

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

INVESTIGAÇÃO DA TRANSMISSIBILIDADE DE VEÍCULOS AUTOMOTORES DE  
PASSEIO

por

Elton Michelsen Fontoura

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, junho de 2019.

INVESTIGAÇÃO DA TRANSMISSIBILIDADE DE VEÍCULOS AUTOMOTORES DE  
PASSEIO

por

Elton Michelsen Fontoura

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Mário Roland Sobczyk Sobrinho  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Mecânica dos Sólidos**

Orientador: Prof. Herbert Martins Gomes

Coorientador: Me. Eng. Mário Fedatto Neto

Comissão de Avaliação:

Prof. Rodrigo Rossi

Prof. Juan Pablo Raggio Quintas

Prof. Herbert Martins Gomes

Porto Alegre, junho de 2019.

### CIP - Catalogação na Publicação

Fontoura, Elton Michelsen  
Investigação da transmissibilidade de veículos  
automotores de passeio / Elton Michelsen Fontoura. --  
2019.

15 f.

Orientador: Herbert Martins Gomes.

Coorientador: Mário Fedatto Neto.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de  
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto  
Alegre, BR-RS, 2019.

1. Vibração de Corpo Inteiro. 2. Vibração Corpo  
Humano. 3. Automóveis. 4. VCI. 5. ISO 2631. I. Gomes,  
Herbert Martins, orient. II. Título.

*“Se fracassar, ao menos que fracasse  
ousando grandes feitos, de modo que a sua postura não  
seja nunca a dessas almas frias e tímidas que não  
conhecem nem a vitória nem a derrota”.*

*Theodore Roosevelt*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a meus pais, Gustavo Fontoura da Silva e Sonia Marques Michelsen Felipe, meu padrasto José Orvalino Felipe por sempre me darem carinho, apoio, estrutura, uma boa educação e a possibilidade de fazer esse curso; aos meus avós Penido Fontoura da Silva e Marlene Silva da Silva pelo grande apoio que me deram ao longo da vida e por terem me ajudado com os meus estudos.

Agradeço a Deus por me dar capacidade intelectual e emocional para cursar e, finalmente, chegar à conclusão deste curso.

Agradeço ao Prof. Herbert Martins Gomes pela grande ajuda e suporte na orientação no trabalho de conclusão do curso. E ao meu coorientador Mário Fedatto pela ajuda neste trabalho.

Aos professores que me acompanharam ao longo desse curso de formação, por transmitirem o conhecimento deles, aprimorando o crescimento e o aprendizado dos alunos.

Ao meu amigo e colega da faculdade Gustavo Luis Zeidler por ter ajudado com a coleta de dados. E ao meu amigo André Piffero pela amizade desde a época do colégio.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, por ser de alta qualidade, disponibilizar de bons professores, estrutura para aprendizado e uma lição para vida inteira.

FONTOURA, E. M. **Investigação da transmissibilidade de veículos automotores de passeio.** 2019. 15f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

## RESUMO

O conforto em veículos de passeio é um assunto complexo que abrange diversas áreas de conhecimento. Ele está associado ao conforto acústico, térmico, vibracional, de odores, aspectos estéticos e de ergonomia. Especificamente no que tange a vibração, este tem sido um quesito recorrente em termos de melhoramento dos fabricantes de automóveis, pois ele está fortemente correlacionado com as vendas de determinada marca ou modelo. Este trabalho avalia os níveis de transmissibilidade da vibração em veículos automotores de passeio a partir de índices como o SEAT e das próprias curvas de transmissibilidade entre piso e assento nestes veículos. O estudo realiza testes experimentais usando equipamentos que permitem a medição da aceleração em três direções simultâneas para trechos pré-definidos com o objetivo de fazer uma comparação entre marcas de veículos e em diferentes pontos no interior destes. Ao final, apresenta-se um comparativo sobre os modelos de testes referente ao conforto vibracional e eventualmente sobre sua adequabilidade frente a questões de saúde em um cenário de uso mais intensivo como no caso de motoristas profissionais.

**PALAVRAS-CHAVE:** Vibração de Corpo Inteiro, Vibração Corpo Humano, automóveis, VCI, ISO 2631, NR-15, Exposição à Vibração.

FONTOURA, E. M. **Investigation of vibration transmissibility on ride vehicles.** 2019. 15f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

## ABSTRACT

Comfort in passenger cars is a complex subject that covers several areas of knowledge. It is associated with acoustic, thermal, vibrational, smell, aesthetic and ergonomic comfort. Specifically with regard to vibration, this has been a recurring issue in terms of the improvement of car manufacturers, as it is strongly correlated with sales of a particular make or model. This work evaluates the levels of transmissibility of vibration in riding vehicles using parameters like the SEAT index and the curves of transmissibility between floor and seat in these vehicles. The study performs experimental tests using equipment that allows the measurement of acceleration in three simultaneous directions for pre-defined road sections with the aim at comparing different vehicle brands at different points inside the vehicle. In the end, a comparison is presented on the vibration comfort levels in the tested models and, eventually, on their suitability for health risk in a more intensive use scenario as in the case of professional drivers.

**KEYWORDS:** Whole Body Vibration, Human Body Vibration, ride vehicles, VCI, ISO 2631, NR-15, Exposure to Vibration .

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Curva de ponderação por frequência $W_k$ e $W_d$ para VCI e $W_h$ para VMB.....	5
Figura 3.2 – Eixos e orientações de medição para posição sentada e para apoio da mão. ....	6
Figura 4.1 – Sistema dois seatpad tri-axiais e acelerômetro extra para medição no volante. ....	7
Figura 4.2 – Locais de medição da aceleração (a) no interior do veículo para posição 1 e (b) demais posições medidas. ....	8
Figura 4.3 – Veículos utilizados nas medições: (a) Ford Fiesta, (b) Chevrolet Sonic, (c) Volkswagen Gol 1.0 G5.....	8
Figura A.1 – Dados dos Acelerômetros ADXL-335 utilizados. ....	16
Figura A.2 – Especificações da placa de aquisição USB-1208FS ( <i>Measurement Computing</i> ). ....	17
Figura A.3 – Exemplo de sinal típico medido para o acelerômetro 1 (piso), o acelerômetro 2 (assento) e o acelerômetro 3 (volante), posição do motorista, veículo Fiesta.....	18
Figura A.4 – Exemplo de sinal típico medido para o acelerômetro 1 (piso), o acelerômetro 2 (assento) e o acelerômetro avulso 3 (instalado no volante), posição do motorista, veículo Gol. ....	18
Figura A.5 – Trajeto em Canoas onde foram feitas as medições.....	19
Figura A.6 – Tipo de piso encontrados no trajeto onde foram feitas as medições. ....	19
Figura A.7 – <i>Seatpad</i> e acelerômetros posicionados corretamente no piso e no assento, da esquerda para a direita, para procedimento de medição de vibração. Eixos coordenados indicam orientação final dos acelerômetros.....	20



## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Curvas de ponderação e fatores multiplicativos para vibração VCI e VMB. ....	6
Tabela 4.1 – Especificações técnicas dos veículos testados. ....	8
Tabela 5.1 – Resumo dos valores de aceleração e critérios usados nas comparações.....	10
Tabela 5.2 – Acelerações medidas e calculadas para os pontos do piso do Ford New Fiesta SE 2015. ....	10
Tabela 5.3 – Acelerações medidas e calculadas para os pontos dos assentos do Ford New Fiesta SE 2015. ....	10
Tabela 5.4 – Acelerações medidas e calculadas para a transmissibilidade por meio do volante do Ford New Fiesta SE 2015.....	11
Tabela 5.5 – Acelerações medidas e calculadas para os pontos do piso do Volkswagen Gol. .	11
Tabela 5.6 – Acelerações medidas e calculadas para os pontos dos assentos do Gol 2009....	11
Tabela 5.7 – Acelerações medidas e calculadas para a transmissibilidade por meio do volante do Volkswagen Gol 2009.....	12
Tabela 5.8 – Acelerações medidas e calculadas para os pontos do piso Chevrolet Sonic LTZ 2013. ....	12
Tabela 5.9 – Acelerações medidas e calculadas para os pontos dos assentos do Chevrolet Sonic LTZ 2013.....	12
Tabela 5.10 – Acelerações medidas e calculadas para a transmissibilidade por meio do volante do Chevrolet Sonic LTZ 2013. ....	13
Tabela 5.11 – Índice SEAT de cada assento do Ford New Fiesta SE 2015.....	13
Tabela 5.12 – Índice SEAT de cada assento do Volkswagen Gol 2009.....	13
Tabela 5.13 – Índice SEAT de cada assento do Chevrolet Sonic LTZ 2013. ....	13

ÍNDICE	Pág.
AGRADECIMENTOS .....	v
RESUMO .....	vi
ABSTRACT .....	vii
LISTA DE FIGURAS .....	viii
LISTA DE TABELAS .....	ix
ÍNDICE .....	x
1 INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Motivação .....	1
1.2 Objetivos.....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	1
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	3
3.1 A vibração.....	3
3.2 Causas e efeitos da vibração no corpo humano e normas e limites de exposição .....	3
3.3 Procedimentos de Avaliação de VCI e VMB .....	4
3.4 Índice SEAT ( <i>Seat Effective Amplitude Transmissibility</i> ) .....	7
4 MATERIAL E MÉTODOS .....	7
4.1 Equipamentos utilizados e procedimentos .....	7
4.2 Modelos dos veículos utilizados.....	8
4.3 Trajeto e tipos de pisos percorridos .....	9
4.4 Motoristas que participaram das medições .....	9
5 RESULTADOS .....	9
5.1 Avaliação sobre conforto e risco à saúde.....	9
5.2 Resultados para análise de conforto e saúde .....	9
5.3 Resultados para o índice SEAT do assento .....	13
6 CONCLUSÕES .....	13
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	14
ANEXO A .....	16
APÊNDICE A .....	18

## 1 INTRODUÇÃO

Uma ferramenta essencial no processo de desenvolvimento de veículos de passeio é a capacidade de quantificar e classificar o seu comportamento dinâmico. Hoje isso é feito por meio de testes subjetivos ou mesmo de testes objetivos. Testes subjetivos têm a desvantagem de ter inúmeros fatores que podem influenciar as opiniões dos motoristas de testes, enquanto testes objetivos têm a vantagem da repetitividade. Assim, os métodos objetivos de hoje são muitas vezes capazes de fornecer classificação aproximada dos veículos quanto ao seu conforto à vibração. Testes de sensibilidade perceptiva indicam que os humanos são bastante sensíveis a transientes de vibração do movimento do veículo. Um problema com muitos índices e parâmetros de medida comuns para avaliar conforto em veículos de passeio é o impacto que estes transientes têm quando a média geral é usada para condensar os dados de medição.

