

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

DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO PARA MEDIÇÃO DE VIBRAÇÕES DE CORPO
INTEIRO BASEADO EM ACELERÔMETROS MEMS

Por

Rafael Lemanski dos Santos

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 2018

DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO PARA MEDIÇÃO DE VIBRAÇÕES DE CORPO
INTEIRO BASEADO EM ACELERÔMETROS MEMS

por

Rafael Lemanski dos Santos

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. Thamy Cristina Hayashi
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Dr. Tiago Becker

Comissão de Avaliação:

Prof. Patric Daniel Neis

Prof. Rafael Antônio Comparsi Laranja

Prof. Tiago Becker

Porto Alegre, 15 de junho de 2018.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a UFRGS e o Departamento de Engenharia Mecânica pela oportunidade de contribuir em meu desenvolvimento profissional.

Agradecimento especial ao meu orientador Tiago Becker pela paciência e dedicação em me acompanhar por este processo.

À minha família por todos os anos de suporte e confiança que me fazem sempre atingir o próximo passo.

À minha namorada pelo carinho e encorajamento que faz eu me desafiar a cada dia, contribuindo ao meu crescimento pessoal.

Aos amigos adquiridos pelo percurso acadêmico, por conseguirem para tornar este desafio mais fácil.

SANTOS, R. L. **DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO PARA MEDIÇÃO DE VIBRAÇÕES DE CORPO INTEIRO BASEADO EM ACELERÔMETROS MEMS**. 2018. 18 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

RESUMO

De acordo com a Norma Regulamentadora 15 do Ministério do Trabalho, Anexo 8, o trabalhador exposto a vibrações de corpo inteiro, deve ter sua condição de trabalho analisada a fim de determinar se a caracterização da sua condição de trabalho se enquadra numa atividade insalubre. Através do uso de tecnologias mais recentes, este trabalho almeja uma redução no custo de aparelhos de medições de vibrações de corpo inteiro mantendo precisa a obtenção dos valores da aceleração. Para isto, será fabricado um dispositivo e analisado em comparação a um sensor de referência, verificando a possibilidade de substituição deste sensor mais caro pelo desenvolvido neste trabalho. Para testes em laboratório, com condições de vibração conhecidas e baixo tempo de duração dos ciclos, foi verificada uma máxima divergência dos resultados de 6% entre os dois sensores. Em situação de campo, com maior tempo de amostragem, porém com muitas variáveis, os resultados ainda são próximos, no entanto, devido à baixa amostragem, pode-se apenas afirmar que o dispositivo desenvolvido registrou diferenças entre suas medições inferiores às diferenças obtidas para o acelerômetro de referência.

PALAVRAS-CHAVE: vibração de corpo inteiro, norma regulamentadora 15, acelerômetro, MEMS.

SANTOS, R. L. DEVELOPMENT OF A GADGET FOR WHOLE BODY VIBRATION MEASUREMENT BASED ON MEMS ACCELEROMETERS. 2018. 18 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

ABSTRACT

According to the fifteenth regulatory standard of the ministry of labor, eighth annex, the worker exposed to whole body vibration must have his work condition analyzed in order to determine if the characterization of his work condition can be considered as an insalubrious activity. By using latest technologies, this paper aims a reduction on costs of whole body vibration equipment keeping precise the acceleration values acquired. To do so, a gadget will be manufactured and analyzed by having a gadget of reference to compare, checking the possibility of substitution of this higher cost sensor for the one developed on this paper. On laboratory tests, with known vibration conditions and low time duration of the cycles, it was verified a maximum divergency of 6% among the two sensors. In a field situation, with higher sampling periods, but having more variables, the results are still close, however, due to a low quantity of tests, it can only be affirmed that the developed gadget got lower variations among its measurements than the reference accelerometer.

KEYWORDS: whole body vibration, fifteenth regulatory standard, accelerometer, MEMS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Sistema de coordenadas na posição sentada. (ISO 2631:1 - 1997)	2
Figura 3.2 – Exemplo de seat pad. Adaptado de Griffin (1990).	5
Figura 5.1 – Dosímetro desenvolvido	7
Figura 5.2 – Configuração do experimento prático de aferição.....	9
Figura A1.1 – Curvas de compensação w_k e w_d por frequência. (ISO 2631:1 – 1997).....	16
Figura AP1.1 – Rota realizada nas medições de campo na cidade de Canoas. Fonte: Google Maps	18

LISTA DE TABELAS

Tabela 6.1 – Resultados obtidos no experimento para o eixo z.....	11
Tabela 6.2 – Resultados obtidos nos experimentos para os eixos x e y.....	11
Tabela 6.3 – Resultados das acelerações r.m.s. para os dois trajetos.....	12
Tabela 6.4 – Resultados das acelerações r.m.s. em m/s^2	13
Tabela A1.1 – Parâmetros da função de transferência da ponderação pela frequência	16

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO	iv
ABSTRACT	v
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	vii
ÍNDICE	viii
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVO	1
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	1
3.1. Definição de vibração.....	1
3.2. Normas sobre vibrações	2
3.3. Acelerômetros MEMS	4
3.4. Seat pad.....	4
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
4.1. Reação do corpo humano às vibrações	5
4.2. Vibrações em automóveis	6
4.3. Aplicações dos acelerômetros MEMS	6
5. METODOLOGIA	6
5.1. Equipamento proposto	6
5.2. Equipamento de comparação.....	7
5.3. Programa para aquisição das acelerações.....	8
5.4. Análise na mesa vibratória	8
5.5. Análise de campo.....	10
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	10
6.1. Avaliação dos resultados em laboratório	10
6.2. Avaliação dos resultados no campo	12
7. CONCLUSÕES	13
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	14
ANEXOS	16
Anexo I	16
APÊNDICES	18
Apêndice I.....	18

1. INTRODUÇÃO

A vibração de corpo inteiro (VCI) é considerada um dos agentes físicos de risco para a saúde de trabalhadores expostos em seu ambiente de trabalho. Apesar dos efeitos e das relações entre níveis de exposição e possíveis prejuízos à saúde dos trabalhadores ainda serem tema de estudo, muitos países e organizações ligadas a segurança no trabalho tratam a exposição à vibração como um fator de risco.

A exposição à VCI pode ocorrer em diversos ambientes de trabalho, e está geralmente associada a veículos e máquinas que se movem, como ocorre na agricultura mecanizada, em atividades florestais, na construção civil e no setor de transportes de carga e passageiros. Entre os citados, o setor de transporte envolve um grande número de trabalhadores no Brasil.

Segundo levantamento feito, em 2018, pelo NTU (Associação Nacional das Empresas de Transporte) o Brasil conta hoje com uma frota total de 107 mil ônibus urbanos em operação gerando aproximadamente 439 mil de empregos diretos no setor. O transporte público coletivo é de acordo com pesquisa realizada pelo Ibope o meio de transporte mais utilizado de locomoção para o trabalho, transportando cerca de 40 milhões de pessoas ao dia.

Explorando as vibrações transmitidas aos motoristas e passageiros de automóveis em geral, este meio de condução pode proporcionar aos usuários vibrações de corpo inteiro de baixa frequência que podem ser as responsáveis por causar problemas a saúde. Há indício de que a exposição a vibração está diretamente ligada a ocorrência de dores nas costas em motoristas profissionais (Palmer et al., 2000).

Uma condição de trabalho potencialmente insalubre devido à presença de vibrações de corpo inteiro, conforme descreve a Norma Regulamentadora 15 do Ministério do Trabalho, Anexo 8, necessita ter essa condição monitorada a fim de definir se esta exposição excede os limites de tolerância determinados. O processo atual pode apresentar algumas dificuldades para que as empresas realizem um monitoramento adequado da exposição à vibração, como o custo elevado dos equipamentos de monitoramento (dosímetros) e a necessidade de o monitoramento ser acompanhado por um técnico.

