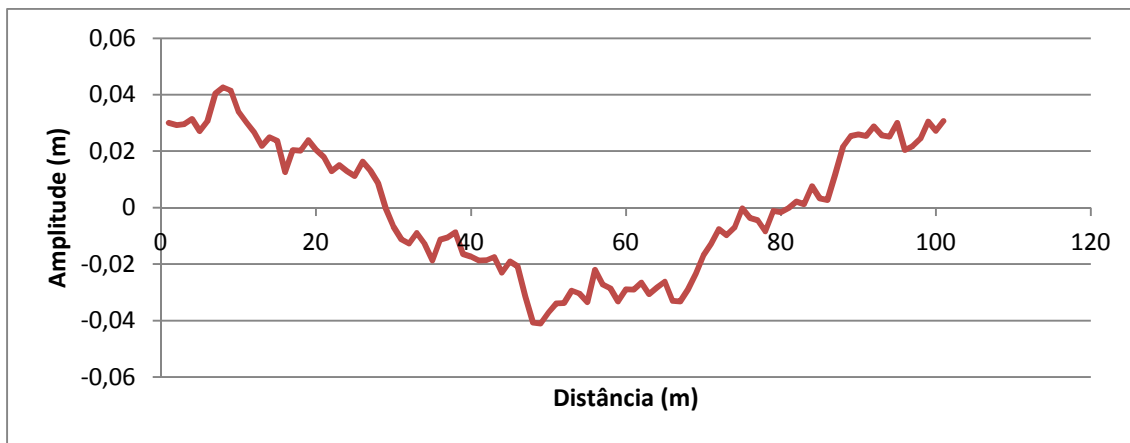


Figura 19 - Pavimento classe A

Classe C – Piso intermédio

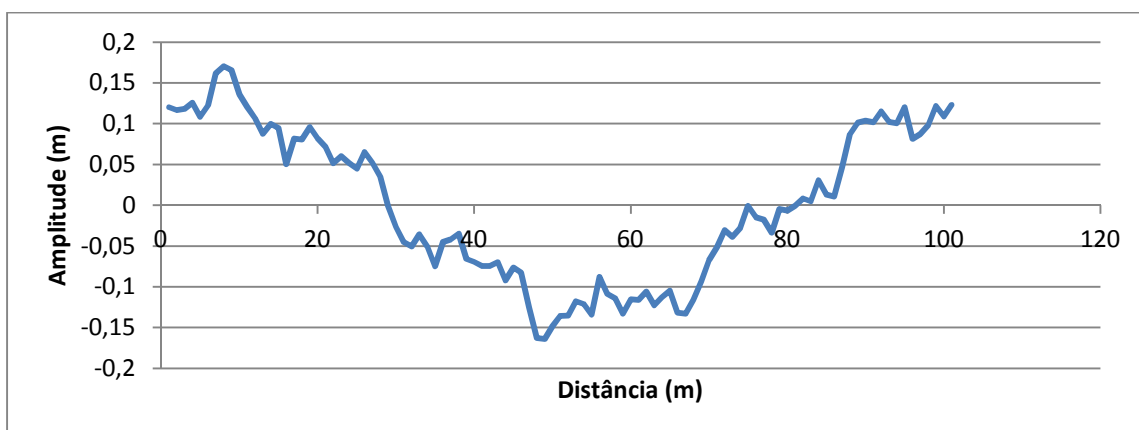


Figura 20 - Pavimento classe C

Classe E – Piso muito sinuoso

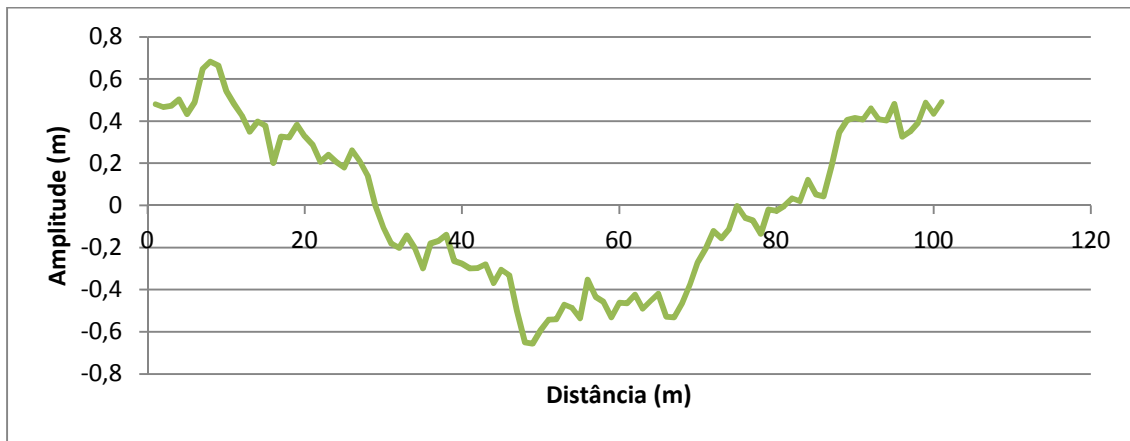


Figura 21 - Pavimento classe C

Para melhor se perceber as diferenças entre as várias classes, observe-se a comparação entre as várias curvas.

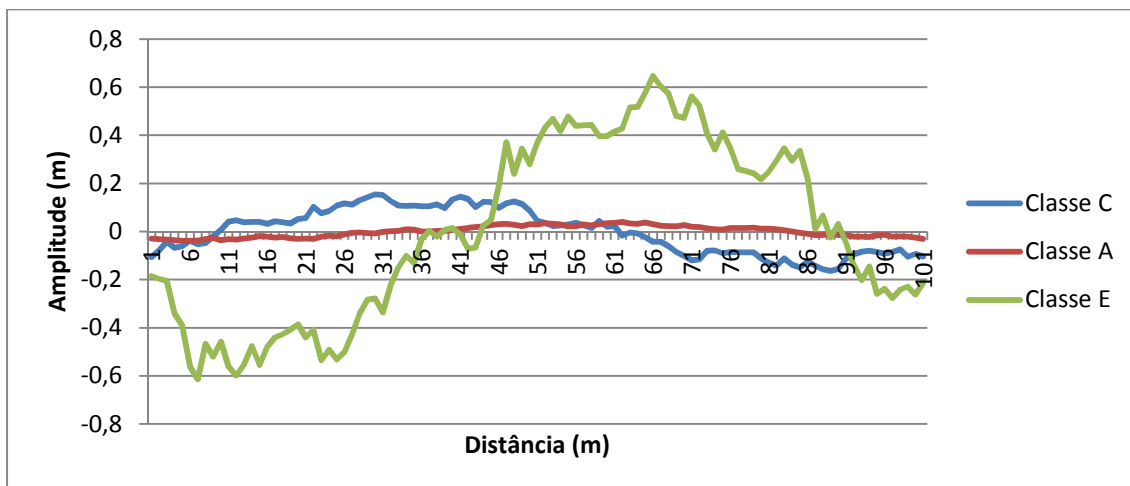


Figura 22 - Comparação entre as várias classes de pavimento

Estes serão os três tipos de pavimentos que irão ser estudados para cada um dos dois tipos de bicicletas.

A nível de software, o movimento irá ser definido nas rodas. O objectivo é q as rodas percorram os pontos que definem o perfil de estrada, para cada uma das classes. Num estudo de dinâmica isto é possível adicionando um “motor” a cada uma das rodas. Um último aspecto a ter em conta é que o movimento da roda de trás terá de ter um pequeno atraso relativamente à roda da frente. Considerando que a velocidade a que a bicicleta é de 20Km/h o tempo de atraso pode ser calculado da seguinte forma para a bicicleta só com suspensão dianteira:

$$v = 20 \text{ Km/h} = 5,55 \text{ m/s} \quad (10)$$

Para esta bicicleta a distância entre rodas é de 1,06m. Sabendo que a bicicleta circula a 5,55m/s é possível calcular o tempo que demorar a percorrer 1,06m:

$$t_{atraso} = \frac{1,06}{5,55} = 0,19s \quad (11)$$

Para a bicicleta com suspensão dianteira e traseira, será considerada a mesma velocidade, variando apenas a distância entre rodas. Neste caso, será de 1,144m. O tempo de atraso da roda traseira relativamente à roda dianteira é calculado da mesma forma:

$$t_{atraso} = \frac{1,144}{5,55} = 0,20s \quad (12)$$

Com todos estes dados é possível efectuar os estudos de dinâmica para a bicicleta de suspensão dianteira.

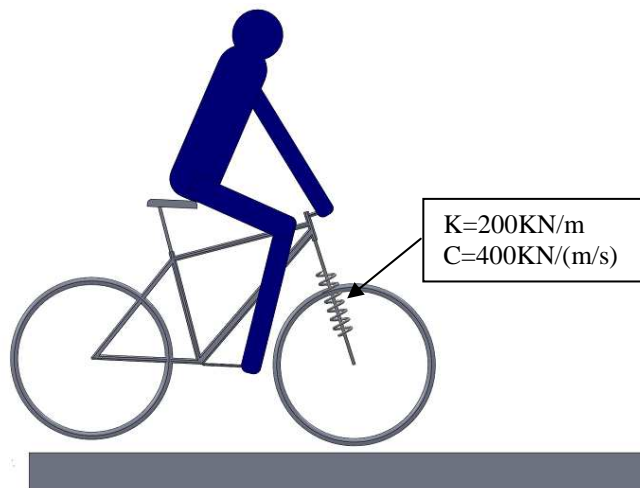


Figura 23 - Parâmetros da suspensão da bicicleta de suspensão dianteira

Para a bicicleta de suspensão total, e como se disse em cima, as condições são as mesmas que na bicicleta de suspensão dianteira, ou seja, os perfis de estrada sobre os quais a bicicleta se desloca são os mesmos bem como a velocidade do veículo. Assim, falta apenas definir os parâmetros da suspensão da bicicleta. Para este caso, poderia aceitar-se dividir o peso do ciclista pelas duas rodas e cada suspensão estaria sujeita apenas a metade do peso, mas será considerada a pior situação possível que será quando todo o peso está concentrado apenas numa suspensão (mais uma vez está a ser-se conservador). Assim, a massa a considerar em cada mola será de 80Kgs. Com esta massa, e tendo em conta todas as considerações feitas para a bicicleta de suspensão dianteira, é possível calcular os parâmetros necessários para a realização dos estudos.

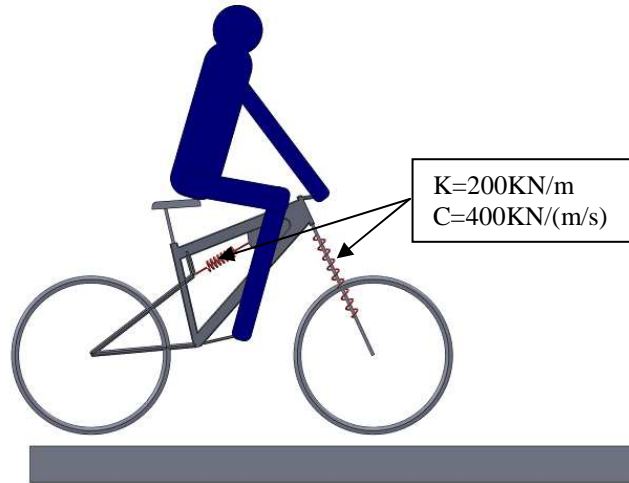


Figura 24 - Parâmetros da suspensão da bicicleta de suspensão total

A figura a seguir apresenta um resumo do procedimento a seguir até ao início dos estudos.

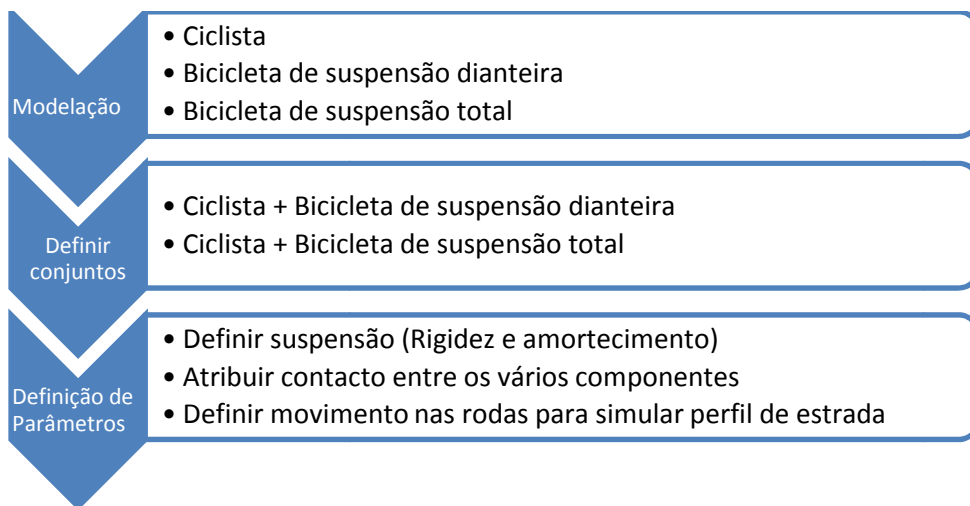


Figura 25 - Procedimento para realização de estudos

Após completar este procedimento, o último passo é apenas correr os estudos e tirar os dados pretendidos.

4.6 Análise de Resultados

Os resultados obtidos são provenientes de seis estudos distintos:



Figura 26 - Estudos realizados

Foram realizados estudos com os dois tipos de bicicleta (de suspensão parcial e suspensão total) nos três tipos de pavimentos definidos. Para cada um destes estudos foram obtidos valores da vibração transmitida no guidador, no assento e no pedal, para um tempo de estudo de 18 segundos.

A análise de resultados será feita de duas formas distintas. Por um lado serão comparados os vários estudos entre si e por outro serão analisados individualmente para se entender melhor a situação de conforto do ciclista em cada um dos casos.

Inicialmente será feita a comparação entre os vários estudos realizados para se entender em que situação existe um maior conforto por parte do ciclista. Nesta análise, e tal como sugere Griffin, o principal parâmetro de comparação é o R.S.S (Root-sums-of-square). Este é um parâmetro que de certa forma faz a soma dos três pontos em análise – o guidador, o assento e o pedal. Em cada um destes pontos será apenas estudada a componente vertical, que no caso será o eixo dos yy, visto ser o caso com maior influência na medição de conforto do ciclista [12].

O primeiro passo para esta análise é a obtenção de valores a partir do software utilizado. Os resultados obtidos são em unidades de aceleração (m/s^2), segundo o eixo dos yy para os três pontos acima referidos. Cada um desses pontos terá um tratamento diferente tal como sugere Griffin, já que dependendo do ponto de contacto entre a bicicleta e o ciclista a vibração irá transmitir-se de forma diferente, variando ainda com o eixo onde essa vibração se transmite.