Segundo Patil e More, 2016, o conforto em veículos de passeio é um dos fatores mais críticos para avaliar o desempenho do automóvel e tem sido um tópico de interesse para pesquisadores por muitos anos. Os projetistas de automóveis dão uma atenção especial ao isolamento de vibrações no carro, a fim de proporcionar uma viagem confortável para os passageiros. As características do nível de vibração afetam não apenas o conforto das pessoas que estão no carro, mas também afetam direta ou indiretamente a potência do veículo, economia e desempenho em termos de manutenção. O conforto ao dirigir é a soma das sensações de ruído, vibração, calor, odor, estética, etc. dentro de um veículo em condução, experimentado tanto pelo motorista quanto pelos passageiros. A otimização do conforto vai além dos limites indicados para vibração de corpo inteiro ISO 2631-1, 1997, pois afeta não só conforto, mas a segurança e a saúde dos passageiros. O conforto é a primeira impressão durante um *test drive* e é um critério importante na tomada de decisão na compra de um novo carro, portanto, representa a primeira apreciação da imagem da marca.

### 1.1 Motivação

A avaliação e comparação dos níveis de aceleração em veículos de passeio em condições de condução usuais é um tema de interesse na literatura e entre fabricantes de automóveis e veículos em geral. Com o crescente uso deste tipo de veículo para uso comercial, devido ao aparecimento de aplicativos para transporte como Uber, 99taxi etc. também é importante a avaliação e monitoramento frente aos riscos que estes veículos podem trazer frente à exposição por uma jornada de um dia de trabalho.

### 1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é avaliar níveis de vibração frente ao conforto dos usuários e aos riscos à saúde de quem está exposto em veículos automotores de passeio. A avaliação em diversas regiões de ocupação do automóvel também é investigada com o intuito de quantificar quais locais serão mais seguros ou confortáveis para o usuário final.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em 1961, Eldik et al. começaram os primeiros testes experimentais para avaliar a tolerância de humanos à vibração quando ocupando veículos. Neste trabalho um certo número de critérios de conforto são discutidos. Mais tarde, muitas das normas basearam-se neste estudo para a definição de critérios e limites para a sua definição.

Numa revisão de bibliografia sobre o tema de vibrações aleatórias e seus efeitos em motoristas e passageiros, Healey, 1975, já indicava que a quantidade de dados para avaliar níveis seguros ou confortáveis era bastante escassa de forma que o nível de confiança nos níveis propostos era bastante pequeno.

Já em 1977, Osborne, preocupava-se em como quantificar o nível de conforto em passageiros referente à vibração. A partir de uma série de questionários e medições ele propõe limites qualitativos e quantitativos para as vibrações sentidas e que posteriormente são utilizadas como base de normas internacionais.

Em um estudo realizado com motoristas de veículos pesados na Austrália, Mabott et al. (2001) afirma que, a partir de dados limitados, estes motoristas poderiam estar em risco quanto à saúde. Ele recomenda, a partir deste estudo preliminar, um estudo mais aprofundado para verificar se de fato a vibração é o mais importante dentre todos os outros fatores (hora de acordar, tempo dirigindo e de sono, etc.) associados à fadiga em caminhoneiros.

Gameiro Silva, 2002 salienta a importância de levar em conta diversos fatores ambientais para poder avaliar de forma efetiva o conforto em veículos. Uma pesquisa extensiva realizada por Paddan e Griffin, 2002 em diversos tipos de veículos seguindo recomendações normativas britânicas revela que o uso das especificações da norma internacional ISO 2631, 1997 leva a subestimar mais os riscos de exposição à vibração de corpo inteiro do que as estimativas da BS 6841, indicando que a ISO 2361 permitiria exposições mais prolongadas diárias que a respectiva norma britânica.

Em um trabalho com diferentes modelos de veículos e em diferentes condições de pista e velocidade, Katu et al. 2004 salienta, a partir de espectros de frequência de aceleração, o efeito da condição da pista no nível da aceleração e da velocidade do veículo, nos níveis de conforto sentidos pelos passageiros. Baixa frequência é a principal faixa do espectro de frequência a contribuir para o aumento dos níveis de aceleração. Ele propõem uma classificação dos veículos quanto a este nível de conforto levando em conta esta faixa de frequência.

Mesmo com o veículo parado e motor funcionando, Song et al., 2017 demonstrou que ele pode gerar desconforto em passageiros. Ele avalia quatro posturas sentadas de sujeitos em um assento rígido sem encosto que são usadas para a determinação do limiar absoluto de desconforto da vibração. Eles concluem que as curvas absolutas de limiar de desconforto obtidas no experimento foram menos sensíveis à mudanças de frequência que aquelas funções de ponderação de frequência indicadas na ISO 2631-1,1997.

Em 2018, Fedatto Neto, realiza um estudo com diversos veículos de passeio avaliando para diferentes pistas e velocidades o índice SEAT para o banco do motorista. Também estima limites, segundo a ISO 2631-5 o risco de lesão na coluna vertebral para os casos de vibração de impacto. Ao final, conclui que há uma certa relação do conforto com o peso dos veículos e que apenas em longos tempos de exposição naqueles veículos, o risco de lesão da coluna poderia ocorrer.

Um sistema de simulação de vibração de assentos para avaliar o conforto foi projetado e construído por Zhao, 2018. A partir deste dispositivo ele propõem novos indicadores para conforto, que melhoram os existentes, baseados na separação da vibração estacionária da não-estacionárias e no uso de diferentes limites como indicadores da sensibilidade humana baseados em dados obtidos na vibração de assentos de veículos reais.

Ikeda et al., 2018 mostra que nem sempre a diminuição da vibração produz o melhor conforto para os passageiros. Verificou que as acelerações de diversas magnitudes e bandas de frequências são consideradas mais perturbadoras por voluntários. Pela técnica do mascaramento proposta (inserção de outras faixas de frequências e amplitudes mais aceitáveis por um sistema de controle), houve uma melhora considerável no conforto percebida pelos voluntários do experimento.

Por meio de estudo em máquinas de aragem, Singh et al., 2019 otimiza a velocidade da força de arrasto e profundidade de aragem de uma máquina para lavrar de forma que os limites de aceleração indicados pela ISO 2631-1, 1997 não sejam excedidos. Um projeto de experimentos com 27 amostras e 5 replicações é feito de forma a obter um mapeamento das acelerações medidas no assento do motorista em função destes parâmetros e assim poder indicar qual a melhor condição de uso.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 A vibração

A vibração é definida como qualquer movimento oscilatório que ocorra em um certo intervalo de tempo. Dessa maneira, Rao, 2011, define que um sistema vibratório, em geral, inclui um meio para armazenar energia (por exemplo, uma mola) e um meio de perda gradual de energia (amortecedor) e que a vibração de um sistema envolve transferência alternada de sua energia potencial para energia cinética e desta para energia potencial. Se o sistema for amortecido, certa quantidade de energia é dissipada em cada ciclo de vibração e deve ser substituída por uma fonte externa, se for preciso manter um regime permanente de vibração.

Para a avaliação da vibração é utilizado usualmente o valor *rms* (*root mean square*) do sinal de aceleração (também conhecido como valor eficaz). De certa forma este valor está associado à potência que o sinal tem e correspondentemente ao potencial lesivo que ele pode ocasionar aos tecidos humanos (Griffin, 1990). Por definição, o valor *rms* para uma função variável e contínua  $a(t)$  da aceleração medida em um certo intervalo de tempo  $T$ , vem dada por  $a_{rms} = \{(1/T) \int_0^T [a(t)]^2 dt\}^{1/2}$ .

O tipo de vibração que o organismo humano pode receber está associado à forma como ele a recebe, se de corpo inteiro (VCI-Vibração de Corpo inteiro), ou em algum ponto específico como no caso do sistema mão braço (VMB-Vibração Mão Braço). Esta vibração pode também ser classificada quanto à sua intermitência e intensidade como vibração contínua ou vibração de impacto. Como será visto mais adiante, a norma ISO 2631-1, 1997 faz a separação a partir do sistema do corpo humano, em que são apresentadas faixas de frequência para as duas modalidades vibracionais, para VMB de 6,3 a 1250 Hz e para VCI, a que realmente interessa para este trabalho, uma extensão entre 0,1 e 80 Hz. Em particular para veículos automotores, entre as frequências de 0,1 e 0,5 Hz tem-se a possibilidade do surgimento do enjoo.