2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é verificar o desempenho e as limitações de sensores de baixo custo no monitoramento da exposição de trabalhadores à VCI. Neste desenvolvimento, está presente a utilização de um software que realize a conexão de um acelerômetro de três eixos com um computador convencional e armazene os valores das acelerações medidos para posterior verificação conforme as normas, analise por meio de uma plataforma vibratória dos erros e incertezas do dispositivo em comparação com um acelerômetro uniaxial, a construção do dispositivo e, por último, a verificação da exposição a vibração dos ocupantes de um automóvel simulando uma situação cotidiana, comparando o acelerômetro proposto com um dosímetro de referência calibrado em dezembro de 2017.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. Definição de vibração

Segundo Griffin (1996) vibração é um movimento oscilatório que varia alternativamente entre valores maiores e menores que sua média. A extensão de sua vibração determina a magnitude e a taxa de repetição dos ciclos determinam a frequência da vibração. Assim como em estruturas mecânicas e máquinas que podem apresentar defeitos quando expostas a um grande período de vibração, o corpo humano também pode ser afetado, sendo assim, necessários estabelecer limites para esta exposição.

3.2. Normas sobre vibrações

A norma ISO 2631 (1997) define métodos para quantificar as vibrações de corpo inteiro que estão relacionadas a saúde e conforto humano, probabilidade da percepção de vibração e incidência de mal-estares relacionadas ao movimento oscilatório. Limitando-se apenas em apresentar métodos de avaliação das vibrações, esta não fornece limites máximos objetivos de exposição devendo servir apenas como base à outra norma que estabeleça tais limites. A Norma Regulamentadora 15, em seu Anexo 8, caracteriza a condição de insalubridade apresentando valores limites que não devem ser superados de exposição ocupacional diária a VCI. Nessa norma, é especificado que os procedimentos e técnicas de avaliação das vibrações devem ser conforme as Normas de Higiene Ocupacional da FUNDACENTRO (NHO 09), que por sua vez, é baseada predominantemente na norma ISO 2631.

Focando a análise em uma pessoa sentada, as normas ISO 2631 e NHO 09 indicam que a vibração deve ser medida de acordo com um sistema de coordenadas originário nos pontos onde a vibração é transmitida ao corpo humano, conforme mostrado na Figura 3.1. O design da cadeira deve ser levado em consideração quando fornece posições inclinadas no assento, a orientação relevante de medição deve ser determinada pelos eixos do corpo, não sendo necessário o alinhamento do eixo z com o campo gravitacional que deve ser levado em consideração nos cálculos consequentes. A análise dos efeitos da exposição à VCI sobre a saúde é realizada atualmente a partir das medições realizadas no assento para pessoas sentadas (caso mais comum) e junto aos pés para pessoas em pé.

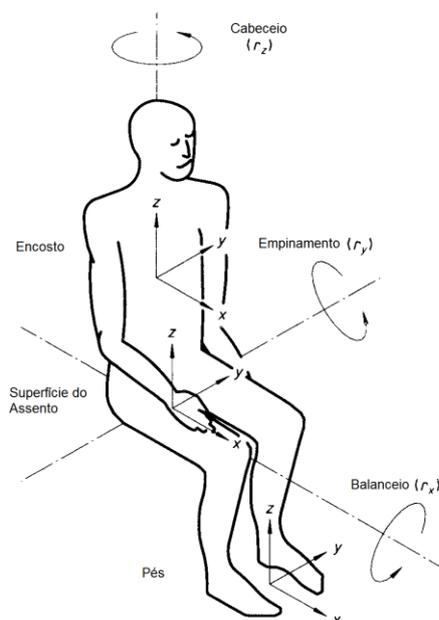


Figura 3.1 – Sistema de coordenadas na posição sentada. (ISO 2631:1 - 1997).

De acordo com Gerges (1992), o corpo humano é mais sensível ao movimento, quando a vibração tem a direção vertical, na região lombar e na faixa de frequência entre 4Hz a 8Hz. Na direção horizontal este intervalo de frequência de maior sensibilidade fica entre 0,67Hz e 1,67Hz. Sendo, então, o corpo humano mais sensível a algumas faixas de frequência de vibração dependentes do eixo a qual estão orientadas, a ISO 2631 oferece diferentes compensações para as acelerações conforme a frequência a qual a magnitude da vibração foi medida. A norma apresenta, para a posição de uma pessoa sentada, o fator de compensação w_k para o eixo z e o fator w_d para as direções horizontais dos eixos x e y, a orientação dos eixos pode ser

visualizada na Figura 3.1. Os gráficos destes fatores, são apresentados na Figura A1.1 do Anexo, onde percebe-se que os fatores próximos a faixa de frequência crítica possuem um maior valor. As funções que definem estas curvas de ponderação também podem ser vistas no anexo I. A NHO 09 faz uso das mesmas curvas de ponderação e utiliza o mesmo sistema de coordenadas.

As duas normas indicam alguns parâmetros que podem ser utilizados para a avaliação da exposição à VCI, dos quais os mais utilizados são o valor da aceleração r.m.s. (root mean square) e o VDV (vibration dose value). De acordo com a norma ISSO 2631:1 (1997), a aceleração r.m.s. ponderada pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$a_w = \left[\frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.1)$$

Onde T é o tempo de medição, em segundos, e $a_w(t)$ é a aceleração ponderada em função do tempo, em m/s^2 . A duração de medição deve ser o suficiente, o que varia de caso para caso, para garantir precisão estatística e garantir que a vibração medida é a mesma a qual o ponto de medição está exposto. A NHO 09 utiliza o mesmo método de aquisição desta aceleração, porém a nomeia como “are” que também é expressa em m/s^2 .

A aceleração r.m.s. ponderada fica pouco sensível a presença de valores de pico de aceleração, sendo a presença dos picos diluída à medida que o período de medição aumenta. A norma ISO 2631 cita que o uso da equação 3.1 se torna insuficiente na análise de vibração quando o módulo da razão entre o máximo valor de pico de aceleração e o valor da aceleração r.m.s ponderada é maior que nove. Nestes casos o VDV se torna uma melhor análise já que é descrito pela quarta potência dos valores de aceleração, expressando valores altos. O VDV, medido em $m/s^{1,75}$, é, nas duas normas, definido como:

$$VDV = \left\{ \int_0^T [a_w(t)]^4 dt \right\}^{\frac{1}{4}} \quad (3.2)$$

O VDV pode ter uma magnitude resultante a partir dos valores correspondentes para cada eixo. O valor da dose da vibração resultante, chamado de VDVR e utilizado na NHO-09 e na NR-15, é dado por:

$$VDVR = \left((1,4 \cdot VDV_x)^4 + (1,4 \cdot VDV_y)^4 + VDV_z^4 \right)^{\frac{1}{4}} \quad (3.3)$$

Onde VDV_x corresponde aos valores de VDV, em $m/s^{1,75}$, para o eixo x, VDV_y e VDV_z correspondem aos valores de VDV, também em $m/s^{1,75}$, para os eixos y e z, respectivamente.

Como a reação do corpo humano às vibrações depende da frequência do movimento oscilatório, torna-se necessário a utilização das curvas de ponderação para atribuir pesos diferentes a deslocamentos com conteúdos espectrais diferentes. Desta forma, utiliza-se a aceleração r.m.s. com os fatores de ponderação para adquirir a aceleração ponderada pela frequência, calculada como:

$$a_w = \left[\sum_i (w_i a_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.4)$$

Nesta equação a_w é a aceleração r.m.s ponderada pela frequência, w_i é o fator de ponderação para a frequência registrada a_i correspondente.