Pode começar-se pela vibração transmitida pelo guiador às mãos do ciclista. Os cálculos aqui descritos podem ser efectuados num software como o Excel. O método para a obtenção do valor de R.S.S inicia-se com a transformação do sinal no tempo (em aceleração) para um sinal em frequência. Isto é possível utilizando a transformada de Fourier (FFT). Esta transformada permite descobrir quais as frequências presentes no sinal no tempo, pois segundo Jacques Fourier, qualquer função complexa pode ser decomposta numa série de harmónicas (forma mais simples da vibração) de diferentes frequências. As transformadas de Fourier assumem no processamento de sinal digital a seguinte forma:

$$X_K = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_i e^{-j \frac{2\pi i k}{N}} \quad (13)$$

Assim, é possível passar de um sinal no tempo para um sinal onde as frequências presentes nesse sinal estão evidenciadas. Obtendo este espectro de frequências é agora necessário aplicar-lhe um determinado “peso”. Este peso, depende do ponto de contacto e do eixo em que a transmissão de vibração se dá. No caso das vibrações transmitidas à mão do ciclista, segundo o eixo dos yy e num movimento de translação, este peso é denominado W_d e é definido da seguinte forma (Ver anexo I para consultar tabela completa):

$$0,5 < f < 2.0 \quad W(f) = 1 \quad (14)$$

$$2 < f < 80 \quad W(f) = 2.0/f \quad (15)$$

Onde f representa as todas as frequências obtidas através da transformada de Fourier. Todas as frequências que se encontrarem entre 0,5 e 2,0Hz terão um peso de 1, enquanto que frequências superiores a 2 serão pesadas com um factor de 2/f. O principal objectivo destes pesos é eliminar as frequências mais elevadas. O próximo passo é aplicar um factor eixo, ou seja, dependendo do ponto de transmissão da vibração e do eixo onde ela ocorre é necessário a aplicação de um factor pois as vibrações transmitem-se de forma diferente no corpo humano para aos vários eixos. No caso das vibrações transmitidas à mão e segundo o eixo y esse factor é de 1. Após passar do sinal no tempo para um sinal em frequência, aplicar um determinado “peso” para eliminar as altas frequências e aplicar o factor eixo é necessário voltar a obter o sinal no tempo, em

aceleração. Tal, é possível aplicando a inversa da transformada de Fourier, IFFT. As transformadas de Fourier inversas assumem no processamento de sinal digital a seguinte forma:

$$x_i = \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{-j\frac{2\pi ik}{N}} \quad (16)$$

Ao voltar a obter um sinal no tempo tem-se a vibração efectivamente transmitida do guiador para a mão do ciclista e não a vibração relativa ao movimento da bicicleta.

É assim a partir deste sinal no tempo, em aceleração, que se vai calcular o valor de RMS (Root Mean Square). Este valor, RMS, é um parâmetro que de certa forma permite avaliar a energia contida numa vibração, e o seu cálculo é simples podendo ser obtido da seguinte forma:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{N-1} x_i^2}{N}} \quad (17)$$

RMS é a raiz quadrada da média aritmética dos quadrados dos valores presentes no sinal no tempo [12].

Na figura a seguir é possível ver um esquema que traduz todo o processo até ao cálculo do valor RMS.



Este é o processo a seguir em todos os estudos realizados neste trabalho, variando apenas os pesos a aplicar a cada frequência e o factor eixo (Ver anexo I, para consultar esquema de procedimento idealizado por Griffin [12]).

Para as vibrações transmitidas do assento para o corpo do ciclista o método é exactamente o mesmo descrito em cima incluindo os valores do peso e do factor eixo. Já as vibrações transmitidas do pedal para o pé do ciclista, apesar do método ser o mesmo alteram-se os valores do “peso” e do factor eixo. O processo inicia-se mais uma vez

com a obtenção do sinal no tempo, em unidades de aceleração. Neste sinal, aplicar FFT, e depois o “peso” W_b . Este peso é definido da seguinte forma (Ver anexo I para consultar tabela completa):

$$0.5 < f < 2.0 \quad W(f) = 0.4 \quad (18)$$

$$2 < f < 5.0 \quad W(f) = f/5.0 \quad (19)$$

$$5 < f < 16 \quad W(f) = 1 \quad (20)$$

$$16 < f < 80 \quad W(f) = 16/f \quad (21)$$

Depois de multiplicar este “peso” às frequências obtidas através da transformada de Fourier, é necessário aplicar o factor eixo. Para o caso do pé, segundo o eixo y e para um movimento de translação o factor é de 0,25. Este factor é mais baixo que os dois anteriores, o que indica que o pé do ciclista é uma zona menos sensível à transmissão de vibração. O passo a seguir é voltar a ter um sinal no tempo, em aceleração, e o cálculo do valor de RMS.

Até aqui foi descrito um método que permite a obtenção do valor de RMS para cada um dos pontos em análise – guiador, selim e pedal. No entanto, como se disse um dos objectivos será comparar os vários estudos realizados através do parâmetro R.S.S. Este valor é possível obter efectuando o seguinte cálculo.

$$R.S.S = \sqrt{RMS_{Guiador}^2 + RMS_{Selim}^2 + RMS_{Pedal}^2} \quad (22)$$

O R.S.S é o valor que permitirá comparar os vários estudos entre si. Quanto maior for o seu valor significará que maior foi a vibração transmitida da bicicleta para o corpo humano, e que por isso maior será o desconforto causado no ciclista.

De referir que este processo pode ser aplicado até um factor de crista de 14, sendo no entanto necessário algum cuidado na análise quando se trabalha com factores de crista superiores a 6. Este factor é uma relação entre o pico e o valor de RMS.

$$FC = \frac{Pico}{RMS} \quad (23)$$

Tanto o pico como o valor RMS são referentes à vibração obtida no Software e não na vibração calculada através do procedimento atrás descrito. No entanto, o valor RMS pode calcular-se exactamente da mesma forma enquanto o pico é o valor mais alto [12].

5. RESULTADOS

Os valores aqui apresentados são os resultados obtidos dos estudos abordados nos capítulos anteriores. Para melhor se perceber, serão realizadas várias comparações para as mais diversas situações.

5.1 Resultados para os três pontos de contacto: Guiador; Assento e Pedal em cada tipo de bicicleta.

Estes resultados serão aqui apresentados de forma a se perceber em cada situação qual o ponto de contacto entre a bicicleta e o ciclista que tem maior transmissão de vibração. Assim, os resultados estarão divididos em duas partes: a primeira é relativa à bicicleta apenas com suspensão dianteira enquanto a segunda apresentará os valores para a bicicleta que além de suspensão dianteira também tem suspensão traseira. Para cada um destes tipos de bicicleta os resultados estão divididos por classes de pavimento: Classe A (Pavimento liso), Classe C (Pavimento intermédio) e Classe E (Pavimento muito sinuoso).

Em cada uma das situações descritas em cima será mostrado o resultado da vibração, em aceleração (m/s^2). Esses valores foram obtidos directamente do software SolidWorks. Por outro lado, serão também apresentados os resultados da vibração que é efectivamente sentida pelo ciclista. Estes valores foram calculados através do procedimento descrito no capítulo anterior. São apresentados gráficos da aceleração em função do número de pontos do estudo realizado.

No anexo II estão só resultados para cada um dos casos apresentados de forma individual.

5.1.1 Bicicleta apenas com suspensão dianteira

5.1.1.1 Classe A

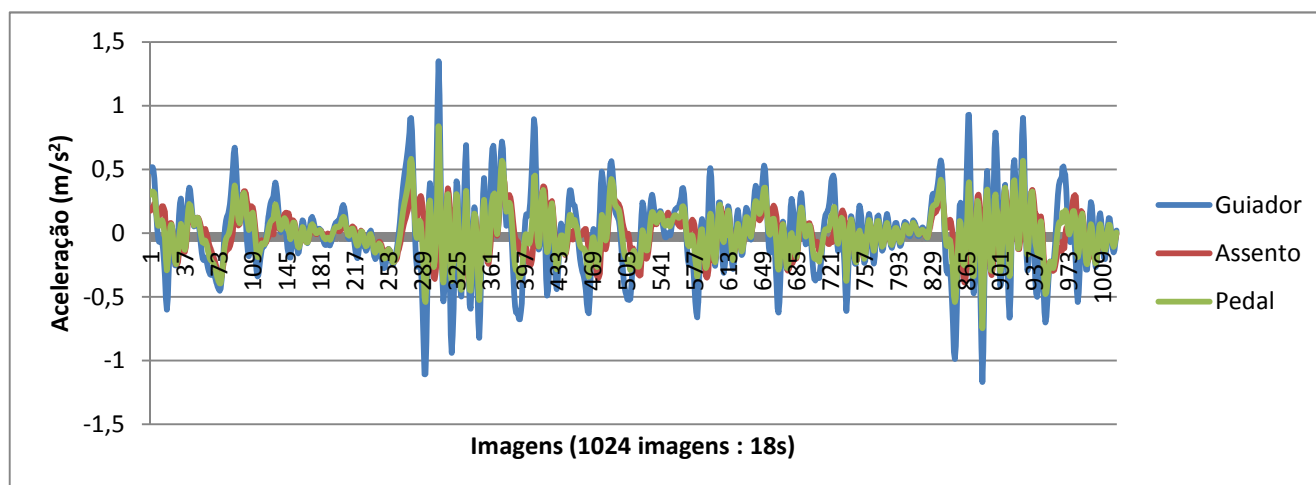


Figura 28 - Aceleração - Bicicleta suspensão dianteira em Classe A

Este gráfico apresenta uma comparação entre os resultados obtidos da aceleração (m/s^2) para os vários pontos de contacto entre o ciclista e a bicicleta, no pavimento de classe A que é um pavimento pouco sinuoso ou mesmo liso. O que se pode ver é que a vibração da bicicleta no assento e no pedal é idêntica sendo que no guiador é onde existe maior transmissão tendo alguns picos que quase atingem uma aceleração de $1,5 m/s^2$. Neste estudo o que se pode verificar é que praticamente toda a vibração se encontra abaixo dos $0,5 m/s^2$.

Tabela 2 - Transmissão de vibração da bicicleta de suspensão dianteira - Classe A

Classe A – Bicicleta de suspensão dianteira – Vibração transmitida			
Ponto de Contacto	Factor Crista	R.M.S (m/s^2)	R.S.S (m/s^2)
Guiador	4,3	2,32E-04	
Assento	3,2	1,33E-04	2,72E-04
Pedal	4,5	4,71E-05	

Esta tabela apresenta os valores da vibração transmitida da bicicleta para o corpo do ciclista, ou seja, a vibração que é efectivamente sentida por quem conduz o veículo.

O que se pode observar é que a vibração transmitida do pedal para o pé do ciclista é aquela que menos importância tem sendo que ao invés a vibração transmitida do guiador da bicicleta para as mãos do ciclista é a que adquire uma maior relevância, tomando valores que representam quase o dobro da vibração transmitida através do assento. Os valores da vibração transmitida no pedal, que na bicicleta eram muito

semelhantes aos valores do assento, passam agora a ser apenas aproximadamente 35% dessa mesma vibração.

O R.S.S é um valor global da vibração transmitida para o corpo do ciclista que só terá expressão quando comparado com outras situações, o que será feito posteriormente.

5.1.1.2 Classe C

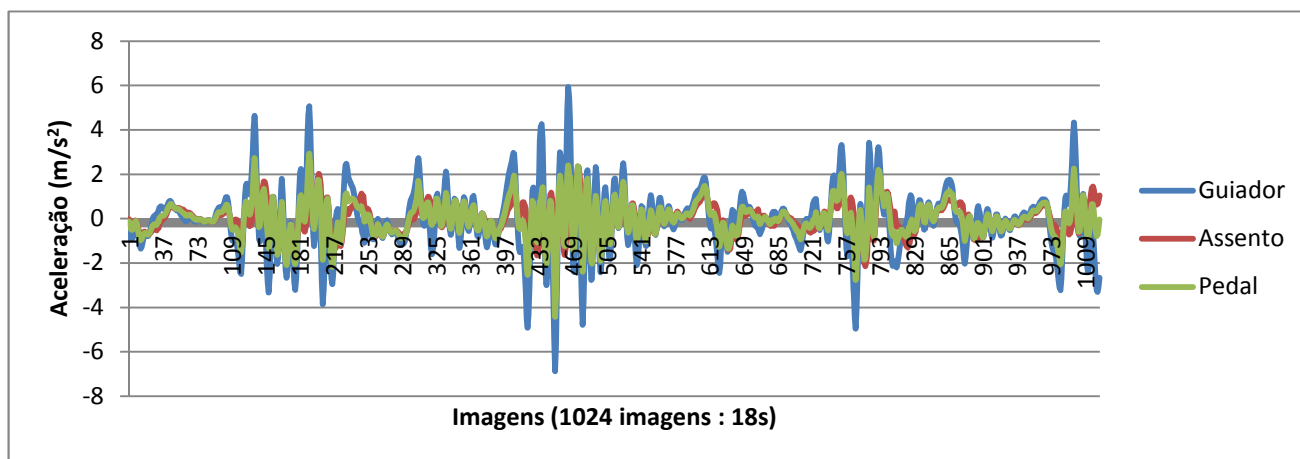


Figura 29 - Acelerações - Bicicleta suspensão dianteira em Classe C

Este gráfico é relativo à aceleração (m/s^2) obtida na bicicleta para os vários pontos de contacto quando se desloca sobre um pavimento que não é muito nem pouco sinuoso, ou seja, é um pavimento intermédio. Nesta situação, na bicicleta de suspensão dianteira, a maior vibração verifica-se no guiador do veículo apresentando picos de aceleração nos $6 m/s^2$. Pode também constatar-se mais uma vez que a vibração obtida no assento e no pedal é semelhante. Neste caso, a aceleração dos vários pontos estudados está praticamente toda contida até valores de $2 m/s^2$.

Tabela 3 - Transmissão de vibração da bicicleta de suspensão dianteira - Classe C

Classe C – Bicicleta de suspensão dianteira			
Ponto de Contacto	Factor Crista	R.M.S (m/s^2)	R.S.S (m/s^2)
Guiador	4,9	1,04E-03	
Assento	4,4	5,54E-04	0,001194
Pedal	5,5	2,07E-04	

Neste conjunto de valores o que se pode observar é que a transmissão de vibração do pedal para o pé do ciclista num pavimento de classe C é cerca de 37% da vibração transmitida através do assento, sendo que esta é pouco mais de metade da vibração sentida pelas mãos no guiador da bicicleta. Torna-se assim a verificar mais uma vez que a vibração no guiador é a mais relevante quando se trata de um a bicicleta de suspensão

dianteira. É assim de destacar o valor de $1,04 \text{ m/s}^2$, o maior valor de vibração sentida pelo ciclista neste estudo.