Outro aspecto de importância é o estabelecimento do valor de dose de vibração resultante, também limitado pela norma. A definição de VDV (Valor de Dose de Vibração) é mais vantajosa que a do valor *rms* nos casos onde os valores da aceleração tem variações bruscas (ou picos) em relação à variação *rms* usual, visto que a formulação do VDV ressalta a ocorrência de eventuais picos de aceleração, o que não é conseguido com o valor *rms* apenas. Para a determinação deste parâmetro aplica-se a Equação (3.1), em que o VDVR representa o valor de dose de vibração representativa da exposição diária na composição dos eixos x, y e z que é dada em unidade de  $m/s^{1,75}$ .

$$VDV = [\int_0^T [a(t)]^4 dt]^{1/4} \quad \text{e} \quad VDVR = [\sum_j (VDV_j)^4]^{1/4} \quad (3.1)$$

#### 3.2 Causas e efeitos da vibração no corpo humano e normas e limites de exposição

No caso de automóveis de passeios em geral a principal causa da vibração transmitida aos passageiros e motoristas são oriundos da via, motor, curvas, frenagens e acelerações. O sistema de suspensão, entre outras funções, poderá absorver parte destas vibrações. Fatores que afetam o desconforto podem incluir a forma física do assento, o encaixe do assento ao ocupante, os materiais dos quais o assento é feito (que ditará sua rigidez), exposição a vibrações de corpo inteiro ou choques mecânicos. Atitude postural (que alteram os grupos musculares que suportam o peso corporal) e o tempo que o ocupante fica sentado no assento também são parâmetros que afetam a vibração recebida. Impactos e vibrações de baixa frequência são mais precariamente atenuados nos sistemas de suspensão passiva atuais dos veículos. Esta aceleração entra em contato com o usuário pelos pés em contato com o assoalho, assento do banco e encosto assim como volante. Em veículos maiores em alguns assentos há a possibilidade de sistemas de suspensão específicos (como no caso de motoristas de ônibus e caminhões expostos por maior tempo) que podem ser passivos ou mesmo ativos pneumáticos.

Os efeitos da vibração no corpo humano podem se apresentar de diversas formas. Dependendo das circunstâncias em que se fica exposto e a faixa e duração de tempo que se está exposto, esta ação pode levar desde desconforto a enjoo ou até mesmo à lesão em partes específicas. Certamente a saúde de cada pessoa também poderá influenciar esta ação [Harris e Piersol, 2002]. De maneira geral a vibração pode interferir diretamente na atividade física que se esteja executando, ou pode haver efeitos secundários posteriores à exposição (enjoo) de curto ou mesmo longo prazo ou mesmo efeitos localizados e imediatos (no caso de níveis elevados) como a concussão ou lesão em tecidos e cartilagens. Relatos subjetivos de desconforto são frequentemente considerados precursores de lesões, e grande parte do trabalho experimental sobre os efeitos físicos da vibração de todo o corpo os classificam como desconforto. Entre os problemas documentados, para diferentes intensidades e tempos de exposição Harris e Piersol, 2002 indica respostas fisiológicas no sistema cardiovascular, respiratório, esquelético, endócrino e metabólico, e nos músculos e nervos e também a cinetose (conhecida como doença do movimento). Efeitos mais graves como hérnia de disco, gangrena de pontas dos dedos, descolamento de retina, concussão cerebral, quebra de dentes, desmaio por falta de irrigação sanguínea cerebral.

Para avaliar VCI e VMB existem as normas Nacionais de Higiene ocupacional NHO-09 e NHO-10 assim como as normas regulamentadoras NR-15, 2014 que fixam limites máximos de exposição que, uma vez excedidos, caracterizam a insalubridade frente a este agente. Além disso, as Normas Internacionais ISO 2631-1, 1997 e ISO 5349-1, 2001 também são indicadas. Há dentro da comunidade Europeia a Diretiva 2002/44/CE a qual é utilizada pelos países membros como balizador dos limites de exposição VCI e VMB para caracterização de condições insalubres.

Pela NR-15, 2014, estabelecida expressamente no Anexo 8, os valores relativos a VCI que indicam existência de condição insalubre são os que alternativa ou concomitantemente superam os limites de exposição diária de  $1,1 \text{ m/s}^2$  de aceleração resultante de exposição normalizada ou  $21,0 \text{ m/s}^2$  do valor de dose de vibração resultante (VDVR). Para a VMB, basicamente apresenta os mesmos valores indicativos de limite de exposição e limite de ação da Diretiva Europeia, 2002. Esta por sua vez apresenta valores limites de exposição para VCI de  $1,15 \text{ m/s}^2$  (valores acima desse limite apresentam níveis insalubres de exposição a vibração) e um valor limite de ação de  $0,5 \text{ m/s}^2$ , abaixo do qual não haveria risco à saúde para VCI. A mesma norma indica um valor para VMB de  $5,0 \text{ m/s}^2$  e  $2,5 \text{ m/s}^2$  para os respectivos valores de limites de ação, para uma exposição de 8h.

Para a norma ISO 2631-1, 1997 e para a ISO 5349-1, 2001, os limites diários para VCI durante uma exposição de 8h são de  $0,48 \text{ m/s}^2$  para o limite de ação e de  $1 \text{ m/s}^2$  para o valor limite de exposição (além do qual a insalubridade estaria caracterizada) e para VMB a norma indica um gráfico que relaciona o valor da aceleração com o tempo de exposição para que 10% de uma população exposta apresente problema de doença dos dedos brancos. Para os limites de exposição e uma jornada de 8h de um tempo de vida de trabalho de 35 anos, utilizando-se este gráfico, tem-se os limites de  $0,91 \text{ m/s}^2$  para indicar insalubridade e de  $0,45 \text{ m/s}^2$  para indicar alerta de ação para a exposição.

### 3.3 Procedimentos de Avaliação de VCI e VMB

A suspensão, chassis e estrutura do veículo, todos contribuem para a experiência vibracional dos passageiros. Desta forma, a medição deve ser executada na interface assento/corpo, pois esse é o ponto de contato direto entre a estrutura vertical e a pessoa [ISO 2631-4, 2001]. Para medir e interpretar os dados recolhidos há uma metodologia e alguns procedimentos previstos em normas. Para o caso de vibração de corpo inteiro (VCI) as normas analisadas foram a ISO 2631-1, 1997, ISO 2631-4, 2001 e a NR-15, 2014, através do Anexo 8, que indicada como guia procedimental o NHO 09, 2013.

Curvas de ponderação são necessárias para ajustar as medições obtidas pelos acelerômetros com a respectiva sensibilidade do corpo humano nas diversas posições e

localizações onde recebe a vibração. Desta forma as normas especificam para VCI, as curvas  $W_k$  e  $W_d$  e para VMB a curva  $W_h$ . A filtragem das acelerações medidas geram um novo valor  $a_w$ , a aceleração ponderada em frequência, de forma que a Equação (3.2) é a usada para avaliar esta nova aceleração ponderada [Harris e Piersol, 2000; ISO 2631-1/1997; Griffin, 1990]:

$$a_{wi} = \sqrt{\sum_i (W_i \cdot a_i)^2} \quad (3.2)$$

A Figura 3.1 apresenta os traçados das curvas de ponderação por frequência necessários para a determinação de VCI e VMB. Diante das curvas de ponderações e das faixas de vibração definidas pela norma ISO 2631-1, 1997, tem-se o estabelecimento de fatores de ponderação que corrigem a leitura da aceleração *rms* no eixo longitudinal *z*, o fator  $W_k$ , e nos eixos transversais *x* e *y*, o fator  $W_d$ , para análise de VCI na superfície de contato do assento. Para conforto, recomenda-se o uso da curva  $W_b$  para qualquer eixo. Há um outro fator *k* que multiplica a aceleração em cada eixo quando na obtenção da aceleração equivalente pela avaliação da norma do vetor da aceleração. Seu valor é tabelado e leva em conta o eixo que o corpo percebe a vibração. Os valores de ponderação também se distinguem para análise do conforto ou da saúde. No caso de VMB, todos os fatores *k* são iguais a 1.

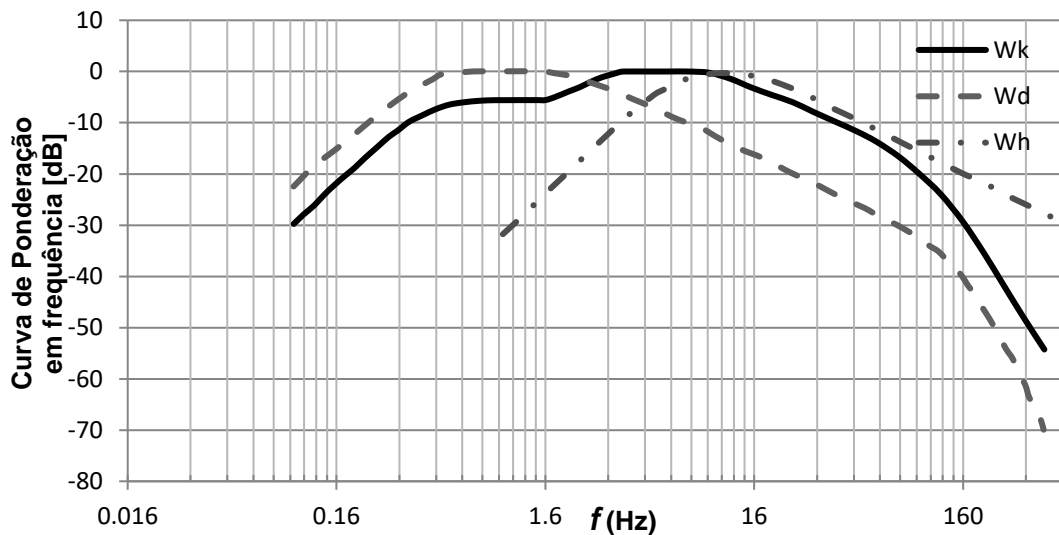


Figura 3.1 – Curva de ponderação por frequência  $W_k$  e  $W_d$  para VCI e  $W_h$  para VMB.  
(Fonte: Adaptada de ISO 2631-1, 1997 e ISO 5349-1, 2001).

