



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

João Filipe Marques Cravo

**AVALIAÇÃO DO CONFORTO DE UM VEÍCULO
AUTOMÓVEL
INFLUÊNCIA DO TIPO DE SUSPENSÃO E DO TIPO DE
PISO**

Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica orientada pelo Professor Doutor Luis Manuel Ferreira Roseiro e orientada pela Professora Doutora Maria Augusta Neto e apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologias.

Outubro de 2020

1 2



9 0

FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Avaliação do Conforto de um Veículo Automóvel: Influência do Tipo de Suspensão e do Tipo de Pavimento

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Mecânica na Especialidade de Produção e Projeto

Evaluation of Vehicle Comfort: Influence of the Type of Suspension and Type of Tread

Autor

João Filipe Marques Cravo

Orientadores

Professor Doutor Luis Manuel Ferreira Roseiro

Professora Doutora Maria Augusta Neto

Júri

	Professora Doutora Ana Paula Betencourt Martins
Presidente	Amaro Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
Orientador	Professora Doutora Maria Augusta Neto Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra Doutora Maria de Fátima da Costa Paulino Professora Auxiliar convidada da Universidade de Coimbra
Vogais	Mestre Vítor Manuel Maranhã Lopes Assistente convidado da Universidade de Coimbra

Coimbra, Outubro, 2020

Agradecimentos

Em primeiro lugar não posso deixar de agradecer aos meus pais José Cravo e Manuela Cravo, pelos princípios que me transmitiram, pelo apoio incansável ao longo de todo o meu crescimento e sobretudo pelo esforço que fizeram ao investirem no meu futuro. A eles fica nesta dissertação o meu enorme agradecimento que é extensível à minha irmã Carolina e ao meu avô José, que desde sempre me acompanharam e tiveram um papel fulcral no meu crescimento intelectual e humano.

Ao meu irmão Pedro, que para além de ser o meu companheiro de todos os dias e de todas as horas, fez parte deste trabalho o qual não seria possível sem ele.

Aos meus orientadores, Prof. Doutor Luís Roseiro e Prof^a. Maria Augusta Neto, pela disponibilidade, amizade, por todo o conhecimento que partilharam comigo e por toda a ajuda prestada, sem eles não teria disso possível chegar ao fim.

A todos os meus amigos que fizeram parte desta caminhada, por todos os momentos partilhados e vivenciados e por me terem ajudado a crescer ao longo destes anos.

Resumo

Os veículos automóveis integram o quotidiano da vida atual, sendo utilizados tanto em contexto de lazer como de trabalho, representando em muitas situações um elevado tempo de exposição para o condutor e passageiros. Relativamente ao utilizador, um dos aspetos mais importantes num veículo envolve as vibrações que são transmitidas durante a sua utilização. Neste contexto, o conforto dos utilizadores é um fator importante, tanto ao nível do bem-estar como de modo a reduzir o cansaço e evitar problemas de saúde.

Com o avanço da tecnologia, nomeadamente com o desenvolvimento de sistemas de suspensão adaptativa que permitem regular a rigidez da suspensão, os veículos atuais garantem um maior conforto e uma menor exposição às vibrações. Este sistema é habitualmente considerado um extra nos veículos, sendo interessante perceber as vibrações a que o utilizador está exposto para as várias afinações do veículo, assim como a perceção das diferenças ao nível do conforto do condutor.

Este trabalho apresenta uma avaliação comparativa do nível de exposição a vibrações do condutor de um veículo com sistema de suspensão adaptativa. Para o estudo foi considerado um veículo de gama média/alta, instrumentado no banco do condutor com uma acelerómetro triaxial. Foi definido um protocolo de recolha de dados que envolveu dois tipos de piso e quatro afinações do sistema de suspensão.

Os resultados obtidos mostram que, para o veículo avaliado e para as condições de ensaio consideradas, não se identificaram alterações significativas ao nível do desconforto que o condutor possa sentir, independentemente do tipo de condução que opte por fazer, seja este um estilo mais desportivo ou normal do dia-a-dia e também independentemente do tipo de piso em que circule.

Palavras-chave: Biomecânica Ocupacional, Vibrações Induzidas, Sistema de Suspensão, Conforto Humano

Abstract

The motor vehicles are part of our day to day life and are used either for leisure or as a mobility system. In both manners, they represent, in many situations, a high exposure time for the driver and the passengers. In what concerns the user, one of the most relevant aspects about the vehicle, is that it transmits vibrations during its use. In this matter, the comfort of the users is an important factor, both in the level of well-being and as a way to reduce tiredness and avoid health related issues.

With the growth of technology, the current vehicles guarantee more comfort and less exposure to these vibrations by using, for example, the adaptive suspension system, which allows to regulate the suspension and its rigidity. This system is, normally, considered as an extra to the vehicles and so, it is interesting to understand the vibrations to which the user is exposed for the various affinities of the vehicle, as well as the perception of the differences in the user's comfort.

This work presents a comparative evaluation of the level of the user's exposure to vibrations in a vehicle with an adaptive suspension system. For this study it was considered a vehicle of upper middle range, with a triaxial accelerometer in the driver's seat. It was established a protocol for data gathering which involved two floor types and four affinities of the adaptive suspension system.

The results obtained show that, for the evaluated vehicle and for the trial's conditions considered, there are no major changes in terms of the discomfort the driver may feel, regardless of the kind of driving he chooses to do, either a more sports kind of driving or a more normal, day-to-day, one. It has also been shown that the type of floor in which the vehicle is circulating on has no major influence in this matter.

Keywords Occupational Biomechanics, Induced Vibrations, Adaptive Suspension System, Human Comfort

Índice

Índice de Figuras	ix
Índice de Tabelas.....	xi
Simbologia e Siglas	xiii
Simbologia	xiii
Siglas	xiv
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Relevância do trabalho	2
1.2. Objetivos e contribuição do autor	2
1.3. Estrutura do trabalho	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1. Tipos de suspensão.....	5
2.2. Tipos de vibração	7
2.3. Caracterização das vibrações	9
2.4. Resposta humana e efeitos sobre a saúde causados pela exposição à vibração ..	10
2.5. Vibrações corpo inteiro	13
2.6. Limites segundo as normas e diretrizes internacionais	21
2.7. Avaliação do conforto quanto à vibração.....	22
3. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL.....	25
3.1. Metodologia	25
3.2. Descrição e princípio de funcionamento de sensores e equipamentos utilizados na aquisição de dados	30
3.3. Placa de aquisição NI 9234	30
3.4. Acelerômetro piezoelétrico triaxial	31
3.5. Instrumentação do veículo	32
3.6. Programa de aquisição e tratamento de dados	33
3.7. <i>Setup</i> experimental	35
4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	37
4.1. Apresentação de resultados	37
4.2. Discussão de resultados.....	41
4.3. Estudo estatístico.....	45
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	47
5.1. Conclusões	47
5.2. Sugestões para trabalhos futuros	48
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Suspensão <i>Mac Pherson</i> (https://slideplayer.com.br/slide/10970069/).....	6
Figura 2.2. Suspensão <i>BMW® 640D</i> (https://posvenda.pt/monroe-fornece-suspensao-inteligente-bmw-serie-3/).....	7
Figura 2.3. Categorização do Tipo de Movimento Oscilatório.....	8
Figura 2.4. Exemplos de Ondas de Diferentes Tipos de Movimento Oscilatório (M.J.Griffin, 1990).....	9
Figura 2.5. Modelo mecânico do corpo humano solicitado por vibrações na direção vertical (Soeiro, 2011).....	11
Figura 2.6. Exemplo da doença de <i>Raynaud</i> (https://medsimples.com/fenomeno-de-raynaud/).....	13
Figura 2.7. Sistemas de eixos ortogonais utilizados em avaliação de vibração corpo inteiro (ISO 2631-1, 1997).....	14
Figura 2.8. Fatores de ponderação em frequência, wk e wd, utilizados na análise de VCI (ISO 2631-1, 1997).....	16
Figura 2.9. Diagrama de avaliação do risco para a saúde inerente à exposição a VCI (ISO 2631-1, 1997).....	19
Figura 2.10. Limites para a fadiga, saúde e conforto vs frequência para o eixo z (Balbinot [22]).....	22
Figura 3.1. Menu display dos modos de suspensão.....	25
Figura 3.2. Veículo automóvel utilizado nos ensaios: <i>BMW® 640D</i>	27
Figura 3.3. Trajeto da estrada nacional N341.....	28
Figura 3.4. Trajeto da estrada da avenida Dias da Silva.....	28
Figura 3.5. Tipos de pavimento considerados nos estudos: Esquerda – asfalto; Direita – empedrado.....	28
Figura 3.6. Placa de aquisição NI 9234 (Almeida, 2013).....	30
Figura 3.7. Acelerómetro piezoelétrico triaxial do tipo seat pad, marca <i>PCB®</i> - modelo 356B41.....	32
Figura 3.8. Veículo instrumentado.....	32
Figura 3.9. Painel frontal do programa LabView.....	33
Figura 3.10. Interface do módulo de aquisição da aceleração.....	34
Figura 3.11. Interface da análise temporal.....	34
Figura 3.12. Veículo instrumentado e co-piloto.....	35
Figura 3.13. Vista detalhada da conexão da placa de aquisição com o computador.....	35

Figura 4.1. Amostra de aceleração ponderada para VCI em asfalto (Sport+ a 60km/h).	37
Figura 4.2. Amostra de aceleração eficaz ponderada para VCI em empedrado (sport+ a 60km/h).....	38
Figura 4.3. Evolução do índice de desconforto com o aumento da velocidade em asfalto (1-Comfort, 2- Comfort+, 3-Sport, 4-Sport+)	43
Figura 4.4. Evolução do índice de desconforto com o aumento da velocidade em empedrado (1-Comfort, 2-Comfort+, 3-Sport, 4-Sport+).....	44

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Efeito das vibrações induzidas ao corpo humano na gama de frequência 4-20Hz (Ferreira, 2015).....	12
Tabela 2.2. Normas internacionais ISO, utilizadas na exposição humana à vibração (Almeida, 2013)	14
Tabela 2.3. Limites de exposição à VCI (<i>Official Journal of the European Communities</i> , 2002)	22
Tabela 2.4. Grau de conforto segundo os valores de aceleração RMS	23
Tabela 3.1. Especificações <i>BMW®</i> 640D	26
Tabela 3.2. Resumo do protocolo	29
Tabela 4.1. Valor médio e desvio padrão das acelerações ponderadas obtidas em empedrado	38
Tabela 4.2. Valor médio e desvio padrão das acelerações ponderadas obtidas em asfalto.	39
Tabela 4.3. Grau de conforto segundo os valores de aceleração RMS (ISO 2631)	39
Tabela 4.4. Reações de conforto para os testes em empedrado	40
Tabela 4.5. Reações de conforto para os testes em asfalto	40
Tabela 4.6. Valores de p em asfalto para as diferentes velocidades de circulação	45
Tabela 4.7. Valores de p em empedrado para as diferentes velocidades de circulação	46

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

- a_i - Aceleração (RMS) para cada frequência
- $a_{j,i}$ - Aceleração eficaz na banda i de um-terço de oitava
- a_V - Valor total de aceleração eficaz ponderada
- a_w - Aceleração (RMS) ponderada em frequência
- a_{wi}^2 - Aceleração eficaz ponderada em cada eixo
- a_{wj} - Aceleração eficaz ponderada registada no eixo dominante
- $a_{w,j}$ - Aceleração eficaz global ponderada em frequência segundo cada eixo ortogonal
- $a_w(t)$ - Aceleração instantânea, em $[m/s^2]$, ponderada em frequência
- $a_{w(t_0)}$ - Aceleração eficaz ponderada em frequência, em $[m/s^2]$ no instante inicial t_0
- a_{wx}, a_{wy}, a_{wz} - Acelerações eficazes ponderadas segundo o eixo x , y e z
- $A(8)$ - Aceleração eficaz ponderada normalizada para um período de oito horas
- i - Número de banda de 1/3 de oitava
- j - Eixo coordenado em análise
- k_j - Fator multiplicativo do eixo dominante
- k_x, k_y, k_z - Fatores multiplicativos relativos à posição do corpo no espaço
- t - Tempo, variável de acordo com a integração, em $[s]$
- t_0 - Instante inicial, em $[s]$
- T - Duração de exposição diária à vibração
- T_0 - Duração normalizada de oito horas de trabalho diárias
- w_d - Fator de ponderação em frequência para corpo inteiro (eixo x e y)
- W_i - Fator de ponderação
- w_k - Fator de ponderação em frequência para corpo inteiro (eixo z)
- τ - Tempo de integração para execução do nivelamento, em $[s]$

Siglas

BMW® – *Bayerische Motoren Werke*

CVSA – Amortecedor Continuamente Variável Semi-ativo

ICP® – *Integrated Circuit Piezoelectric*

IEPE – *Integrated Electronic Piezoelectric Accelerometers*

ISO – *International Organization for Standardization*

NI® – *National Instruments®*

RMS – *Root Mean Square*

VCI – Vibrações Corpo Inteiro

VDV – Valor da Dose de Vibração

VMB – Vibrações Mão-Braço

VMTV – Valor Máximo Transiente de Vibração

1. INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos as pessoas aprenderam a valorizar a segurança e o conforto nas tarefas do dia-a-dia. A sensação de conforto está associada a “qualidade de vida” e, por isso, muitas empresas apostam em produtos diferenciadores, onde esta componente é disponibilizada aos seus clientes. Neste contexto, salienta-se a indústria automóvel que conseguiu alterar a natureza da sociedade fazendo com que o carro se tornasse símbolo de *status* social e, simultaneamente, num luxo necessário, ou seja, como um objeto que possibilita *status* ao dono, mas que ao mesmo tempo é uma necessidade para suprir as tarefas do dia a dia.