Esta aceleração ponderada pela frequência, obtida através dos fatores de compensação w_k e w_d , deve ser calculada separadamente para os eixos x, y e z. Para cada eixo, as normas estabelecem pesos, para obter o módulo da vibração total, conforme a importância da orientação da vibração e conforme a condição desejada. Somente para as avaliações da vibração relacionadas a saúde este fator possui diferenciação entre seus eixos, sendo k_z igual a 1 para o

eixo vertical e igual a 1,4 para os eixos x e y, representados por k_x e k_y respectivamente. Desta forma, a vibração total resultante pode ser calculada por:

$$a_v = \left(k_x^2 a_{wx}^2 + k_y^2 a_{wy}^2 + k_z^2 a_{wz}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.5)$$

Onde a_v é a vibração total, em m/s², a_{wx} , a_{wy} e a_{wz} são as acelerações r.m.s ponderadas pela frequência nos eixos x, y e z.

3.3. Acelerômetros MEMS

Acelerômetros são dispositivos eletromecânicos capazes de medir a aceleração. As acelerações podem ser constantes, como a aceleração da gravidade, ou variáveis, causadas pelo movimento oscilatório ou vibração do dispositivo (Andrejasic, 2008). Os tipos mais comuns de transdutores de aceleração são os piezoelétricos e os capacitivos.

Para acelerômetros MEMS capacitivos, Calache (2013) explica que uma massa de prova fica localizada entre duas placas paralelas, formando assim dois capacitores. A aceleração pode ser medida com a capacitância entre as placas que varia com a posição da massa de prova. Outras configurações de MEMS capacitivos podem ser encontradas em outras bibliografias, porém os princípios de funcionamento permanecem semelhantes.

Apesar da tecnologia MEMS ainda não cobrir todas as aplicações dos outros tipos de acelerômetros, eles são uma alternativa de baixo custo que pode ser útil em diversas aplicações. Devido ao fato de possuir micro dimensões, o uso de deposições químicas é utilizado o que ajuda a reduzir o custo de fabricação pois possuem a possibilidade de serem feitos em lotes.

Com a crescente demanda por sensores usados para monitoramento das condições de vibração, a necessidade por uma alternativa aos acelerômetros convencionais e caros tem aumentado [2]. Segundo Korvink e Paul (2006) os dispositivos MEMS são considerados as menores máquinas criadas pelo homem. O custo do MEMS pode chegar a 10% do acelerômetro convencional mais barato disponível no mercado [1], e de acordo com relatório da Yole Développement, a indústria dos sistemas micro eletromecânicos vai exceder os 20 bilhões de dólares até 2020, atestando o crescimento do setor.

3.4. Seat pad

Conforme apresentado no Capítulo 3.2, um dos pontos de análise da transmissão da vibração ao corpo humano para a posição sentada é através do assento. Desta forma, é necessário que uma estrutura seja montada de forma que possibilite as medições das acelerações nesta interface. O seat pad é o dispositivo recomendado na ISO 8041 (2005) para medições realizadas na posição sentada em veículos.

Apenas com o objetivo de servir como suporte ao acelerômetro instalado em seu interior, o seat pad pode ser fabricado em um material rígido (plástico, madeira, metal) de forma que absorva o mínimo de vibração, pouco interferindo nas acelerações transmitidas ao usuário. Desta maneira, o acelerômetro pode ser encaixado diretamente no seat pad. Em contrapartida, para aplicações onde possam ser realizados estudos sobre um período longo de tempo, o incomodo gerado ao usuário por um assento rígido pode afetar a sua postura, tornando infiel o estudo sobre a exposição àquela situação.

Para situações onde o assento é mais flexível, pode ser necessário o uso de um seat pad que se molde a sua estrutura, afim de que a captação das acelerações transmitidas ao usuário seja mais precisa aos valores reais. Um exemplo de um seat pad feito com material flexível, como borracha, pode ser visto na Figura 5.1. Nestes casos, um furo no meio do seat pad é feito para acomodar o acelerômetro que fica fixo ao seat pad através de uma base conectada a ambos. Um modelo proposto por Griffin (1990) é apresentado na Figura 3.2, onde é possível ver as dimensões sugeridas para construção do seat pad.

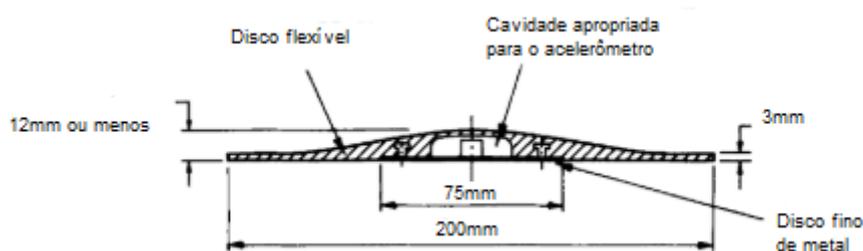


Figura 3.2 – Exemplo de seat pad. Adaptado de Griffin (1990).

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. Reação do corpo humano às vibrações

O corpo humano é um sistema dinâmico onde as propriedades mecânicas podem variar de pessoa a pessoa. Mansfield (2004) aborda que o corpo não contém apenas um órgão responsável pela sensação de vibração, mas que combina os sistemas visual, somático, vestibular e auditivo para a percepção da vibração e que cada sistema destes capta o sentido de movimento em mais de uma forma.

Devido aos órgãos, músculos e outras partes do corpo apresentarem propriedades físicas distintas, a percepção a um mesmo estímulo de vibração pode ser diferente em cada região, sendo órgãos diferentes ressonando com diferentes frequências. Griffin (1996) aponta que a vibração mais incomoda ao ser humano são aquelas chamadas de baixa frequência, correspondentes a níveis entre 0,5 Hz e 100 Hz. De acordo com Chaffin (1999) as vibrações com frequências correspondentes ao intervalo de 0 a 2 Hz são responsáveis pela manifestação de mal-estar provocadas pelo aparelho vestibular responsáveis pela sensação de enjoo. Griffin (1996) afirma que as frequências logo acima de 2 Hz causadas pela oscilação vertical em uma pessoa sentada fazem com que algumas partes do corpo entrem em ressonância, sendo a frequência de máxima ressonância da vibração atingida por volta de 5 Hz, no entanto, este valor pode ser variável considerando a postura e tensão muscular da pessoa. A esses níveis, atividades que necessitam precisão de manipulação de objetos já estão bastante comprometidas que podem ser cruciais numa condição da necessidade de reflexo.

As reações do corpo humano correspondentes às oscilações num eixo horizontal (lateral ou frontal) para uma pessoa sentada na presença de vibrações de corpo inteiro são mais incômodas numa faixa entre 1 a 3 Hz. Nas taxas de repetição de ciclos superiores a 10 Hz a oscilação do movimento é mais sentida no ponto de contato entre o encosto e o corpo, sendo pouco transmitidos aos órgãos internos. Já na faixa de maior sensibilidade ao corpo humano, além da dificuldade de estabilizar uma postura da parte superior do corpo ao assento, dores na lombar e disfunções da coluna vertebral são registrados.

Apesar da grande quantidade de trabalhos escritos sobre a transmissão de VCI em ambientes de trabalho, relacionados a trabalhadores em posições sentadas ou em pé, ainda não é muito claro como a vibração se torna incômoda ou nociva ao ser humano. É possível que haja uma relação da presença de vibração em níveis considerados acima dos limites no ambiente ocupacional e o desconforto percebido pelo trabalhador.

