

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

AVALIAÇÃO DOS NÍVEIS DE VIBRAÇÃO EM USUÁRIOS DE VEÍCULO LEVE SOBRE
TRILHOS EM PORTO ALEGRE

por

André Bonato Germani

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, dezembro de 2017.



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

AVALIAÇÃO DOS NÍVEIS DE VIBRAÇÃO EM USUÁRIOS DE VEÍCULO LEVE SOBRE
TRILHOS EM PORTO ALEGRE

por

André Bonato Germani

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. Thammy Cristina Hayashi
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Mecânica dos sólidos**

Orientador: Prof. Dr. Juan Pablo Raggio Quintas

Coorientador: Prof. Dr. Herbert Martins Gomes

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Daniel de Leon

Prof. Dr. Edson Hikaro Aseka

Prof. Dr. Juan Pablo Luiz Raggio Quintas

Porto Alegre, dezembro de 2017.

“Só o impossível acontece. O possível apenas se repete”.

Chacal.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais e a minha família que puderam me proporcionar bons estudos e condições para a realização de um bom curso universitário ao longo dos anos.

À minha mãe que esteve ao meu lado em todos os momentos, oferecendo apoio e carinho.

Também agradeço ao Me. Eng. Leandro Medeiros da Silva pelos diversos conhecimentos compartilhados e ao apoio incondicional na etapa final do curso.

Agradeço ao meu orientador Prof^o Juan Pablo Raggio Quintas e ao meu coorientador Prof^o Herbert Martins Gomes, por toda ajuda, apoio acadêmico e disponibilidade oferecidas ao longo do desenvolvimento do trabalho.

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

Aos colegas e amigos com os quais tive o privilégio de conviver ao longo da etapa, aos quais estimo como grandes companheiros para uma vida toda.

GERMANI, A. B. **Avaliação dos níveis de vibração em usuários de veículo leve sobre trilhos em Porto Alegre.** 2017. 15f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

RESUMO

A vibração a que seres humanos estão expostos no dia a dia pode ser classificada em dois grandes grupos: (i) as vibrações de corpo inteiro (VCI), aquelas recebidas pelo o corpo como um todo, como quando estão sentados, deitados ou de pé em algum equipamento ou dispositivo que gere vibrações e (ii) vibrações do sistema mão-braço (VMB), caracterizada por aquelas vibrações recebidas diretamente pelos braços e mãos pelo uso de equipamentos ou em situações que gerem vibrações localizadas nestas partes. São muitas as fontes e situações que podem gerar vibrações sendo necessário, nestes casos, avaliar e quantificar sua intensidade e tempo de exposição afim de avaliar seu grau de risco ao ser humano. Veículos e outros meios de transporte podem gerar vibrações que, dependendo de sua intensidade e tempo de exposição ocasionam desconforto ou até mesmo doenças ocupacionais às pessoas que estão expostas. O Aeromóvel é uma nova alternativa de meio de transporte que surge para trajetos curtos que apresenta custos menores por passageiro transportado (*APM – Automated People Mover*). Neste trabalho, uma avaliação dos níveis de vibração neste tipo de veículo é feita tendo em base normas nacionais e internacionais referentes aos risco à saúde assim como limites indicativos para conforto. Uma campanha de medições no veículo em condições normais de uso é feita em posições no seu interior com o objetivo de quantificar este comportamento. Resultados referentes aos níveis encontrados e o risco quanto à saúde são apresentados, assim como gráficos de transmissibilidade para as vibrações de assento e piso do modelo A100 para três posições distintas no seu interior. Resultados de níveis de conforto são comparados com dados da literatura. Um Análise de Variância (ANOVA) quanto ao conforto relacionado à posição do passageiro indica que há posições mais confortáveis que outras no interior do veículo.