Assim, o cidadão ao adquirir um veículo novo tem em conta o que este lhe pode oferecer, tanto em termos de custo, como de aspeto visual, tamanho, espaço, entre outros. Além disso, até há cerca de 10 ou 15 anos atrás, tinha ainda de optar entre se ia dar preferência ao conforto de condução ou se ia optar por uma viatura mais desportiva, onde o conforto é menor. Nos dias de hoje, com a evolução tecnológica e também a necessidade de dar resposta às necessidades e/ou preferências de todos os clientes, as diversas marcas começaram a desenhar uma suspensão adaptativa, que pudesse contribuir para uma experiência de condução e conforto mais vasta. Esse foi o caso da *BMW®* que, aliada à *Monroe®*, concebeu uma suspensão inteligente capaz de responder às mudanças das condições da estrada, com resposta em milésimos de segundos, e com definição do tipo de condução de acordo com a preferência do condutor, podendo o mesmo optar entre uma condução confortável ou desportiva.

De acordo com o Grupo *BMW®*, o amortecedor continuamente variável semi ativo (CVSA) aplicado no sistema de suspensão adaptativo M ajuda a estabilizar o veículo, melhorando o conforto e a segurança dos ocupantes, enquanto os ajustes dos amortecedores para mais rígidos no modo sport ajudam a criar uma sensação dinâmica impressionante. A configuração “*Sport +*” permite aos condutores “dominar” as curvas mais apertadas com elevada precisão, mesmo em velocidades extremas. Os condutores podem alternar entre configurações de suspensão, premindo o botão de controlo “*Driving Experience*”. Os sensores nos amortecedores CVSA e o sistema de direção transmitem continuamente dados

sobre a condição da estrada e da situação de condução a um computador de bordo, que, em seguida, ajusta os amortecedores em tempo real para obter o melhor desempenho em cada uma das quatro configurações de suspensão possíveis.

Sendo o autor desta dissertação um praticante e amante de desportos motorizados, nomeadamente de *rallys*, entendeu-se como pertinente proceder a um estudo experimental com o objetivo de avaliar o efeito da exposição a vibrações de corpo inteiro no nível de conforto sentido pelo condutor, aquando da condução num modo de suspensão mais desportivo ou confortável.

1.1. Relevância do trabalho

Após uma revisão da literatura, no que diz respeito ao impacto das vibrações no conforto do corpo humano, verificou-se a inexistência de estudos direcionados a veículos com suspensões adaptativas de conforto e rigidez capazes de simular num só carro, graças aos diferentes modos de suspensão, os vários tipos de suspensões que estão disponíveis em diferentes carros. Por outro lado, os estudos sobre o impacto das vibrações no corpo humano têm vindo a ganhar particular atenção por parte da comunidade científica e, apesar da presente dissertação não ser direcionada a possíveis efeitos prejudiciais à saúde, como lesões corporais, torna-se relevante entender os níveis de conforto sentidos pelo ser humano num veículo com diversos modos de suspensão em diferentes tipos de estrada. De facto, uma pessoa que viaje muito tempo na estrada, seja por motivos profissionais ou por lazer, pode ficar exposta a diferentes níveis de vibrações, dependentes do tipo de piso em que o veículo está a circular. Assim, realizar este estudo experimental poderá contribuir para o enriquecimento do conhecimento científico neste domínio.

1.2. Objetivos e contribuição do autor

O principal objetivo deste trabalho passa por avaliar o nível de conforto a que um indivíduo está exposto no dia-a-dia, quando conduz um veículo que é capaz de adaptar o regime de conforto/rigidez às necessidades do seu condutor e do tipo de piso em que

circula. Esta avaliação envolve a quantificação das vibrações a que o condutor está sujeito em diversos cenários.

Assim, neste trabalho, o autor pretende quantificar os níveis de conforto a que o corpo humano fica exposto, em particular através de uma análise de vibrações de corpo inteiro, considerando um conjunto de situações experimentais. Os dados recolhidos experimentalmente são, posteriormente, analisados e comparados com os valores definidos em normas internacionais. O estudo tem ainda como objetivo contribuir para que a investigação científica neste campo seja alargada, possibilitando assim melhorias no desenvolvimento tecnológico das suspensões adaptativas.

1.3. Estrutura do trabalho

A descrição do trabalho realizado encontra-se dividida em cinco capítulos: introdução, revisão bibliográfica, desenvolvimento experimental, apresentação e discussão de resultados, conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

No primeiro capítulo apresenta-se uma breve descrição do tema em estudo, a relevância e os objetivos do trabalho.

O segundo capítulo diz respeito à revisão bibliográfica, ou seja, a toda a literatura teórica que está por detrás do tema abordado.

No terceiro capítulo é descrito todo o procedimento experimental, desde os equipamentos utilizados para a medição da vibração até ao modo como foi realizada a aquisição e tratamento dos dados.

O quarto capítulo é referente à apresentação e discussão dos resultados obtidos neste trabalho.

Por fim, no quinto e último capítulo são expostas as conclusões retiradas com esta dissertação e onde são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Tipos de suspensão

O sistema de suspensão de um veículo automóvel é um elemento de ligação entre as rodas e o resto do veículo, permitindo que haja movimento relativo entre os dois, isto é, entre as rodas e o veículo. Para além de ser responsável pelo conforto, o sistema de suspensão tem, também, um papel muito importante no comportamento dinâmico do automóvel, sendo responsável por: 1) Proporcionar o movimento vertical das rodas prevenindo o movimento do chassis com a irregularidade da estrada; 2) Manter as rodas em determinada posição de modo a que o *camber* e a direção se mantenham ajustadas á estrada; 3) Reagir às forças produzidas pelos pneus; 4) Resistir ao movimento de rolamento do veículo; 5) Manter os pneus em contacto com a superfície de contacto, independentemente das irregularidades desta [1].

Geralmente, os sistemas de suspensão são classificados em dois grandes grupos, tendo em consideração a capacidade de movimento independente de rodas opostas: dependentes e independentes [1]. Nos sistemas dependentes, também chamados de eixo rígido, as rodas que partilham o mesmo eixo encontram-se ligadas por uma barra maciça. Nesta configuração, quando o ângulo de uma roda se altera, o ângulo da roda oposta sofre igual alteração, mas no sentido oposto. Na configuração do eixo independente, as rodas que partilham o mesmo eixo podem subir e descer de forma independente. Este facto permite maior estabilidade, melhor aderência à estrada e conforto de condução.

Atualmente, é ainda possível classificar os sistemas de suspensão tendo em conta o modo de controlo de atuação: passiva, ativa e semi-ativa [1]. No grupo de suspensão passiva incluem-se todos os sistemas convencionais ou tradicionais. A principal característica destes sistemas é que, uma vez instalados no automóvel, os parâmetros desta suspensão (rigidez, altura) não podem ser controlados externamente, sendo que todos os seus parâmetros se mantêm constantes no tempo, qualquer que seja o tipo de piso em que se esteja a circular, impedindo, por isso, a modificação do seu comportamento em tempo real. Estas

suspensões podem-se encontrar na maioria dos automóveis de gama baixa e média, nos dias que correm, devido à sua simplicidade e ao seu baixo custo, como é o caso do sistema *Mac Pherson* [2]. Na Figura 2.1 encontra-se ilustrado uma suspensão *Mac Pherson*.



Figura 2.1. Suspensão *Mac Pherson* (<https://slideplayer.com.br/slide/10970069/>)

Os sistemas de controlo ativo, contrariamente aos sistemas de controlo passivo, possuem a capacidade de alterar a energia do sistema, através de atuadores eletromecânicos, electro-hidráulicos ou electropneumáticos, fornecendo, dessa forma, meios para a suspensão se ajustar continuamente às alterações das condições da estrada. Os atuadores exercem forças de controlo sobre o sistema de forma a reduzir os níveis de vibração desse mesmo sistema. Apesar dos sistemas de controlo ativo apresentarem um melhor desempenho do que os sistemas de controlo passivo, a necessidade de energia externa torna-os mais vulneráveis à falha e, devido à sua elevada complexidade, têm um custo elevado, tanto de manutenção como de implementação.

Os sistemas de controlo semi-ativo são uma solução intermédia entre os sistemas apresentados anteriormente e, por isso, têm sido alvo de muitos estudos e investigação com vista ao seu desenvolvimento. Este tipo de sistema é o sistema analisado no presente trabalho. O controlo semi-ativo combina a adaptabilidade dos dispositivos ativos com a

fiabilidade e simplicidade dos sistemas do controlo passivo. A principal característica da suspensão semi-ativa é o facto de permitir o ajuste contínuo do coeficiente de amortecimento, tornando os amortecedores mais rígidos ou mais flexíveis, dependendo das condições do piso. Este controlo é conseguido através da associação de uma unidade eletrónica adicional, que controla o coeficiente de amortecimento de quatro amortecedores com características de variação contínua. As propriedades de amortecimento podem ser alteradas em tempo real, tal como nos sistemas ativos, contudo, não são capazes de destabilizar o sistema em que atuam, sem nunca haver injeção de energia no sistema. Assim, estes sistemas apresentam uma alta fiabilidade ao funcionarem com baixa necessidade de energia, ao contrário dos sistemas de controlo ativo, que como requerem um alto consumo de energia, podem deixar de funcionar no caso de haver uma falha na fonte de alimentação.

A Figura 2.2 apresenta a suspensão específica do veículo *BMW*® 640D, utilizado neste trabalho, desenvolvida em parceria com a *Monroe*®, uma marca especializada em suspensões inteligentes semi-ativas.



Figura 2.2. Suspensão *BMW*® 640D (<https://posvenda.pt/monroe-fornece-suspensao-inteligente-bmw-serie-3/>)

2.2. Tipos de vibração

A vibração pode ser considerada como um fenómeno mecânico através do qual existe oscilação alternada em torno de uma posição de referência. A amplitude do movimento determina a magnitude da vibração e a sua taxa de repetição determina a sua frequência [3, 4].

A natureza de uma oscilação pode ser pressuposta a partir do conhecimento existente de oscilações prévias ou pode ser caracterizada pelas suas propriedades estatísticas. No primeiro caso estamos perante movimento do tipo determinístico e no segundo perante movimento do tipo aleatório [5]. Ambos os tipos podem ser posteriormente subdivididos conforme o indicado na Figura 2.3.



Figura 2.3. Categorização do Tipo de Movimento Oscilatório

Na Figura 2.4 estão representados exemplos de ondas referentes a diferentes tipos de vibração. Na análise do ponto de vista do conforto humano, são considerados dois tipos de vibração: vibração de corpo inteiro, que é transmitida à globalidade do corpo através das superfícies de apoio (pés, costas, etc.), e vibração de mão-braço que é transmitida pela mão através de um objeto em vibração.

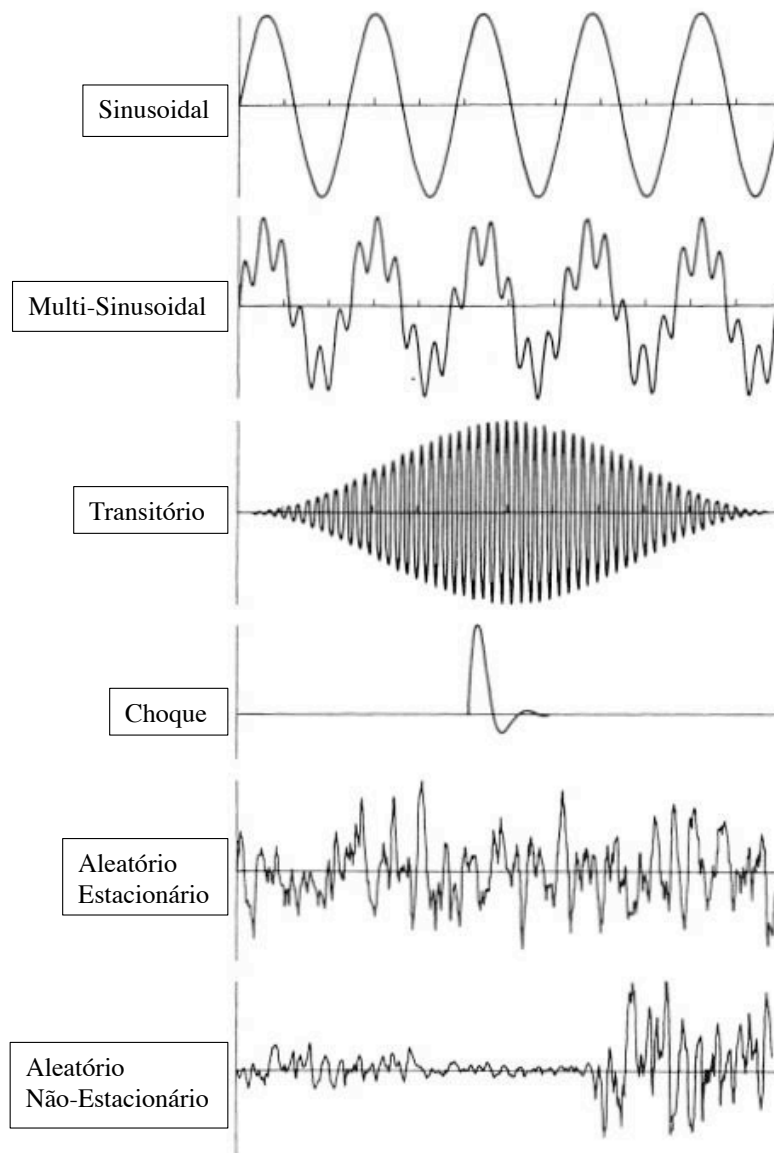


Figura 2.4. Exemplos de Ondas de Diferentes Tipos de Movimento Oscilatório (M.J.Griffin, 1990)

2.3. Caracterização das vibrações

A vibração de um corpo pode ser caracterizada de diferentes formas, nomeadamente através do deslocamento, velocidade ou da sua aceleração [5]. O primeiro caso é mais adequado para um movimento de grande amplitude e baixa frequência, uma vez que é possível observar facilmente o deslocamento entre o pico de movimento máximo numa

direção e o da oposta, ou seja, o denominado deslocamento pico-a-pico. O deslocamento de pico será o maior desses dois máximos comparados em valor absoluto.