5.1.1.3 Classe E

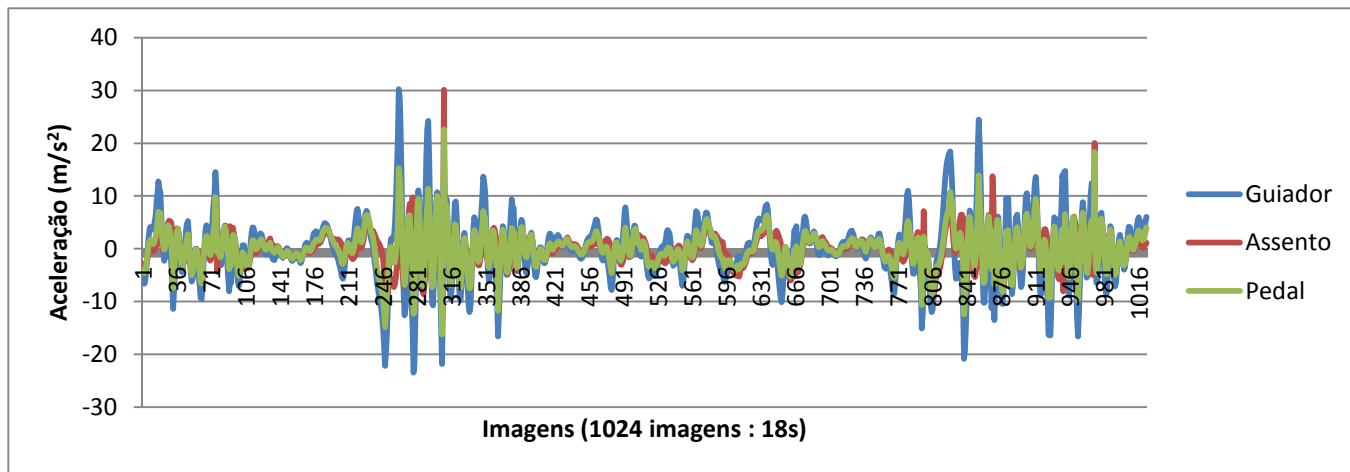


Figura 30 - Acelerações - Bicicleta suspensão dianteira em Classe E

Este é o gráfico representativo da vibração do guidador, assento e do pedal para as várias partes do corpo do ciclista num pavimento sinuoso. Neste caso não é tão expressivo que exista uma maior vibração no guidador visto que existem picos a atingir os 30 m/s^2 tanto nesta parte da bicicleta como no assento. Aqui, os resultados obtidos para os vários pontos de contacto são semelhantes sendo que a maioria dos valores se encontra até aproximadamente 10 m/s^2 .

Tabela 4 - Transmissão de vibração da bicicleta de suspensão dianteira - Classe E

Classe E – Bicicleta de suspensão dianteira			
Ponto de Contacto	Factor Crista	R.M.S (m/s^2)	R.S.S (m/s^2)
Guiador	5	0,00415	
Assento	9,5	0,002278	0,004849
Pedal	5,95	0,001046	

Quando uma bicicleta de suspensão dianteira se desloca sobre um pavimento de classe E, ou seja, muito sinuoso, a vibração transmitida do guidador para a mão do ciclista é cerca de quatro vezes superior à transmissão verificada do pedal para o pé e duas vezes à vibração do assento. No assento, o factor de crista é superior a 6, no entanto comparando com os outros estudos realizados os valores obtidos estão dentro do esperado. Tal como nos estudos anteriores, é de dar destaque mais uma vez ao valor de RMS para a vibração transmitida no guidador, $0,00415 \text{ m/s}^2$.

Nestes três estudos, para uma bicicleta de suspensão dianteira, o que se constatou foi que a vibração na bicicleta tem valores aproximados no assento e no pedal. Por outro lado, no guidador, com mais ou menos expressividade, foi onde se registou valores mais altos que representam uma maior vibração. No entanto, o mais importante é a vibração sentida pelo ciclista e aqui é de destacar a pouca importância da vibração do pedal comparando com os outros dois pontos de contacto. Dos resultados obtidos e apresentados nas tabelas em cima, é de notar que a vibração do guidador para a mão do ciclista é aquela que toma valores de maior destaque, sendo em média duas vezes superior aos valores da vibração transmitida através do assento.

Tendo em conta os valores os valores globais de vibração, e tal como seria de esperar, a vibração aumenta com o aumento da sinuosidade do pavimento, ou seja, o pavimento de classe E é o que apresenta valores mais elevados sendo que ao invés num pavimento liso de Classe A obtém-se valores muito pequenos. Comparando os valores de RSS calculados percebe-se facilmente esse aumento pois esse valor na Classe A representa apenas pouco mais de 5% do valor da Classe E.

5.1.2 Bicicleta de suspensão dianteira e traseira

5.1.2.1 Classe A

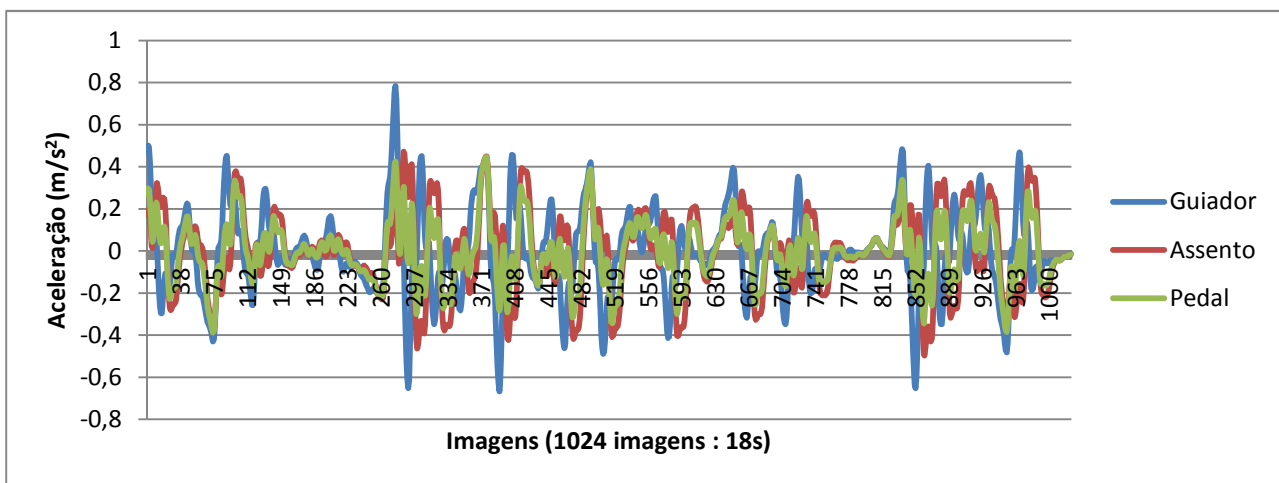


Figura 31 - Acelerações - Bicicleta suspensão total em Classe A

Este gráfico apresenta os resultados obtidos do estudo de uma bicicleta com suspensão traseira e dianteira num pavimento liso, pavimento de classe A. O que se pode verificar é que a vibração da bicicleta nos três pontos de contacto é semelhante sendo que a

vibração no guidador apresenta alguns picos mais elevados, próximos de $0,8\text{m/s}^2$. A maior parte dos valores encontram-se abaixo dos $0,5\text{m/s}^2$.

Tabela 5 - Transmissão de vibração da bicicleta de suspensão total - Classe A

Classe A – Bicicleta de suspensão dianteira e traseira			
Ponto de Contacto	Factor Crista	R.M.S (m/s^2)	R.S.S (m/s^2)
Guiador	3,8	1,85E-04	
Assento	2,6	1,69E-04	0,000253
Pedal	3,0	2,97E-05	

Com esta tabela o que se verifica é que a vibração transmitida através do pedal é insignificante comparada com a vibração nos outros dois pontos, representando menos de 20% dessa vibração. É assim de destacar mais uma vez a pouca importância que a vibração no pedal têm na transmissão para o corpo humano. Quanto aos valores obtidos para o guidador e para o assento, são muito parecidos, $1,85\text{E-}4$ e $1,69\text{E-}4$ respectivamente.

5.1.2.2 Classe C

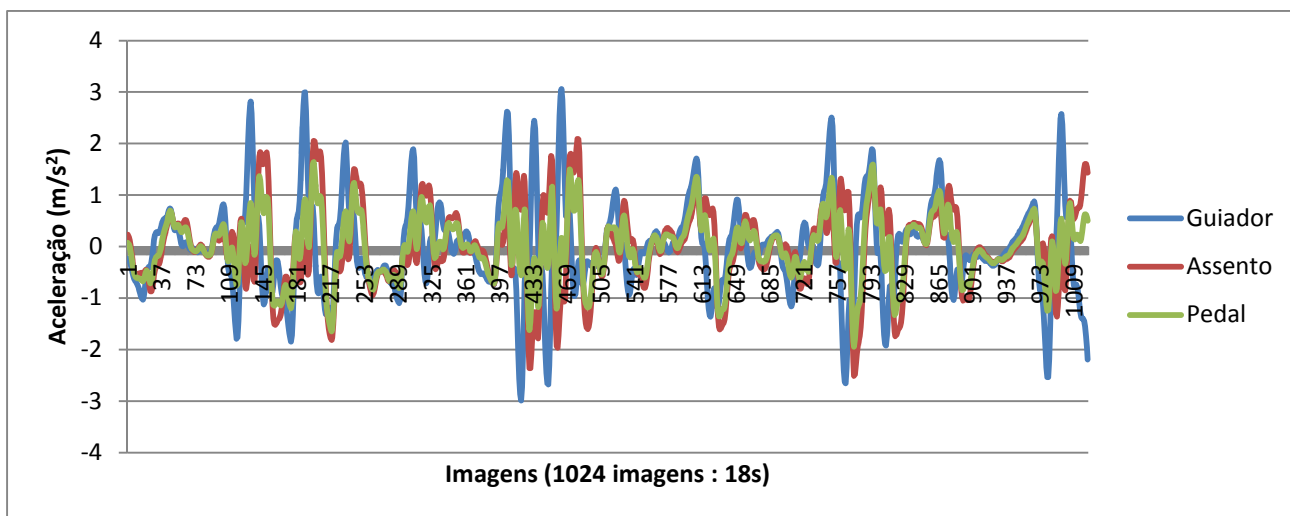


Figura 32 - Acelerações - Bicicleta suspensão total em Classe C

Este é o gráfico que apresenta os valores da aceleração obtida no estudo com uma bicicleta de suspensão traseira e dianteira para um pavimento intermédio, de Classe C. Aqui, o que se verifica é que a vibração no pedal e no assento são idênticas sendo que a vibração obtida no guidador apresenta picos um pouco mais elevados, chegando aos 3m/s^2 . A maioria da vibração está contida até aos 2m/s^2 .

Tabela 6 - Transmissão de vibração da bicicleta de suspensão total - Classe C

Classe C – Bicicleta de suspensão dianteira e traseira			
Ponto de Contacto	Factor Crista	R.M.S (m/s ²)	R.S.S (m/s ²)
Guiador	3,4	8,22E-04	
Assento	3,2	6,78E-04	0,001073
Pedal	3,3	1,23E-04	

Nesta tabela é possível ver que mais uma vez o ponto onde há maior transmissão de vibração é entre o guiador e as mãos do ciclista e ao invés no pedal é onde existe menor transmissão de vibração. A vibração transmitida neste ponto representa 18% da vibração transmitida através do assento e apenas 15% da vibração nas mãos do ciclista. A vibração transmitida do assento representa aproximadamente 82% da vibração mais elevada sentida pelo corpo do ciclista que se situa entre o guiador e as suas mãos.

5.1.2.3 Classe E

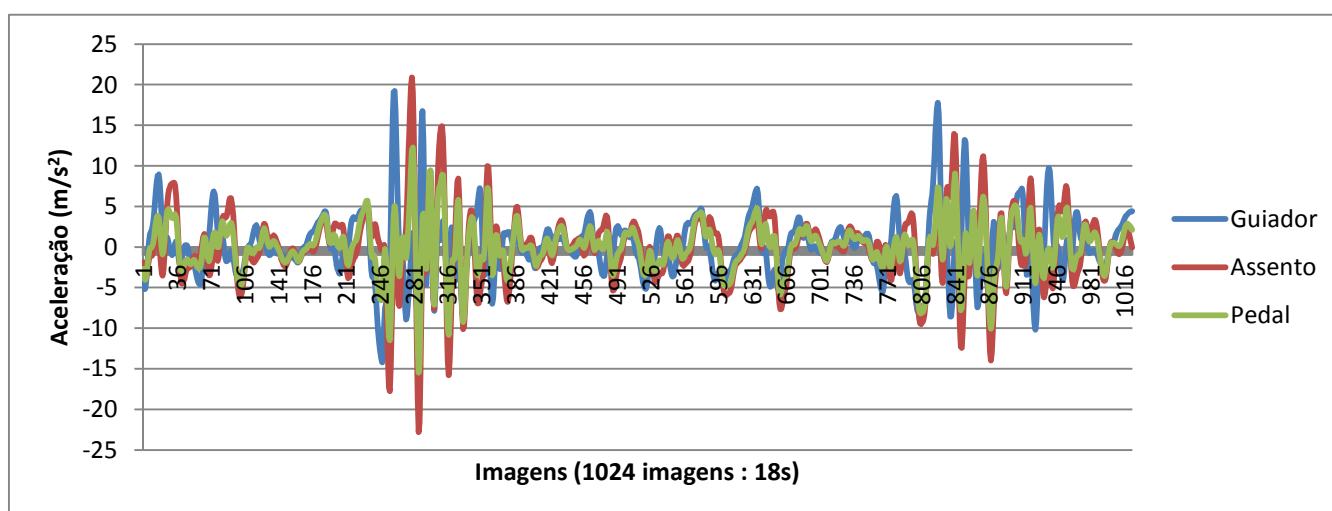


Figura 33 - Acelerações - Bicicleta suspensão Total em Classe E

Este é o gráfico representativo da vibração no guiador, assento e pedal para uma bicicleta de suspensão traseira e dianteira quando se desloca num pavimento muito sinuoso, classe E. Neste gráfico é possível verificar que o ponto que tem menos vibração é o pedal sendo que os picos mais elevados neste caso se verificam no assento, acima dos 20m/s². A maioria da vibração da bicicleta encontra-se abaixo dos 10m/s², existindo apenas alguns picos acima desse valor.

Tabela 7 - Transmissão de vibração da bicicleta de suspensão Total - Classe E

Classe C – Bicicleta de suspensão dianteira e traseira			
Ponto de Contacto	Factor Crista	R.M.S (m/s ²)	R.S.S (m/s ²)
Guiador	4,9	0,0032	
Assento	5,2	0,00311	0,004531
Pedal	5,1	0,0008	

Mais uma vez é de constatar que a vibração que é transmitida do pedal para o pé do ciclista é a que tem menos expressão. Neste caso, a vibração transmitida através do assento e do guiador são bastante semelhantes não havendo por isso uma que se destaque relativamente à outra. O que se nota é que a vibração transmitida através do pedal é cerca de um quarto da vibração transmitida nos outros dois pontos.