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

GERMANI, A. B. **Evaluation of vibration levels in light rail vehicle users (Aeromóvel) at Porto Alegre.** 2017. 15f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

ABSTRACT

The vibration to which human beings are exposed on a daily basis can be classified into two broad groups: (i) the whole body vibrations (WBV), those received by the body as a whole, such as when sitting, lying or standing in some equipment or device that generates vibrations and (ii) vibrations of the hand-arm system (HAV) characterized by those vibrations received directly by the arms and hands by the use of equipment or in situations that generate vibrations localized in these parts. There are many sources and situations that can generate vibrations and in these cases it is necessary to evaluate and quantify their intensity and time of exposure in order to assess their degree of risk to humans. Vehicle and other means of transportation can generate vibrations that, depending on their intensity and time of exposure may cause discomfort or even occupational diseases passengers that are exposed. The Aeromóvel is a new alternative transportation mode that appears for short journeys and that presents lower costs per passenger carried (APM - Automated People Mover). In this work, an evaluation of the vibration levels in this type of vehicle is made based on national and international standards regarding health risks as well as indicative limits for comfort. A test campaign in the vehicle at usual daily condition is performed in positions in its interior in order to quantify this dynamic behavior. Results regarding healthy levels found and the risk regarding health are presented as well as transmissibility graphs for the floor seat vibrations of the A100 model for three distinct positions inside. Results of comfort levels are compared with data from the literature. An Analysis of Variance (ANOVA) for comfort related to the position of the passenger indicates that there are more comfortable positions than others inside the vehicle.

KEYWORDS: Whole Body Vibration, Human Body Vibration, ISO 2631, NR-15, Vibration Exposure.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Medidor VI400-Pro e <i>seatpad</i> utilizados nas medições.	6
Figura 3.2 - Locais de medição e posicionamento dos sensores.	7
Figura 3.4 - Vista superior dos assentos no modelo A100 e posições de medição.	8
Figura 4.1 - Gráfico de acelerações <i>rms</i> posição 1 (Ida).	8
Figura 4.2 - Gráfico de acelerações <i>rms</i> posição 1 (Volta).	9
Figura 4.4 - Comparativos de níveis de conforto aceitáveis para as medições conduzidas.	10
Figura 4.5 - Comparativos de níveis de conforto aceitáveis para as medições conduzidas.	11
Figura 4.6 - <i>Seatpad</i> posicionado no assento e piso do banco central do Aeromóvel. Eixos coordenados indicam orientação final dos acelerômetros.	11
Figura 4.7 - Sinais de aceleração medidos pelos dois <i>seat pads</i> e os respectivos espectros de frequência.	12
Figura 4.8 - (a)Valores do índice SEAT para cada um dos 3 eixos na Posição 1 e (b)Transmissibilidades de aceleração.	12
Figura A.1 Interior do Aeromóvel.	16
Figura A.2 - Gráfico de acelerações <i>rms</i> posição 1 (Ida).	17
Figura A.3 - Gráfico de acelerações <i>rms</i> posição 1 (Vinda).	17
Figura A.4 - Gráfico de acelerações <i>rms</i> posição 2 (Ida).	18
Figura A.5 - Gráfico de acelerações <i>rms</i> posição 2 (Vinda).	18
Figura A.6 - Gráfico de acelerações <i>rms</i> posição 3 (Ida).	19
Figura A.7 - Gráfico de acelerações <i>rms</i> posição 3 (Vinda).	19

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Fatores das curvas de ponderação para conforto ISO 2631-1 [1997].	3
Tabela 2.2. Fatores multiplicativos de acordo com a ISO 2631-1.	4
Tabela 2.3. Valores limites de vibração de acordo com a ISO 2631-1 [1997] e NR-15[2014].	4
Tabela 2.4. Escala de desconforto de acordo com a ISO 2631-1 [1997].	4
Tabela 3.1. Classificação pela CNT por modalidade de transporte (Fonte: CNT, 2016).	6
Tabela 4.1. Análise ANOVA de 1 fator para as acelerações combinadas nos três eixos.	10