Alternativamente, a magnitude da vibração pode ser definida pela velocidade, particularmente, quando se pretende uma análise relacionada de uma forma mais direta com a energia envolvida no movimento, ou seja, no caso de movimentos impulsivos. A velocidade de pico-a-pico observa-se da mesma forma que o deslocamento pico-a-pico.

Apesar de haver várias justificações válidas para quantificar a magnitude da vibração em termos de velocidade, a instrumentação mais conveniente e geralmente aceita é a medição da aceleração da oscilação [6]. É por esse motivo que a maior parte das normas internacionais, como por exemplo as ISO (*International Organization for Standardization*), defendem que a severidade da exposição humana à vibração deve ser expressa em termos de aceleração, em vez de velocidade ou de deslocamento. Resposta humana e efeitos sobre a saúde causados pela exposição à vibração.

2.4. Resposta humana e efeitos sobre a saúde causados pela exposição à vibração

Durante o nosso dia-a-dia estamos expostos a vibrações, de uma forma ou de outra, em carros, autocarros, comboios, etc. Muitas outras pessoas estão também expostas a outras vibrações, durante o seu trabalho, por exemplo as produzidas por ferramentas manuais, máquinas ou veículos pesados.

O corpo humano possui características de inércia e elasticidade que lhe conferem valores de frequência natural distintos, relativos a cada uma de suas partes. Quando uma frequência de solicitação coincide com a frequência natural do sistema ocorre a ressonância, que implica amplificação do movimento [7, 8]. Desse modo, a energia de vibração associada a esse efeito é absorvida pelo corpo, como consequência da atenuação promovida pelos tecidos e órgãos. A Figura 2.5 retrata os valores de frequências associados a cada parte do corpo.

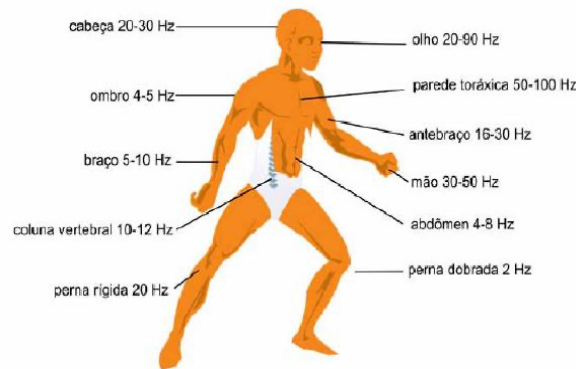


Figura 2.5. Modelo mecânico do corpo humano solicitado por vibrações na direção vertical (Soeiro, 2011)

Quando diariamente o corpo humano está exposto a vibrações excessivas, estas vão, eventualmente, afetar a saúde do indivíduo exposto, nomeadamente ao nível do sistema nervoso, podendo originar alguns problemas de saúde, que tendem a propagar-se partindo de uma simples situação de desconforto. Alguns dos sintomas observados são a fadiga, tonturas, respiração irregular, sonolência, dor de cabeça e tremores. Estes efeitos verificam-se de uma forma geral em condutores de veículos expostos diariamente a vibrações [7, 9]. Por norma, estes sintomas estão associados a vibrações de baixa frequência situadas numa gama de valores entre os 4 Hz e os 20 Hz, como se pode constatar na Tabela 2.1.

Braga [10] afirma que os efeitos das vibrações no corpo humano atuam de uma forma gradual e de acordo com a intensidade. Por isso, a probabilidade de existência de lesões fisiológicas e patológicas aumenta com a intensidade e duração da exposição a vibrações. “*Para baixos níveis de vibração haverá desconforto e redução da eficiência. Para altos níveis e longos períodos de exposição poderão ocorrer doenças que afetam os vasos sanguíneos e a circulação*”.

Tabela 2.1. Efeito das vibrações induzidas ao corpo humano na gama de frequência 4-20Hz (Ferreira, 2015)

Efeito	Gama de Frequências [Hz]
Aumento do ritmo respiratório	4-8
Aumento do tónus muscular	13-20
Alterações do sistema cardiovascular	13-20
Contrações musculares	4-9
Desconforto	4-9
Dores abdominais	4-10
Dores de garganta	12-16
Dores no maxilar inferior	6-8
Sensações incómodas na cabeça	13-20
Urgência de urinar e defecar	10-18

Um indivíduo a conduzir um veículo está sujeito às VCI (vibrações de corpo inteiro) através das nádegas e, se estiver recostado, através das costas [11]. São vibrações de baixa frequência e alta amplitude e situam-se na faixa de 1 a 80 Hz, mais precisamente de 1 a 20 Hz [12, 13]. As VMB (vibrações mão-braço) são transmitidas às mãos e aos braços. É sobretudo suportada pelos operadores que utilizam ferramentas manuais, como é o caso de martelos pneumáticos. Estas vibrações são as mais estudadas e situam-se na faixa de 6,3 Hz a 1250 Hz [14].

Os estudos publicados na área da biodinâmica e os estudos epidemiológicos efetuados até à data, mostram de forma clara a existência de um elevado risco de degradação da saúde por efeitos da exposição do corpo humano, durante períodos longos, a vibrações de elevada intensidade [15]. É de realçar que a região lombar (coluna vertebral) e o sistema nervoso associado podem ser as zonas afetadas com maior importância. Para além disso, a exposição ocupacional continuada das vibrações pode causar efeitos diretos sobre o corpo destacando-se a perda do equilíbrio e falta de concentração, desordens gastrointestinais, aumento da frequência cardíaca, perda do controle muscular de partes do corpo, distúrbios visuais com visão turva, descalcificação de pequenas áreas dos ossos e degeneração

gradativa do tecido muscular [16]. Uma doença muito comum e reconhecida resultante da exposição prolongada das mãos à vibração e a impactos repetidos é a síndrome dos dedos brancos ou doença de *Raynaud*, causada pelo espasmo das artérias digitais, que limita o fluxo sanguíneo nos dedos, sendo que, em casos extremos, pode causar danos permanentes. A Figura 2.6 mostra um exemplo da doença de *Raynaud*.



Figura 2.6. Exemplo da doença de *Raynaud* (<https://medsimples.com/fenomeno-de-raynaud/>)

2.5. Vibrações corpo inteiro

As vibrações no sistema corpo inteiro são as vibrações transmitidas a todo o corpo da pessoa através do contacto com uma fonte de vibração, normalmente quando se está sentado ou em pé de uma superfície vibratória. As vibrações no sistema corpo inteiro são um problema ocupacional comum para trabalhadores em ambientes de alta vibração, principalmente quando a exposição representa uma parte significativa do seu dia de trabalho. Vários modelos biomecânicos foram desenvolvidos para ajudar a compreender a biomecânica da vibração no sistema corpo inteiro.

No que toca à análise de vibrações no corpo humano, ao longo dos anos, foram desenvolvidas normas internacionais cujo objetivo é orientar e normalizar uma metodologia experimental uniforme, de forma a incentivar a investigação contínua nesta área. Apesar de as normas e os investigadores considerarem o estudo das vibrações ainda uma área a desenvolver, visto que o estabelecimento de limites ainda não é muito preciso, até ao

momento, estas normas têm as melhores referências disponíveis da área. Na Tabela 2.2 são indicadas as normas internacionais utilizadas no presente trabalho, referentes à avaliação da exposição humana a vibrações.

Tabela 2.2. Normas internacionais ISO, utilizadas na exposição humana à vibração (Almeida, 2013)

Normas ISO (avaliação da exposição humana a vibrações)	
Vibrações corpo inteiro	ISO (2631) -Guia para avaliação da exposição humana à vibração de corpo inteiro ISO (2631-1) -Vibração mecânica e choque – Parte 1: Requisitos gerais

De forma a satisfazer os objetivos proposto neste trabalho, recorre-se à literatura presente na norma ISO 2631, para orientar este estudo no que toca a avaliação da VCI. Concluindo que embora a norma não cite os limites concretos de exposição da vibração no corpo humano, na verdade permite identificar os efeitos nocivos na saúde, conforto e percepção humana. A metodologia desta norma propõe a utilização de um sistema de eixos ortogonais para avaliação da magnitude em diferentes direções. A Figura 2.7 mostra a posição dos eixos de referência estabelecida pela norma [17].

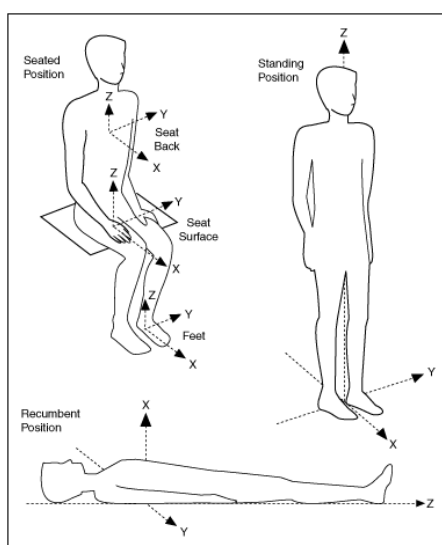


Figura 2.7. Sistemas de eixos ortogonais utilizados em avaliação de vibração corpo inteiro (ISO 2631-1, 1997)

Como já foi referido anteriormente, Griffin [6] enuncia que a aceleração é o parâmetro mais adequado para quantificar a magnitude da vibração. Por outro lado, Becker [18] afirma que as formas diretas de quantificar o movimento oscilatório, baseadas no valor de aceleração, não têm em conta os possíveis efeitos provocados pela frequência. Walber [19] explica que os sinais medidos de vibração com conteúdo espectral podem ter valores idênticos para diferentes parâmetros, mas, por outro lado, o seu efeito no corpo humano pode ser completamente diferente. Para resolver este problema foram idealizadas curvas de ponderação em frequência. Estas curvas são utilizadas como um fator que atribui pesos diferentes para movimentos com frequências diferentes, que tem como objetivo qualificar as vibrações nas frequências em que o corpo humano apresenta maior sensibilidade.

No presente trabalho, apenas será feita avaliação de vibrações de corpo inteiro e, de acordo com a norma ISO 2631, apenas serão tidos em conta os aspetos referentes na faixa de frequência de 0,5 a 80 Hz. O resultado da ponderação em frequência é a obtenção do valor de aceleração RMS (*Root Mean Square*) ponderada pela frequência a_w , em m/s^2 . A aceleração a_w , é dada pela Equação (2.1):

$$a_w = \left[\sum_i (W_i \cdot a_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.1)$$

Onde,

a_w - Aceleração RMS ponderada em frequência.

W_i - Fator de ponderação.

a_i - Aceleração RMS para cada frequência.

A norma refere ainda que, uma vez que o corpo humano apresenta uma resposta à frequência da vibração diferente para cada um dos eixos é necessário que se utilizem os seguintes fatores de ponderação em frequência:

- w_k – Fator de ponderação em frequência para corpo inteiro (eixo z)
- w_d – Fator de ponderação em frequência para corpo inteiro (eixo x e y)

A Figura 2.8 apresenta as curvas de ponderação por frequência w_k para o eixo z e w_d para os eixos x e y:

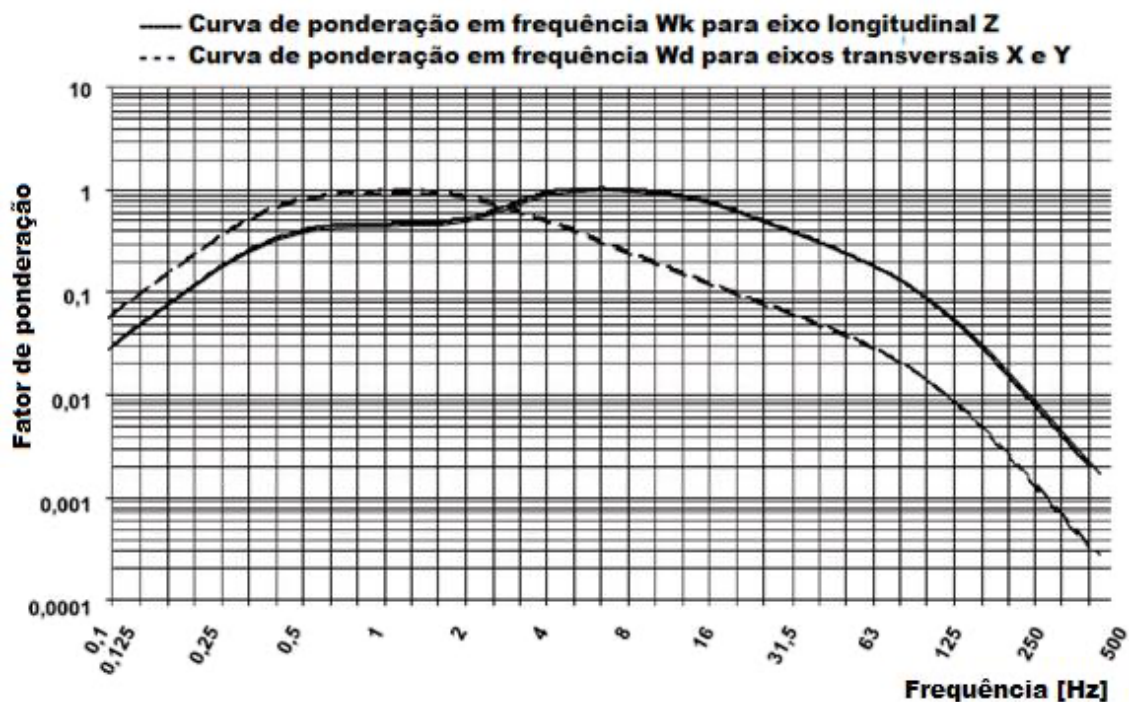


Figura 2.8. Fatores de ponderação em frequência, w_k e w_d , utilizados na análise de VCI (ISO 2631-1, 1997)