A norma ISO 2631-5 (2004), apresenta um método de quantificação e avaliação da exposição a vibração alternativo à ISO 2631-1 sem utilizar o método r.m.s. ou VDV. Nesta norma, são considerados fatores como idade, número de anos de exposição e sazonalidade na avaliação da vibração. Apesar de, por enquanto, ainda não costumar ser utilizado como referência legal, indicando que o r.m.s. e o VDV podem não ser suficientes para avaliar a severidade de uma exposição.

4.2. Vibrações em automóveis

As vibrações em estruturas envolvendo a composição de diversos sistemas mecânicos com propriedades físicas distintas são bastante complexas de serem analisadas. Segundo Inman (2018), os automóveis atuais operando em condições ideais de pavimentação e manutenção continuamente expõem passageiros às vibrações sem que incômodos lhes sejam apresentados, porém, a simples presença de um pneu desbalanceado já pode causar uma vibração inconveniente gerando desconforto aos usuários do veículo.

Fatores como a qualidade das vias em que o veículo se locomove, quantidade de carga transportada, pressão dos pneus, além da velocidade do deslocamento podem contribuir para a ampliação da amplitude de vibração e para a variação da frequência a uma taxa dentro dos valores críticos. Paddan e Griffin, 2001, realizaram medições em dezenas de veículos e afirmam que mesmo veículos considerados da mesma categoria, não possuem a mesma resposta a vibração, devendo ser cada veículo analisado individualmente. Os autores afirmam também que para a maioria dos veículos analisados, a máxima aceleração transmitida foi registrada no eixo vertical.

Normalmente em automóveis, a atenuação das vibrações é provocada pelo uso de sistemas passivos, ou seja, àqueles que não provocam movimentos oscilatórios contrários ao que estão expostos. Em veículos pesados, a redução da vibração pode ser causada pelo uso de assentos *air-ride*, que são específicos para atenuarem as frequências entre 4 a 8 Hz em vibrações verticais (Wasserman, 1987).

4.3. Aplicações dos acelerômetros MEMS

Atualmente, as aplicações dos acelerômetros MEMS que podem estar mais próximas do dia a dia das pessoas estão presentes nos celulares smartphones. Segundo Andrejasic (2008) a troca da vista vertical para horizontal, controle de interface e contadores de passos, são alguns exemplos onde já estão sendo aplicados os MEMS para aperfeiçoar a interação do usuário com seu telefone. Algumas câmeras fotográficas estão aplicando o micro acelerômetro para corrigir fotos que saíam tremidas pelo movimento, estabilizando a máquina na hora da foto.

De acordo com Chollet (2016) os dispositivos do tipo MEMS não se restringe apenas em desempenhar as mesmas funções de outros sistemas, porém numa escala geométrica reduzida, ele vem substituindo outros controladores em alguns mecanismos os deixando aperfeiçoados. Como é o caso da substituição do antigo sistema de acionamento do airbag do automóvel pelo acelerômetro, além de ser mais barato, consegue ter uma precisão melhor quando deve ser acionado. Os drones também utilizam os MEMS para os auxiliarem a retornar a seus donos quando acabam saindo da zona que conseguem captar o sinal do controlador. Os computadores laptops estão sendo equipados com esses acelerômetros para proteção de seu disco rígido contra quedas [3].

Grandes projetos também já estão começando a utilizar os micros acelerômetros. A indústria militar chegou a utilizar os MEMS em mísseis teleguiados, verificando que este acelerômetro possui robustez suficiente para tal aplicação [8].

5. METODOLOGIA

5.1. Equipamento proposto

O dispositivo escolhido para a aquisição dos valores de aceleração foi o micro acelerômetro piezoelétrico JY901M da marca WitMotion ShenZhen Co., Ltd. Este sensor triaxial é, teoricamente, capaz de medir até 16g e apresentar uma faixa de frequência de saída entre 0 Hz e 200 Hz. Entretanto, para este trabalho, a taxa máxima de frequência registrada foi de 100Hz, permitindo visualizar frequências de até 50Hz, apesar de a norma ISO 2631 considerar a faixa de frequência que deve ser analisada para situações de saúde entre 0,5Hz e 80Hz. O ruído de

fundo do aparelho é na ordem de $0,03 \text{ m/s}^2$ para cada eixo e, a resolução do conversor analógico digital é igual a 16 bits.

A conexão do hardware com o computador foi feita através de um módulo conversor USB para TTL. Este módulo possui uma velocidade máxima de transmissão de dados de 1,5 Mbps, sendo capaz de apresentar dados em tempo real sem defasagem.

A estrutura para formar a base do seat pad é feita de borracha de butadieno estireno que apresentam uma flexibilidade menor que borrachas naturais, conseqüentemente, absorvendo menos vibrações tornando as acelerações transmitidas ao usuário mais fiéis. O diâmetro externo da base possui 230mm e o furo central para acoplar o acelerômetro possui 60mm de diâmetro. A altura máxima do dispositivo, próximo ao centro, contém 15mm e, as extremidades possuem espessura de 4mm. A estrutura do dispositivo desenvolvido pode ser observada na Figura 5.1.



Figura 5.1 – Dosímetro desenvolvido.

5.2. Equipamento de comparação

Para comparar os valores adquiridos pelo acelerômetro MEMS na análise de campo, foi utilizado o dosímetro de vibração QUEST VI-400Pro, o software QuestSuite Professional II e um seat pad modelo 070-030 S/N 646 com sensibilidade de $100,3 \text{ mV/g}$. Com o programa do fabricante, é possível configurar o modo de aquisição das acelerações, a faixa de aquisição das frequências desejadas, os filtros a serem aplicados aos valores e obter o valor do r.m.s. para o período de aquisição registrado.

O dosímetro de vibração utiliza três canais de entrada separados para cada eixo de vibração, capazes de medir vibrações a $1/3$ de banda de oitava. Para medições de vibrações no corpo humano, os parâmetros de configuração incluem a faixa de acelerações que podem estar presentes na medição, os filtros de ponderação para cada eixo e determinar o intervalo que será calculado o r.m.s.

Para a calibração do MEMS em laboratório, foi utilizado o acelerômetro modelo 4514-B-004 da marca Bruel e Kjaer. Segundo o fabricante, esse acelerômetro uniaxial é capaz de medir frequências na faixa entre 1 Hz e 10000 Hz com sensibilidade de 50 mV/g . O ruído de fundo do aparelho é de $0,3 \text{ mg}$ e a frequência de ressonância é de 32 kHz, fora da faixa de utilização na calibração.

5.3. Programa para aquisição das acelerações

A utilização de um programa era necessária para decodificar a informação serial recebida pelo sistema de medição. A coleta dos sinais gerados pelo acelerômetro foi feita através de um programa desenvolvido no software Matlab 2012 onde os dados adquiridos em cada amostragem eram gravados em um arquivo texto. O programa de processamento pode ser dividido em três partes: configuração dos sinais de saída do acelerômetro MEMS, rotina de apresentação das acelerações em tempo real e cálculo r.m.s. e V.D.V. conforme parâmetros da ISO 2631-1 (1997).

Para a configuração do acelerômetro foi necessário o uso do manual do fabricante para determinar os parâmetros de saída que seriam utilizados no programa. Um fator de correção foi aplicado para cada eixo do acelerômetro, sendo obtido experimentalmente através do alinhamento com o campo gravitacional. Cada valor de aceleração registrado, foi multiplicado por estes fatores de modo que o resultado se aproximasse do valor da aceleração da gravidade. O fator de correção utilizado para as acelerações registradas pelo MEMS, foi de 1,2 para cada eixo.

Para a apresentação simultânea dos valores registrados com a apresentação ao usuário pelo computador, foi necessário criar um vetor onde ficam armazenados todos os valores medidos para cada eixo de vibração. Assim, cada byte recebido era armazenado em seu respectivo vetor de forma que se isole as magnitudes das acelerações em cada eixo de vibração e também, suas respectivas frequências. O tamanho do vetor resultante depende do período de medição realizado.