AGRADECIMENTOS	iv
RESUMO	v
ABSTRACT	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	viii
ÍNDICE	ix
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos	2
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	2
2.1 A vibração em seres humanos	2
2.2 Exposição humana a vibração	3
2.3 Transmissibilidade	5
3 MATERIAIS E MÉTODOS	5
3.1 Modelo do Aeromóvel utilizado	5
3.2 Equipamentos utilizados	6
3.3 Procedimento de instrumentação adotado	6
3.4 Trajeto e pontos medidos	7
4 RESULTADOS	8
4.1 Avaliação com o equipamento Quest VI 400-Pro	8
4.2 Avaliação da transmissibilidade com dois <i>seat pads</i>	11
5 CONCLUSÕES	13
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	14
APÊNDICE	17

1 INTRODUÇÃO

Trens urbanos são cada vez mais utilizados em grandes cidades e conglomerados. As vantagens de se utilizar linhas nos centros se dá principalmente ao rápido deslocamento, a capacidade de levar maior quantidade de pessoas ocupando menos espaço físico, devido ao baixo índice de poluição e a segurança presente nestes equipamentos. O sistema Aeromóvel em questão coloca-se como um trem sob via elevada com propulsão pneumática instalada fora do carro. Em características gerais é um sistema que possui vantagens devido a via elevada esbelta de baixo custo de implantação, operação e manutenção, baixo consumo energético, fácil inserção e integração da via na malha urbana, estações compactas, veículo leve com utilização de roda de trilhos, baixíssimo peso morto de passageiros, propulsão pneumática com motores e propulsores estacionários, via segregada com operação 100% automatizada e conformidade com normas técnicas internacionais.

A caracterização do transporte ferroviário é feita através de diversos critérios, dentre eles o número de carros, modalidade, capacidade da linha em passageiros por sentido por hora, distância média entre estações e intervalo por veículo nas horas de pico segundo a CNT. O Aeromóvel, tema abordado no presente trabalho, é classificado segundo a CNT como APM (*Automated People Mover*) designado para sistemas de transporte automático de passageiros comumente implantados em circuitos fechados de pequena extensão, tais como terminais de aeroportos e parques temáticos. São veículos, geralmente de baixa capacidade (5000 a 15000 passageiros por sentido por hora) e sem condutor, operam com elevada frequência (60 a 180 segundos, ou seja, 1 a 3 minutos), em oferta contínua ou quase contínua e com segregação total.

O Aeromóvel, sob a responsabilidade da Trensurb, teve o início da sua operação assistida em 2013 e, da operação comercial, em 2014. Possui duas estações e dois veículos com capacidades para 150 e 300 passageiros. A única linha em operação interliga a estação Aeroporto, do trem metropolitano, ao Terminal 1, do Aeroporto Internacional Salgado Filho, com uma extensão de aproximadamente 1,0 km. Distingue-se dos seus congêneres pelo tipo de propulsão utilizada. Os veículos, sem condutor e não motorizados, são impelidos por propulsão pneumática ou aerodinâmica. O Aeromóvel é apoiado em rodas de aço sobre trilhos, fixados em uma plataforma elevada. Um duto no interior da plataforma é percorrido por ar soprado por ventiladores industriais. Sob o veículo estão fixadas aletas que ficam contidas no duto, são pressionadas pelo ar e impulsionam o veículo. Por não ter motor embarcado, tem menos peso próprio e, por conseguinte, um acréscimo de eficiência energética por passageiro transportado.

O sistema de transporte de passageiros sobre trilhos de Porto Alegre (trem metropolitano e Aeromóvel) conta com 43,9 km de extensão, sendo 42,9 km para o trem metropolitano e 1,0 km para o Aeromóvel e é composto por duas linhas e 23 estações, um terminal para o trem metropolitano, um terminal para o Aeromóvel e uma integrando os dois sistemas (Estação Aeroporto). A linha do Aeromóvel, por ser elevada, também é segregada. Existe a previsão de construção de duas novas linhas, também integradas ao trem metropolitano, no município de Canoas (RS).

1.1 Motivação

Com o crescente aumento de veículos automotores nos grandes centros urbanos, faz-se necessário o transporte por métodos cada vez mais eficientes, que causem baixo impacto ambiental e que sejam práticos e pouco onerosos aos transeuntes. A avaliação de tais transportes quanto ao nível de conforto e saúde segundo as normas vigentes, torna-se necessária para funcionários, operadores e passageiros destes equipamentos de transporte. Através dos dados obtidos, pode-se comparar às normas e ter uma ideia relativa à qualidade do equipamento atual, abrindo assim, nichos para alterações e melhorias constantes do projeto.