A norma ISO 2631, 1997, apresenta valores para os fatores de multiplicação e as curvas de ponderação que devem ser aplicados nas medições de vibração, neste trabalho, os parâmetros que definem as correções que devem ser aplicadas são: vibração de corpo inteiro (para assento, encosto e piso) com fins de análise de saúde humana e para fins de avaliação do conforto. Para os três eixos vibracionais adequados aos parâmetros de medição, tem-se o indicado na Tabela 3.1. Assim, com a determinação dos dois fatores de correção estabelecidos é possível avaliar um valor de aceleração total ponderada,  $a_v$ , em  $m/s^2$  pela Equação (3.3):

$$a_v = \sqrt{k_x^2 \cdot a_{wx}^2 + k_y^2 \cdot a_{wy}^2 + k_z^2 \cdot a_{wz}^2} \quad (3.3)$$

Neste ponto há uma diferença entre as recomendações da ISO 2631-1, 1997 e da NR-15, 2014. A norma ISO diz que a aceleração total pode ser avaliada pela equação anterior, caso as acelerações *rms* nas três direções tenham a mesma magnitude, caso contrário deve-se tomar a maior das acelerações *rms*. No procedimento da NHO-09, 2014, a variável correspondente é a aceleração média resultante (*amr*) e se deve fazer a soma com os fatores de correção.

Tabela 3.1 – Curvas de ponderação e fatores multiplicativos para vibração VCI e VMB.

(Fonte: ISO 2631-1, 1997 e ISO 5349-1, 2001).

Eixo $x$	Eixo $y$	Eixo $y$
Superfície do assento $W_d$ e $k_x$ de 1,4	Superfície do assento $W_d$ e $k_y$ de 1,4	Superfície do assento $W_k$ e $k_z$ de 1,0
Apoio dos pés $W_k$ e $k_x$ de 1,0	Apoio dos pés $W_k$ e $k_y$ de 1,0	Apoio dos pés $W_k$ e $k_z$ de 1,0
Mãos $W_h$ e $k_x$ de 1,0	Mãos $W_h$ e $k_y$ de 1,0	Mãos $W_h$ e $k_z$ de 1,0

Outra avaliação que deve ser observada é a possibilidade de haver intervalos de tempo diversos de exposição à vibração, com períodos de exposição que não são iguais e também com diferentes magnitudes. Para estas situações deve-se determinar a aceleração total equivalente,  $a_{ve}$ , tomando por base o período de tempo da exposição, indicado na equação (3.4) por  $T_i$ .

$$a_{ve} = \sqrt{\sum[(a_{vi}^2 \cdot T_i) / \sum T_i]} \quad (3.4)$$

Como a avaliação pertinente a insalubridade precisa levar em conta o tempo de exposição diária, conforme determina o anexo 8 da NR-15, 2014, há necessidade de fazer uma extrapolação sobre a exposição que o trabalhador recebe diariamente para poder comparar com os valores previamente estabelecidos por norma, compatíveis com a jornada diária de 8 horas. Para esta verificação sobre um tempo de referência de jornada usa-se a expressão indicada de  $A_{(8)} = a_{ve}(T/T_0)^{1/2}$ , em que se tem a chamada aceleração resultante da exposição normalizada onde  $T_0$  apresenta-se como a duração de jornada de 8 horas,  $T$  como jornada efetiva do trabalhador e  $a_{ve}$  vem a ser a aceleração ponderada [Griffin, 1990; Harris e Piersol, 2000; ISO 2631-1, 1997].

Conforme mostra a Figura 3.2, para a análise vibracional deve-se posicionar o equipamento de medição de forma que no eixo vertical tome-se a coordenada  $z$ , e nos eixos transversais os eixos  $x$  e  $y$ .

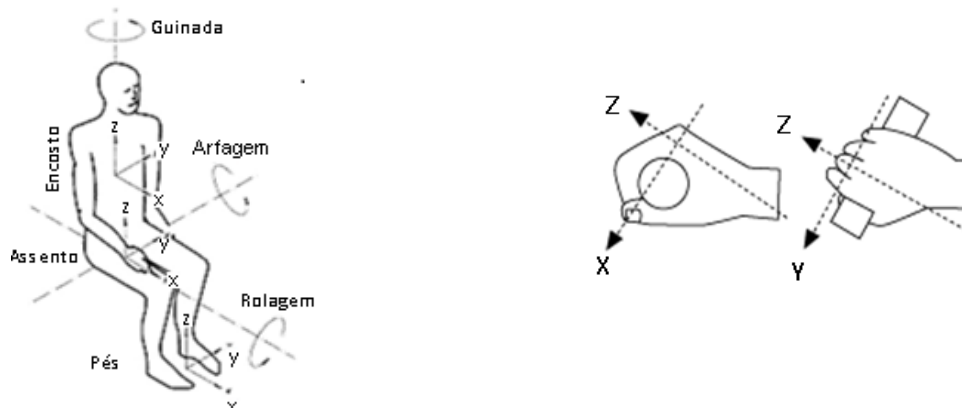


Figura 3.2 – Eixos e orientações de medição para posição sentada e para apoio da mão.

(Fonte: Adaptado de ISO-2631-1, 1997 e AMD 2010, ISO 5349-1, 2001).

Tais posicionamentos são provenientes de um sistema de coordenadas basicêntrico, adotando a origem como ponto de contato do corpo, a partir do qual a vibração é transmitida ao corpo. Este sistema de orientação axial permanece o mesmo tanto para a tomada de medições transmitidas do assento e piso, alterando para encosto devido à sua superfície ser em 90° com o plano do piso. Em que, nesse caso, o eixo  $x$  da pessoa se torna o eixo  $z$  do aparelho, o eixo  $y$



da pessoa se torna o eixo  $x$  do aparelho e o eixo  $z$  da pessoa se torna o eixo  $y$  do aparelho. Para o sistema mão braço o eixo  $z$  aponta na direção do antebraço, o  $x$  para baixo da palma da mão e o eixo  $y$  numa direção a compor o produto vetorial dos outros eixos.

### 3.4 Índice SEAT (*Seat Effective Amplitude Transmissibility*)

Um dos métodos mais usados para a determinação da transmissibilidade é o parâmetro SEAT (*Seat Effective Amplitude Transmissibility*), o qual permite a possibilidade de avaliar a eficiência da isolamento de um assento conforme Griffin, 1990. O índice consiste na razão entre as acelerações rms num ponto de interesse e certa direção e a mesma medição (simultânea) em outro ponto (que origina a vibração). Um SEAT de 100% indica que não existe melhoramento ou amplificação do nível de vibração medido no primeiro ponto; se o valor do SEAT for maior que 100%, o nível de vibração está sendo amplificado, e se o SEAT for menor que 100% indica que o nível de vibração está sendo atenuado. Desta forma pode-se avaliar a efetividade de determinado sistema (banco, espuma, molas e amortecedores) em atenuar a vibração passada do ponto de origem para outro (geralmente onde encontra-se uma pessoa). O SEAT é obtido pela Equação 3.5:

$$SEAT = \frac{a_{rms,assento}}{a_{rms,piso}} * 100 = \frac{VDV_{assento}}{VDV_{piso}} * 100 \quad (3.5)$$

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Equipamentos utilizados e procedimentos

Para a determinação dos valores vibracionais foi utilizado um sistema construído e calibrado no laboratório da área de mecânica dos sólidos como indicado na Figura 4.1. O sistema é composto por 2 *seatpads* contendo, cada um, um acelerômetro tri-axial modelo ADXL-335 que foram utilizados para a medição do VCI e um acelerômetro tri-axial avulso utilizado para a medição do VMB, todos com capacidade de medir até  $\pm 3g$  de aceleração para uma faixa de frequências de 1600Hz para os eixos  $x$  e  $y$ , e até 550 Hz, para eixo  $z$  e sensibilidade média de 300 mV/g (Figura A.1). Todos os sensores são conectados à uma placa de aquisição USB-1208-FS da empresa *Measurement Computing*, a uma taxa de  $f_s=1kS/s$  (Figura A.2).



Figura 4.1 – Sistema dois seatpad tri-axiais e acelerômetro extra para medição no volante.  
(FONTE: Autor)

Os sinais amostrados são depois compatibilizados (sub-amostrados) para uma taxa de  $f_s = 200 S/s$  para medições referentes a VCI com a finalidade de acelerar o processamento dos dados obtidos. Ao total são utilizados 8 canais da placa de aquisição para medir 3 eixos no *seatpad* 1, 3 eixos no *seatpad* 2 e 2 eixos no acelerômetro avulso para medição de VMB no volante. Na Figura 4.2 são indicados os locais no interior do veículo em que foram feitas as medições. Cada

ponto diz respeito à uma localização dentro do veículo, de um total de 5 posições: 1-Motorista, 2-Carona, 3-Banco atrás do motorista, 4-Banco no centro (em cima do túnel central) e 5- Banco atrás do carona. Para cada uma das posições, há a medição simultânea com 2 *seat pads* um no assoalho e outro na interface assento motorista/passageiro e 1 acelerômetro no volante. Nas posições 2, 3, 4 e 5 a posição de medição no volante ficou fixa variando apenas a posição dos dois *seat pads*. A Figura A.7 indica o posicionamento real nos veículos.