Uma vez que a medição da vibração é realizada segundo um sistema de coordenadas tri-axial, é expectável que seja obtido para cada um dos eixos x, y e z, um valor de aceleração RMS ponderada pela frequência. Além disso, são utilizados fatores de multiplicação k_i que têm como objetivo atribuir pesos para os diferentes eixos de coordenadas, porque, segundo Griffin [6], a vibração em diferentes frequências e em diferentes eixos, produzem diferentes sensações em diferentes partes do corpo. Por isso, para obter a quantificação do valor total de aceleração eficaz ponderado em frequência, segundo os três eixos, deve-se recorrer à Equação (2.2). O valor resultante deve apenas ser utilizado na avaliação da exposição à vibração quando não se verifique a existência de um eixo de vibração dominante.

$$a_v = \sqrt{k_x^2 a_{wx}^2 + k_y^2 a_{wy}^2 + k_z^2 a_{wz}^2} \quad (2.2)$$

Onde,

a_v - Valor total de aceleração eficaz ponderada

a_{wx}, a_{wy}, a_{wz} - Acelerações eficazes ponderadas segundo o eixo x, y e z, respectivamente

k_x, k_y, k_z - Fatores multiplicativos dos eixos ortogonais de acordo com a posição do corpo

Neste estudo experimental a avaliação de corpo inteiro será realizada em posição sentada, com o acelerómetro embutido no assento do carro. Assim, seguindo a norma, os valores referência dos fatores multiplicativos serão os seguintes.

$$k_x = k_y = 1.4 \text{ e } k_z = 1 \quad (2.3)$$

Em situações em que seja notória a existência de um eixo de vibração dominante, a quantificação diária de exposição deve apenas ter em conta o valor de aceleração eficaz registada nesse eixo. Esse valor de exposição diário, deve ser expresso em termos do valor total da vibração contínua equivalente ponderada em frequência, para um período de oito horas, denominado de $A(8)$ e é dado pela Equação (2.4).

$$A(8) = k_j a_{wj} \sqrt{\frac{T}{T_0}} \quad (2.4)$$

Onde,

a_{wj} - Aceleração eficaz ponderada registada no eixo dominante

k_j - Fator multiplicativo do eixo dominante

T - Duração de exposição diária à vibração

T_0 - Duração normalizada de oito horas de trabalho diárias

No caso de não existir um eixo dominante, isto é, quando a exposição diária é constituída por várias exposições com diferentes magnitudes, o valor $A(8)$ é dado pela seguinte Equação (2.5).

$$A(8) = \sqrt{\frac{1}{T_0} \sum_{i=1}^n a_{wi}^2 \times T_i} \quad (2.5)$$

Onde,

a_{wi}^2 - Aceleração eficaz ponderada em cada eixo

A literatura sobre este tema mostra que a exposição diária do corpo humano à vibração tem efeitos nocivos para a saúde, onde se destacam consequências a nível da coluna vertebral com possíveis alterações degenerativas. A norma ISO 2631 define um diagrama representativo, representado na Figura 2.9, que dita a faixa de valores onde a exposição à vibração é considerada prejudicial à saúde de qualquer ser humano exposto a vibrações, onde se evidencia a posição sentada para um período de 4 a 8 horas de exposição, não invalidando outras posições e períodos.

Na Figura 2.9 são indicados dois métodos alternativos, que estabelecem bandas onde a exposição à vibração deve ser controlada (equação B.1 e equação B.2). Define-se que para valores inferiores à banda não são identificados quaisquer riscos, para valores no seu interior devem ser tomadas precauções e para valores superiores observa-se uma elevada probabilidade de risco para a saúde. É também de frisar que para períodos compreendidos entre as quatro e oito horas de exposição os métodos apresentam resultados equivalentes.

Seguindo a norma ISO 2631, pode-se aplicar as duas conjeturas a exposições vibratórias periódicas aleatórias ou transientes em indivíduos saudáveis durante a sua atividade laboral ou lazer. Existem dois parâmetros fundamentais que devem ser tidos em conta no estudo da exposição de uma população ao efeito das VCI. Estes parâmetros são: valor de pico e valor eficaz, sendo que estes estão relacionados através do fator de crista.

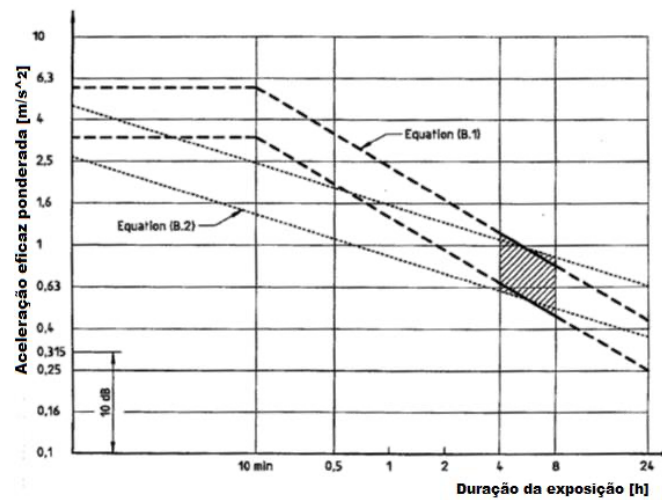


Figura 2.9. Diagrama de avaliação do risco para a saúde inerente à exposição a VCI (ISO 2631-1, 1997)

O método (RMS) pode não ser suficientemente preciso na avaliação da magnitude da vibração quando o corpo humano se encontra exposto a vibrações, choques ocasionais ou vibrações transientes com um valor de fator de crista superior a 9. Para estes casos, é sugerido pela norma a utilização de um método adicional, como por exemplo o método *running RMS* ou método *fourth power vibration dose value*.

O método *running RMS* tem em conta a existência de choques e vibrações transientes, utiliza uma constante de tempo curta na integração numérica, e é definido pela Equação (2.6).

$$a_w(t_0) = \left[\frac{1}{\tau} \int_{t_0-\tau}^{t_0} [a_w(t)]^2 dt \right]^{\frac{1}{2}}, \text{ Para o eixo } x, y \text{ e } z \quad (2.6)$$

Onde,

$a_w(t_0)$ - Aceleração eficaz ponderada em frequência, em $[m/s^2]$ no instante inicial t_0

$a_w(t)$ - Aceleração instantânea, em $[m/s^2]$, ponderada em frequência

τ - Tempo de integração para execução do nivelamento, em $[s]$

t_0 - Instante inicial, em $[s]$

t - Tempo, variável de acordo com a integração, em $[s]$

Por conseguinte, o valor máximo transiente de vibração (VMTV) é o parâmetro que define a magnitude da vibração e é o valor máximo obtido pelo método *running rms* durante o período de medição. O VMTV é dado pela Equação (2.7).

$$VMTV = \text{Máximo}(a_w(t_0)) \quad (2.7)$$

O método *fourth power vibration dose value*, ou em Português, valor da dose de vibração (VDV) é um método de quarta ordem, o que torna este método mais sensível a picos e, claro, é mais preciso do que o método básico de segunda ordem. O valor da dose de vibração é expresso em $[m/s^{1,75}]$ e é definido pela Equação (2.8)

$$VDV = \left[\int_0^T [a_w(t)]^4 dt \right]^{\frac{1}{4}}, \text{ Para o eixo } x, y \text{ e } z \quad (2.8)$$

Onde,

VDV - Valor da dose de vibração, em $[m/s^{1,75}]$

$a_w(t)$ - Aceleração instantânea ponderada em frequência, em $[m/s^2]$

T - Intervalo de tempo de medição, em $[s]$

A utilização de um destes métodos complementares é justificada se forem excedidos os valores indicados no conjunto de Equações (2.9) relativamente a cada um dos métodos.

$$\frac{VMTV}{a_{rms,w}} = 1,5 \text{ ou } \frac{VDV}{a_{rms,w} T^{1/4}} = 1,75 \quad (2.9)$$

Tendo em conta que a análise temporal nem sempre responde a todas as questões, existe sempre a possibilidade de se realizar uma análise de espectros de frequência. Nesse caso, a aceleração eficaz global ponderada em cada eixo no domínio da frequência é determinada pela Equação (2.10).

$$a_{w,j} = \left[\sum_{i=1}^n (W_i a_{j,i})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{para } x, y \text{ e } z \quad (2.10)$$

Onde,

$a_{w,j}$ - Aceleração eficaz global ponderada em frequência segundo cada eixo ortogonal

W_i - Fator de ponderação para a banda i de um-terço de oitava

$a_{j,i}$ - Aceleração eficaz na banda i de um-terço de oitava

i - Número de banda de 1/3 de oitava

j - Eixo coordenado em análise

2.6. Limites segundo as normas e diretrizes internacionais

O Decreto-Lei nº 46/2006, do Ministério de Trabalho e da Solidariedade Social, define os valores limites em vigor para exposição a vibração mecânica em terreno nacional, os quais foram estabelecidos de acordo com a diretiva nº 2002/44/CE [20] do Parlamento Europeu, que define os limites mínimos de segurança e saúde. Neste decreto, o valor de ação de exposição define-se como o valor a partir do qual se torna necessário adotar medidas preventivas, ou seja, é o valor máximo que não deve ser excedido, contudo, se for excedido deverá ser interrompida a exposição até a regularização da situação. Estes valores são referentes à exposição de pessoas durante um período normalizado de oito horas de trabalho diário, ou seja, os valores de $A(8)$ que foram definidos na Equação (2.5).

Na Tabela 2.3 estão apresentados os valores de exposição e os VDV segundo a diretiva 2002/44/CE, adotados na avaliação de VCI com elevado fator de crista, choques ocasionais ou vibrações transientes.

Tabela 2.3. Limites de exposição à VCI (*Official Journal of the European Communities, 2002*)

Valor de ação de exposição diária	$A(8) = 0.5 [m/s^2]$ $VDV = 9.1 [m/s^{1.75}]$
Valor limite de exposição diária	$A(8) = 1.15 [m/s^2]$ $VDV = 21 [m/s^{1.75}]$

2.7. Avaliação do conforto quanto à vibração

De um modo geral, tendo em conta que a sensibilidade de cada indivíduo à vibração varia, é muito difícil estabelecer os limites de conforto ou desconforto para um passageiro ou motorista de um veículo [21]. Porém, a norma ISO 2631 estabelece alguns critérios para a avaliação do desconforto devido à vibração. O gráfico representado na Figura 2.10 pode ser utilizado para limitar o tempo de exposição a determinadas frequências de vibração na direção z. Este gráfico relaciona fadiga, conforto e saúde na direção do eixo z, tendo em conta que por norma é o eixo mais solicitado, mas não invalida a análise nas direções x e y, que também podem ser utilizadas. Assim, para verificar se os limites de conforto são ultrapassados é possível utilizar uma metodologia de análise baseada nestes gráficos: 1) utilizar as acelerações RMS obtidas da Equação (2.1); 2) usar os valores de aceleração na faixa de frequências de 1 a 80 Hz; 3) verificar se ultrapassam os limites estabelecidos pela norma [4, 12, 13].

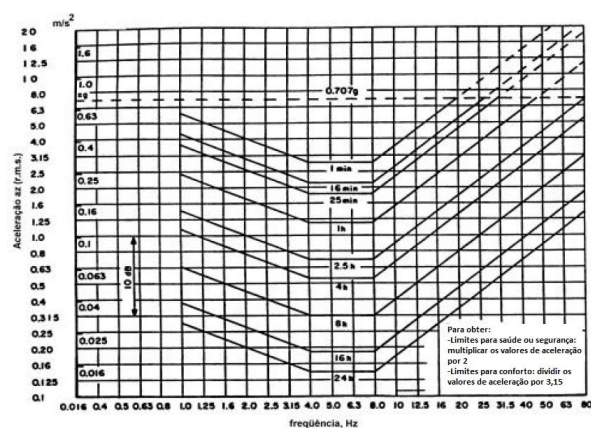


Figura 2.10. Limites para a fadiga, saúde e conforto vs frequência para o eixo z (Balbinot [22])

Para facilitar a análise quanto ao conforto, e de modo a obter um valor único para fins de comparação, opta-se por utilizar os valores de aceleração RMS ponderados pela frequência nos três eixos obtidos através das Equações (2.1) e (2.2). Assim, seguindo as recomendações da norma, a Tabela 2.4 fornece os valores de aceleração RMS ponderados pela frequência como uma indicação das reações com relação ao conforto.

Tabela 2.4. Grau de conforto segundo os valores de aceleração RMS

Aceleração [m/s^2]	Grau de desconforto
<0,315	Não desconfortável (Confortável)
0.315-0,63	Pouco desconfortável
0.5-1	Razoavelmente desconfortável
0.8-1.6	Desconfortável
1.25-2.5	Muito desconfortável
>2.5	Extremamente desconfortável

Como já referido anteriormente, o principal objetivo deste trabalho é quantificar o grau de conforto a que um indivíduo está sujeito quando conduz um veículo equipado com uma suspensão adaptativa em rigidez e conforto. Este tipo de suspensão permite, em teoria, simular num só veículo automóvel o comportamento dinâmico de diferentes automóveis. Por isso, a tabela acima mencionada será a base da discussão dos resultados do Capítulo 4, pelo que não será feita nenhuma análise no campo da saúde humana.

3. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

3.1. Metodologia

O presente trabalho tem como principal objetivo quantificar os níveis de vibração e observar, segundo as normas internacionais, o nível de conforto a que um condutor de um veículo está exposto. Assim, foram feitas avaliações em dois tipos de piso com alteração das características do sistema de suspensão e da velocidade de circulação. Nesse contexto, foi definido um protocolo para os ensaios experimentais que teve como finalidade abranger o maior número de cenários possíveis com aquisição de dados das vibrações. Para a realização dos ensaios utilizou-se um veículo da marca *BMW*®, modelo 640D com um motor 6 cilindros biturbo de 3000cc de cilindrada, com uma potência de 313cv. A massa do veículo em vazio é de 1870 kg e está equipado com uma caixa sequencial de 8 velocidades e com uma suspensão adaptativa M desenvolvida pela *BMW*® em colaboração com a marca *Monroe*®, com quatro modos de suspensão diferentes. Deste modo, é possível simular “quatro veículos diferentes” com a vantagem de o sistema manter constante todos os outros fatores que condicionam o comportamento dinâmico de um veículo automóvel. Os quatro modos de suspensão considerados são designados pela marca como: *Comfort*, *Comfort +*, *Sport* e *Sport +*. A Figura 3.1 ilustra o painel de instrumentos do veículo com os modos de suspensão referidos.



Figura 3.1. Menu display dos modos de suspensão

Todos os modos variam o tempo de resposta do pedal do acelerador e a rigidez da suspensão, permitindo, assim, estilos de condução completamente diferentes e que se adaptam consoante a necessidade e/ou gosto de cada condutor. A Tabela 3.1 contém as características relevantes referentes ao *BMW*® 640D.

Tabela 3.1. Especificações *BMW*® 640D

Característica	<i>BMW</i>® 640D
Pressão dos pneus frontais	2,5 bars
Pressão dos pneus traseiros	2,6 bars
Diâmetro da roda	19 polegadas
Especificação do pneu frontal	245/40
Especificação do pneu traseiro	275/35
Massa total	1870 kg
Potência do motor	313 cv
Binário do motor	630 Nm
Ano de fabricação	2011
Ano do modelo	2012
Combustível	Gasóleo
Tração	Traseira

O veículo considerado nos testes experimentais encontrava-se em plenas condições de serviço, tendo sido mantida a mesma pressão dos pneus em todos os ensaios realizados. Os testes foram realizados sempre pelo mesmo piloto e co-piloto, para garantir a uniformidade dos testes. O piloto tem uma massa corporal de 60 kg e mede 1,80 m e o co-piloto tem uma massa corporal de 92 kg e mede 1,80 m, ambos do sexo masculino. Na Figura 3.2 encontra-se representado o veículo objeto de estudo.



Figura 3.2. Veículo automóvel utilizado nos ensaios: BMW® 640D

Relativamente à aquisição de dados, o protocolo usado consistiu na realização de ensaios em dois tipos de pavimentos diferentes: asfalto e empedrado. Estes dois tipos de pavimento são ambos característicos das cidades portuguesas e, por isso, considera-se que permitem simular o dia-a-dia de uma grande parte dos condutores. Os ensaios realizados na pavimentação de asfalto localizaram-se na estrada nacional N341 que liga Coimbra a Taveiro, tendo como característica o facto de ter uma superfície lisa, mas com algumas irregularidades decorrentes do desgaste e falta de manutenção, o que é um cenário muito comum nas estradas de Portugal.

Os ensaios feitos em pavimentação de empedrado foram realizados na avenida Dias da Silva, em Coimbra, que apresenta uma superfície com constantes interrupções, devido às pequenas dimensões de cada uma das pedras do piso, possuindo um alto número de juntas ao longo da via, tornando a superfície rica em irregularidades. A Figura 3.3 representa o trajeto percorrido no pavimento de asfalto, enquanto a Figura 3.4 representa o percurso no pavimento de empedrado. Os dois tipos de pavimento são apresentados na Figura 3.5.



Figura 3.3. Trajeto da estrada nacional N341

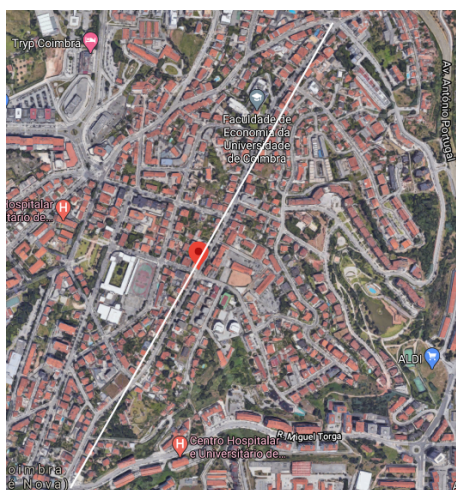


Figura 3.4. Trajeto da estrada da avenida Dias da Silva



Figura 3.5. Tipos de pavimento considerados nos estudos: Esquerda – asfalto; Direita – empedrado.

Durante a realização dos ensaios, estipularam-se faixas de velocidade para a realização dos mesmos, tendo-se optado por velocidades constantes entre 40 km/h e 80 km/h. Estas velocidades foram selecionadas para garantir que não se excediam os limites permitidos em cada um dos trajetos.

No piso em asfalto, as medições foram feitas com velocidades de 40, 60 e 80 km/h. Apesar de na cidade ser proibido circular a 80 km/h, na verdade, este tipo de piso é o dominante nas estradas nacionais Portuguesas e, em geral, já é permitido circular a essa velocidade, por isso decidiu-se incluir este registo no presente trabalho. Refira-se que nesse troço de estrada o limite de velocidade é de 90 km/h. Estas três velocidades foram usadas para cada um dos modos de suspensão disponíveis pelo *BMW® 640D (comfort, comfort +, sport e sport +)*.

No piso em empedrado, o procedimento foi semelhante, apenas, com a diferença dos valores da velocidade de circulação, visto que este tipo de pavimento é habitualmente encontrado nas povoações, onde a velocidade máxima permitida é de 50 km/h. Ou seja, as velocidades avaliadas neste piso foram de 40, 50 e 60 km/h, considerando-se também os quatro modos de suspensão diferentes.

Para cada velocidade e modo de suspensão foram realizadas cinco passagens para garantir uma boa amostragem. No total foram realizados 120 testes e todos eles com um tempo de aquisição de pelo menos 60 segundos. É ainda importante referir, que em cada um dos ensaios referidos anteriormente houve particular atenção para assegurar condições idênticas de percurso e velocidade, fazendo uso do *cruise control*, de forma a garantir a reprodutibilidade e a coerência dos dados recolhidos. A Tabela 3.2 representa um resumo de todo o protocolo utilizado no presente trabalho.

Tabela 3.2. Resumo do protocolo

Asfalto			Empedrado		
40 km/h	Comfort	→ 5 passagens	40 km/h	Comfort	→ 5 passagens
	Comfort +	→ 5 passagens		Comfort +	→ 5 passagens
	Sport	→ 5 passagens		Sport	→ 5 passagens
	Sport +	→ 5 passagens		Sport +	→ 5 passagens
60 km/h	Comfort	→ 5 passagens	50 km/h	Comfort	→ 5 passagens
	Comfort +	→ 5 passagens		Comfort +	→ 5 passagens
	Sport	→ 5 passagens		Sport	→ 5 passagens
	Sport +	→ 5 passagens		Sport +	→ 5 passagens
80 km/h	Comfort	→ 5 passagens	60 km/h	Comfort	→ 5 passagens
	Comfort +	→ 5 passagens		Comfort +	→ 5 passagens
	Sport	→ 5 passagens		Sport	→ 5 passagens
	Sport +	→ 5 passagens		Sport +	→ 5 passagens

3.2. Descrição e princípio de funcionamento de sensores e equipamentos utilizados na aquisição de dados

A aquisição dos dados de vibração foi implementada com recurso a um acelerómetro triaxial conectado a um sistema de aquisição da *National Instruments*®. O programa de aquisição e tratamento de dados foi anteriormente desenvolvido, com recurso a programação em *LabView* [17]. Nesta secção são descritos os principais componentes do sistema de aquisição utilizado neste estudo.

3.3. Placa de aquisição NI 9234

A placa NI 9234 é um módulo de condicionamento de sinal dinâmico da série C, com quatro canais independentes, resolução de 24-bits e faixa dinâmica de 102 dB. Este equipamento é o indicado para o processamento de sinais de áudio ou vibração de elevada precisão com acelerómetros piezoelétricos IEPE e não IEPE. Este módulo suporta taxas de aquisição por canal até 51,2 KS/s e possui filtros *antialiasing* integrados que se ajustam à taxa de amostragem pretendida, a fim de que a qualidade da imagem que é depois transferida para o computador seja nítida e perceptível. A Figura 3.6 ilustra o condicionador de sinal utilizado.



Figura 3.6. Placa de aquisição NI 9234 (Almeida, 2013)

3.4. Acelerómetro piezoelétrico triaxial

Este tipo de acelerómetro é um transdutor de energia, ou seja, transforma energia mecânica em energia elétrica. Utiliza a vibração para gerar uma tensão elétrica proporcional a aceleração do movimento e da aceleração da vibração. O acelerómetro triaxial foi desenvolvido para medir a vibração nos três eixos ortogonais (x, y e z), ou seja, cada um dos três eixos reage à vibração de uma forma diferente, fornecendo assim valores de aceleração individualizados e possuindo uma grande eficiência. Acelerómetros deste tipo são constituídos por uma massa sísmica, por um cristal de quartzo ou cerâmico piezoelétrico e por uma base designada de corpo de acelerómetro. Quando submetido a níveis de vibração, com frequências inferiores à frequência natural do sistema, a aceleração da massa sísmica comprime/traciona o material piezoelétrico, que se localiza entre a massa e a base do acelerómetro. A magnitude dessa solicitação é proporcional ao produto da massa pela aceleração, como é descrito na segunda lei de Newton. O cristal piezoelétrico ao ser solicitado produz entre as suas superfícies um sinal elétrico de magnitude proporcional a essa solicitação. A dimensão da massa sísmica neste tipo de equipamentos determina a faixa de frequências com sensibilidade constante (intervalo de frequências de utilização). Estes acelerómetros por norma apresentam frequências naturais superiores a 5 KHz. Nestes equipamentos encontram-se integrados microamplificadores eletrónicos que amplificam a tensão do sinal de saída para valores na ordem do milivolt. Este microamplificadores são responsáveis por atenuar a perda de sensibilidade do sistema de aquisição, resultante do aumento da capacitância, isto é, devido ao aumento da relação entre a carga acumulada por um corpo e o seu correspondente potencial elétrico.

No presente trabalho foi utilizado um acelerómetro piezoelétrico triaxial ICP®, modelo 356B41 da marca PCB®, com formato *seat pad*, ilustrado na Figura 3.7.



Figura 3.7. Acelerómetro piezoelétrico triaxial do tipo seat pad, marca PCB® - modelo 356B41.

3.5. Instrumentação do veículo

A instrumentação do veículo seguiu a metodologia aconselhada na norma ISO 2631, para a avaliação da exposição à vibração no sistema corpo inteiro. Esta norma indica que a aquisição dos dados deve ser realizadas na posição sentado, embora permita recolhas em posições corporais distintas, como deitado ou em pé. Assim, o acelerómetro foi posicionado no assento do veículo com o auxílio do *seat pad*, na interface do condutor com a superfície do banco, ou seja, imediatamente abaixo do cóccix, como indica a norma. Destaca-se, ainda, a importância do alinhamento do acelerómetro relativamente aos eixos coordenados (x, y e z), sendo que a norma permite uma tolerância angular até 15°. A Figura 3.8 ilustra o posicionamento do acelerómetro utilizado na avaliação da VCI.

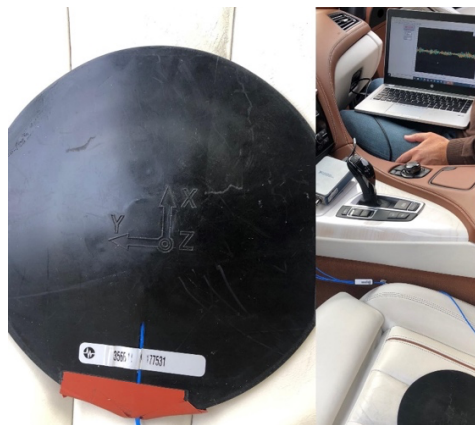


Figura 3.8. Veículo instrumentado

3.6. Programa de aquisição e tratamento de dados

A aquisição do sinal primário foi feita através da placa de aquisição NI 9234 da *National Instruments*®. Este equipamento permite estabelecer uma conexão direta entre o acelerómetro e o computador, através do programa desenvolvido em *LabVIEW*. O programa utilizado inclui várias aplicações, sendo umas destinadas à aquisição dos dados e outras ao seu tratamento, consoante a necessidade do utilizador e o tipo de trabalho em estudo. A Figura 3.9 apresenta o menu inicial do programa utilizado. O programa disponibiliza três opções de aquisição de dados (“gravar aceleração”, “gravar força” e “gravar aceleração e força”) e uma para tratamento dos dados adquiridos (“analisar”). Neste trabalho, foi utilizada a aplicação de registo da aceleração. A Figura 3.10 mostra a interface do módulo de aquisição da aceleração para o condicionador utilizado e respetivo código de programação, onde a taxa de aquisição utilizada foi de 12800 Hz.