1.2 Objetivos

O objetivo do trabalho deposita-se em analisar o conforto relativo à vibração a que está submetido um passageiro ou operador, caso necessário, em um trem urbano com propulsão pneumática (Aeromóvel). Os valores obtidos referem-se à vibração de corpo inteiro, obtido através das acelerações nos eixos x, y e z. Para classificação de conforto utilizou-se da comparação dos valores obtidos com as normas ISO 2631-1 [1997], ISO 2631-4 [2001], Diretiva Europeia [2002], NR-15 [2014], NHO-9 [2016], NR-9 [2016]. Analisou-se também a transmissibilidade do assento do trem ao passageiro. De posse destas informações buscou-se realizar a comparação com a saúde do usuário e ao conforto do mesmo, propondo assim, alternativas para melhoria de projeto.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 A vibração em seres humanos

Vibrações podem ser definidas como movimentos oscilatórios em torno de um ponto de referência (Savioneck, 2010). Conforme Rao [2011] citado em Kaderli [2010] o número de vezes de um ciclo completo de movimento, durante o período de um segundo é chamado de frequência e medido em Hertz.

A vibração está presente em qualquer sistema mecânico em movimento conforme Becker [2006], se diferenciando exclusivamente em seu nível e conteúdo espectral. Nos sistemas mecânicos mencionados o corpo humano se coloca como referência, no qual se define a vibração como toda e qualquer produzida por um evento externo, atuando no corpo, como por exemplo, quando o mesmo se encontra sobre uma superfície vibrante (Balbinot, 2001).

Gráficos mais usuais, segundo Kaderli [2010], são amplitude de vibração x tempo, e amplitude de vibração x frequência (espectro de frequência). Espectros de frequência diferentes caracterizam diferentes tipos de movimentos oscilatórios como por exemplo de tipo discreto, que decorrem de sinais contínuos determinísticos (periódicos), ou contínuos decorrentes de sinais randômicos ou até mesmo sinais transientes, como no impacto.

Um dos poucos trabalhos encontrados na literatura que trata da avaliação da vibração em veículos guiados sobre trilhos é o trabalho de Fedatto Neto e Gomes [2016], o qual avaliou a vibração nos vagões do trem de superfície (TRENSURB) em Porto Alegre, quanto à vibração de corpo inteiro em um trajeto de toda uma jornada de ida e volta de Porto Alegre até novo Hamburgo. No trabalho, fez-se comparações entre os níveis medidos num modelo de trem urbano e num novo modelo que havia recém entrado em operação. Neste trabalho a transmissibilidade do piso assento não foi avaliada, apenas a vibração individual no piso, encosto e assento, devido à limitação do equipamento de medição. No geral, foi observado que os níveis de vibração estavam dentro de valores aceitáveis para conforto de seus passageiros.

Existem uma série de parâmetros importantes na avaliação de vibrações, tais como valor de pico, valor pico a pico, fatores de forma de crista e valor *rms* (Kaderli, 2010). De acordo com Griffin [1990] o valor de maior importância é o valor *rms* (*root mean square*), o qual possibilita avaliar a média de energia contida no movimento oscilatório, mostrando assim os danos provocados pelo efeito da vibração, este, como a mais importante medida de um sinal ou movimento, o qual possui também, relação direta com a energia contida na onda. A representação da expressão que define o valor da aceleração *rms* é mostrada abaixo para uma função de variável contínua $f(t)$ definida sobre um intervalo de tempo $T_1 \leq t \leq T_2$.

$$a_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} [f(t)]^2 dt} \quad (2.1)$$

Segundo Stefanello [2017] o valor *rms* se enquadra como o modo mais comum da intensidade de vibração a ser avaliada apesar de sinais de vibração com conteúdo espectral diferente poderem possuir idênticas intensidades e possuir efeitos completamente diversos no corpo humano. Ainda conforme Stefanello [2017] foram propostas na norma ISO 2631-1 [1997] curvas de ponderação, as quais se atribuem diferentes pesos para os valores de acelerações

rms em função das respectivas frequências correspondentes do corpo humano cujo resultado é a aceleração ponderada (a_w) em m/s^2 a qual é dada pela equação:

$$a_w = [\sum(W_i a_i^2)]^{\frac{1}{2}}, \quad (2.2)$$

onde W_i são os fatores de ponderação indicados pela norma e a_i é a aceleração rms em cada banda de oitava ou terços de oitavas.