5.2 Comparação dos resultados entre os vários pavimentos

O objectivo da comparação entre os resultados obtidos para os vários pavimentos é o de se perceber em cada uma dessas situações qual o tipo de bicicleta (ou a bicicleta de suspensão dianteira ou a bicicleta de suspensão dianteira e traseira) transmite menos vibração ao corpo do ciclista, ou seja, o tipo de bicicleta em que o ciclista se sente mais confortável.

Os resultados que foram obtidos para cada classe de pavimento serão comparados para cada um dos pontos de contacto dos dois tipos de bicicleta, ou seja, por exemplo, para o pavimento de classe A serão apresentados os resultados no guiador, assento e pedal para a bicicleta de suspensão dianteira e a bicicleta que tem também suspensão traseira.

Para cada classe de pavimento, será interessante também analisar os resultados globais através do parâmetro RSS para verificar a situação de conforto do ciclista.

5.2.1 Resultados obtidos para Pavimento Classe A

5.2.1.1 Guiador

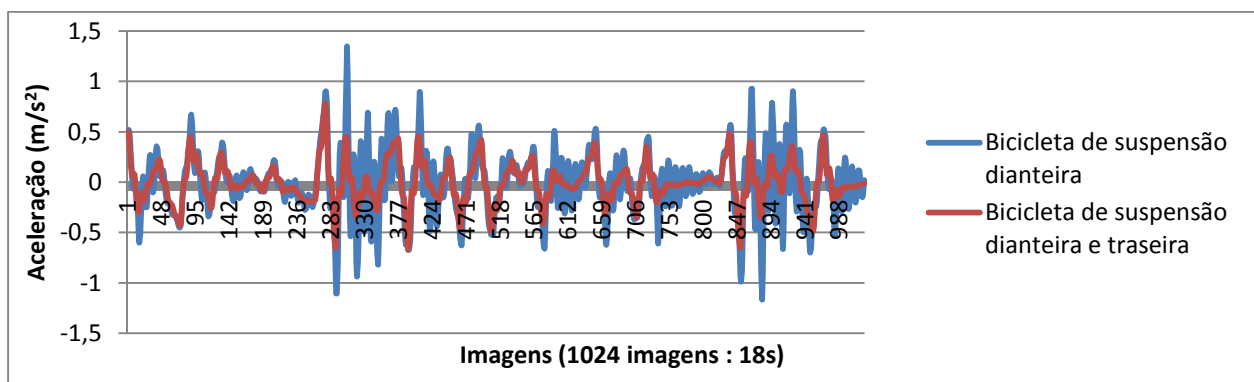


Figura 34 - Vibração no Guiador - Classe A

Este gráfico apresenta uma comparação entre a aceleração obtida no guiador, tanto na bicicleta de suspensão dianteira como na bicicleta de suspensão total. Através dele, é possível ver que o veículo que possui duas suspensões tem muito menos vibrações neste ponto de contacto que o veículo de apenas umas suspensão. Como é possível ver pelo gráfico, a primeira bicicleta tem vários picos acima dos $0,5\text{m/s}^2$ enquanto que a outra apenas possui um ou outro valor acima dessa referência.

Dado que o procedimento para o cálculo dos valores de vibração que é efectivamente transmitida do veículo para o corpo do ciclista é exactamente o mesmo para os dois tipos de bicicleta é de concluir que no guiador, para um pavimento liso, a adição de uma suspensão traseira trouxe benefícios a nível de conforto.

Tabela 8 - Vibração no guiador - Classe A

Pavimento Classe A - Guiador	
Tipo de Bicicleta	RMS (m/s^2)
Bicicleta de suspensão dianteira	2,32E-04
Bicicleta de suspensão total	1,85E-04

Comparando os dois valores observa-se que com a colocação da suspensão traseira reduziu-se a transmissão de vibração do guiador para as mãos em cerca de 20%.

5.2.1.2 Assento

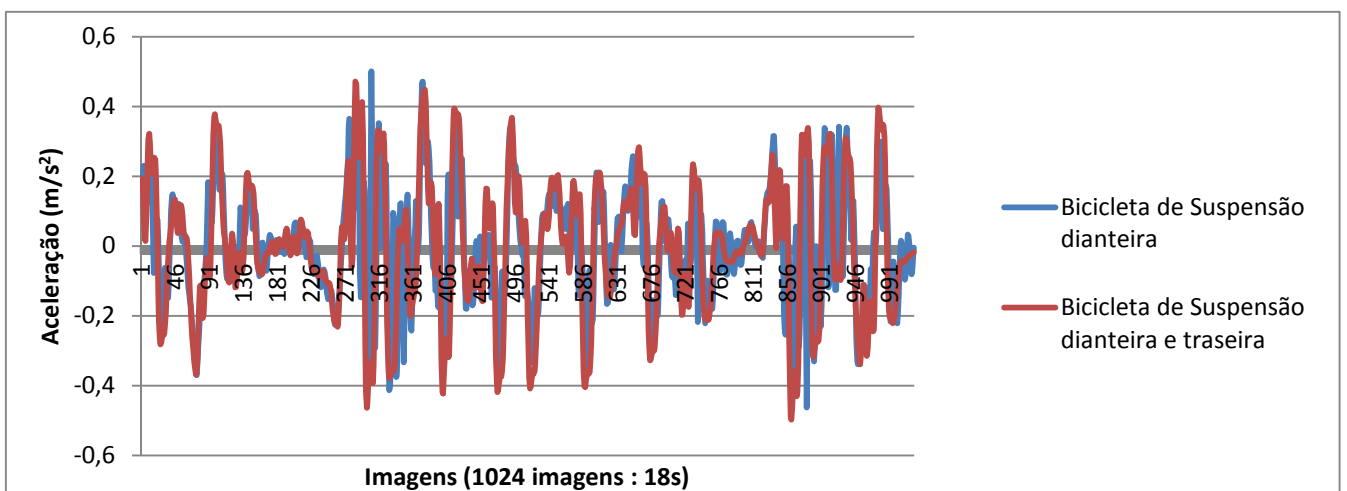


Figura 35 - Vibração no Assento - Classe A

No caso do assento, já não se podem tirar as mesmas conclusões que do caso do guiador, visto que os resultados obtidos mostram que com a colocação de uma suspensão traseira a vibração não teve uma redução significativa até antes pelo contrário, a bicicleta de suspensão total parece ter picos mais elevados que o outro tipo de bicicleta. Para perceber os verdadeiros resultados dos dois tipos de bicicleta é preciso calcular os valores de RMS para a vibração transmitida através do assento para o corpo do ciclista.

Tabela 9 - Vibração no Assento - Classe A

Pavimento Classe A - Assento	
Tipo de Bicicleta	RMS (m/s ²)
Bicicleta de suspensão dianteira	1,33E-04
Bicicleta de suspensão total	1,69E-04

O que se pode ver é que aumentou a transmissão de vibração da bicicleta para o ciclista, na zona do assento com a colocação de uma suspensão traseira. Esse aumento foi na ordem dos 20% aumentando assim o parâmetro desconforto no ciclista nessa parte específica do corpo.

5.2.1.3 Pedal

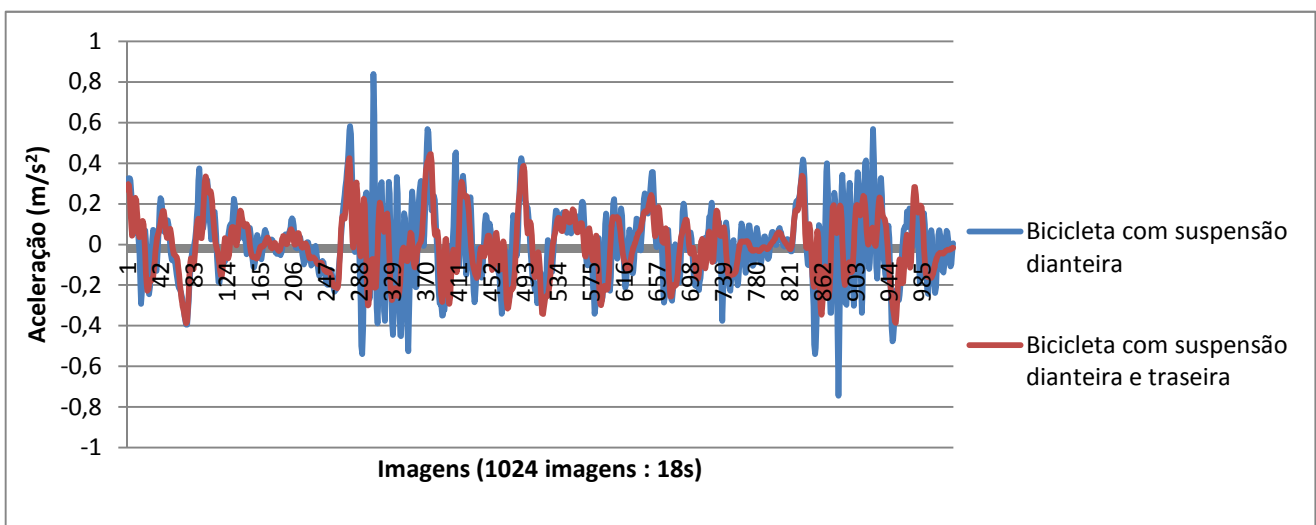


Figura 36 - Vibração no Pedal - Classe A

Neste gráfico estão apresentados os resultados da aceleração obtida no pedal dos dois tipos de bicicleta. Tal como no guiador, o que se pode perceber é que com a colocação de uma suspensão traseira existiu uma expressiva redução na vibração da bicicleta. No gráfico é possível ver picos de aceleração da bicicleta com suspensão dianteira acima dos $0,6 \text{ m/s}^2$ enquanto que o outro tipo de bicicleta tem praticamente todos os picos abaixo do valor $0,4 \text{ m/s}^2$. Para melhor se perceber os valores da redução de vibração veja-se os valores de RMS para cada um dos casos.

Tabela 10 - Vibração no Pedal - Classe A

Pavimento Classe A - Pedal	
Tipo de Bicicleta	RMS (m/s^2)
Bicicleta de suspensão dianteira	4,71E-05
Bicicleta de suspensão total	2,97E-05

No caso do pedal, pode ver-se que realmente existiu uma grande redução de vibração sentida pelo corpo do ciclista. É importante lembrar que o valor RMS apresentado nesta tabela é o valor sentido pelo ciclista e não o valor de RMS da aceleração nos vários pontos da bicicleta.

Comparando os dois valores de RMS da tabela é possível avaliar a redução em mais de 35%.

Tabela 11 - Valores de RMS nos vários pontos de contacto - Classe A

Bicicleta	RMS (m/s^2)			RSS (m/s^2)
	Guiador	Assento	Pedal	
Bicicleta de suspensão dianteira	2,32E-04	1,33E-04	4,71E-05	0,000272
Bicicleta de suspensão total	1,85E-04	1,69E-04	2,97E-05	0,000253

Nesta tabela é possível ver uma comparação entre os vários valores de RMS da vibração transmitida dos dois tipos de bicicleta para o corpo do ciclista nos três pontos de contacto, para um pavimento de classe A. Resumindo o que foi descrito em cima, ao

colocar uma suspensão traseira na bicicleta, existiu uma redução da vibração transmitida tanto do guidador para as mãos como do pedal para os pés do ciclista. Por outro lado com a colocação dessa mesma suspensão provocou um aumento de vibração na zona do assento.

O mais importante na análise de conforto de um ciclista será fazer uma avaliação global da vibração transmitida da bicicleta para o corpo do ciclista. Isso é possível através do parâmetro RSS. Calculando esse valor para os dois tipos de bicicleta o que se observa é que colocando a suspensão traseira o valor cai de $2,72E-4$ m/s^2 para $2,53E-4$ o que representa uma redução na vibração transmitida na ordem dos 7%. O facto de ter existido uma redução leva a concluir que numa bicicleta de suspensão dianteira e traseira o ciclista sente-se mais confortável que numa bicicleta que tenha apenas suspensão dianteira.

É importante voltar a referir que estes estudos foram realizados para um pavimento classe A, ou seja um pavimento pouco sinuoso ou mesmo liso e que portanto a vibração a que a bicicleta está sujeita é muito pequena. É assim de assinalar que as reduções de vibração provocadas pela adição de uma suspensão traseira não devem ter grande destaque.

5.2.2 Resultados obtidos para Pavimento Classe C

5.2.2.1 Guiador

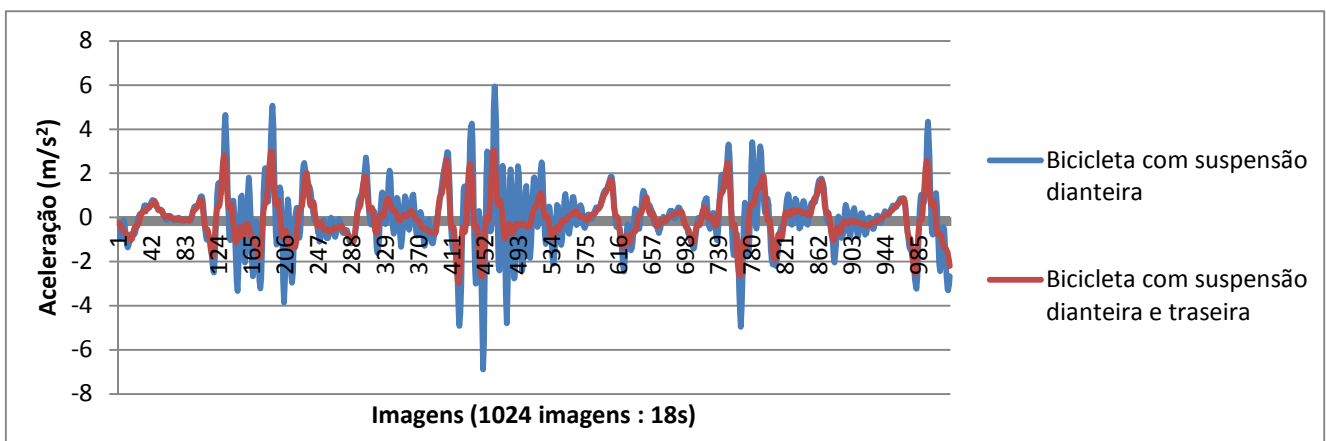


Figura 37 - Vibração no Guiador - Classe C

Neste gráfico podem ver-se os resultados das acelerações obtidas no guidador das bicicletas quando se deslocam sobre um pavimento de Classe C, ou seja um pavimento que não sendo liso também não é muito sinuoso. O que se observa nesta comparação de

resultados é que existe uma significativa redução de vibração no guidador quando se troca uma bicicleta de suspensão dianteira por uma que tenha os dois tipos de suspensão. No gráfico é possível ver que a bicicleta com uma só suspensão tem vários picos acima dos 4m/s^2 enquanto que o veículo com ambas as suspensões tem os valores de aceleração até 3m/s^2 . Para se verificar quão expressiva é a redução de valores é importante observar os valores de RMS da vibração transmitida das bicicletas para o corpo do ciclista.