Figura 3.9. Painel frontal do programa LabView

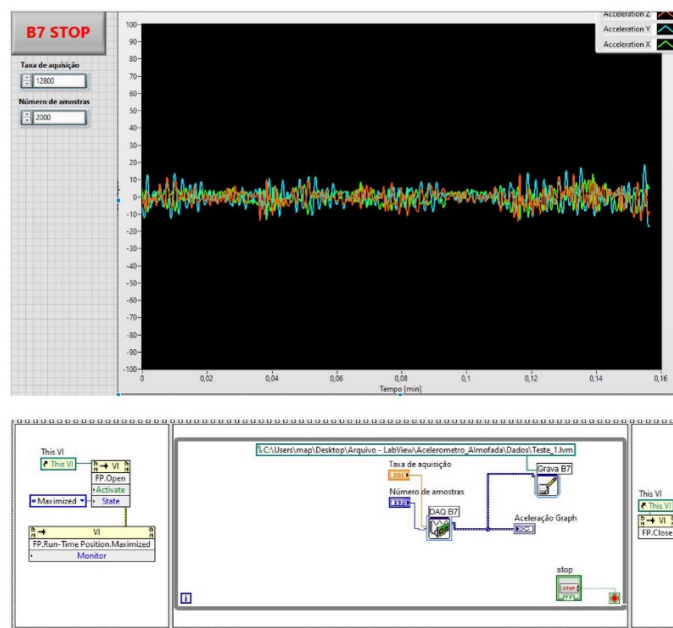


Figura 3.10. Interface do módulo de aquisição da aceleração

Este módulo permite vários tipos de análises de dados, nomeadamente: análise temporal, análise de frequência e análise de bandas de oitava. Neste trabalho optou-se por realizar apenas uma análise temporal, estando esta interface representada na Figura 3.11. A análise temporal, para um dado intervalo de tempo, permite visualizar a evolução da aceleração recolhida em cada um dos eixos (x, y e z), identificar extremos, níveis de pico e fatores de crista. Para além disto, esta análise permite ainda relacionar os valores de aceleração com o respetivo fator de ponderação em frequência e determinar os valores de aceleração total eficaz ponderada em frequência, de modo a estimar o parâmetro $A(8)$.

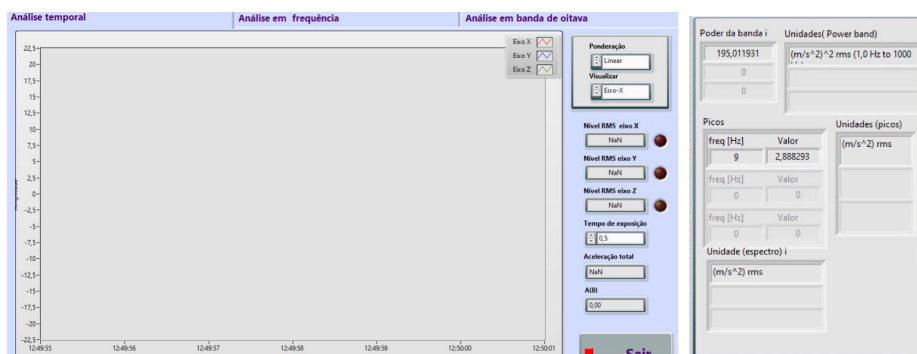


Figura 3.11. Interface da análise temporal

3.7. Setup experimental

Com o veículo devidamente instrumentado, o acelerómetro foi embutido no assento do condutor e ligado à placa de aquisição NI 9239. Posteriormente, foi conectado ao programa de aquisição de dados que foi controlado pelo co-piloto, que auxiliou na coordenação de todos os testes realizados. A Figura 3.12 e a Figura 3.13 representam ao pormenor, todo o *Setup* experimental devidamente montado no veículo e a forma como foi usado durante os testes, já com o co-piloto posicionado para o auxílio da realização dos mesmos.



Figura 3.12. Veículo instrumentado e co-piloto



Figura 3.13. Vista detalhada da conexão da placa de aquisição com o computador

Importa ainda referir que os testes foram feitos em dois dias distintos e à noite. Num deles foram feitos todos os testes referentes ao piso em asfalto e no outro os restantes referentes ao empedrado. Durante os testes não houve paragens para descanso, pelo que tanto o condutor como o co-piloto mantiveram sempre o posicionamento em todos os testes, para garantir que todo o material fosse utilizado de forma uniforme para obter os resultados o mais coerente possível.

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir dos dados recolhidos, assim como a sua discussão.

4.1. Apresentação de resultados

A Figura 4.1 e a Figura 4.2 apresentam, para os dois tipos de pavimento considerados neste estudo (asfalto e empedrado), uma amostra da aceleração eficaz ponderada para VCI, segundo cada um dos eixos coordenados (X, Y e Z). Os exemplos apresentados foram escolhidos aleatoriamente e correspondem ao modo Sport + com uma velocidade de 60km/h. Nesta figura, é perceptível que a amplitude de vibração dominante é no eixo X (este eixo corresponde à direção que vai das costas ao peito, isto é, é a principal direção de aceleração ou desaceleração do movimento), independentemente, do tipo de pavimento em estudo.

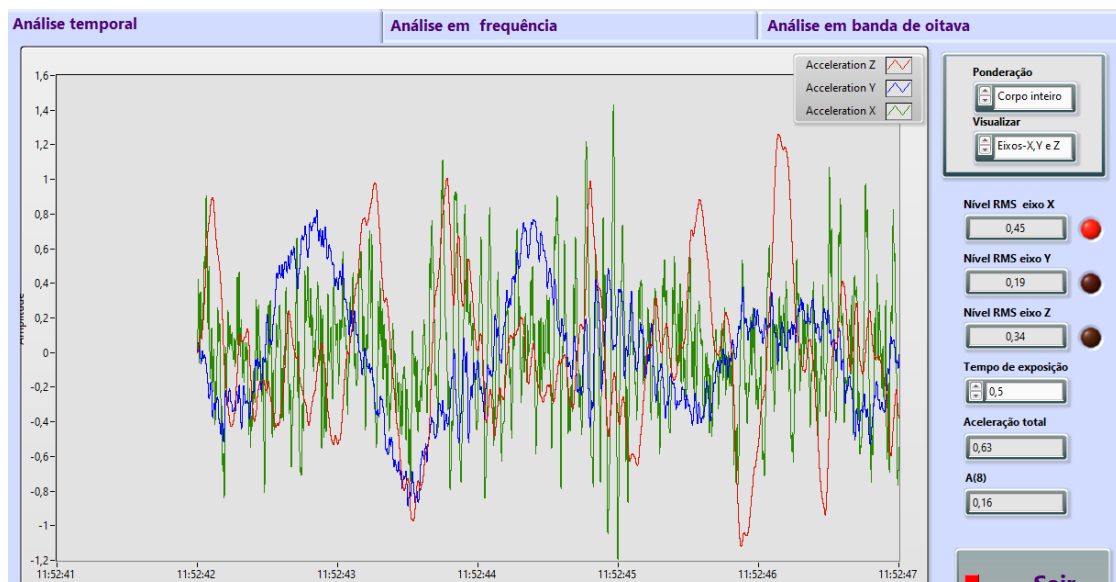


Figura 4.1. Amostra de aceleração ponderada para VCI em asfalto (Sport+ a 60km/h).

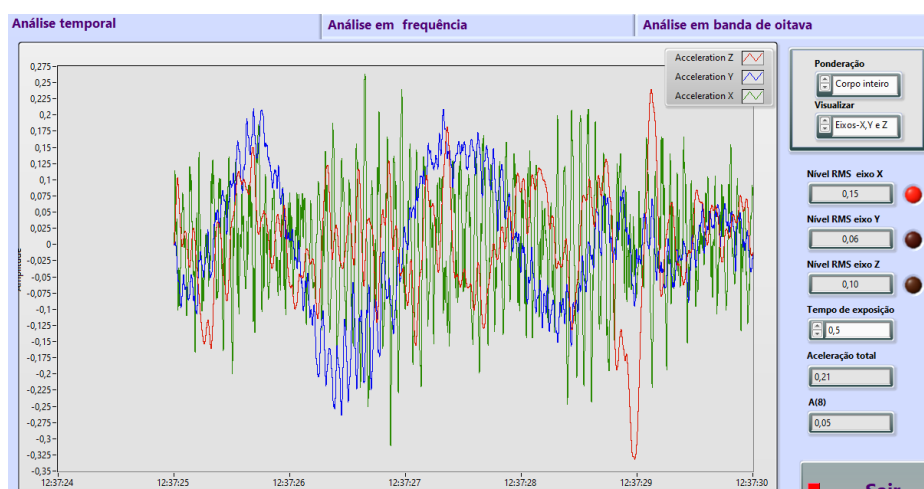


Figura 4.2. Amostra de aceleração eficaz ponderada para VCI em empedrado (sport+ a 60km/h).

Na Tabela 4.1 são apresentadas as médias das acelerações RMS obtidas para o eixo x, y e z e a respetiva média da aceleração eficaz ponderada, das 5 passagens realizadas para cada modo e os respetivos desvios padrões, para os testes em empedrado, enquanto na Tabela 4.2 são apresentados os resultados obtidos em asfalto.

Tabela 4.1. Valor médio e desvio padrão das acelerações ponderadas obtidas em empedrado

Suspensão	RMS X [m/s^2]	RMS Y [m/s^2]	RMS Z [m/s^2]	a(RMS) [m/s^2]
Comfort 40	0,338 ± 0,0160	0,130 ± 0,0360	0,230 ± 0,0219	0,494 ± 0,0561
Comfort + 40	0,356 ± 0,0361	0,158 ± 0,0177	0,236 ± 0,0136	0,526 ± 0,0398
Sport 40	0,280 ± 0,0167	0,142 ± 0,0075	0,226 ± 0,0136	0,496 ± 0,0242
Sport + 40	0,272 ± 0,0117	0,148 ± 0,0098	0,242 ± 0,0232	0,498 ± 0,0223
Comfort 50	0,436 ± 0,0102	0,192 ± 0,0075	0,278 ± 0,0223	0,612 ± 0,0147
Comfort + 50	0,476 ± 0,0120	0,202 ± 0,0160	0,276 ± 0,0310	0,666 ± 0,0174
Sport 50	0,368 ± 0,0040	0,210 ± 0,0303	0,250 ± 0,0167	0,514 ± 0,0049
Sport + 50	0,368 ± 0,0075	0,182 ± 0,0160	0,256 ± 0,0120	0,518 ± 0,0075
Comfort 60	0,570 ± 0,0268	0,172 ± 0,0098	0,324 ± 0,0265	0,794 ± 0,0403
Comfort + 60	0,626 ± 0,0332	0,186 ± 0,0136	0,312 ± 0,0172	0,872 ± 0,0466
Sport 60	0,468 ± 0,0075	0,188 ± 0,0172	0,316 ± 0,0136	0,650 ± 0,0109
Sport + 60	0,470 ± 0,0179	0,216 ± 0,0258	0,316 ± 0,0136	0,654 ± 0,0454

Tabela 4.2. Valor médio e desvio padrão das acelerações ponderadas obtidas em asfalto

Suspensão	RMS X [m/s^2]	RMS Y [m/s^2]	RMS Z [m/s^2]	a(RMS) [m/s^2]
Comfort 40	0,080 ± 0,0179	0,046 ± 0,0049	0,074 ± 0,0080	0,150 ± 0,0180
Comfort + 40	0,084 ± 0,0301	0,054 ± 0,0166	0,078 ± 0,0147	0,148 ± 0,0306
Sport 40	0,074 ± 0,0136	0,036 ± 0,0049	0,074 ± 0,0102	0,134 ± 0,0215
Sport + 40	0,082 ± 0,0075	0,044 ± 0,0049	0,082 ± 0,0098	0,154 ± 0,0136
Comfort 60	0,166 ± 0,0361	0,050 ± 0,0089	0,112 ± 0,0074	0,238 ± 0,0431
Comfort + 60	0,150 ± 0,0289	0,042 ± 0,0075	0,106 ± 0,1020	0,226 ± 0,0185
Sport 60	0,158 ± 0,0319	0,056 ± 0,0080	0,110 ± 0,0063	0,228 ± 0,0256
Sport + 60	0,146 ± 0,0338	0,054 ± 0,0080	0,104 ± 0,0102	0,216 ± 0,0294
Comfort 80	0,228 ± 0,0668	0,058 ± 0,0075	0,100 ± 0,0167	0,320 ± 0,0294
Comfort + 80	0,286 ± 0,0621	0,062 ± 0,0075	0,106 ± 0,0102	0,398 ± 0,8890
Sport 80	0,164 ± 0,0242	0,050 ± 0,0000	0,088 ± 0,0754	0,228 ± 0,0319
Sport + 80	0,248 ± 0,0453	0,066 ± 0,0080	0,110 ± 0,0155	0,344 ± 0,0647

Para compreender melhor o significado dos valores de aceleração mencionados nas tabelas anteriores e para fazer uma comparação direta entre esses valores e o que significam em termos de conforto, recorre-se à Tabela 4.3 retirada da norma ISO 2631.

Tabela 4.3. Grau de conforto segundo os valores de aceleração RMS (ISO 2631)

Aceleração Eficaz (m/s^2)	Reação Provável
Inferior a 0,315	Não é desconfortável
Entre 0,315 a 0,63	Um pouco desconfortável
Entre 0,5 a 1	Razoavelmente desconfortável
Entre 0,8 a 1,6	Desconfortável
Entre 1,25 a 2,5	Muito desconfortável
Superior a 2	Extremamente desconfortável

Cruzando estes valores com os resultados obtidos dos testes, a Tabela 4.4 representa as reações de conforto para os testes em empedrado e a Tabela 4.5 para os testes em asfalto.

Tabela 4.4. Reações de conforto para os testes em empedrado

Teste + Velocidade	Aceleração Eficaz (m/s^2)	Reação Provável
Comfort 40	0,494	Um pouco desconf.
Comfort 50	0,612	Razoavelmente desconf.
Comfort 60	0,794	Razoavelmente desconf.
Comfort + 40	0,526	Um pouco desconf.
Comfort + 50	0,666	Razoavelmente desconf.
Comfort + 60	0,872	Razoavelmente desconf.
Sport 40	0,496	Um pouco desconf.
Sport 50	0,514	Razoavelmente desconf.
Sport 60	0,650	Razoavelmente desconf.
Sport + 40	0,498	Um pouco desconf.
Sport + 50	0,518	Razoavelmente desconf.
Sport + 60	0,654	Razoavelmente desconf.