2.2 Exposição humana a vibração

Conforme Reis [2015], a norma descreve o modo de medição para saúde, conforto, percepção e enjoo. Ainda conforme Reis [2015] a vibração que afeta o conforto humano se situa entre 0,5 e 80 Hz e pode ser avaliada para pessoas sentadas, medindo através do assento, em 6 eixos (3 translacionais e 3 rotacionais) e para pessoas em pé ou sentadas, medindo através do assento e chão em 3 eixos (3 translacionais). No caso de transporte sobre trilhos, Reis [2015] afirma que o tipo mais indicado de vibração a ser medido é o tipo translacional. Os pesos e as curvas de ponderação podem ser vistos abaixo para cada situação conforme a norma ISO 2631-1 [1997] indica.

Tabela 2.1. Fatores das curvas de ponderação para conforto ISO 2631-1 [1997].

Ponderações em Frequências	Análise quanto ao Conforto	k
W_k	Eixo z, medição na superfície do assento.	1,0
	Eixo z, em pé	1,0
	Deitado na vertical (exceto cabeça)	1,0
	Eixo x, y, superfície apoio pé (sentado)	0,25
	Eixo z superfície apoio pé (sentado)	0,40
W_d	Eixo x, medição na superfície do assento.	1,0
	Eixo y, medição na superfície do assento.	1,0
	Eixo x, y em pé	1,0
	Deitado na horizontal	1,0
	Eixos y Encosto do assento	0,4
Eixos z encosto do assento	0,5	
W_f	-	-
W_c	Eixo x, encosto do assento	0,8
W_e	r_x , superfície do assento	0,63m/rad
	r_y , superfície do assento	0,40m/rad
	r_z , superfície do assento	0,20m/rad
W_i	Deitado na vertical (cabeça)	1,0

(Fonte: Adaptado de ISO 2631-1, 1997)

São obtidos os valores a_{wx} , a_{wy} e a_{wz} respectivos aos três eixos que representam o valor de acelerações ponderadas obtidas em x, y e z respectivamente. É necessária a obtenção de um valor único de aceleração, a fim de facilitar as comparações com a norma ISO 2631-1 [1997] através da seguinte equação:

$$a_v = \sqrt{k_x^2 \times a_{wx}^2 + k_y^2 \times a_{wy}^2 + k_z^2 \times a_{wz}^2}, \quad (2.3)$$

na qual k_x , k_y e k_z são os chamados fatores de ponderação, os quais, dependem do eixo em que a aceleração ocorre, da posição de medição e do objetivo da avaliação (conforto ou saúde). Abaixo na Tabela 2.2, encontramos os fatores de ponderação utilizados:

Tabela 2.2. Fatores multiplicativos de acordo com a ISO 2631-1.

Fator de multiplicativo	Saúde	Conforto
k_x	1.4 (piso e assento)	1.0 (assento); 0.25 (piso)
k_y	1.4 (piso e assento)	1.0 (assento); 0.25 (piso)
k_z	1.0 (piso e assento)	1.0 (assento); 0.4 (piso)

É calculada a vibração total equivalente (a_{ve}) para casos nos quais a exposição a vibração ocorre em dois ou mais períodos para diferentes durações e magnitudes que correspondem a duração total de vibração, de acordo com a seguinte equação:

$$a_{ve} = \left[\frac{\sum(a_{vi}^2 \times T_i)}{\sum T_i} \right]^{1/2}, \quad (2.4)$$

onde a_{vi} é a vibração em m/s^2 para a duração de T_i , onde i é o período em questão.