Figura 4.2 – Locais de medição da aceleração (a) no interior do veículo para posição 1 e (b) demais posições medidas.  
(FONTE: Autor)

#### 4.2 Modelos dos veículos utilizados

Os modelos dos veículos escolhidos para a análise, de acordo com a Figura 4.3, do presente trabalho foram um Volkswagen Gol 1.0, um Ford New Fiesta SE 2015 1.6 e um Chevrolet Sonic LTZ 2013 1.6, todos na versão *hatch*. As especificações técnicas de cada veículo encontram-se na Tabela 4.1 abaixo, além disso, os amortecedores, a suspensão, os pneus, o funcionamento do motor e da caixa de câmbio foram revisados para garantir o funcionamento adequado dos veículos.



Figura 4.3 – Veículos utilizados nas medições: (a) Ford Fiesta, (b) Chevrolet Sonic, (c) Volkswagen Gol 1.0 G5.  
(FONTE: Autor)

Tabela 4.1 – Especificações técnicas dos veículos testados.

Modelo	Marca	Ano	Potência (cv)	Cambio	Torque (kgfm)	Cilindros	Pneus
Gol 1.0	Volkswagen	2009	76	Manual 5 marchas	9,7	4 em linha	175/70 R13
Fiesta SE 1.6	Ford	2015	128	Manual 5 marchas	16	4 em linha	195/55 R15
Sonic LTZ 1.6	Chevrolet	2013	120	Automático 6 marchas	16,3	4 em linha	205/55 R16

### 4.3 Trajeto e tipos de pisos percorridos

Foi escolhido um trajeto linear com no máximo 2 tipos de piso e predominantemente reto para que os veículos pudessem desenvolver uma velocidade constante de 40km/h. O trecho escolhido foi o da Avenida Antônio Frederico Ozanan, no bairro São José, em Canoas, RS (Latitude -29.876930°, Longitude -51.160982°). O trecho tem aproximadamente 5,4 km, levando com aquela velocidade um tempo entre 8 a 9 minutos para ser percorrido. O trajeto contém lombadas, trechos em asfalto e blocos intertravados. A Figura A.5 do Apêndice indica o trajeto escolhido e a Figura A.6, os tipos de pisos e obstáculos encontrados no trajeto medido em questão. Cada carro fez uma volta e uma ida no respectivo trajeto.

### 4.4 Motoristas que participaram das medições

Participaram duas pessoas nas medições, uma na direção conduzindo o veículo testado e outra auxiliando com as medições. A massa do motorista/passageiro que participou nas medições foi de  $m_1=70$  kg e  $m_2=95$  kg. O IMC (Índice de Massa Corporal) de cada um deles foi de  $IMCA=22,9$  e  $IMCB=27,8$ , respectivamente.

## 5 RESULTADOS

### 5.1 Avaliação sobre conforto e risco à saúde

Sinais típicos de aceleração medidos na posição do motorista para o caso do veículo Ford Fiesta e para o Volkswagen Gol estão indicados na Figura A.3 e Figura A.4. Aproximadamente 260 segundos percebe-se claramente em ambas medições dos dois veículos uma variação brusca no sinal do acelerômetro referente ao volante na direção  $y$ , correspondente ao giro completo necessário para realizar a volta no trajeto (praticamente reto). Os valores para o eixo  $z$  correspondentes ao piso e assento são próximos a  $9,8$  m/s<sup>2</sup> como indicado nos gráficos, sendo a pequena diferença resultante da inclinação ergonômica que cada banco possui. Também percebe-se que o eixo  $z$  local do acelerômetro não está sendo medido para o ponto 3 (volante) com indicação nula de aceleração.

Após as medições, os resultados obtidos por meio do MATLAB foram tabelados para facilitar a comparação entre os veículos testados. Os carros foram testados em horário de baixo movimento com a finalidade de manter a velocidade o mais constante possível em torno dos 40 km/h. Para cada medição se obteve os respectivos valores da aceleração rms ponderada pela frequência para os três eixos do eixo axial em conformidade com a ISO 2631-1, 1997/ISO 5349-1, 2001 e procedimentos indicados na NHO-09, 2013 e NHO-10, 2013. As acelerações obtidas por meio de um acelerômetro são denominadas de  $a_{wx}$ ,  $a_{wy}$ ,  $a_{wz}$  e indicam que estão ponderadas pelas respectivas curvas. Por meio destas acelerações parciais calcula-se a vibração total  $a_v$ , por meio da Equação 3.3, utilizando os valores obtidos medidos em campo e com os fatores de multiplicação adequados para a avaliação de VCI ou VMB quanto a saúde.

Com o valor de  $a_v$  torna-se possível o cálculo da aceleração resultante da exposição convencional na norma como  $A_8$ , em que se apresenta a duração diária de exposição de um motorista a vibração, com a finalidade de ser confortada com o valor relativo a uma exposição de 8 horas diárias, que consiste em um período de jornada de trabalho padrão de um motorista profissional. Com a finalidade de facilitar a compreensão dos resultados obtidos, um breve resumo das normas utilizadas é mostrado na Tabela 5.1.

### 5.2 Resultados para análise de conforto e saúde

A primeira análise, que consta na Tabela 5.2, refere-se as medições do *Seatpad 1* (do piso) do veículo New Fiesta SE 2015. Visualizando os dados obtidos, pode-se dizer que todos os pontos do piso e do assento do veículo se encontraram em um nível seguro de exposição, salvo a medição 4, em que a vibração transmitida oriunda do piso fica um pouco acima do limite de

exposição, no entanto, é importante considerar que essa posição está localizada no piso do assento do meio do banco traseiro, a posição mais desconfortável do veículo.

Tabela 5.1 – Resumo dos valores de aceleração e critérios usados nas comparações.

<b>Saúde (NR-15, 2014) e Diretiva 2002-44-EC, 2002 :</b>	
Valor Limite de Ação ( <i>Vibration Action Exposure</i> ): VAE = 0,5 $m/s^2$ (Diretiva)	
Limite de Exposição à Vibração ( <i>Vibration Limit Exposure</i> ): VLE = 1,1 $m/s^2$ (NR-15) (1,15 $m/s^2$ Diretiva)	
<b>Conforto VCI (ISO 2361-1,1997) (<math>m/s^2</math>)</b>	
Confortável	<0,315
Levemente confortável	0,315 a 0,63
Pouco desconfortável	0,63 a 1,0
Desconfortável	1,0 a 1,6
Muito desconfortável	1,6 a 2,5
Extremamente desconfortável	>2,5

Além disso, para o valor rms total medido tem-se um nível de vibração “confortável” para todos os pontos do piso do veículo.

Tabela 5.2 – Acelerações medidas e calculadas para os pontos do piso do Ford New Fiesta SE 2015.

<b>Seatpad 1 (Piso)</b>	<b>Medição 1</b>	<b>Medição 2</b>	<b>Medição 3</b>	<b>Medição 4</b>	<b>Medição 5</b>
Aceleração x ( $m/s^2$ )	0,55	0,54	0,522	0,547	0,528
Aceleração y ( $m/s^2$ )	0,382	0,411	0,408	0,43	0,386
Aceleração z ( $m/s^2$ )	0,455	0,52	0,491	0,649	0,529
av(8) ( $m/s^2$ )	0,81	0,86	0,825	0,952	0,841
VDV(8) ( $m/s^{1,75}$ )	14,14	14,06	13,51	16,18	14,7
av ( $m/s^2$ )	0,137	0,167	0,148	0,207	0,156
Atingiu o Valor Limite de exposição	Não	Ficou no limite	Ficou no limite	Ficou acima do limite	Ficou no limite
Atingiu o Valor Limite de Ação	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Análise do conforto	Confortável	Confortável	Confortável	Confortável	Confortável

Fazendo uma análise das medições, que se encontram na Tabela 5.3, do seatpad 2 (dos assentos do veículo) do veículo New Fiesta é possível analisar que todos os pontos passaram da linha de ação, todavia, não chegaram a passar do valor limite de exposição, portanto continuam em um nível seguro de exposição. Enquanto a análise do conforto, é possível dizer que quase todos os assentos têm um nível de vibração “confortável”, exceto a medição 3 e medição 4, sendo que este representa o assento traseiro do meio e aquele o assento traseiro lado do motorista.

Tabela 5.3 – Acelerações medidas e calculadas para os pontos dos assentos do Ford New Fiesta SE 2015.

<b>Seatpad 2 (Assento)</b>	<b>Medição 1</b>	<b>Medição 2</b>	<b>Medição 3</b>	<b>Medição 4</b>	<b>Medição 5</b>
Aceleração x ( $m/s^2$ )	0,306	0,319	0,297	0,267	0,528
Aceleração y ( $m/s^2$ )	0,233	0,191	0,222	0,203	0,386
Aceleração z ( $m/s^2$ )	0,274	0,288	0,422	0,494	0,529
av(8) ( $m/s^2$ )	0,472	0,471	0,562	0,597	0,841
VDV(8) ( $m/s^{1,75}$ )	9,22	9,21	11,77	13,13	14,7
av ( $m/s^2$ )	0,274	0,288	0,422	0,494	0,41
Atingiu o Valor Limite de exposição	Não	Não	Não	Não	Não
Atingiu o Valor Limite de Ação	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Análise do conforto	Confortável	Confortável	Levemente confortável	Levemente confortável	Levemente confortável

A próxima análise foi em relação a vibração transmitida por meio do volante do veículo, em que os resultados obtidos, na Tabela 5.4, mostram que a transmissibilidade ficou abaixo do valor da linha de ação, portanto, não representa nenhum risco a saúde dos ocupantes do carro. Além disso, a transmissibilidade ficou no limite tolerável na análise de conforto.