Tabela 4.5. Reações de conforto para os testes em asfalto

Teste + Velocidade	Aceleração Eficaz (m/s^2)	Reação Provável
Comfort 40	0,150	Não é desconf.
Comfort 60	0,238	Não é desconf.
Comfort 80	0,320	Um pouco desconf.
Comfort + 40	0,148	Não é desconf.
Comfort + 60	0,226	Não é desconf.
Comfort + 80	0,398	Um pouco desconf.
Sport 40	0,134	Não é desconf.
Sport 60	0,228	Não é desconf.
Sport 80	0,355	Um pouco desconf.
Sport + 40	0,154	Não é desconf.
Sport + 60	0,216	Não é desconf.
Sport + 80	0,344	Um pouco desconf.

4.2. Discussão de resultados

Analisando a Tabela 4.1 e a Tabela 4.2, apesar das variadas sensações sentidas, aquando dos diferentes modos de suspensão, os resultados acabaram por revelar valores muito próximos entre eles. A diferença é notória entre o tipo de piso, onde a estrada em empedrado revela valores bastante mais elevados, mesmo para velocidades inferiores, quando comparado com os valores resultantes da estrada em asfalto.

Nota-se maior linearidade nos resultados para o piso de asfalto, dado que como o piso não apresenta irregularidades significativas, os valores obtidos são muito mais próximos e concisos, mesmo entre os diferentes modos de suspensão. É notório que, à medida que a velocidade aumenta, o veículo está mais exposto às vibrações e como tal, as respetivas acelerações eficazes também aumentam.

No piso de empedrado, nota-se uma maior diferença de valores entre os diferentes modos de suspensão, mesmo para velocidades iguais, que poderá ser resultante das várias irregularidades que o piso apresenta. Apesar desta diferença, os valores de aceleração são bastantes próximos, o que sugere que, seja qual for o modo de suspensão utilizado, a nível de conforto as sensações vão ser muito idênticas e, de um modo geral, o BMW 640D demonstra ser confortável. Este grau de conforto parece estar associado a toda a sua qualidade de construção, assim como ao excelente sistema de suspensão adaptativo e amortecimento de vibrações que possui, característico das gamas médias/elevadas dos automóveis atuais.

Analisando mais em pormenor os valores obtidos, pode-se afirmar que os modos de suspensão “*sport*” e “*sport +*” apresentam valores mais baixos de aceleração do que os modos de suspensão “*comfort*” e “*comfort +*”. Esta diferença é mais notória no piso de empedrado, face às irregularidades que o piso apresenta, como já foi mencionado anteriormente. Estes resultados sugerem que a condução nos modos desportivos é mais confortável, com valores de vibração mais baixos, quando comparada com os modos “confortáveis”. A razão para esta diferença parece estar no facto de no modo de suspensão “confortável” a suspensão ser mais macia, dado que há uma menor compressão da mola do amortecedor, o que diminui a dissipação de energia, isto é, as vibrações induzidas pelas irregularidades da estrada não se anulam tão rapidamente [23]. Esta situação faz com que haja mais “ondas” de vibração vertical da suspensão, i.e. vibração com maior frequência e

menor amplitude, e, por isso, conduz a que não se sinta tanto o impacto entre o solo e o veículo [24]. Nos modos mais desportivos a suspensão é mais rígida e a compressão da mola do amortecedor poderá ser maior, onde o veículo está a uma distância menor do solo, fazendo com que os impactos não sejam mais instantâneos que nos modos confortáveis e, portanto, menos vibrações serão captadas pelo acelerómetro. Contudo, na prática, sente-se muito mais o impacto em “seco”, o que torna a suspensão desportiva mais desconfortável, apesar de os valores sugerirem o contrário. Na realidade o modo desportivo tenderá a beneficiar outros fatores de condução que não foram avaliados neste trabalho, nomeadamente estabilidade, manobrabilidade e estabilidade em curva.

Apesar desta discrepância de valores, a diferença de comportamento é muito pequena, o que nos indica que apesar de haver modos de suspensão onde esta é mais rígida, o seu nível de conforto mantém-se próximo dos modos de suspensão onde esta é mais macia, o que confirma, a qualidade de construção deste sistema.

Analisando a Tabela 4.4 e a Tabela 4.5, pode-se afirmar que nenhum dos modos de suspensão considerados provoca uma reação desconfortável ou muito desconfortável para o condutor do veículo, em quaisquer das velocidades e piso considerados. Assim, o *BMW*® 640D com suspensão adaptativa semi-ativa, parece garantir conforto ao condutor numa condução em cidade, quer seja no modo comfort quer seja no modo sport.

Comparando os valores da aceleração eficaz no asfalto e correlacionando com as reações prováveis em termos de conforto, a velocidade de 80 km/h foi a única que demonstrou sinais de “um pouco de desconforto”, sendo que nas outras velocidades não há quaisquer indícios de desconforto. Enquanto para o piso empedrado, qualquer que seja o modo de suspensão ou velocidade testada, há sempre alguns indícios de desconforto, sendo que a tendência é estes indícios aumentarem à medida que a velocidade aumenta. Este comportamento está de acordo com o previsto, pois as irregularidades do solo têm mais impacto no veículo se este estiver a circular a uma maior velocidade. É razoável afirmar-se que, se os testes em empedrado fossem feitos a velocidades superiores às utilizadas neste trabalho, se iriam obter patamares considerados desconfortáveis. Contudo, na realidade, é um cenário pouco provável, visto que essas velocidades não são praticadas num meio citadino, e em particular nesse tipo de piso. Relativamente ao piso de asfalto, visto que as

irregularidades nesse tipo de piso não são significativas, os resultados obtidos serão sempre muito mais lineares e não tão acentuados quanto os do piso empedrado.

Para ilustrar melhor este aumento do índice de desconforto com o aumento da velocidade, a Figura 4.3 e a Figura 4.4 representam essa evolução para os pisos em asfalto e em empedrado, respetivamente, para os valores obtidos anteriormente. Cada um dos gráficos diz respeito a um dos modos de suspensão avaliados. Ainda nestes gráficos, no eixo das abcissas observa-se a velocidade desenvolvida pelo veículo e no eixo das ordenadas, a vibração total em (m/s^2). Assim, estes gráficos representam a velocidade desenvolvida pelo veículo em função da vibração total. As linhas horizontais representam os níveis de conforto pré-definidos pela norma ISO 2631, como se pode verificar, em nenhum dos casos se atinge o patamar associado a “desconfortável”.

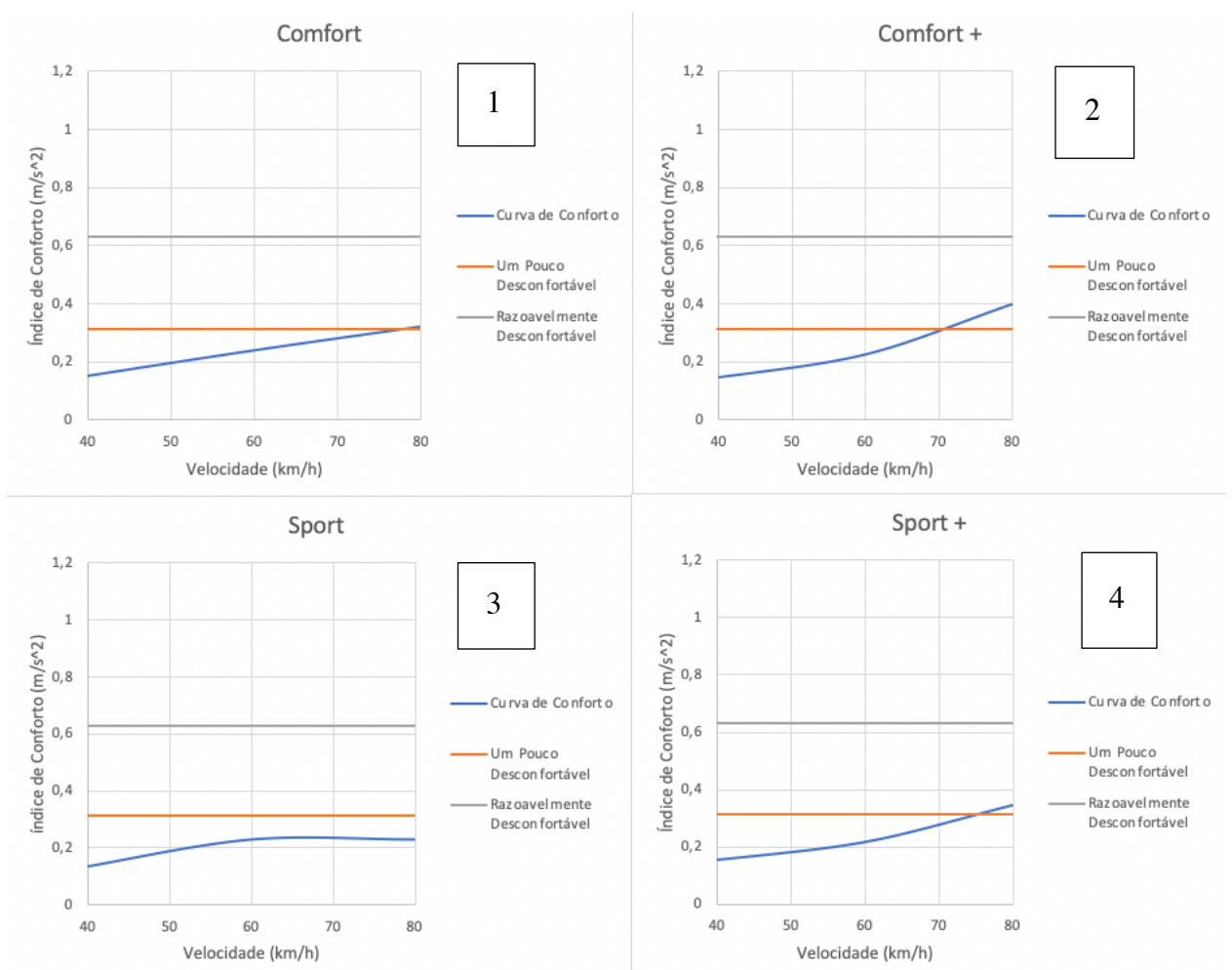


Figura 4.3. Evolução do índice de desconforto com o aumento da velocidade em asfalto (1-Comfort, 2-Comfort+, 3-Sport, 4-Sport+)

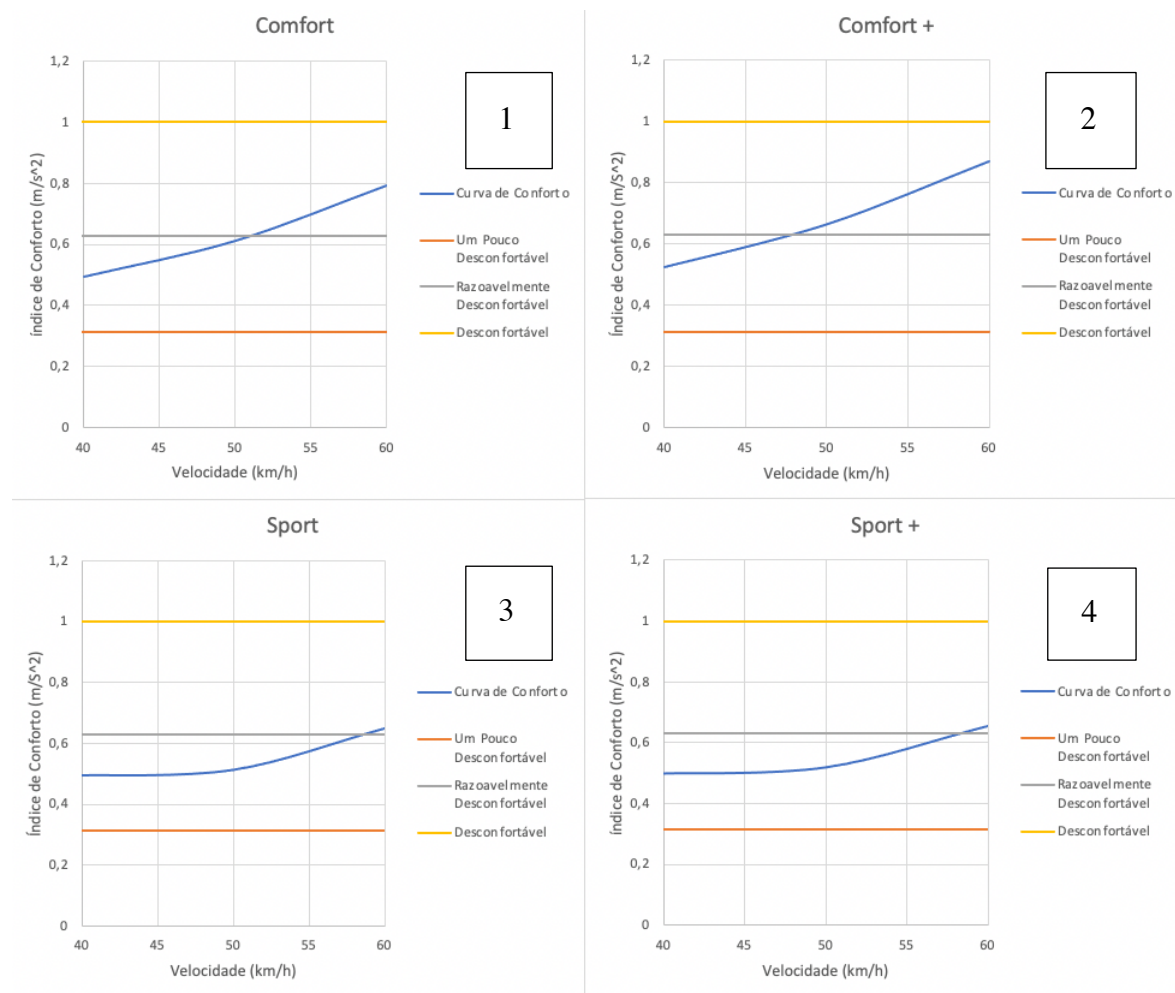


Figura 4.4. Evolução do índice de desconforto com o aumento da velocidade em empedrado (1-Comfort, 2-Comfort+, 3-Sport, 4-Sport+)

Os resultados estão em linha com o esperado e traduzem a sensação do condutor. No caso do empedrado, no final da realização dos testes, o condutor apresentou uma descrição de algum desconforto e percepção de dor na zona lombar, enquanto que para o asfalto, apenas descreveu algum cansaço resultante do tempo que esteve a conduzir, mas nenhum tipo de desconforto.