Tabela 12- Vibração no Guiador - Classe C

Pavimento Classe C - Guiador	
Tipo de Bicicleta	RMS (m/s^2)
Bicicleta de suspensão dianteira	1,04E-03
Bicicleta de suspensão total	8,22E-04

Através dos valores de RMS calculados ve-se que existiu uma redução significativa na vibração transmitida do guidador para as mãos do ciclista colocando uma suspensão traseira. Através dos números obtidos nota-se que essa redução foi na ordem dos 20% o que para um pavimento que não é liso já começa a ser significativo.

5.2.2.2 Assento

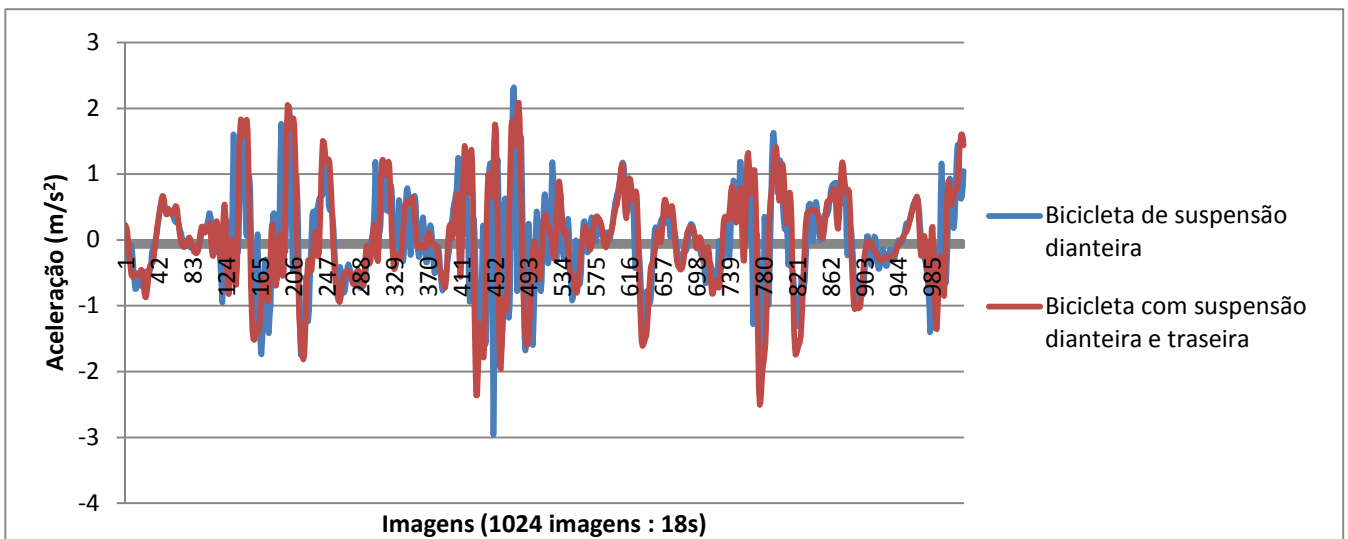


Figura 38 - Vibração no Assento - Classe C

Este gráfico apresenta os resultados da aceleração verificada no assento quando as bicicletas em estudo se deslocam sobre um pavimento de Classe C. Neste caso o que se pode ver é que tal como aconteceu no pavimento classe A a bicicleta de suspensão traseira, excepto numa ou noutra situação, tem picos mais elevados.

Tabela 13 - Vibração no Assento - Classe C

Pavimento Classe C - Guiador	
Tipo de Bicicleta	RMS (m/s ²)
Bicicleta de suspensão dianteira	5,54E-04
Bicicleta de suspensão total	6,78E-04

Através dos valores apresentados na tabela é possível confirmar que o assento da bicicleta de suspensão dianteira e traseira tem maior vibração que o assento da bicicleta que tem apenas uma suspensão. O que se nota é que com a colocação de mais uma suspensão a vibração aumentou no assento em cerca de 22%.

5.2.2.3 Pedal

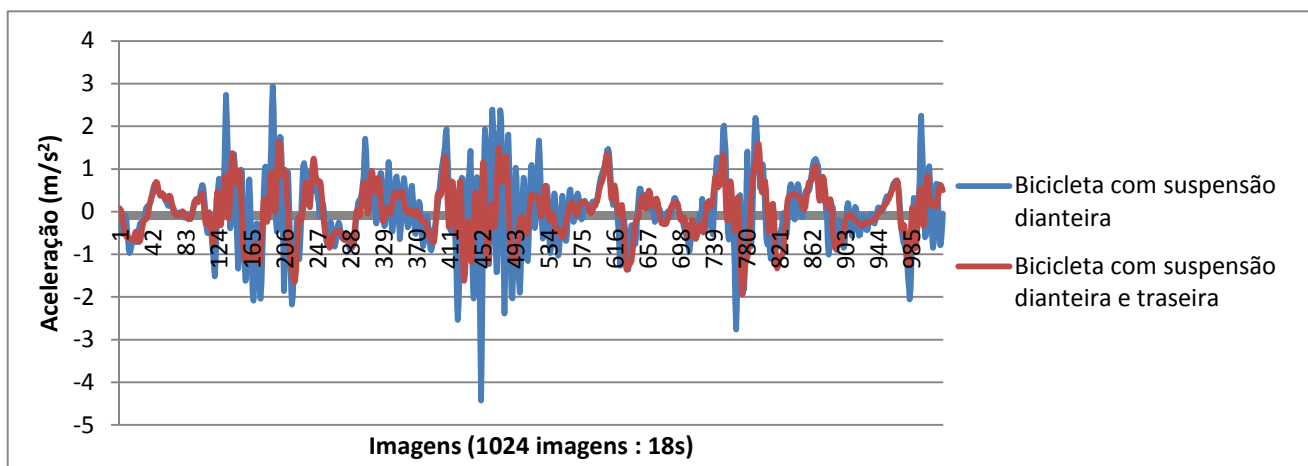


Figura 39 - Vibração no Pedal - Classe C

Este gráfico mostra claramente que, num pavimento de classe C, uma bicicleta com uma suspensão dianteira e outra traseira está sujeita a muito menos vibração no pedal.

Enquanto uma bicicleta com apenas uma suspensão tem vários picos acima dos 2m/s^2 , uma bicicleta com duas suspensões tem todos os seus valores abaixo dessa marca.

Tabela 14 - Vibração no Pedal - Classe C

Pavimento Classe C - Guiador	
Tipo de Bicicleta	RMS (m/s^2)
Bicicleta de suspensão dianteira	2,07E-04
Bicicleta de suspensão total	1,23E-04

Através desta tabela o que se nota é que quando se aplicou uma suspensão traseira existiu uma redução de $0,84\text{E}-04 \text{ m/s}^2$ o que corresponde a uma redução de vibração na ordem dos 40%, ou seja, quando um ciclista se desloca sobre um pavimento de classe C, um pavimento que não é liso mas também não é muito sinuoso, se em vez de utilizar uma bicicleta de uma só suspensão utilizar uma bicicleta de suspensão dianteira e traseira está sujeito a uma vibração 40% inferior no pedal.

Tabela 15 - Valores de RMS nos vários pontos de contacto - Classe C

Bicicleta	RMS (m/s^2)			RSS (m/s^2)
	Guiador	Assento	Pedal	
Bicicleta de suspensão dianteira	1,04E-03	5,54E-04	2,07E-04	0,001194
Bicicleta de suspensão total	6,78E-04	6,78E-04	1,23E-04	0,001073

Olhando para esta tabela e fazendo um resumo dos resultados para o pavimento de classe C, o que se pode dizer é que no guiador e no pedal, ao aplicar uma suspensão traseira existiu uma significativa redução da vibração transmitida para o ciclista. De referir ainda, que nestes dois pontos de contacto, a redução de vibração conseguida com

a colocação de uma suspensão traseira foi ainda superior no pavimento classe C comparando com o pavimento classe A.

Por outro lado, é de assinalar que no assento voltou a verificar-se um aumento de vibração tal como aconteceu no pavimento classe A.

Comparando os valores globais de vibração transmitida da bicicleta para o ciclista, o que se nota é que a bicicleta com suspensão dianteira e traseira apresenta valores inferiores à bicicleta apenas com suspensão dianteira. Para um pavimento de classe C, com a colocação de mais uma mola e um amortecedor consegue-se uma redução de vibração de aproximadamente 10%. Esta redução é devida à redução de vibração transmitida através do guiador e através do pedal da bicicleta. É de concluir assim que com a bicicleta de duas suspensões tem melhores níveis de conforto comparativamente com o outro tipo de bicicleta.

5.2.3 Resultados obtidos para Pavimento Classe E

5.2.3.1 Guiador

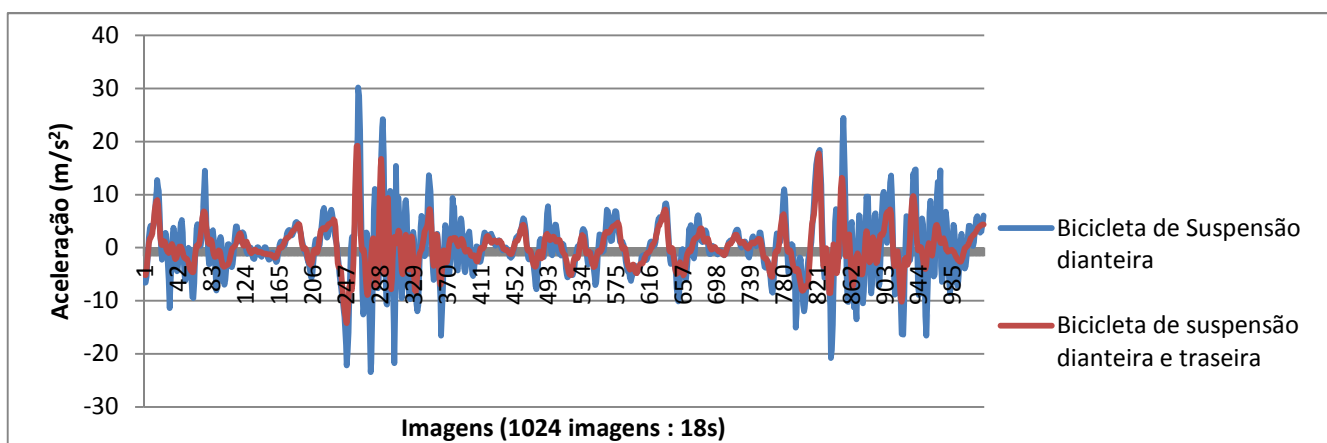


Figura 40 - Vibração no Guiador - Classe E

Os resultados mostrados neste gráfico são as acelerações no guiador nos dois tipos de bicicleta que estão em estudo, quando este veículo se desloca sobre um pavimento muito sinuoso, um pavimento de Classe E. O que se pode ver é que numa bicicleta de suspensão total, o guiador da bicicleta está sujeito a muito menos vibração comparativamente com uma bicicleta de suspensão dianteira. No gráfico podem ver-se vários picos de aceleração acima dos 15m/s^2 quando se trata de um veículo de uma só suspensão, enquanto que os valores obtidos para o outro tipo de bicicleta estão praticamente todos abaixo dessa marca. Para melhor se a importância da diferença

destes valores veja-se os valores de RMS cálculos, relativos à transmissão de vibração para o corpo humano.

Tabela 16 - Vibração no guiador - Classe E

Pavimento Classe E - Guiador	
Tipo de Bicicleta	RMS (m/s ²)
Bicicleta de suspensão dianteira	0,00415
Bicicleta de suspensão total	0,0032

Nesta tabela é possível a diferença de vibração transmitida de um guiador para as mãos do ciclista enquanto a bicicleta se desloca num pavimento sinuoso. Uma bicicleta de suspensão dianteira apresenta um valor de RMS de 0.00415m/s² enquanto uma bicicleta com duas suspensões tem de RMS 0.0032m/s², o que se traduziu numa redução de aproximadamente 23%.

5.2.3.2 Assento

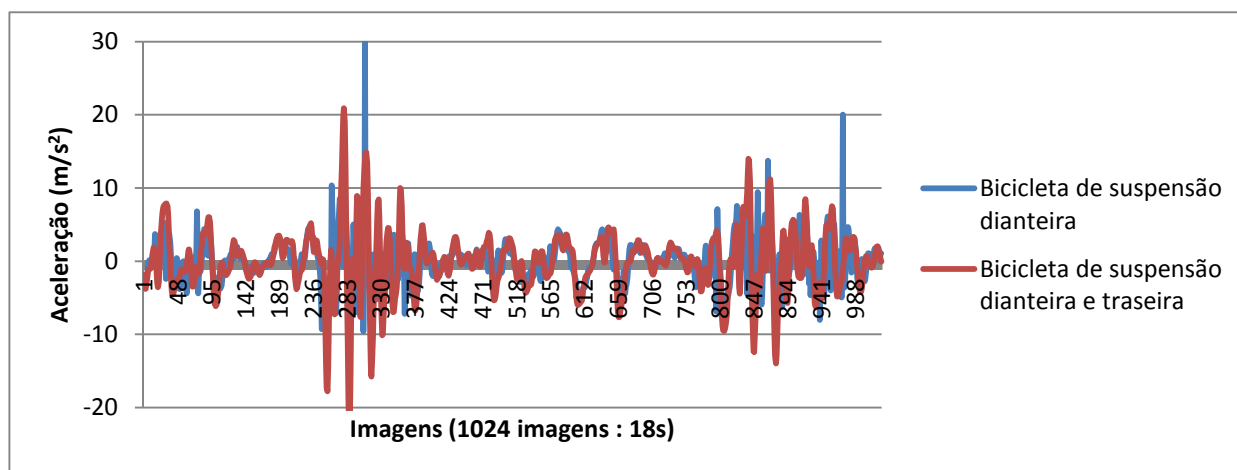


Figura 41 - Vibração no Assento - Classe E

Este é o gráfico que faz a comparação entre a vibração no assento de uma bicicleta de suspensão dianteira e uma bicicleta com suspensão total. O que se vê é que em boa parte do tempo, a bicicleta de duas suspensões tem picos de aceleração mais altos que o outro tipo de bicicleta. Tal como nos outros dois tipos de pavimento, classe A e classe C, com a colocação de mais uma suspensão, aumentou a vibração no assento.

Tabela 17 - Vibração no Assento - Classe E

Pavimento Classe E - Assento	
Tipo de Bicicleta	RMS (m/s ²)
Bicicleta de suspensão dianteira	0,002278
Bicicleta de suspensão total	0,00311

Os valores RMS de aceleração da vibração transmitida para o corpo do ciclista indicam que uma bicicleta com uma suspensão à frente e outra a trás provoca mais desconforto no ciclista do que uma bicicleta de uma só suspensão. Através dos valores em cima apresentados o que se pode ver é que esse aumento é na ordem dos 27%.