Tabela 5.4 – Acelerações medidas e calculadas para a transmissibilidade por meio do volante do Ford New Fiesta SE 2015.

<b>Acelerômetro Volante</b>	<b>Medição 1</b>
Aceleração x ( $m/s^2$ )	0,166
Aceleração y ( $m/s^2$ )	0,306
Aceleração z ( $m/s^2$ )	0
av(8) ( $m/s^2$ )	0,348
av ( $m/s^2$ )	0,306
Atingiu o Valor Limite de exposição	Não
Atingiu o Valor Limite de Ação	Não
Análise do conforto	Limite tolerável

Os dados referentes as medições realizadas no piso do Volkswagen Gol 2009 encontram-se na Tabela 5.5. Fazendo a análise dos resultados obtidos é possível verificar que teve pontos de medições que ficaram acima do valor limite de exposição para o período de 8 horas, o que mostra que os ocupantes do assento do carona e passageiro do assento traseiro do lado direito estão expostos a um pequeno nível de insalubridade. No entanto, os resultados da análise do conforto mostram que todos os assentos medidos são classificados como “confortável”.

Tabela 5.5 – Acelerações medidas e calculadas para os pontos do piso do Volkswagen Gol.

<b>Seatpad 1 (Piso)</b>	<b>Medição 1</b>	<b>Medição 2</b>	<b>Medição 3</b>	<b>Medição 4</b>	<b>Medição 5</b>
Aceleração x ( $m/s^2$ )	0,506	0,543	0,541	0,562	0,656
Aceleração y ( $m/s^2$ )	0,385	0,43	0,402	0,421	0,485
Aceleração z ( $m/s^2$ )	0,465	0,684	0,574	0,468	0,489
av(8) ( $m/s^2$ )	0,817	0,817	0,885	0,844	0,951
VDV(8) ( $m/s^{1,75}$ )	13,65	13,65	14,62	13,32	13,31
av ( $m/s^2$ )	0,136	0,234	0,193	0,15	0,152
Atingiu o Valor Limite de exposição	Ficou no limite	Ficou acima do limite	Ficou no limite	Ficou no limite	Ficou acima do limite
Atingiu o Valor Limite de Ação	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Análise do conforto	Confortável	Confortável	Confortável	Confortável	Confortável

Analisando os resultados obtidos para os assentos do Volkswagen Gol 2009 pode se verificar que todos as medições atingiram o valor limite de ação, porém não ultrapassaram o valor limite de exposição. Por conseguinte, não representaram risco a saúde dos ocupantes do carro. Já na análise de conforto, todos os assentos foram classificados como “levemente confortável”. A Tabela 5.6 mostra os resultados obtidos pelos acelerômetros instalados no veículo.

Tabela 5.6 – Acelerações medidas e calculadas para os pontos dos assentos do Gol 2009.

<b>Seatpad 2 (Assento)</b>	<b>Medição 1</b>	<b>Medição 2</b>	<b>Medição 3</b>	<b>Medição 4</b>	<b>Medição 5</b>
Aceleração x ( $m/s^2$ )	0,36	0,298	0,298	0,272	0,355
Aceleração y ( $m/s^2$ )	0,211	0,219	0,198	0,221	0,24
Aceleração z ( $m/s^2$ )	0,4	0,319	0,368	0,425	0,342
av(8) ( $m/s^2$ )	0,579	0,488	0,513	0,55	0,548
VDV(8) ( $m/s^{1,75}$ )	11,2	10,08	10,07	12,07	10,2
av ( $m/s^2$ )	0,4	0,319	0,368	0,425	0,342
Atingiu o Valor Limite de exposição	Não	Não	Não	Não	Não
Atingiu o Valor Limite de Ação	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Análise do conforto	Levemente confortável	Levemente confortável	Levemente confortável	Levemente confortável	Levemente confortável

Fazendo uma análise nos dados obtidos por meio do acelerômetro instalado no volante do veículo pode se dizer que foram obtidos resultados semelhantes do Ford New Fiesta 2015. Verificando a Tabela 5.7 é possível concluir que o tempo de exposição de 8 horas não atingiu o nível de insalubridade, que ocorre quanto a transmissibilidade ultrapassa o valor limite de exposição. E quanto ao critério de conforto, a transmissibilidade fica no “limite tolerável”.

Tabela 5.7 – Acelerações medidas e calculadas para a transmissibilidade por meio do volante do Volkswagen Gol 2009.

<b>Acelerômetro Volante</b>	<b>Medição 1</b>
Aceleração x ( $m/s^2$ )	0,178
Aceleração y ( $m/s^2$ )	0,3102
Aceleração z ( $m/s^2$ )	0
av(8) ( $m/s^2$ )	0,354
av ( $m/s^2$ )	0,31
Atingiu o Valor Limite de exposição	Não
Atingiu o Valor Limite de Ação	Não
Análise do conforto	Limite tolerável

O último carro submetido ao teste de transmissibilidade foi o Chevrolet Sonic LTZ 2013. Os resultados obtidos pelo acelerômetro que foi instalado no piso do carro, Tabela 5.8 mostram que esse carro obteve os melhores resultados para a transmissibilidade do piso, pois somente o assento traseiro do lado direito ficou no limite de exposição. Enquanto a análise de conforto, todos medidos pelo seatpad 1 foram classificados como “confortável”.

Tabela 5.8 – Acelerações medidas e calculadas para os pontos do piso Chevrolet Sonic LTZ 2013.

<b>Seatpad 1 (Piso)</b>	<b>Medição 1</b>	<b>Medição 2</b>	<b>Medição 3</b>	<b>Medição 4</b>	<b>Medição 5</b>
Aceleração x ( $m/s^2$ )	0,512	0,495	0,473	0,5	0,507
Aceleração y ( $m/s^2$ )	0,403	0,398	0,399	0,382	0,425
Aceleração z ( $m/s^2$ )	0,472	0,437	0,465	0,451	0,531
av(8) ( $m/s^2$ )	0,805	0,771	0,885	0,776	0,85
VDV(8) ( $m/s^{1,75}$ )	12,9	12,74	14,62	13,15	13,76
av ( $m/s^2$ )	0,171	0,146	0,15	0,133	0,181
Atingiu o Valor Limite de exposição	Não	Não	Não	Não	Ficou no limite
Atingiu o Valor Limite de Ação	Sim	Ficou no limite	Sim	Sim	Sim
Análise do conforto	Confortável	Confortável	Confortável	Confortável	Confortável

Os resultados obtidos pelas medições do seatpad 2, Tabela 5.9, mostram melhores resultados para o Chevrolet Sonic para o assento do motorista (medição 1) e carona (medição 2), em que ambos ficaram no limite de ação. Na análise de conforto, com exceção do assento do motorista, todos os demais foram classificados como “levemente confortável”.

Tabela 5.9 – Acelerações medidas e calculadas para os pontos dos assentos do Chevrolet Sonic LTZ 2013.

<b>Seatpad 2 (Assento)</b>	<b>Medição 1</b>	<b>Medição 2</b>	<b>Medição 3</b>	<b>Medição 4</b>	<b>Medição 5</b>
Aceleração x ( $m/s^2$ )	0,243	0,239	0,27	0,262	0,22
Aceleração y ( $m/s^2$ )	0,221	0,193	0,215	0,21	0,191
Aceleração z ( $m/s^2$ )	0,298	0,346	0,372	0,344	0,403
av(8) ( $m/s^2$ )	0,44	0,462	0,508	0,483	0,497
VDV(8) ( $m/s^{1,75}$ )	9,4	10,08	11,05	11,32	11,62
av ( $m/s^2$ )	0,4	346	0,372	0,343	0,403
Atingiu o Valor Limite de exposição	Não	Não	Não	Não	Não
Atingiu o Valor Limite de Ação	Ficou no limite	Ficou no limite	Sim	Sim	Sim
Análise do conforto	Confortável	Levemente confortável	Levemente confortável	Levemente confortável	Levemente confortável

Analisando o acelerômetro instalado no volante do Sonic, Tabela 5.10, pode-se dizer que foram obtidos resultados semelhantes aos demais veículos testados, ou seja, a transmissibilidade não atingiu o limite de exposição. E quanto a análise de conforto, a transmissibilidade ficou dentro de “limite tolerável”.

Tabela 5.10 – Acelerações medidas e calculadas para a transmissibilidade por meio do volante do Chevrolet Sonic LTZ 2013.

<b>Acelerômetro Volante</b>	<b>Medição 1</b>
Aceleração x (m/s <sup>2</sup> )	0,178
Aceleração y (m/s <sup>2</sup> )	0,3102
Aceleração z (m/s <sup>2</sup> )	0
av(8) (m/s <sup>2</sup> )	0,354
av (m/s <sup>2</sup> )	0,31
Atingiu o Valor Limite de exposição	Não
Atingiu o Valor Limite de Ação	Não
Análise do conforto	Limite tolerável

### 5.3 Resultados para o índice SEAT do assento

Analisando o índice SEAT do New Fiesta SE 2015, Tabela 5.11, é possível verificar que o assento traseiro do meio e o do lado direito não conseguem atenuar a vibração transmitida.

Tabela 5.11 – Índice SEAT de cada assento do Ford New Fiesta SE 2015.

SEAT do New Fiesta SE 2015	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4	Medição 5
X	87,9	90	109,6	103,83	108,08
Y	110,7	104,41	117,2	103,7	113,78
Z	80	69,18	114,1	95,4	105,01

Fazendo a mesma análise para o Volkswagen Gol 2009, Tabela 5.12, é possível dizer que o assento do motorista e o traseiro do lado esquerdo não conseguem atenuar a vibração transmitida.