A norma ISO 2631-1[1997] estabelece o uso do valor de exposição diária A(8) que é dado pela equação abaixo:

$$A(8) = a_{ve} \sqrt{\frac{T}{T_0}} \quad (2.5)$$

Na equação acima T_0 se refere a uma duração de 8 horas conforme tabela 2.3. A(8) é entendido como a vibração total ponderada a que um determinado sistema está exposto no período de 8 horas diárias. Existem dois tipos de avaliação ao valor de A(8), denominados valores limites (VAE e VLE). VAE (valor de ação de exposição diária) refere-se ao valor de exposição diária o qual se ultrapassado informa a necessidade de ações que diminuam o nível de vibração, apesar de não representar riscos elevados a saúde.

O segundo valor utilizado VLE (valor limite de exposição) nos indica, caso seja ultrapassado, o elevado risco a saúde ocupacional no evento avaliado. Frente ao risco elevado a saúde devem se tomar ações imediatas para diminuir os níveis de vibrações, os quais podem ser considerados insalubres conforme as normas. Duas equações são apresentadas pela norma para avaliar valores limites. Neste trabalho avaliaremos conforme a (equação 2.5) pelo fato da mesma apresentar uma versão mais conservadora apresentando valores mais baixos. Os valores limites encontrados seguem conforme tabela abaixo das normas ISO 2631-1 [1997] e NR-15 [2014].

Tabela 2.3. Valores limites de vibração de acordo com a ISO 2631-1 [1997] e NR-15[2014].

Limites	VAE	VLE
Valores limite NR-15 [2014] [m/s^2]	0,55*	1,10
Valores limite ISO 2631-1 [1997] [m/s^2]	0,43**	0,86**

*Valor estipulado como sendo metade do valor limite.

**Valores obtidos por interpolação do gráfico da ISO 2631-1 [1997] para 8h de exposição.

Abaixo segue a escala que é utilizada em relação ao conforto pela norma ISO 2631-1[1997], que representa a aceleração ponderada como referência. (Tabela 2.4):

Tabela 2.4. Escala de desconforto de acordo com a ISO 2631-1 [1997].

Faixa de vibração [m/s^2]	Índice de conforto
Menos que 0,315	Confortável
0,315-0,63	Levemente desconfortável
0,5-1,0	Pouco desconfortável
0,8-1,6	Desconfortável
1,25-2,5	Muito desconfortável
Maior que 2,0	Extremamente desconfortável

Conforme comentado anteriormente um parâmetro de suma importância é o valor *rms*, o qual é responsável por medir e quantificar a energia contida na onda gerada pelo movimento oscilatório de aceleração gerando danos aos tecidos humanos (Griffin, 1990) bem como insônia, falta de concentração, enjoo, irritabilidade, falta de atenção entre outros sintomas conforme Reis[2015

(2.6)

2.3 Transmissibilidade

Atualmente, um dos métodos mais populares utilizado para avaliar a dinâmica do conforto do assento é o valor de *SEAT* (*Seat Effective Amplitude Transmissibility*). Este valor *SEAT* pode ser calculado a partir de uma função de transferência para uma variedade de espectros de entrada de vibração. É definido como uma porcentagem proveniente da divisão do valor de vibração do assento pelo valor de vibração do piso, representada por seu valor *rms* ou valor de dose de vibração VDV, medidos no sinal. Um valor de *SEAT* de 100% indica que não existe melhoramento ou degradação no desconforto produzido pelo assento; se o valor é maior que 100%, o desconforto causado pela vibração é aumentado pelo assento e se o *SEAT* é menor do que 100 % indica que o assento isolou parte da vibração produzida. Este valor pode ser avaliado para os três eixos coordenados.