5.2.3.3 Pedal

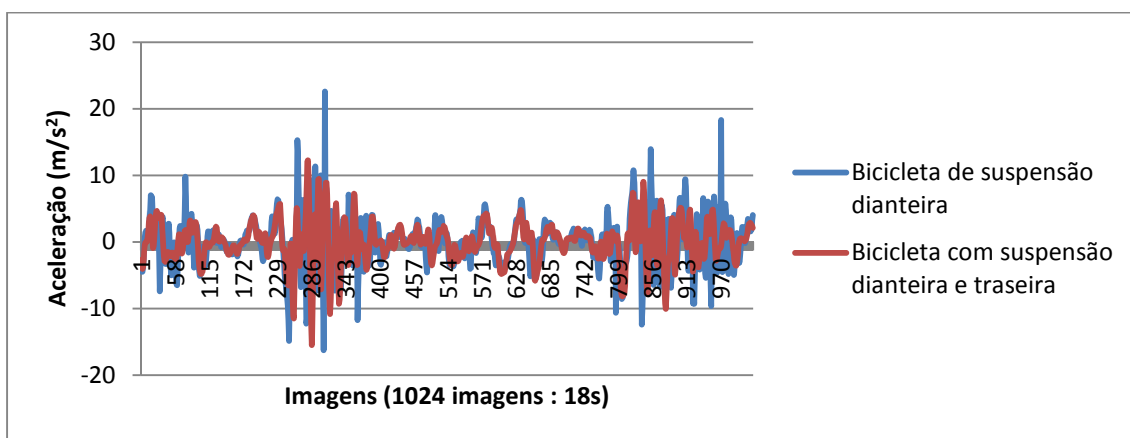


Figura 42 - Vibração no Pedal - Classe E

Este gráfico mostra que quando uma bicicleta de suspensão dianteira se desloca sobre um pavimento de classe E, está sujeito a maiores valores de vibração no pedal do que uma bicicleta de suspensão total. Na imagem é possível ver que o primeiro tipo de bicicleta tem vários picos de aceleração acima dos 13m/s², enquanto que o outro veículo salvo uma ou outra exceção tem os valores de aceleração todos abaixo dessa marca.

Tabela 18 - Vibração no Pedal - Classe E

Pavimento Classe E - Pedal	
Tipo de Bicicleta	RMS (m/s ²)
Bicicleta de suspensão dianteira	0,001046
Bicicleta de suspensão total	0,0008

Através desta tabela é possível ver que efectivamente a vibração transmitida por um pedal de uma bicicleta com suspensão traseira é menos do que a vibração transmitida por um pedal de uma bicicleta com suspensão apenas dianteira. Pelos números apresentados é possível constatar que existiu uma redução de aproximadamente 24%.

Tabela 19 - Valores de RMS nos vários pontos de contacto - Classe E

Pavimento Classe C				
Bicicleta	RMS (m/s ²)			RSS (m/s ²)
	Guiador	Assento	Pedal	
Bicicleta de suspensão dianteira	0,00415	0,002278	0,001046	0,001194
Bicicleta de suspensão total	0,0032	0,00311	0,0008	0,001073

Esta tabela faz um resumo dos valores de RMS aceleração obtidos para um pavimento sinuoso, de classe C, nos dois tipos de bicicleta em estudo. Tal como nos pavimentos anteriores o que se pode ver é que existem dois pontos de contacto onde a bicicleta com mais uma suspensão apresenta valores de vibração mais baixo. Esses pontos são o guiador e o pedal e apresentam uma redução de 23% e 24% respectivamente. Quanto ao outro ponto de contacto, o assento, verificou-se que mais uma vez a vibração aumentou com a colocação de uma suspensão traseira. Esse aumento foi na ordem dos 27%.

No entanto o que importa aqui comparar são os valores globais de aceleração a que o ciclista está sujeito. Comparando os dois valores de RSS a conclusão a que se chega é que num pavimento de classe E, uma bicicleta de suspensão traseira e dianteira tem um nível de conforto mais elevado que uma bicicleta com apenas umas suspensão. A

transmissão de vibração (valor global) de uma bicicleta com duas suspensões é 10% mais baixa comparativamente com a outra bicicleta em estudo.

Tabela 20 - Comparação entre os vários valores obtidos

Pavimento	Ponto de Contacto	Bicicleta com suspensão	Bicicleta com suspensão
		dianteira RMS (m/s ²)	total RMS (m/s ²)
Classe A	Guiador	2,32E-04	1,85E-04
	Assento	1,33E-04	1,69E-04
	Pedal	4,71E-05	2,97E-05
Classe C	Guiador	1,04E-03	8,22E-04
	Assento	5,54E-04	6,78E-04
	Pedal	2,07E-04	1,23E-04
Classe E	Guiador	0,00415	0,0032
	Assento	0,002278	0,00311
	Pedal	0,001046	0,0008

Nos estudos realizados verificou-se que numa bicicleta os valores mais altos de vibração estão no guiador da bicicleta, quer tenha uma suspensão ou duas. No entanto, viu-se que quando a bicicleta de suspensão dianteira e traseira, os valores da vibração do assento aproximam-se dos valores do guiador. Por outro lado os valores mais baixos de vibração registaram-se sempre no pedal.

Tabela 21 - Valores globais de vibração nos vários pavimentos

Pavimento	Bicicleta com suspensão	Bicicleta com suspensão
	dianteira RSS (m/s ²)	total RSS (m/s ²)
Classe A	0,000272	0,000253
Classe C	0,001194	0,001073
Classe E	0,004849	0,004531

O mais importante de todos os resultados obtidos é que em bicicletas de suspensão total o nível de conforto do ciclista é superior ao nível de conforto de uma bicicleta de apenas

uma suspensão, não estando contudo numa zona de desconforto segundo os limites definidos pela norma, tal como se pode ver na tabela a seguir.

Tabela 22 - Limites de conforto aproximados

Estado	Valores de RMS	Estado
Extremamente desconfortável	3.15	Muito desconfortável
	2.5	
	2.0	
Desconfortável	1.6	
	1.25	
	1.0	
Muito pouco desconfortável	0.8	Pouco desconfortável
	0.63	
	0.5	
	0.4	
	0.315	Confortável
	0.25	

Esta tabela apresenta os limites de conforto aproximados. Comparando os resultados obtidos com os valores presentes nesta tabela é possível verificar que para os estudos realizados o ciclista encontra-se sempre dentro de uma zona de conforto. De referir ainda que nos estudos realizados não se teve em conta a duração da exposição do ciclista a vibrações.

Tabela 23 - Picos de Aceleração

Pavimento	Ponto de Contacto	Pico (m/s ²)	
		Bicicleta de suspensão dianteira	Bicicleta de suspensão total
A	Guiador	1,34	0,78
	Assento	0,5	0,49
	Pedal	0,83	0,44
B	Guiador	6,87	3,05
	Assento	2,95	2,51
	Pedal	4,42	1,94
C	Guiador	30,2	19,21
	Assento	30,06	22,72
	Pedal	22,58	15,47

Uma outra forma de olhar para os resultados obtidos será através dos picos de aceleração obtidos em cada ponto de contacto entre a bicicleta e o ciclista. Na tabela atrás apresentada uma conclusão interessante que se pode tirar é que numa bicicleta de suspensão total os picos são muito mais baixos que os picos verificados na vibração da bicicleta de suspensão dianteira. Esta diferença é muito significativa quando se trata de pavimentos muito rugosos, existindo mesmo diferenças superiores a 10m/s^2 . Estes picos de aceleração podem ser interpretados como sendo impactos que a bicicleta sofre quando se desloca sobre os pavimentos. Estes impactos, além do desconforto natural, podem ainda provocar lesões graves a vários níveis no ciclista. Assim, e como se pode ver na tabela acima apresentada, a bicicleta de suspensão dianteira e traseira traz muitos benefícios no que a esses impactos diz respeito, sendo que quanto mais irregular for o pavimento mais eficaz é este tipo de bicicleta. Este resultado faz todo o sentido porque a bicicleta de suspensão total é um tipo de bicicleta que se adapta às irregularidades do terreno ao invés da bicicleta de suspensão dianteira que é mais rígida, logo está mais sujeita a impactos e daí aparecerem grandes picos de vibração.

6. CONCLUSÃO

A bicicleta é um meio de transporte muito utilizado nos dias que correm. No entanto, este veículo está sujeito a determinadas vibrações que podem ter consequências no corpo do ciclista, nomeadamente a nível de conforto. Assim, modelaram-se dois tipos de bicicletas diferentes, uma com suspensão parcial (ou suspensão dianteira) e outra com suspensão total (ou suspensão dianteira e traseira), e um corpo que representasse o corpo do ciclista. Com estes modelos, e criando perfis de estrada aleatórios (um mais sinuoso, outro liso e outro ainda intermédio a estes dois), analisaram-se as vibrações transmitidas em três pontos de contacto do veículo com o ciclista: o guiador, o assento e o pedal.

Com estes estudos verificou-se que o ponto de contacto para ambos os tipos de bicicleta que mais vibração transmite ao ciclista é o guiador e que por outro lado, o pé é a zona do corpo do ciclista que é menos sensível a essa transmissão. Por outro lado, constatou-se que com a colocação de uma suspensão traseira, a nível global, o ciclista fica sujeito a menos vibração sobretudo devido à redução de transmissão através do guiador e do pedal.

Por fim a conclusão mais importante a reter foi que tanto para a bicicleta de suspensão dianteira como para a bicicleta de suspensão total os níveis de conforto estão abaixo dos limites definidos em normas.

Ainda assim é de referir que neste trabalho muitos factores podiam trazer alteração dos resultados como estudando a influência da posição do tronco, o ângulo que os braços fazem com o guiador ou a altura do assento sendo esses os principais pontos que se podiam melhorar na análise de conforto do ciclista.

7. REFERÊNCIAS

- [1] – Valuing the benefits of cycling, A report so Cycling England; URL: <http://www.dft.gov.uk/cyclingengland/site/wp-content/uploads/2008/08/valuing-the-benefits-of-cycling-full.pdf> (Acesso: 20/02/2011)
- [2] - DINGWELL, JB ; JOUBERT, JE ; DIEFENTHAELER, F. ; TRINITY, JD . Changes in muscle activity and kinematics of highly trained cyclists during fatigue. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 55, 2666-2674, 2008
- [3] - CARPES, FP; DAGNESE, F ; KLEINPAUL, JF ; MARTINS, EA ; MOTA, CB. Bicycle saddle pressure: effects of trunk position and saddle design on healthy subjects. Urologia Internationalis, 82, 8-11, 2009.
- [4] - CARPES, FP ; DAGNESE, F ; KLEINPAUL, JF ; MARTINS, EA ; MOTA, CB . Effects of workload on seat pressure while cycling with two different saddles. The Journal of Sexual Medicine, 2009.
- [5] - BINI, RR; TAMBORINDEGUY, F. Does saddle height affect patellofemoral and tibiofemoral forces during bicycling for rehabilitation? Journal of Bodywork and Movement Therapies, 2009
- [6] – SAVIONEK D. Medição e avaliação à exposição humana à vibração transmitida ao sistema mão-braço durante a actividade ciclistica. 2010. 22f. Monografia (Trabalho de conclusão do curso de engenharia mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.
- [7] - MARCU, FL.,LAZAR, L.,POP, P.A.,UNGUR, P., The Limits of using mechanical vibrations in human pathology, Fascicle of Management and Technological Engineering, Volume VII (XVII), 2008
- [8] - G.E. Conway, J.L. Szalma, B.M. Saxton., J.M. Ross, and P.A. Hancock, 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
- [9] – DRUGA C, BARBU D, LACHE S, Vibrations and the human body, Fascicle of Management and Technological Engineering, Volume IV, Brasov, 2007
- [10] ABERCROMBY, A. F. J., W. E. AMONETTE, C. S. LAYNE, B. K. MCFARLIN, M. R. HINMAN, and W. H. PALOSKI. Vibration Exposure and Biodynamic Responses during Whole-Body Vibration Training. Med. Sci. Sports Exerc., Vol. 39, No. 10, pp. 1794–1800, 2007

- [11] - Whole Body Vibration Exposure to Train Passenger, American Journal of Applied Sciences 7 (3): 352-359, 2010
- [12] – GRIFFIN, M.J. (2004) Handbook of human vibration, London, Elsevier.
- [13] – YOSHIMURA T., NAKAI K., TAMAOKI G., Multi-body Dynamics Modelling of Seated Human Body under Exposure to Whole-Body Vibration, Industrial Health 2005, 43, 441–447, 2005
- [14] – KRODKIEWSKI, J.M., Mechanical Vibration, Unit 2, 436-431 Mechanics, The University of Melbourn, 2008
- [15] - PEQUINI, Suzi Mariño. Ergonomia aplicada ao design de produtos: um estudo de caso sobre o design de bicicletas, Tese de doutoramento, Universidade de São Paulo, Brasil, 2005
- [16] – ISO 2631:2003 - Mechanical vibration and shock -- Evaluation of human exposure to whole-body vibration
- [17] – Bicicletas referência para modelação; URL: <http://www.mscbikes.com/home.php> (Acesso: 27/03/2011)
- [18] – POGORELSKI, J., LARANJA, R., Medição de coeficientes de amortecimento de amortecedores de automóveis e motocicletas, Brasil.
- [19] – Rill, G. Vehicle dynamics, Hochschule Regensburgs, Março 2009
- [20] – ISO 8606:1995 – Mechanical Vibration – road surface profiles