4.3. Estudo estatístico

Com o objetivo de verificar se existe alguma diferença significativa no nível de vibração induzida no condutor com a variação da velocidade e os modos de suspensão, foi realizada uma análise de variância, de modo a verificar se existe diferença significativa do nível de vibração em relação à variação de velocidade e tipo de pavimento [25].

Segundo Callegari-Jacques [26], um dos modelos mais simples de avaliação de variância é o que analisa os dados segundo um critério de classificação. Assim sendo, para a verificação no presente trabalho, utiliza-se a análise de variância de fator único. Numa análise de variância assumem-se duas hipóteses: H₀, os tratamentos não afetam a variável de interesse e H₁ onde os tratamentos de alguma forma afetam a variável de interesse. Estas análises, foram realizadas para um nível de significância de 0,05, ou seja, uma confiança de 95% o que quer dizer que, se o parâmetro p for menor que 0,05 ($p < 0,05$), a hipótese H₁ é aceite, indicando uma correlação entre os tratamentos e a variável. Caso contrário, a hipótese H₁ é rejeitada e adota-se H₀ [4].

Para a verificação de diferenças do nível de vibração com relação à velocidade para o piso em asfalto, separou-se a velocidade em três grupos (40, 60 e 80 km/h), sendo que cada grupo, engloba todos os valores de aceleração recolhidos e as combinações entre os diferentes modos de suspensão, dois a dois. A análise foi realizada com o auxílio da ferramenta de análise de dados do EXCEL.

A Tabela 4.6 contém os resultados da análise para as três velocidades de circulação em asfalto.

Tabela 4.6. Valores de p em asfalto para as diferentes velocidades de circulação

Asfalto 40 km/h						
Par de Modos	Comfort/Comfort+	Comfort/Sport	Comfort/Sport+	Comfort+/Sport	Comfort+/Sport+	Sport/Sport+
p	0,456908	0,143072	0,366039	0,239322	0,366098	0,080048
Asfalto 60 km/h						
Par de Modos	Comfort/Comfort+	Comfort/Sport	Comfort/Sport+	Comfort+/Sport	Comfort+/Sport+	Sport/Sport+
p	0,315331	0,350877	0,213373	0,451449	0,291507	0,277636
Asfalto 80 km/h						
Par de Modos	Comfort/Comfort+	Comfort/Sport	Comfort/Sport+	Comfort+/Sport	Comfort+/Sport+	Sport/Sport+
P	0,126889	0,056706	0,339599	0,007759	0,179262	0,009099

O valor de p para as velocidades de 40 e 60 km/h é sempre superior a 0,05, revelando que não existem diferenças estatisticamente significativas para a aceleração RMS ponderada pela frequência, estando em linha com a percepção dos testes realizados. Contudo, para a velocidade de circulação de 80 km/h já se encontram valores de p inferiores a 0,05, nomeadamente para as comparações entre o par de modos *Comfort + / Sport* e o par *Sport / Sport +*, o que indica que existem diferenças estatisticamente significativas entre os testes realizados.

Passando às análises para os testes em empedrado, é expectável que haja mais diferenças estatisticamente significativas quando comparado com as análises no asfalto. Ainda assim, para a velocidade de 40 km/h não foram registados quaisquer tipos de diferenças, visto o p ser sempre superior a 0,05, comprovando assim a qualidade e a veracidade da realização dos testes, como podemos ver na Tabela 4.7.

Tabela 4.7. Valores de p em empedrado para as diferentes velocidades de circulação

Empedrado 40 km/h						
Par de Modos	Comfort/Comfort+	Comfort/Sport	Comfort/Sport+	Comfort+/Sport	Comfort+/Sport+	Sport/Sport+
p	0,191475	0,475152	0,449841	0,119243	0,132736	0,453063
Empedrado 50 km/h						
Par de Modos	Comfort/Comfort+	Comfort/Sport	Comfort/Sport+	Comfort+/Sport	Comfort+/Sport+	Sport/Sport+
p	0,000736	2,74E-05	1,37E-05	6,86E-06	9,83E-06	0,200399
Empedrado 60 km/h						
Par de Modos	Comfort/Comfort+	Comfort/Sport	Comfort/Sport+	Comfort+/Sport	Comfort+/Sport+	Sport/Sport+
p	0,017609	0,000491	0,000454	0,000377	7,64E-05	0,379817

Ainda na Tabela 4.7 pode-se observar que a maiores velocidades já se nota diferenças significativas, com exceção para as comparações entre o par de modos *Sport / Sport +*, onde o valor de p foi sempre superior a 0,05, tanto para a velocidade de 50 km/h como para a velocidade de 60 km/h.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1. Conclusões

O trabalho experimental realizado, permitiu verificar e quantificar o nível de conforto a que um indivíduo está sujeito ao conduzir um automóvel com um sistema de suspensão semi-ativo continuamente variável, podendo este ser adaptado em termos de conforto consoante as necessidades do seu utilizador, para diferentes tipos de pisos e de velocidades através de uma análise de vibrações de corpo inteiro. O estudo envolveu um veículo da marca *BMW*®, modelo 640D, possuindo este sistema de suspensão como extra, fazendo dele um carro de gama média/elevada. Era expectável obter níveis de conforto elevados, o que ficou demonstrado na análise realizada. No entanto, seria importante perceber se o ajuste da suspensão entre o modo dito confortável e outro desportivo, alteraria o conforto e o carro se tornaria desconfortável. Os resultados revelaram que as diferenças entre as acelerações ponderadas entre os diversos modos são reduzidas, podendo-se afirmar que, de um modo geral, esta suspensão confere ao carro um excelente conforto. Nos resultados obtidos verificou-se que, à medida que a velocidade aumenta, os registos das acelerações também aumentam, indicando que o corpo humano está então mais exposto às vibrações induzidas, mas em nenhum caso atingiu níveis significativos o suficiente para se sentir um desconforto associado à condução, independentemente do tipo de piso e do modo de suspensão utilizado. Comparando os dois pisos avaliados, apesar de no asfalto terem sido feitos testes a velocidades mais elevadas, visto que o empedrado apenas é característico nas cidades e nessas mesmas não é permitido circular a uma velocidade superior a 50 km/h, este foi o que registou acelerações ponderadas mais elevadas, devido ao maior número de irregularidades do piso, onde a pior reação esperada dado os resultados obtidos, foi de “razoavelmente desconfortável” para as velocidades de 50 e 60 km/h. No asfalto apenas foram registadas reações de “não é desconfortável” e “um pouco desconfortável” para velocidades de 60 e 80 km/h, respetivamente. Estes resultados, além de estarem em linha

com o esperado, também condizem com a sensação tida por parte do condutor durante a realização dos testes.

Do ponto de vista estatístico, foi feita uma análise de variância, onde o objetivo foi comprovar a veracidade dos resultados obtidos nos testes, para ver se havia diferenças estatisticamente significativas nos níveis de vibração registados, tendo em conta o piso, as velocidades e os diferentes tipos de modos de suspensão. Verificou-se em alguns casos resultados com diferenças estatisticamente significativas. Estas diferenças foram mais notórias no piso de empedrado e em velocidades mais elevadas. Já no asfalto, quase nenhuma diferenças significativas foram registadas.

Analisando todos os resultados obtidos, pode-se afirmar que, nos aspetos estudados o veículo objeto de estudo satisfez com distinção o porquê de ser considerado de gama média/elevada. Refira-se a importância do conforto de condução, nomeadamente em condutores expostos diariamente a muitas horas de condução.

Do ponto de vista pessoal, o autor adquiriu conhecimentos na área da biomecânica, área essa que muito pouco conhecia. A oportunidade de conciliar a engenharia com o campo da saúde foi uma experiência muito enriquecedora, dando uma visão alargada de extensões possíveis da engenharia, o que certamente possibilitará uma abertura de novos horizontes para o futuro. Este trabalho possibilitou também o desenvolvimento, preparação e implementação de uma componente experimental, que permitiu a aquisição de competências importantes no domínio da engenharia mecânica.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para trabalhos futuros, deixa-se as perspectivas de estudos similares a este, mas com veículos de outras gamas, sejam estas equivalentes, ou mais baixas, com sistemas de suspensões passivas e ativas, para tentar perceber a grande diferença e comprovar a mais valia de um sistema de suspensão semi-ativo ajustável, tanto em termos de conforto para o condutor, como para a saúde a médio-longo prazo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Oliveira, K. F. (2015). *Controlo semi-ativo da suspensão de um veículo automóvel*. 1–106. Tese de mestrado.
- [2] Almeida, V. (2014). *Análise do comportamento dinâmico de um veículo automóvel de rali*. Universidade de Coimbra. Tese de mestrado
- [3] FERNANDES, J. C.. “*Segurança nas vibrações sobre o corpo humano*”, 2000. Texto académico.
- [4] Kaderli, F. (2010). Universidade federal do rio grande do sul escola de engenharia. In *Diabete*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Tese de mestrado
- [5] Margarido, D. (2007). *Metodologias para a Avaliação dos Níveis de Vibração em Estruturas do Ponto de Vista do Conforto Humano*. Universidade do Porto. Tese de mestrado.
- [6] GRIFFIN, M., J. – “*HandBook of human vibration*”. San Diego. Academic Press, 1990. ISBN 0-12-303040-4
- [7] Ferreira, V. (2015). *Avaliação das vibrações induzidas ao sistema mão-braço na prática desportiva*. Universidade de Coimbra. Tese de mestrado
- [8] SALIBA, T. M.. “*Manual Prático de Avaliação e Controle de Vibração*”. São Paulo. LTR, 2009. ISBN 9788536113494
- [9] SOEIRO, N.S.. “*Vibrações e o corpo humano: uma avaliação ocupacional*”. Belém: GVA – UFPA, 2011. Monografia.
- [10] BRAGA, C.. “*Exposição ocupacional a vibrações no sistema mão-braço no sector da construção*”. Porto: FEUP, 2007. Tese de mestrado.
- [11] REHN, B., BERGDAHL, C., AHLEGRAN, C., FROM, C., JARVHOLM, B., LUNDSTROM, R., NILSSON, T., SUNDELIN, G.. *Musculoskeletal Symptoms among Drivers of All-Terrain Vehicles*. Journal of Sound and Vibration. ISSN 0022-460X. Vol. 253 (1) (2002) p. 21-29.
- [12] ISO 2631-1. (1997). International Standard International Standard.
- [13] ISO 2631-2. (2003). International Standard International Standard. *61010-1 © Iec:2001, 2003*, 13.
- [14] ISO 5349-1:2001. Mechanical vibration – Measurement and evaluation of human exposure to hand-transmitted vibration – Part 1: General requirements.
- [15] Aroeira, C. (2017). “*Avaliação da exposição dos trabalhadores às vibrações – corpo inteiro*”, artigo. Acedido a 20 de Junho de 2020, em: <https://www.dbwave.pt/avaliacao-da-exposicao-dos-trabalhadores-as-vibracoes->

[corpo-inteiro/](#)

- [16] Lopes, E. S. (2015, 19 de Outubro). “Os efeitos da vibração na saúde do trabalhador”, artigo. Acedido a 20 de Junho de 2020, em: <http://www.mundohusqvarna.com.br/coluna/os-efeitos-da-vibracao-na-saude-do-trabalhador/>
- [17] Almeida, T. F. T. (2013). *Avaliação biomecânica na prática de enduro*. Universidade de Coimbra.
- [18] BECKER, T. “Desenvolvimento de uma mesa vibratória para estudos sobre vibração no corpo humano, medições em um grupo de motoristas e ajuste de um modelo biodinâmico”. Tese para obtenção de título de doutor em engenharia. Porto Alegre: UFRGS, 2006.
- [19] WALBER, M. “Avaliação dos Níveis de Vibração Existentes em Passageiros de Ônibus Rodoviários Intermunicipais, Análise e Modificação Projetual”. Tese para obtenção do título em Doutor em Engenharia. Porto Alegre: UFRGS, 2009.
- [20] DIRECTIVE 2002/44/EC. “On the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (vibration)”. L177/13 (25-06-2002).
- [21] WONG, J. Y. *Theory of Ground Vehicles*. 3rd ed. USA: John Wiley and Sons, 2001.
- [22] BALBINOT, A. “Caracterização dos níveis de vibração em motoristas de ônibus: um enfoque no conforto e na saúde”. Tese para obtenção de título de doutor em engenharia. Porto Alegre: UFRGS, 2001.
- [23] Hamed, M., Elrawemi, M., Gu, F., & Ball, A. D. (2018). *Effects of Spring Stiffness on Suspension Performances Using Full Vehicle Models*. 2, 430–439. <https://doi.org/10.21467/proceedings.4.10>
- [24] Jugulkar, L. M., Singh, S., & Sawant, S. M. (2016). *Analysis of suspension with variable stiffness and variable damping force for automotive applications*. *Advances in Mechanical Engineering*, 8(5), 1–19. <https://doi.org/10.1177/1687814016648638>
- [25] Huang, Y., & Li, D. (2019). *Subjective discomfort model of the micro commercial vehicle vibration over different road conditions*. *Applied Acoustics*, 145, 385–392. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.10.028>
- [26] CALLEGARI-JACQUES, S.M. *Bioestatística: Princípios e Aplicações*. Porto Alegre: Ed. Artmed, 2003.