Tabela 5.12 – Índice SEAT de cada assento do Volkswagen Gol 2009.

SEAT do Volkswagen Gol 2013	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4	Medição 5
X	101	99,39	96,95	104,82	82,9
Y	113,9	120,44	115,81	122,83	110,39
Z	117,6	54,63	76,11	113,11	90,04

O Chevrolet Sonic obteve bons resultados no índice SEAT, Tabela 5.13, sendo que somente o assento traseiro do meio não conseguiu atenuar a vibração. Além disso, esse veículo obteve o melhor índice para o assento do motorista, que é o mais utilizado na rotina comum do trabalhador.

Tabela 5.13 – Índice SEAT de cada assento do Chevrolet Sonic LTZ 2013.

SEAT do Chevrolet Sonic 2013	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4	Medição 5
X	96,99	99,87	105,88	109,18	111,73
Y	120,92	107,56	119,31	128,49	99,26
Z	74,71	94,66	99,27	103,01	89,19

## 6 CONCLUSÕES

De acordo com os dados obtidos nas medições de vibração, os três carros testados obtiveram, na maior parte dos resultados, para análise de conforto, a classificação “levemente confortável”, o que pode servir de alerta, se for levado em consideração que um motorista de aplicativo trabalha mais de 8 horas diárias dentro de um veículo para obter uma remuneração capaz de prover o seu sustento.

E quanto os valores de vibração referentes ao valor da dose de vibração (VDV) a maioria dos resultados obtidos ficaram abaixo ou no limite do valor de ação para a exposição estabelecidos pelas normas relativas à saúde, sendo que somente o Ford New Fiesta e o Volkswagen Gol obtiveram alguns pontos acima desse limite. Com relação à exposição diária à

aceleração de vibração ( $A_{(8)}$ ) os valores verificados ficaram na faixa de alerta, tendo quase todos os resultados ficado entre o valor limite para ação e o valor limite de exposição.

Analisando os valores do índice SEAT, com exceção do Volkswagen Gol, todos os carros resultaram em bons resultados para os assentos do carona e do motorista, no qual o Chevrolet Sonic obteve o melhor índice para o assento do motorista. No entanto, os valores dos assentos traseiros dos veículos ficaram muito próximos ou acima de 100%, o que mostra uma menor capacidade de atenuar a vibração como indicado pela transmissibilidade nesses assentos. Curiosamente em 2 dos 3 veículos, na posição 4, no assento traseiro, a transmissibilidade em  $z$  foi maior como esperado (exceção Ford Fiesta).

A transmissibilidade do volante dos veículos testados não atingiu níveis insalubres, portanto, não causa danos à saúde do motorista durante o período de uma jornada de exposição. Os três veículos testados obtiveram resultados muito parecidos, tendo pequena variação dos valores medidos.

Por fim, com os estudos realizados nos veículos do presente trabalho, pode-se dizer que aparentemente os fabricantes dos veículos tendem a priorizar os assentos do motorista e do carona da frente quanto ao conforto, com os assentos traseiros tendo uma menor qualidade no requisito de atenuar a vibração. No entanto, é importante considerar que esses resultados se referem a modelos de veículo *hatch* e compactos com motores 4 cilindros, portanto, veículos de categorias superiores e com arranjos de centro de massa diferentes podem apresentar resultados distintos destes aqui avaliados e medidos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Directive 2002/44/EC. “**On the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (vibration)**”. The European Parliament and the Council of the European Union. Official Journal of the European Communities, L177/13-19, 2002.

Fedatto Neto, M., Gomes, H. M., Moreira, M. M. “**Avaliação dos níveis de transmissibilidade de vibração e predição de lesão na coluna vertebral em diferentes modelos de veículos automotores**”, ENEBI 2018, 6º Encontro Nacional de Engenharia Biomecânica, Águas de Lindóia, São Paulo, 2018.

Gameiro Silva, M. C. “**Measurements of comfort in vehicles**”. Meas. Sci. Technol. 13. R41–R60. 2002.

Griffin, M. J. “**Handbook of Human Vibration**”. Academic Press, London, 1990. ISBN: 0-12-303040-4.

Harris, C. M., Piersol, A. G. “**Shock and vibration Handbook**”. 5<sup>th</sup> Ed. McGraw-Hill, 1456p. 2002. ISBN: 0-07-137081-1.

Healey, A. J. “**Passenger response to random vibration in transportation vehicles-literature review**” Report No. DOR-TST-75-143. CATS. The University of Texas at Austin. 1975.

Ikeda, K., Endo, A., Minowa, R., Narita, T., Hideaki, K. “**Ride comfort control system considering physiological and psychological characteristics: effect of masking on vertical vibration on passengers**”. Actuators, V.7(42). 2018. doi:10.3390/act7030042.

ISO 2631-1:1997. “**Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole body vibration – Part 1: General requirements**”. International Organization for Standardization, 1997.

ISO 2631-1:1997-AMD 2010. “**Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole body vibration – Part 1: General requirements. Amendment 1**”. International Organization for Standardization, 2010.



ISO 2631-4:2001. **“Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole body vibration – Part 4: Guidelines for the evaluation of the effects of vibration and rotational motion on passenger and crew comfort in fixed-guideway transport systems”**. International Organization for Standardization, 2007.

Katu, U.S., Desavale, R. G., Kanai, R. A. **“Effect of vehicle Vibration on human body-RIT experience”**. Rajarambapu Institute of Technology, internal report, 9p. 2004.

Mabbott, N., Foster, G., McPhee, B. **“Heavy vehicle seat vibration and driver fatigue”**. Report No. CR203, 35p., ISBN 0642255628, July, 2001. ISSN: 1445-4467

NHO-09. **“Normas de Higiene Ocupacional. Procedimento Técnico - Avaliação da Exposição Ocupacional a Vibração de Corpo Inteiro”**. Fundacentro. 64p. 2013. <http://www.fundacentro.gov.br/biblioteca/normas-de-higiene-ocupacional/publicacao/detalhe/2013/4/nho-09-procedimento-tecnico-avaliacao-da-exposicao-ocupacional-a-vibracao-de-corpo-inteiro>. Acesso em 30/04/2016.

NHO-10. **Normas de Higiene Ocupacional. Procedimento Técnico - Avaliação da exposição ocupacional a vibrações em mãos e braços**. 54p. 2013. [http://www.fundacentro.gov.br/biblioteca/normas-de-higiene-ocupacional/publicacao/detalhe/2013/4/nho-10-procedimento-tecnico-avaliacao-da-exposicao-ocupacional-a-vibracao-em-mãos-e-braços](http://www.fundacentro.gov.br/biblioteca/normas-de-higiene-ocupacional/publicacao/detalhe/2013/4/nho-10-procedimento-tecnico-avaliacao-da-exposicao-ocupacional-a-vibracao-em-maos-e-braços). Acesso em 26/04/2016.

NR-09. **“Norma Regulamentadora No.09. Programa de prevenções de riscos ambientais - Anexo N°1 Vibrações”**. 2014. <http://www.guiatrabalhista.com.br/legislacao/nr/nr9.htm>. Acesso em 26/04/2016.

NR-15. **“Norma Regulamentadora No.15. Atividades e operações insalubres - Anexo N°8 Vibrações”**. 2014. <http://www.guiatrabalhista.com.br/legislacao/nr/nr15.htm>. Acesso em 24/04/2016.

Osborne, D. J. **“Vibration and passenger comfort”**. Applied Ergonomics, V.8, N.2, pp97-101. 1977. doi: 10.1016/0003-6870(77)90060-6

Paddan, G. S., Griffin, M. J. **“Evaluation of Whole Body Vibration in Vehicles”**. Journal of Sound and vibration. V.253 (1), pp.195-213. (2002). doi: 10.1006/jsvi.2001.4256

Quest-Technology. **“Real-time vibration Analyzers”**, VI-400PRO, Preliminary owner’s manual. 2005.

Rao, S. S. **“Mechanical Vibrations”**. 5<sup>th</sup> Ed. Prentice Hall. 1084p. 2011.

Singh, A., Singh, L. P., Singh, S., Singh, H. **“Optimization of Occupational WBV Exposure for Rotavation Operation”**. In IEA 2018, S. Bagnara et al. (Eds.), AISC 823, pp. 467–473, 2019. doi:10.1007/978-3-319-96074-6\_49

Song, J. T., Ahn, S. J., Jeong, W. B., Yoo, W. S. **“Subkective abslute discomfort threshold due to idle vibration in passenger vehicles according to sitting posture”**. International Journal of Automotive Technology, Vol. 18, No. 2, pp. 293–300. 2017. doi: 10.1007/s12239-017-0029-1

Thieme, I. van E. **“Passenger riding comfort criteria and methods of analyzing riding and Vibration data”**. In SAE international congress and exposition of automotive engineering. SAE Technical Paper 610173, 1961, doi: 10.4271/610173.

## ANEXO A

ADXL335

## SPECIFICATIONS

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

Table 1.

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

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

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

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

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

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

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

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

Figura A.1 – Dados dos Acelerômetros ADXL-335 utilizados.  
(Fonte: Analog Devices)

## Specifications

All specifications are subject to change without notice.

Typical for 25°C unless otherwise specified.

Specifications in *italic text* are guaranteed by design.