ANEXO I

Dados e procedimento para o cálculo
da transmissão de vibração

ANEXO I.1 – Pesos para o cálculo da transmissão de vibração

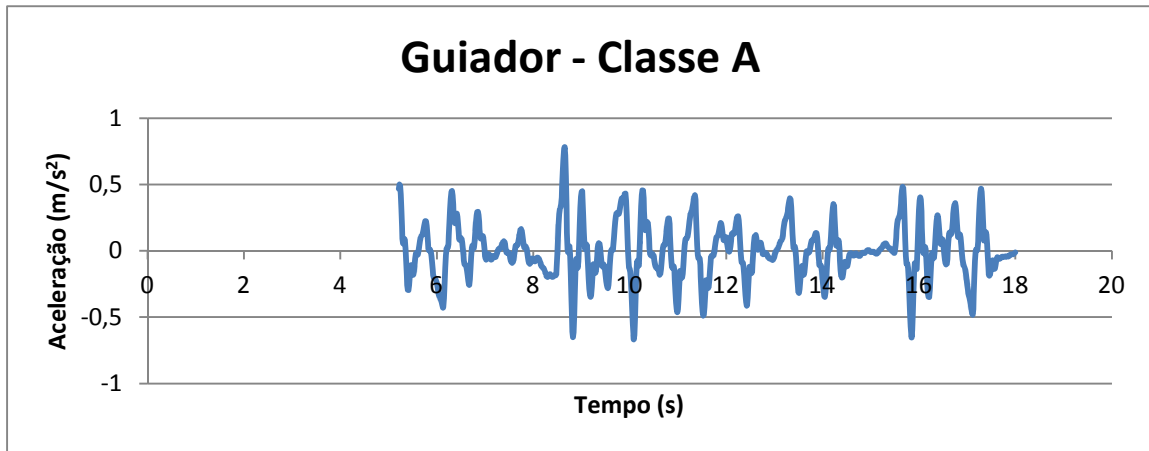
Input	Axis	Frequency weighting	Axis multiplying factor	Weighting. $W(f)$
Seat	x	W_d	1.00	$0.5 < f < 2.0$ $W(f) = 1.00$
				$2.0 < f < 80.0$ $W(f) = 2.0/f$
	y	W_d	1.00	$0.5 < f < 2.0$ $W(f) = 1.00$
				$2.0 < f < 80.0$ $W(f) = 2.0/f$
	z	W_b	1.00	$0.5 < f < 2.0$ $W(f) = 0.4$
				$2.0 < f < 5.0$ $W(f) = f/5.00$
				$5.0 < f < 16.0$ $W(f) = 1.00$
$16.0 < f < 80.0$ $W(f) = 16.0/f$				
r_x	W_c	0.63	$0.5 < f < 1.0$ $W(f) = 0.63$	
r_y	W_c	0.40	$1.0 < f < 20.0$ $W(f) = 0.63/f$	
r_z	W_c	0.20	$0.5 < f < 1.0$ $W(f) = 0.4$	
			$1.0 < f < 20.0$ $W(f) = 0.4/f$	
Back	x	W_c	0.80	$0.5 < f < 8.0$ $W(f) = 0.8$
				$8.0 < f < 80.0$ $W(f) = 6.4/f$
	y	W_d	0.50	$0.5 < f < 2.0$ $W(f) = 0.5$
			$2.0 < f < 80.0$ $W(f) = 1.0/f$	
	z	W_d	0.40	$0.5 < f < 2.0$ $W(f) = 0.4$
			$2.0 < f < 80.0$ $W(f) = 0.8/f$	
Feet	x and y	W_b	0.25	$0.5 < f < 2.0$ $W(f) = 0.1$
				$2.0 < f < 5.0$ $W(f) = f/20.0$
				$5.0 < f < 16.0$ $W(f) = 0.25$
				$16.0 < f < 80.0$ $W(f) = 4.0/f$
	z	W_b	0.40	$0.5 < f < 2.0$ $W(f) = 0.16$
			$2.0 < f < 5.0$ $W(f) = f/12.5$	
			$5.0 < f < 16.0$ $W(f) = 0.4$	
			$16.0 < f < 80.0$ $W(f) = 6.4/f$	

ANEXO II

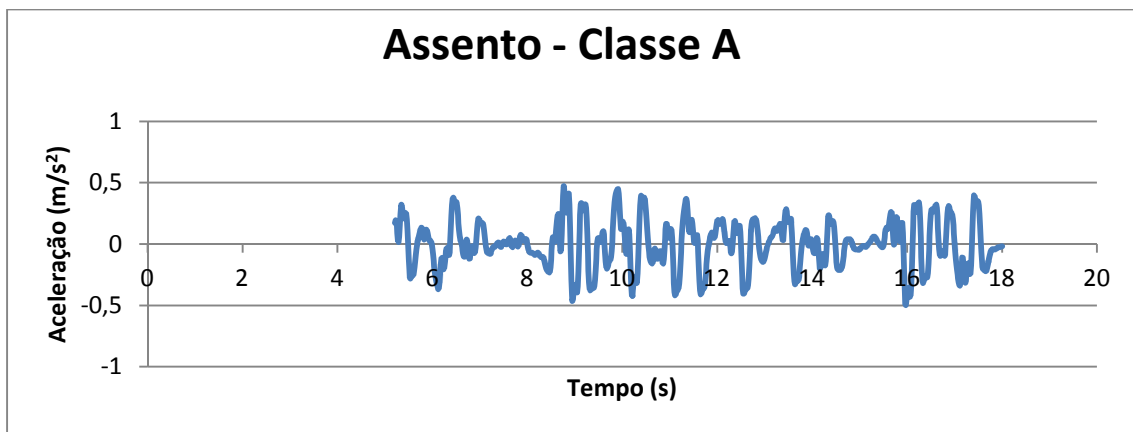
Gráficos de aceleração obtidos

Anexo II.1 – Bicicleta de Suspensão total

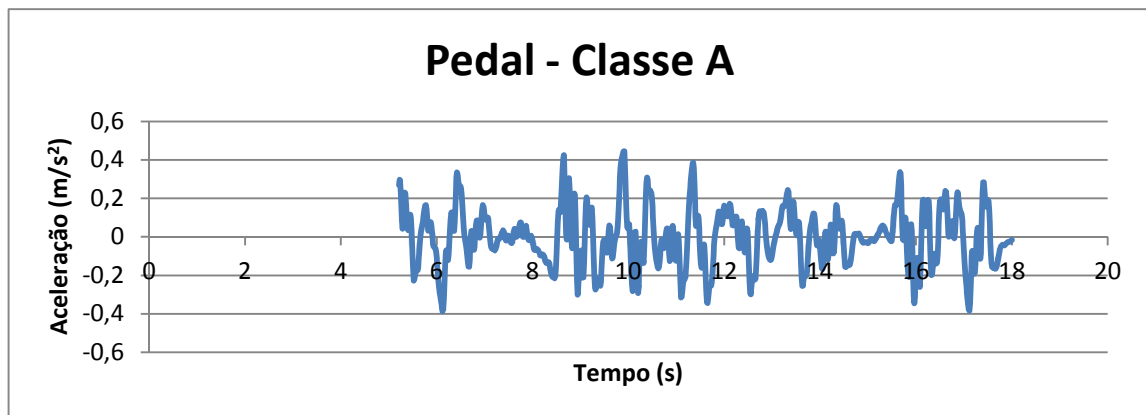
Anexo II.1.1 – Gráfico da aceleração obtida no guidador – Classe A (em função do tempo)



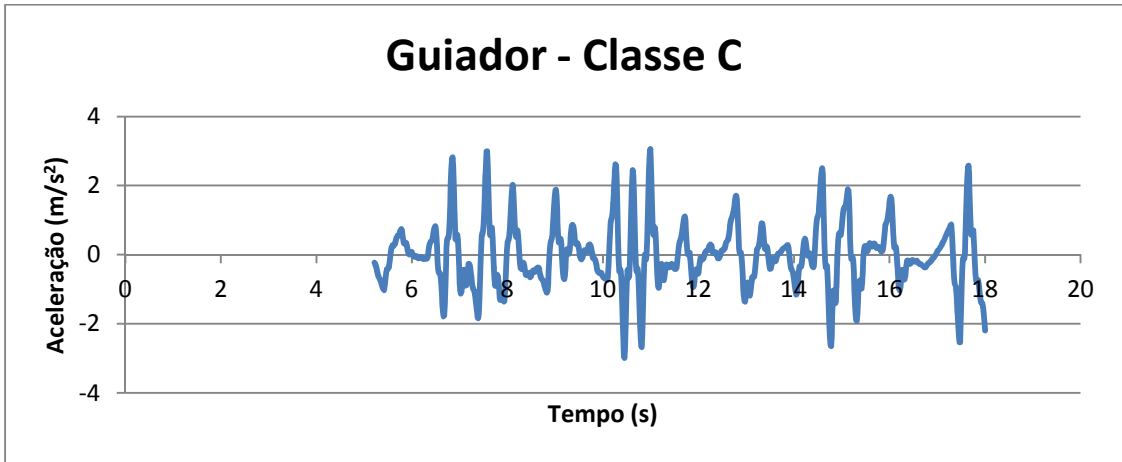
Anexo II.1.2 – Gráfico da aceleração obtida no Assento – Classe A (em função do tempo)



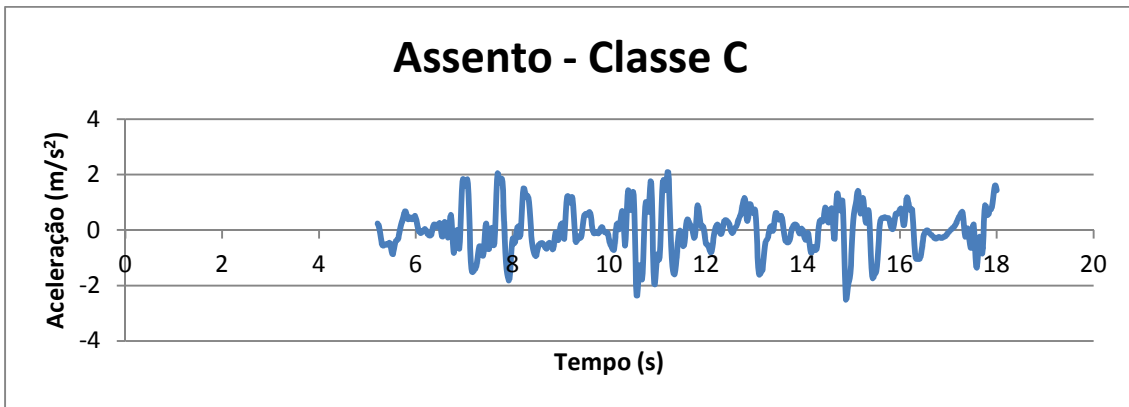
Anexo II.1.3 – Gráfico da aceleração obtida no Pedal – Classe A (em função do tempo)



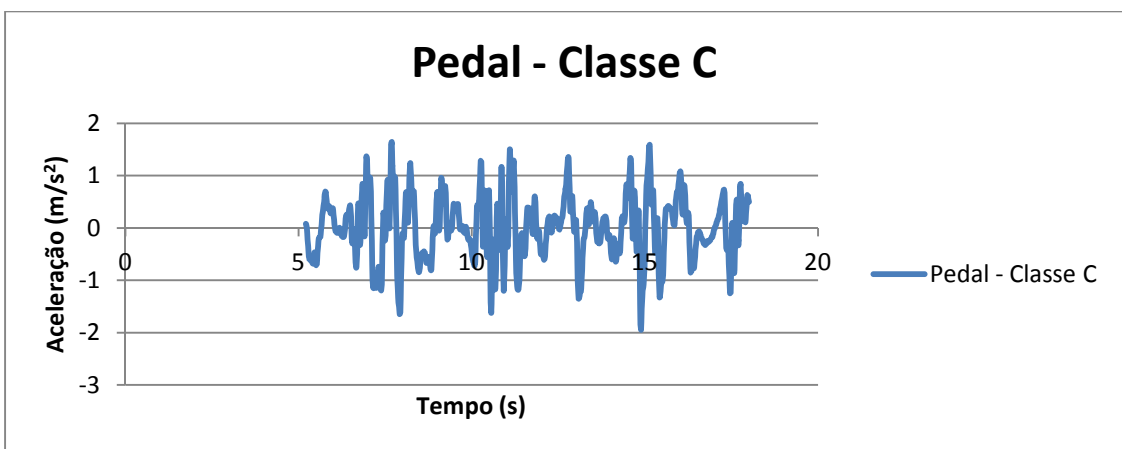
Anexo II.1.4 – Gráfico da aceleração obtida no guidador – Classe C (em função do tempo)



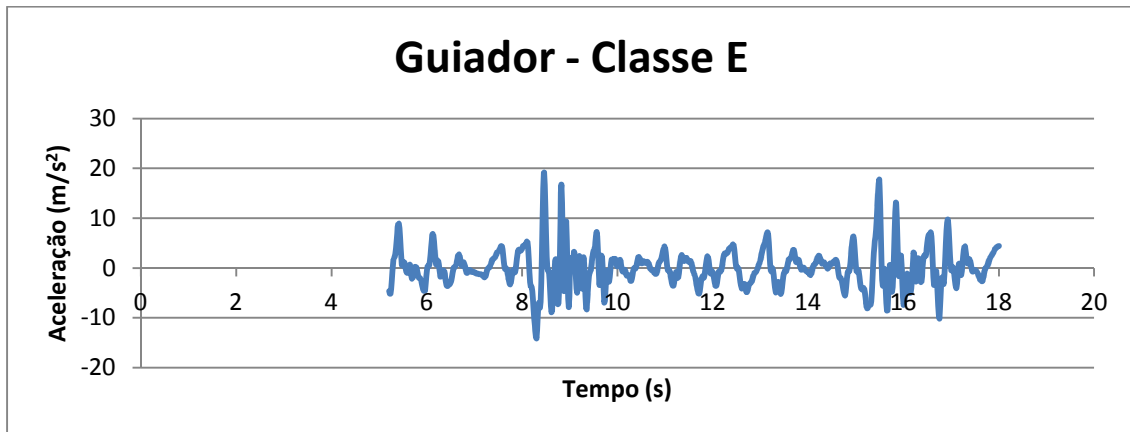
Anexo II.1.5 – Gráfico da aceleração obtida no Assento – Classe C (em função do tempo)



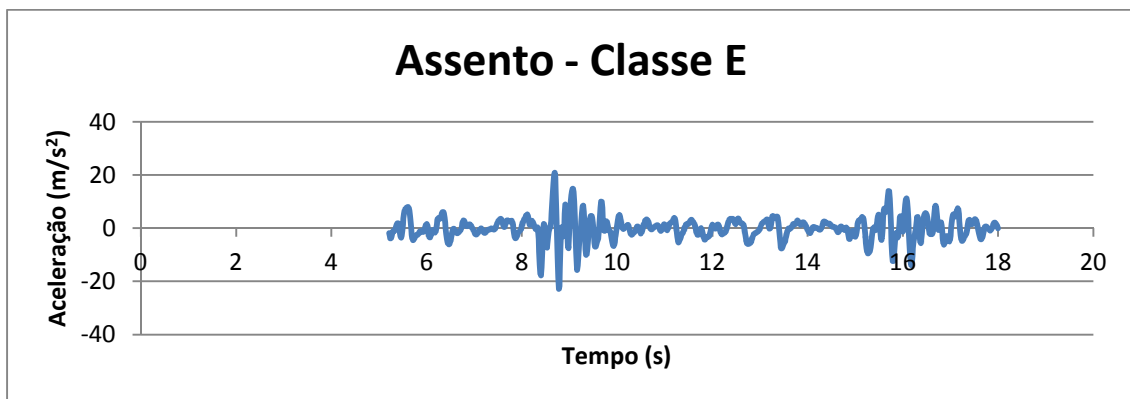
Anexo II.1.6 – Gráfico da aceleração obtida no Pedal – Classe C (em função do tempo)