Conforme Stefanello [2017] são realizados muitos estudos de avaliação de assentos automotivos, os quais se baseiam em opinião de pilotos de testes caracterizando a subjetividade da avaliação através de medidas tendenciosas e muito dispersas. Ainda conforme Stefanello [2017] para se realizar quantitativamente e de modo mais confiável as medições que atestem a eficácia de um assento calcula-se o índice *SEAT* o qual permite obter a razão entre a aceleração de saída (assento) em relação a aceleração de entrada (piso) em uma determinada direção na faixa de frequência ensaiada. A avaliação, segundo Stefanello [2017], pode ser feita por valores *rms*, VDV ou pelas respectivas integrais das densidades espectrais (PSD) no assento e dividido pelo valor no piso. A equação seguinte mostra como calcular o valor *SEAT* usando a integral da PSD [1]:

$$SEAT\% = \frac{a_{w2,rms}}{a_{w1,rms}} \times 100, \quad (2.7)$$

onde $a_{w2,rms}$ é o valor da aceleração *rms* já ponderada no assento e $a_{w1,rms}$ é o valor da aceleração *rms* já ponderada no piso.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Modelo do Aeromóvel utilizado

No meio urbano existe uma diversidade de modalidades e classificações para os sistemas de transporte de passageiros sobre trilhos conforme a CNT. Ainda conforme a CNT pode-se classificar pela capacidade de transporte, pelos níveis de direito de tráfego (segregação em relação ao tráfego de pedestres e veículos), pela inserção no território (zonas centrais ou suburbanas), pelo traçado (subterrâneo, em superfície ou elevado), pelo espaçamento entre estações, velocidade comercial, capacidade dos carros, capacidade da linha e tecnologia de tração. Segundo o órgão encontramos as modalidades de trens sendo, o trem metropolitano, o metrô, o monotrilho, o veículo leve sobre trilhos (VLT) e o *Automated People Mover* (APM) que é o Aeromóvel, equipamento avaliado no trabalho. Na Tabela 3.1, os diferentes tipos classificados pela CNT com as respectivas características são mostrados.

O Aeromóvel é representado pelo *Automated People Mover* – APM, o qual é encontrado comumente, segundo a CNT, em terminais de aeroportos e parques temáticos onde os circuitos predominantes são de pequena extensão e a frequência de operação é alta para este tipo de transporte (60 a 180 segundos), em oferta contínua ou quase contínua com segregação

total. Segundo a Tabela 3.1, os veículos possuem baixa capacidade (5.000 a 15.000 passageiros por sentido por hora) e não necessitam de condutor a bordo. O veículo possui tecnologia brasileira de desenvolvimento e utiliza propulsão pneumática com segregação total (ventiladores e motores alocados em casas de máquinas).

Tabela 3.1. Classificação pela CNT por modalidade de transporte (Fonte: CNT, 2016).

Modalidade	No. De Carros por composição	Capacidade da composição (passageiros)	Capacidade da linha (passageiros por sentido por hora)	Distância média entre estações (m)	Intervalo entre veículos na hora de pico (<i>headway</i>) (s)
Trem metropolitano	8 a 12	2000	40000 a 80000	1500 a 2500	120 a 300
Metrô	4 a 10	720 a 2500	40000 a 80000	700 a 1200	90 a 180
Monotrilho	-	-	20000 a 48000	500 a 1000	180 a 480
Veículo Leve sobre Trilhos – VLT	1 a 4	100 a 720	7000 a 24000	500 a 800	600 a 840
Automated People Mover - APM	1	-	5000 a 15000	-	60 a 180

3.2 Equipamentos utilizados

Os valores vibracionais transmitidos ao corpo humano foram obtidos através de acelerômetros fixados em um *seat pad* (Figura 3.1) o qual se trata de um disco semi-rígido de material flexível que não altera as propriedades dinâmicas dos elementos a serem medidos. O aparelho Quest VI-400Pro (QUEST-TECHNOLOGY, 2005), Número de Série 12430 foi utilizado para as leituras e armazenamentos dos dados obtidos no veículo e posteriormente analisados em uma planilha no Microsoft Excel 2007.

Contou-se também com o software *Quest Suite Professional II* para que os dados fossem processados e as corretas curvas de ponderação aplicadas, bem como a definição dos eixos coordenados, e outros parâmetros necessários.