Encerrada a captura das acelerações, uma rotina para o cálculo das variáveis é iniciada para cada eixo de análise. Três etapas de cálculos são apresentadas para ajudar na verificação da resposta final do valor r.m.s. Primeiramente, estes valores são determinados pelo uso das acelerações que foram registradas diretamente das medições realizadas com o MEMS. Tais acelerações são medidas em função do tempo e a determinação das frequências que foram registradas torna-se inicialmente complexa de determinar, visto que os movimentos gerados são aleatórios. Assim, para achar o espectro da frequência dos valores que foram medidos desde o instante zero até o fim de cada período de medição, a aplicação da transformada rápida de Fourier (FFT) é utilizada sob a magnitude das acelerações e, como esta transformação preserva a energia total do sinal adquirido, o valor do r.m.s. nesta etapa deve ser igual ao resultado anterior. O resultado da FFT sobre o vetor das acelerações no tempo, é um vetor complexo de mesmo tamanho que, devido a propriedade da FFT, tem seus valores espelhados a partir da metade do seu tamanho. Para corrigir a amplitude e ajustar o tamanho do vetor à faixa de frequência que o MEMS pôde alcançar, foi multiplicado o vetor por uma senóide de mesma frequência com amplitude de $\sqrt{2}$, e removida a parcela espelhada a partir da metade do vetor. Por último, foi ajustado o eixo da frequência para que representasse a faixa entre 0 Hz e 50 Hz, e que o intervalo entre cada ponto fosse caracterizado pela razão entre a máxima frequência e o tamanho do vetor da FFT resultante das operações acima descritas. As curvas de ponderação conforme a frequência são desenhadas através da multiplicação das funções de transferência e a magnitude das acelerações corrigidos por estas. Finalmente, os valores de r.m.s. e VDV são recalculados sob as acelerações ponderadas e tais resultados devem se aproximar ao máximo dos valores medidos pelo acelerômetro de referência.

5.4. Análise na mesa vibratória

Para calibração do acelerômetro MEMS proposto com o uso do acelerômetro de referência estes foram colocados em uma plataforma vibratória de modo que ficassem expostos as mesmas condições de frequência e amplitude das vibrações. A plataforma vibratória, modelo SI.5000/300 da marca Thuringer Industriewerk Rauenstein, fabricada em 1968, possibilita gerar frequências constantes com amplitudes constantes.

Uma das configurações de montagem do procedimento pode ser vista na Figura 5.4, onde o eixo horizontal y (Figura 3.1) do acelerômetro MEMS encontra-se perpendicular à superfície

de vibração da plataforma vibratória. O eixo x foi calibrado utilizando o mesmo suporte para manter o acelerômetro imóvel com relação a sua base. Durante a calibração do acelerômetro MEMS para os eixos “x” e “y”, o acelerômetro uniaxial foi mantido na mesma posição. Para a aferição dos valores registrados pelo eixo z do MEMS e o acelerômetro referência, estes foram fixados diretamente na plataforma vibratória, sem a necessidade do auxílio da estrutura em forma de “L” (Figura 5.4).

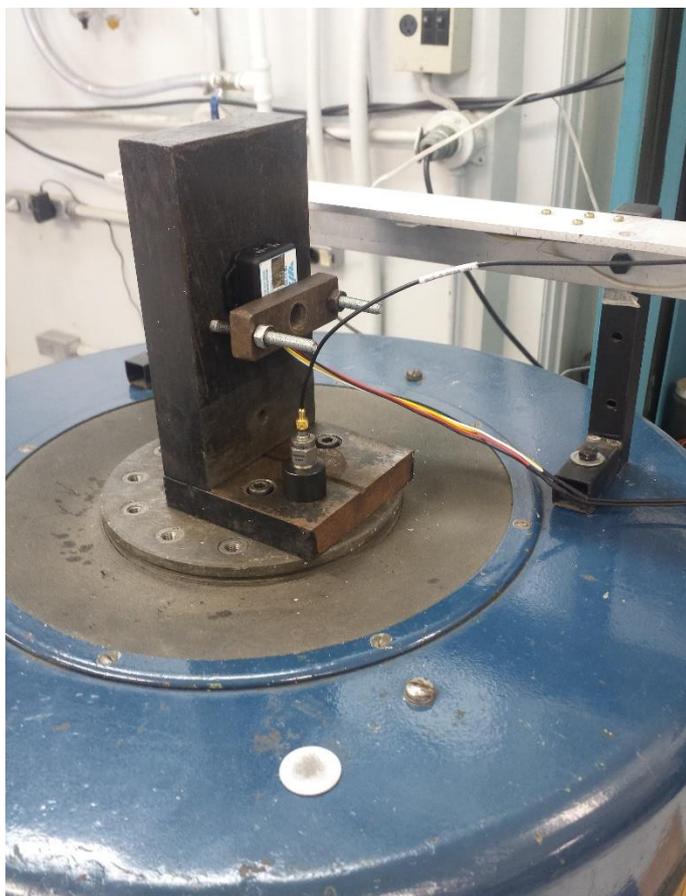


Figura 5.4 – Configuração do experimento prático de aferição.

Foi iniciada a operação da plataforma com frequência e amplitude constantes para cada ciclo de operação. O período de medição de cada ciclo do acelerômetro MEMS durou aproximadamente 16 segundos com frequências e magnitudes diferentes para cada intervalo de medição. Para a calibração do dispositivo proposto, foram realizadas medições com frequências de 5 Hz, 10 Hz, 20 Hz, 40 Hz e 48 Hz, buscando abranger toda faixa de capacidade de captação das frequências do sistema proposto. Para as frequência de 10 Hz e superiores, foram feitas quatro variações de amplitude da vibração, buscando atingir valores r.m.s. para o sensor de referência de 0,3 m/s², 1 m/s², 2 m/s² e 4 m/s² para verificar se os dois acelerômetros registravam valores próximos entre si em todas condições de vibração. Apenas para as medições utilizando a frequência de vibração de 5 Hz que, devido a capacidade da plataforma vibratória, o máximo valor r.m.s. que foi possível obter com o acelerômetro uniaxial foi de 1,82 m/s². Desta forma, foram realizadas apenas três medições para esta frequência.

Para cada ciclo de calibração, a plataforma vibratória era colocada na frequência desejada e ia-se variando a amplitude de vibração até que o acelerômetro de referência se aproximasse do valor r.m.s. desejado. O acelerômetro uniaxial estava conectado a um computador e se comunicando com um programa para avaliar o valor r.m.s. resultante das acelerações empregadas, o resultado r.m.s. era recalculado a cada 8 segundos. Para começar

o ciclo de medição para o MEMS, era esperado o acelerômetro de referência estabilizar o r.m.s. resultante.

5.5. Análise de campo

O dispositivo montado foi testado sob condições de simulação de uma situação real para verificar se este poderia ser um possível substituto para o acelerômetro de referência. As medições foram realizadas em um veículo modelo Gol 1.6 Power 2010 fabricado em 2009 da marca Volkswagen. Os acelerômetros foram instalados no acento do motorista e orientados conforme descrevem as normas citadas anteriormente.

O veículo se encontrava com pneus de tamanho e especificação conforme estabelecido no manual, com pressão de 30psi nos 4 pneus de acordo com indicação do fabricante. O tanque de combustível estava abastecido com gasolina e se encontrava, no início do experimento, na sua total capacidade. As medições foram realizadas no assento do motorista e contava com um operador com peso de 880N.