### Analog input

Table 1. Analog input specifications

Parameter	Conditions	Specification
A/D converter type		Successive approximation type
Input voltage range for linear operation, single-ended mode	CHx to GND	±10 volts (V) max
Input common-mode voltage range for linear operation, differential mode	CHx to GND	-10 V min, +20 V max
<i>Absolute maximum input voltage</i>	<i>CHx to GND</i>	<i>±28 V max</i>
<i>Input impedance</i>		<i>122 kΩ</i>
Input current (Note 1)	V <sub>in</sub> = +10 V	70 μA typ
	V <sub>in</sub> = 0 V	-12 μA typ
	V <sub>in</sub> = -10 V	-94 μA typ
Number of channels	Software-selectable	8 single-ended / 4 differential
Input ranges, single-ended mode		±10 V, G=2
Input ranges, differential mode	Software-selectable	±20 V, G=1 ±10 V, G=2 ±5 V, G=4 ±4 V, G=5 ±2.5 V, G=8 ±2.0 V, G=10 ±1.25 V, G=16 ±1.0 V, G=20
Throughput (Note 2)	Software paced	250 S/s typ, PC-dependent
	Hardware paced	50 kS/s
Channel gain queue	Up to 16 elements	Software configurable channel, range, and gain.
Resolution (Note 3)	Differential	12 bits, no missing codes
	Single-ended	11 bits
CAL accuracy	CAL = 2.5 V	±36.25 mV max
Integral linearity error		±1 LSB typ
Differential linearity error		±0.5 LSB typ
Repeatability		±1 LSB typ
CAL current	Source	5 mA max
	Sink	20 μA min, 100 μA typ
Trigger source	Software-selectable	External digital: TRIG_IN
Pacer source	Software-selectable	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Internal</li> <li>■ External (SYNC), rising edge triggered</li> <li>■ Programmed IO</li> </ul>

**Note 1:** Input current is a function of applied voltage on the analog input channels. For a given input voltage, V<sub>in</sub>, the input leakage is approximately equal to (8.181 \* V<sub>in</sub> - 12) μA.

**Note 2:** Maximum throughput scanning to PC memory is machine dependent.

**Note 3:** The AD7870 converter only returns 11-bits (0 to 2047 codes) in single-ended mode.

Figura A.2 – Especificações da placa de aquisição USB-1208FS (*Measurement Computing*).  
(Fonte: Analog Devices)

## APÊNDICE A

## Medição No.:1

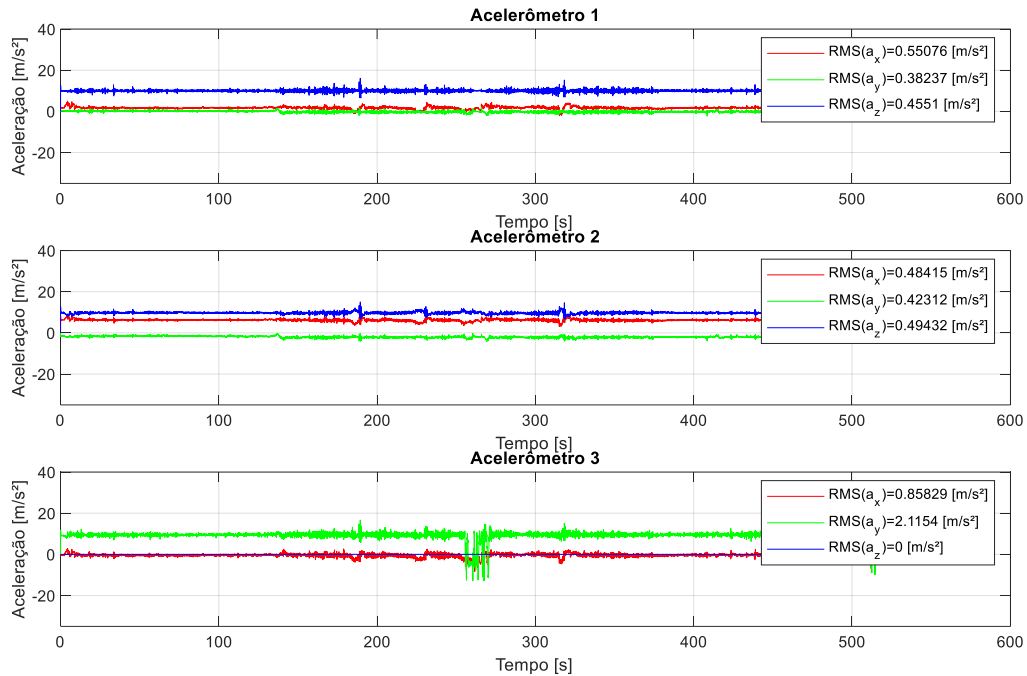


Figura A.3 – Exemplo de sinal típico medido para o acelerômetro 1 (piso), o acelerômetro 2 (assento) e o acelerômetro 3 (volante), posição do motorista, veículo Fiesta.

## Medição No.:6

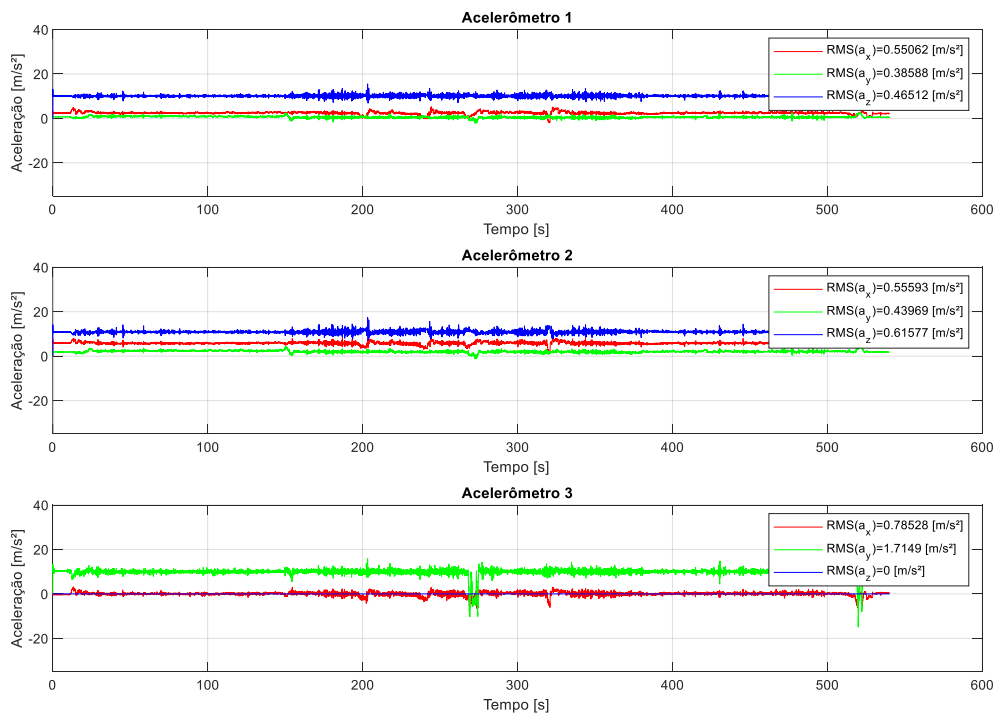


Figura A.4 – Exemplo de sinal típico medido para o acelerômetro 1 (piso), o acelerômetro 2 (assento) e o acelerômetro avulso 3 (instalado no volante), posição do motorista, veículo Gol.

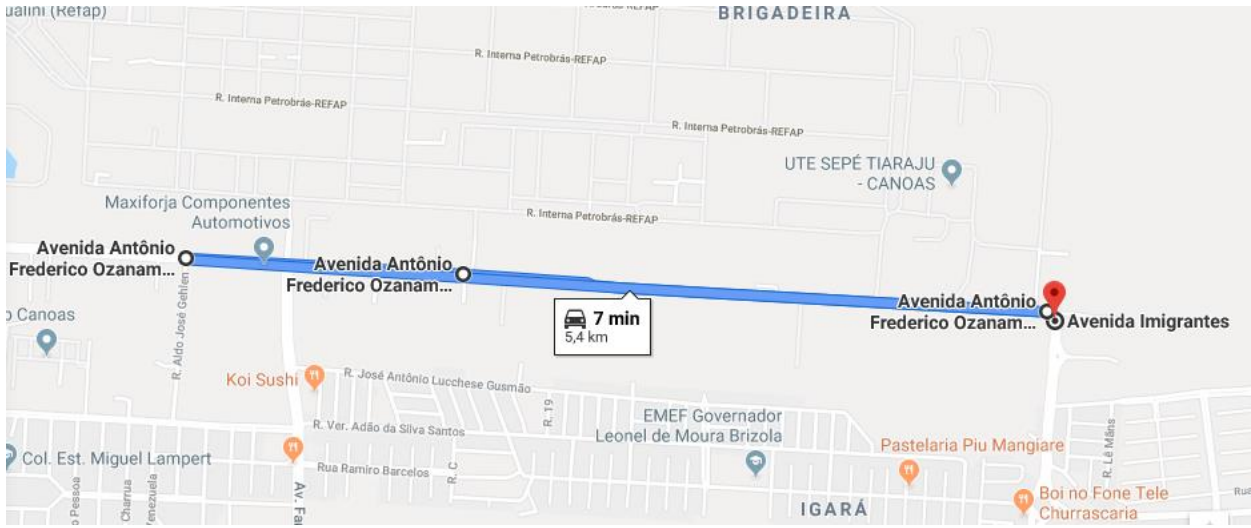


Figura A.5 – Trajeto em Canoas onde foram feitas as medições.  
(Fonte: Google Maps)



Figura A.6 – Tipo de piso encontrados no trajeto onde foram feitas as medições.  
(Fonte: Google Street View)





Figura A.7 – *Seatpad* e acelerômetros posicionados corretamente no piso e no assento, da esquerda para a direita, para procedimento de medição de vibração. Eixos coordenados indicam orientação final dos acelerômetros.