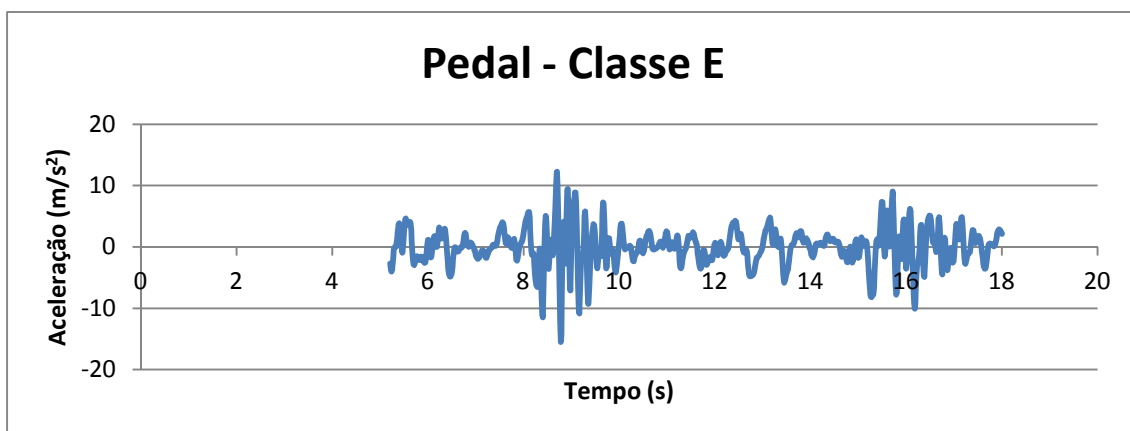
Anexo II.1.7 – Gráfico da aceleração obtida no guidador – Classe E (em função do tempo)



Anexo II.1.8 – Gráfico da aceleração obtida no Assento – Classe E (em função do tempo)

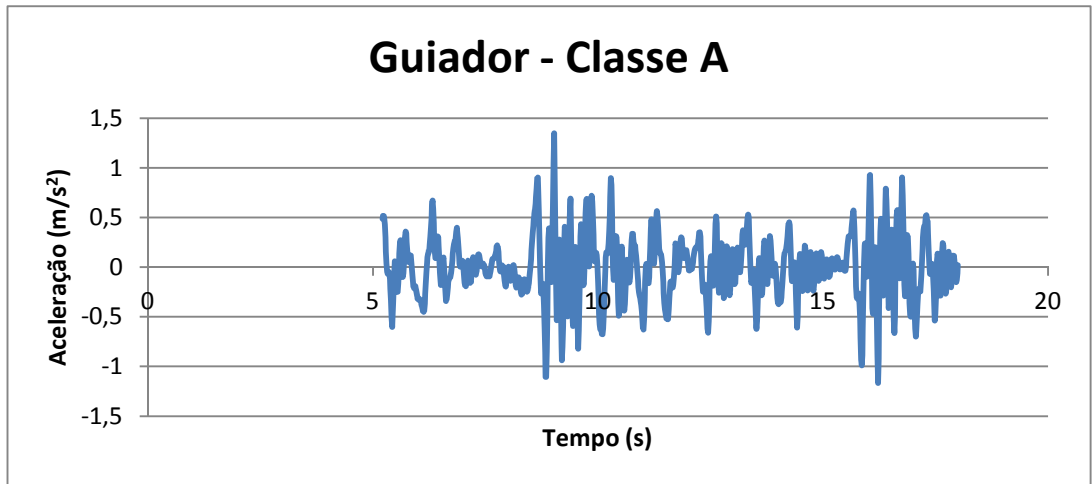


Anexo II.1.9 – Gráfico da aceleração obtida no Pedal – Classe E (em função do tempo)

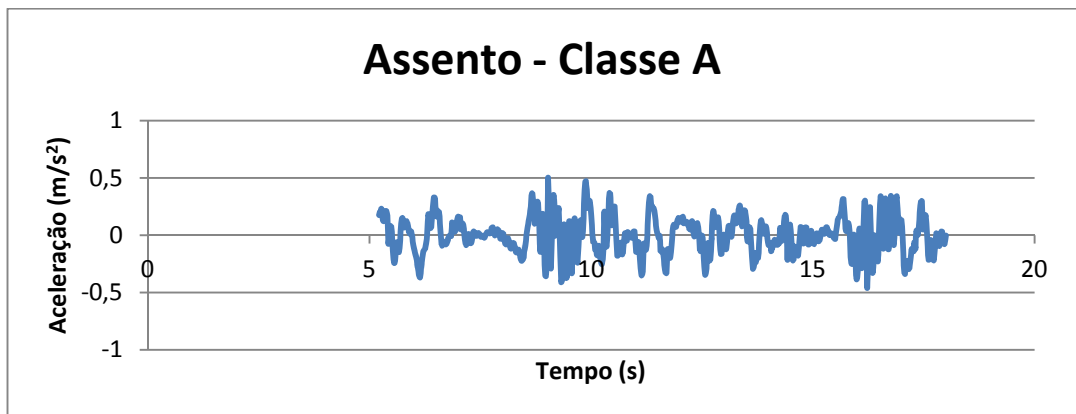


Anexo II.2 – Bicicleta de Suspensão Dianteira

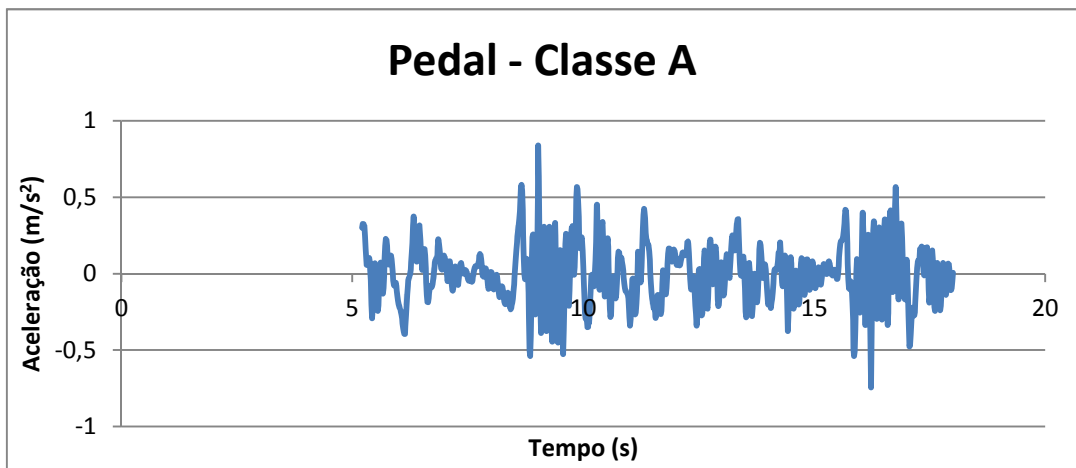
Anexo II.2.1 – Gráfico da aceleração obtida no guidador – Classe A (em função do tempo)



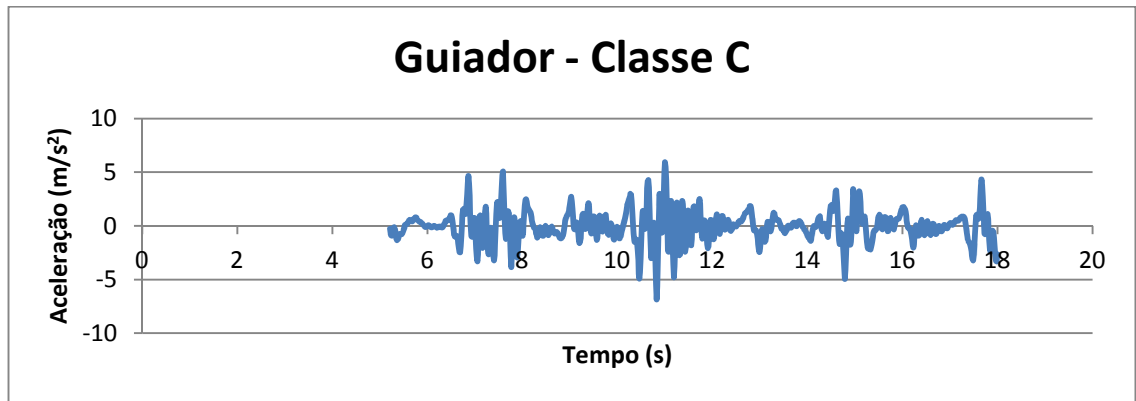
Anexo II.2.2 – Gráfico da aceleração obtida no Assento – Classe A (em função do tempo)



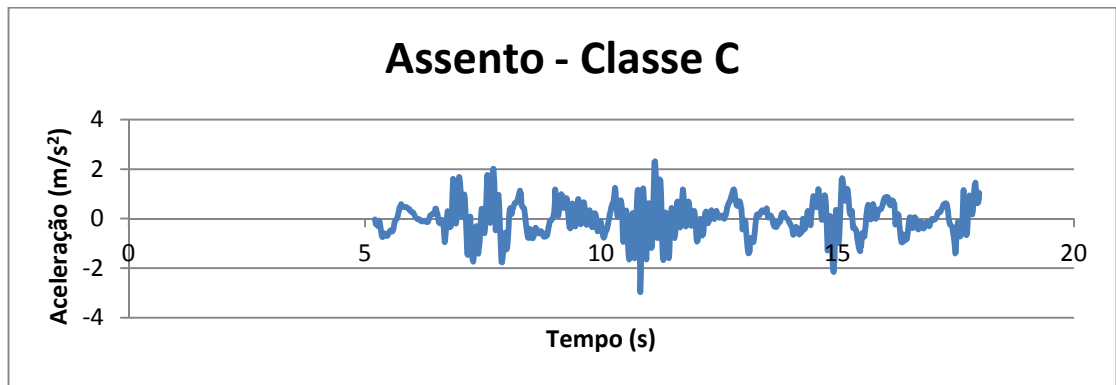
Anexo II.2.3 – Gráfico da aceleração obtida no Pedal – Classe A (em função do tempo)



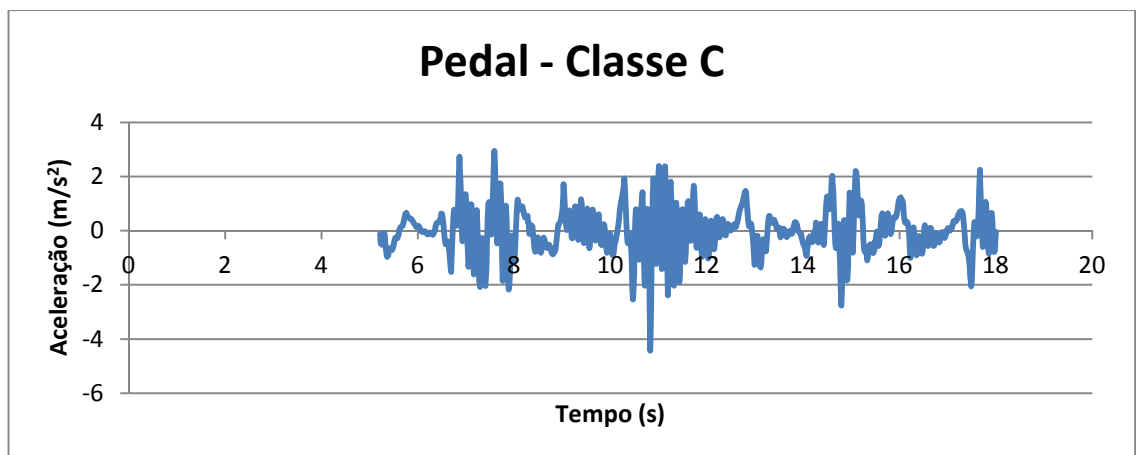
Anexo II.2.4 – Gráfico da aceleração obtida no guidador – Classe C (em função do tempo)



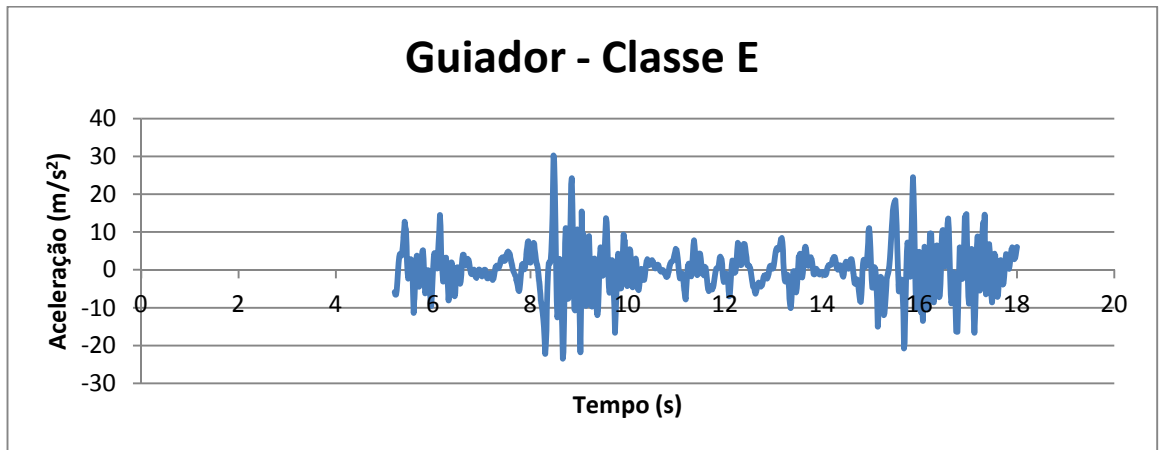
Anexo II.2.5 – Gráfico da aceleração obtida no assento – Classe C (em função do tempo)



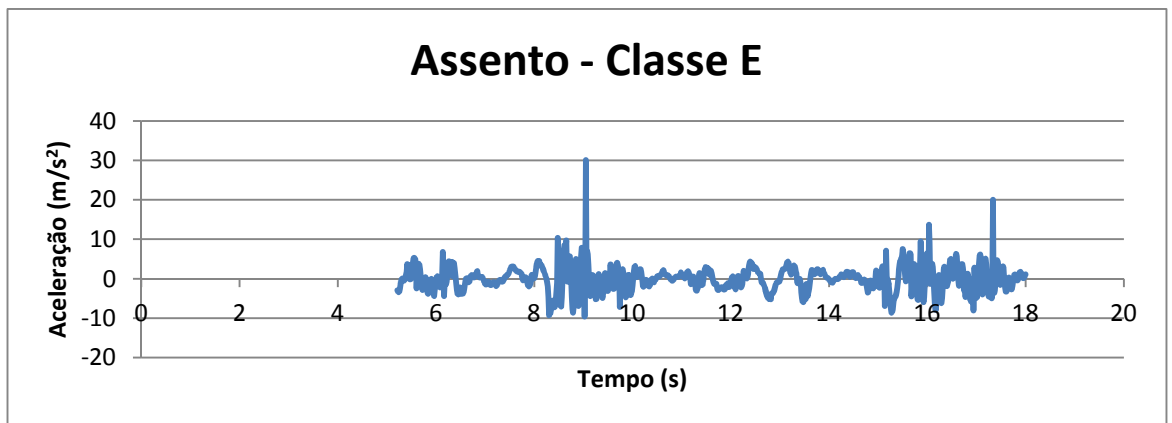
Anexo II.2.6 – Gráfico da aceleração obtida no Pedal – Classe C (em função do tempo)



Anexo II.2.6 – Gráfico da aceleração obtida no Guiador – Classe E (em função do tempo)



Anexo II.2.7 – Gráfico da aceleração obtida no Assento – Classe E (em função do tempo)



Anexo II.2.7 – Gráfico da aceleração obtida no Pedal – Classe E (em função do tempo)