Para a análise das vibrações, foi escolhido um trajeto com piso asfaltado pela menor dificuldade de reprodução da situação com o acelerômetro proposto e o de referência. Foram realizados dois trajetos de aproximadamente 4400 metros na BR-448 e seus percursos podem ser vistos na Figura AP1.1. O primeiro percurso era o trajeto do ponto, mostrado na imagem AP1.1, “Rodovia do Parque – Mato Grande” com destino à “Rodovia do Parque – São Luis”. O segundo trajeto era o caminho inverso ao primeiro, na sua respectiva pista.

Os trajetos foram percorridos três vezes com cada dispositivo tentando sempre reproduzir a mesma situação em cada percurso. A velocidade planejada de curso era aproximadamente 80 km/h, com o início de medição do ciclo já na velocidade estabelecida. Para todos os ciclos nos dois trajetos, foi pretendido o início e fim do circuito em pontos pré-determinado, de modo que os tempos em cada medição fossem os mais próximos possíveis. Pretendeu-se, também, que o motorista mantivesse uma postura constante durante os percursos e que fosse repetida para todos circuitos de medição.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1. Avaliação dos resultados em laboratório

A partir dos métodos descritos no Capítulo 5.4, os resultados dos valores das acelerações r.m.s. podem ser verificados nas tabelas a seguir. Os valores percentuais negativos indicam quando o MEMS obteve valores inferiores de r.m.s. comparado ao acelerômetro de referência.

Tabela 6.1 – Resultados obtidos no experimento para o eixo z.

Eixo Z			
	RMS Ref. [m/s ²]	RMS MEMS [m/s ²]	Diferença
5 Hz	0,3020	0,3130	4%
	1,0000	1,0270	3%
	1,8000	1,8400	2%
10 Hz	0,2980	0,3040	2%
	1,0200	1,0300	1%
	2,0100	2,0300	1%
	4,0200	4,0200	0%
20Hz	0,3020	0,3090	2%
	1,0700	1,0900	2%
	2,0500	2,0900	2%
	4,0700	4,1800	3%
40Hz	0,2970	0,3070	3%
	1,0900	1,1200	3%
	1,9600	2,0200	3%
	3,9800	4,1400	4%
48Hz	0,2990	0,3110	4%
	1,0300	1,0700	4%
	1,9100	2,0000	5%
	4,0000	4,2600	6%

Tabela 6.2 – Resultados obtidos nos experimentos para os eixos x e y.

Eixo Y				Eixo X			
	RMS Ref. [m/s ²]	RMS MEMS [m/s ²]	Diferença		RMS Ref. [m/s ²]	RMS MEMS [m/s ²]	Diferença
5Hz	0,3010	0,3077	2%	5Hz	0,2980	0,3019	1%
	1,0200	1,0318	1%		0,9870	0,9855	0%
	1,8200	1,8315	1%		1,8300	1,8221	0%
10Hz	0,3020	0,2929	-3%	10Hz	0,2960	0,2856	-4%
	1,0000	0,9745	-3%		1,0000	0,9677	-3%
	1,9800	1,9252	-3%		2,0100	1,9449	-3%
	3,9400	3,8248	-3%		4,0100	3,8878	-3%
20Hz	0,3070	0,2969	-3%	20Hz	0,3060	0,2972	-3%
	1,0200	0,9914	-3%		1,0200	0,9886	-3%
	2,0300	1,9691	-3%		2,0600	1,9936	-3%
	4,0000	3,8780	-3%		3,9500	3,8183	-3%
40Hz	0,2920	0,2833	-3%	40Hz	0,3060	0,295	-4%
	1,0500	1,0179	-3%		1,0100	0,973	-4%
	1,9800	1,9140	-3%		2,0500	1,9753	-4%
	4,0700	3,9360	-3%		4,0300	3,888	-4%
48Hz	0,3120	0,3071	-2%	48Hz	0,2990	0,2963	-1%
	1,0300	1,0160	-1%		0,9940	0,9786	-2%
	2,0300	2,0000	-1%		2,0600	2,0207	-2%
	3,9700	3,8740	-2%		4,0800	3,9036	-4%

Para as medições realizadas na calibração do eixo z, é possível notar que todos os ciclos obtiveram valores r.m.s. inferiores a 6% de diferença entre as acelerações adquiridas pelo MEMS e o acelerômetro de referência. Também, pode-se perceber que todos valores percentuais de diferença são positivos, o que indica que o dispositivo proposto estava registrando valores

maiores de aceleração que o acelerômetro uniaxial, indicando que o fator de calibração, descrito no Capítulo 5.3, usado para este eixo estava levemente superior ao necessário. Como a aplicação do fator de calibração modifica linearmente a resposta das acelerações, seria possível reduzir este fator em 3% para que reduza, também, a diferença percentual entre as medições. Avaliando ainda os resultados para este eixo, percebe-se que não houve influência da variação da amplitude de vibração na diferença percentual no valor r.m.s. dos dois acelerômetros. Pode-se notar, no entanto, que a maior desigualdade dos resultados aconteceu perto do limite máximo de frequência alcançado pelo MEMS.

Para os eixos x e y, nota-se que os valores das acelerações r.m.s. adquiridas pelo MEMS, estão, na maioria das medições, 3% inferiores aos valores registrados pelo acelerômetro de referência. Desta forma, é possível aumentar em 3% o fator de correção para estes eixos, de modo que se aproximem as respostas de cada sensor, diminuindo a diferença percentual. Além disso, é possível notar uma leve redução das desigualdades nas medições realizadas com 5 Hz e 48 Hz, os extremos tomados para este experimento. Não é possível perceber a influência da variação da amplitude de vibração na diferença das acelerações r.m.s. adquiridas com cada sensor.

6.2. Avaliação dos resultados no campo

Considerando a quase impossibilidade de repetir exatamente o mesmo trajeto, passando pelos mesmos pontos nos 6 circuitos de cada trajeto e de manter constante a velocidade de percurso, uma comparação direta entre os resultados adquiridos pelos dois acelerômetros, pode não ser a melhor alternativa de comparação para uma pequena amostra de dados. Entretanto, pode ser esperado que a diferença entre as acelerações r.m.s. dos dois sensores fique próxima às diferenças medidas em laboratório.

A tabela 6.4 apresenta os resultados dos valores r.m.s. obtidos através da medição da vibração nos percursos indicados anteriormente. Em laranja na tabela, representa os valores adquiridos para o primeiro trajeto descrito no Capítulo 5.5, e, em verde, o segundo trajeto.

Os tempos totais para completar o primeiro percurso para as medições realizadas com o sensor de referência foram, em ordem: 3min33seg, 3min33seg e 3min34seg. Já, para completar o percurso quando o MEMS estava registrando as acelerações, os tempos foram, em ordem: 3min33seg, 3min33seg e 3min35seg.

Para o segundo trajeto, os tempos para completar o circuito com o acelerômetro de referência foram, em ordem: 3min32seg, 3min34seg e 3min34seg. Para realizar o mesmo trajeto, o tempo registrado quando o MEMS estava em operação foram todos 3 minutos e 34 segundos.

Tabela 6.3 – Resultados das acelerações r.m.s. para os dois trajetos.

	Referência				MEMS			
	RMS X [m/s ²]	RMS Y [m/s ²]	RMS Z [m/s ²]	Resultante [m/s ²]	RMS X [m/s ²]	RMS Y [m/s ²]	RMS Z [m/s ²]	Resultante [m/s ²]
Primeiro Circuito	0,1789	0,1089	0,5875	0,6566	0,1611	0,1633	0,5774	0,6607
Segundo Circuito	0,1587	0,1090	0,6053	0,6626	0,1638	0,1724	0,5818	0,6703
Terceiro Circuito	0,1062	0,1133	0,5991	0,6372	0,1624	0,1688	0,5806	0,6668
Máxima Diferença	0,0727	0,0044	0,0178	0,0254	0,0027	0,0091	0,0044	0,0096
Diferença [%]	41%	4%	3%	4%	2%	5%	1%	1%
Primeiro Circuito	0,1570	0,1215	0,5875	0,6499	0,1471	0,1538	0,5757	0,6482
Segundo Circuito	0,1015	0,1176	0,5888	0,6277	0,1473	0,1572	0,5847	0,6579
Terceiro Circuito	0,1034	0,1204	0,5998	0,6396	0,1322	0,1588	0,5788	0,6471
Máxima Diferença	0,0555	0,0039	0,0123	0,0222	0,0151	0,0050	0,0090	0,0108
Diferença [%]	35%	3%	2%	4%	10%	3%	2%	2%

Comparando cada acelerômetro individualmente entre os circuitos realizados, é possível notar que houve menos variação do valor r.m.s. resultante no acelerômetro MEMS que no acelerômetro de referência. Percebe-se, também, uma maior discrepância no valor r.m.s. para o eixo x do acelerômetro de referência. Apesar da grande quantidade de variáveis do experimento, é possível descartar um desalinhamento desse eixo durante as medições, visto que isso também geraria uma variação na mesma ordem para o eixo y, o que não ocorreu. Para o acelerômetro proposto, a maior diferença r.m.s. registrada entre seus circuitos foi de 5% no eixo y.

Na tabela a seguir, foi gerada a média para cada eixo e para cada acelerômetro das acelerações r.m.s adquiridas nas três medições de cada sensor em cada trajeto. É possível notar que a aceleração r.m.s. resultante obteve uma aproximação de 2% comparado ao acelerômetro de referência.

Tabela 6.4 – Comparação das acelerações r.m.s. em m/s².

	Média das 3 medições			
	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z	Resultante
Referência [RMS]	0,1479	0,1104	0,5973	0,6508
MEMS [RMS]	0,1624	0,1682	0,5799	0,6659
Diferença [%]	10%	52%	-3%	2%
Referência [RMS]	0,1206	0,1198	0,5920	0,6381
MEMS [RMS]	0,1422	0,1566	0,5797	0,6510
Diferença [%]	18%	31%	-2%	2%

7. CONCLUSÕES

Considerando os resultados e a metodologia que foi aplicada, é possível afirmar que o acelerômetro MEMS comparado ao dosímetro de uso profissional, possuiu uma limitação na faixa de frequência onde os valores das acelerações devem ser medidos. O fato de não se ter conseguido alcançar o registro de frequências acima de 50Hz com o MEMS, pode ser um impeditivo para que o dosímetro desenvolvido possa substituir o dosímetro referência em algumas aplicações.

Apesar disto, visto que em muitas atividades há uma dominância da quantidade de energia em baixas frequências, o equipamento proposto pode desempenhar uma função razoável para aquisição das vibrações nessas situações. Além disto, devido ao baixo custo do acelerômetro MEMS, o dosímetro pode servir, nestes casos, como uma ferramenta de uso inicial para indicar se o indivíduo pode estar numa condição insalubre, devendo a análise ser seguida posteriormente pelo uso de um dosímetro comercial.

A partir dos resultados obtidos nos dois experimentos, é possível observar uma proximidade nos valores registrados pelos dois dosímetros. Para a análise em laboratório, ainda que os resultados obtidos chegaram até 6% de diferença entre si, uma alteração no fator de calibração do acelerômetro MEMS poderia aproximar ainda mais os valores r.m.s. registrados. Também, foi possível constatar uma proximidade nos resultados entre os circuitos realizados pelo acelerômetro proposto no experimento de campo, visto que a diferença máxima entre a aceleração r.m.s. para cada eixo e para o r.m.s. resultante, terem sido percentualmente equivalente aos do acelerômetro tomado como base. Entretanto, ainda há a necessidade de que sejam realizados um maior número de experimentos para que se determine que o dosímetro proposto possa ser um potencial substituto ao dosímetro de referência. Da mesma forma, é necessário que mais medições sejam realizadas no trajeto prático, para que gerem dados

suficientes para que uma comparação direta entre os dois acelerômetros possa ser feita com melhor acurácia.

Ainda assim, conforme descrito anteriormente no trabalho, a indústria dos MEMS vem crescendo exponencialmente e melhorias ainda podem ser desenvolvidas para este tipo de componente. Desta forma, seria interessante acompanhar um possível processo de desenvolvimento dos acelerômetros MEMS para que, talvez um dia, possam superar as dificuldades aqui registradas e substituir, enfim, dosímetros mais caros.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Albarbar, A.; Mekid, S. **Suitability of MEMS Accelerometers for Condition Monitoring: An experimental study**. Sensors, 8, 784-799. 1999.

[2] Albarbar A., Teay S.H. **MEMS Accelerometers: Testing and Practical Approach for Smart Sensing and Machinery Diagnostics**. In: Zhang D., Wei B. (eds) Advanced Mechatronics and MEMS Devices II. Microsystems and Nanosystems. Springer, Cham. 2017.

[3] Andrejasic, M. **MEMS Accelerometers**. Seminar – University of Ljubljana, 2008.

[4] Associação Nacional das Empresas de Transporte Público, **Dados do transporte público por ônibus**, <<http://www.ntu.org.br/novo/AreasInternas.aspx?idArea=7>>. Acessado em 28/04/2018.

[5] Calache, D. C. Caracterização de um Acelerômetro Baseado em Sistemas Microeletromecânicos (MEMS). Projeto Final (Graduação) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. 2013

[6] Confederação Nacional da Indústria, Retratos da Sociedade Brasileira: Locomoção Urbana. CNI, 2011.

[7] Chaffin, D. B.; Andersson, G. B. J. **Occupational biomechanics**. Wiley-Interscience publication, 1999.

[8] Chollet, F.; Liu, H.B. **A (not so) short Introduction to Micro Electromechanical Systems**. Versão 5.3, 2016. Disponível em: <http://memscyclopedia.org/introMEMS.html> Acessado em 12/06/2018.

[9] Gerges, S. N. Y. **Ruído: Fundamentos e controle**. 2ª ed. Florianópolis: Nr. Editora, 2000.

[10] Griffin, M. J. **Handbook of human vibration**. Elsevier Academic press, 1996.

[11] Inman, D. **Vibrações Mecânicas**. Elsevier Brasil, 2018.

[12] 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.

[13] ISO 2631-5:2004. **Mechanical vibration and shock -- Evaluation of human exposure to whole-body vibration -- Part 5: Method for evaluation of vibration containing multiple shocks**. International Organization for Standardization, 2004.

- [14] ISO 8041:2005. **Human response to vibration – Measuring instrumentation.** International Organization for Standardization, 2005.
- [15] Mansfield, N. J. **Human Response to Vibration.** CRC press, 2004.
- [16] Paddan, G. S.; Griffin, M. J.; **Evaluation of whole-body vibration in vehicles.** Human Factors Research Unit, Institute of Sound and Vibration Research, University of Southampton, Highfield, Southampton, SO17 1BJ, Hampshire, England. 2001.
- [17] Palmer, K. T.; Griffin, H. J.; Bendall, H.; Pannett, B.; Coggon, D. **Prevalence and pattern of occupational exposure to whole body vibration in Great Britain: findings from a national survey.** Occupational Environmental Medicine, 2000.
- [18] Stevens, S. S. **Psychophysics – Introduction to Its Perceptual, Neural and Social Prospects.** 2004.
- [19] Tian, B.; Liu, H.; Yang, N.; Zhao, Y.; Jiang, Z. **Design of a Piezoelectric Accelerometer with High Sensitivity and Low Transverse Effect..** Wagner JF, ed. Sensors (Basel, Switzerland). 2016;16(10):1587. doi:10.3390/s16101587.
- [20] Wasserman, D. E. **Human aspects of occupational vibration.** Elsevier Amsterdam Oxford, 1987.
- [21] Yazdi, Navid & Ayazi, Farrokh & Najafi, Khalil. (1998). **Micromachined Inertial Sensors.** Proceedings of the IEEE. 86. 1640 - 1659. 10.1109/5.704269.
- [22] Yole Développement **Growing in maturity, the MEMS industry is getting its 2nd wind** Status of the MEMS Industry report, 2015. <http://www.yole.fr/iso_upload/News/2015/PR_MEMSMarkets_YOLE_May2015.pdf> Acessado em 06/05/2018

ANEXOS

Anexo I

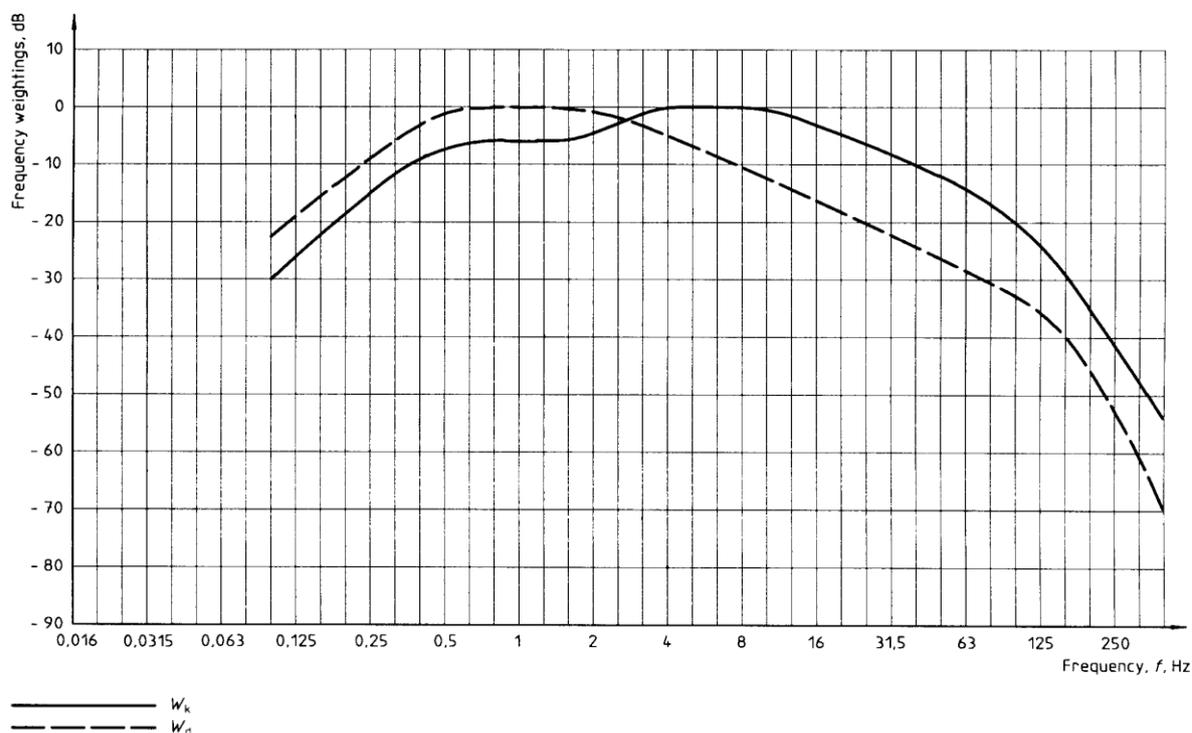


Figura A1.1 - Curvas de compensação w_k e w_d por frequência (ISO 2631:1 - 1997).

Tabela A1.1 - Parâmetros da função de transferência da ponderação pela frequência.

Weighting	Band-limiting		Acceleration-velocity transition (a-v transition)			Upward step			
	f_1 Hz	f_2 Hz	f_3 Hz	f_4 Hz	Q_4	f_5 Hz	Q_5	f_6 Hz	Q_6
w_k	0,4	100	12,5	12,5	0,63	2,37	0,91	3,35	0,91
w_d	0,4	100	2,0	2,0	0,63	∞	—	∞	—
w_f	0,08	0,63	∞	0,25	0,86	0,062 5	0,80	0,1	0,80

De acordo com a norma ISO 2631-1 (1997), as funções que definem as curvas de ponderação w_k e w_d são:

$$|H_h(p)| = \left| \frac{1}{1 + \frac{\sqrt{2} w_1}{p} + \left(\frac{w_1}{p}\right)^2} \right| = \sqrt{\frac{f^4}{f^4 + f_1^4}} \quad (\text{A.1})$$

$$|H_l(p)| = \left| \frac{1}{1 + \frac{\sqrt{2}p}{w_2} + \left(\frac{p}{w_2}\right)^2} \right| = \sqrt{\frac{f_2^4}{f^4 + f_2^4}}, \quad (\text{A.2})$$

$$|H_t(p)| = \left| \frac{1 + \frac{p}{w_3}}{1 + \frac{p}{(Q_4 w_4)} + \left(\frac{p}{w_4}\right)^2} \right| = \sqrt{\frac{f^2 + f_3^2}{f_3^2}} \cdot \sqrt{\frac{f_4^4 \cdot Q_4^2}{f^4 Q_4^2 + f^2 f_4^2 (1 - 2Q_4^2) + f_4^4 Q_4^2}} \quad (\text{A.3})$$

$$|H_s(p)| = \left| \frac{1 + \frac{p}{(Q_5 w_5)} + \left(\frac{p}{w_5}\right)^2}{1 + \frac{p}{(Q_6 w_6)} + \left(\frac{p}{w_6}\right)^2} \cdot \left(\frac{w_5}{w_6}\right)^2 \right| = \frac{Q_6}{Q_5} \cdot \sqrt{\frac{f^4 Q_5^2 + f^2 f_5^2 (1 - 2Q_5^2) + f_5^4 Q_5^2}{f^4 Q_6^2 + f^2 f_6^2 (1 - 2Q_6^2) + f_6^4 Q_6^2}} \quad (\text{A.4})$$

APÊNDICES

Apêndice I

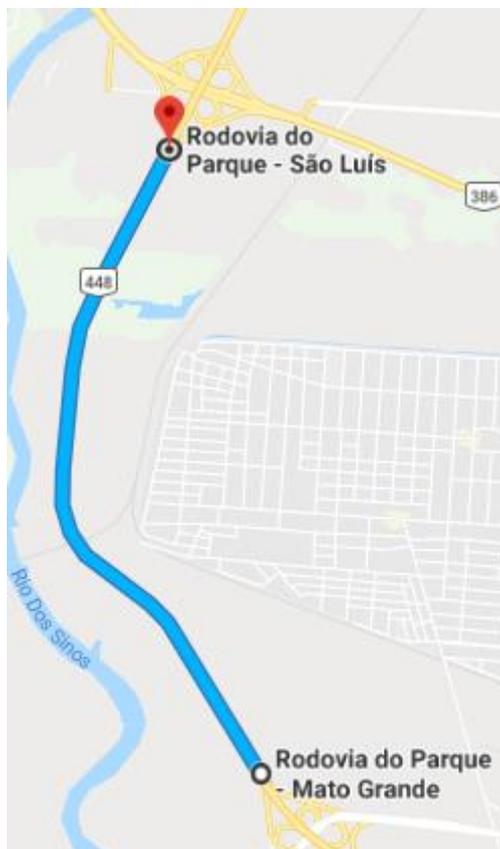


Figura AP1.1 – Rota realizada nas medições de campo na cidade de Canoas. Fonte: Google Maps.