3.3 Procedimento de instrumentação adotado

O *seat pad*, transdutor utilizado, foi posicionado na interface entre o usuário e o assento, pés e piso do trem, onde se localiza a transferência de vibração do veículo até o ocupante seguindo a correspondente orientação estabelecida e indicada pela norma ISO 2631-1, 1997. Através do *software* utilizado (*Quest Suite Professional II*) a configuração do analisador correspondente foi realizada, de acordo com as curvas de ponderação adequadas para o tipo de situação desejada da análise realizada e com os fatores de multiplicação definidos para a mesma.



Figura 3.1 - Medidor VI400-Pro e *seatpad* utilizados nas medições.

Descarregaram-se os dados após as medições em um computador para efetuar o pós-processamento dos mesmos. Para análise de transmissibilidade foi usado outro *seat pad* construído e apresentado por Fagundes [2017] através do qual se obtiveram as curvas de transmissibilidade em cada um dos eixos coordenados entre o piso e o assento, bem como a

posterior avaliação dos índices de conforto. Abaixo segue a Figura 3.2 que demonstra o posicionamento do *seat pad* com os correspondentes eixos e suas respectivas orientações.



Figura 3.2 - Locais de medição e posicionamento dos sensores.

3.4 Trajeto e pontos medidos

O trajeto do Aeromóvel se dá através de uma linha que liga o terminal de embarque do aeroporto (*Terminal 1*) a estação *Aeroporto* do trem metropolitano de Porto Alegre. Na Figura 3.3 encontra-se a indicação do mesmo. Os pontos medidos foram escolhidos de forma a abranger o universo do passageiro no Aeromóvel. Escolheram-se pontos em cada uma das partes do trem (frente, centro e traseira), bem como em lados opostos de modo a obter maior compreensão da vibração transmitida ao veículo. Os pontos citados podem ser vistos na Figura 3.4.

O trajeto possui pouco mais de 800 metros de comprimento e é cumprido em um período em torno de três minutos dependendo das condições do controle do veículo de uma estação a outra, pois o mesmo pode sofrer interrupções do sinal transmitido via ondas de rádio e automaticamente acionar os freios de emergência até que a comunicação seja reestabelecida para iniciar o percurso novamente. Foram realizadas medições considerando ida e volta do carro.



Figura 3.3 - Trajeto medido neste trabalho do Aeromóvel.

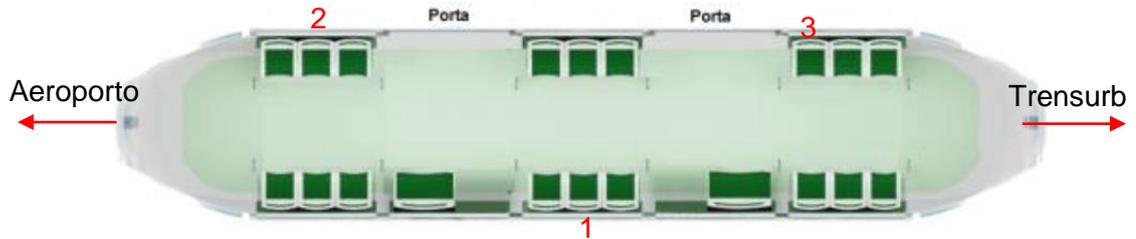


Figura 3.4 - Vista superior dos assentos no modelo A100 e posições de medição.

4 RESULTADOS

4.1 Avaliação com o equipamento Quest VI 400-Pro

Foram realizadas medições em 3 pontos distintos dentro do veículo para trajetos de ida e volta com o equipamento comercial Quest Vi 400-Pro. Como este equipamento só permite a medição de apenas 1 ponto (3 eixos), a análise fica restrita à análise dos valores *rms* medidos. Na Figura 4.1 e Figura 4.2 encontra-se as leituras gravadas para a posição 1 do assento percorrendo o sentido estação do Trensub para a estação do Aeroporto e o percurso inverso (ida e vinda). Nas Figuras A1 a A7 nos apêndices encontram-se os dados medidos no tempo de aceleração em cada um dos 3 eixos ao longo dos trajetos de ida e de vinda nas 3 posições avaliadas.

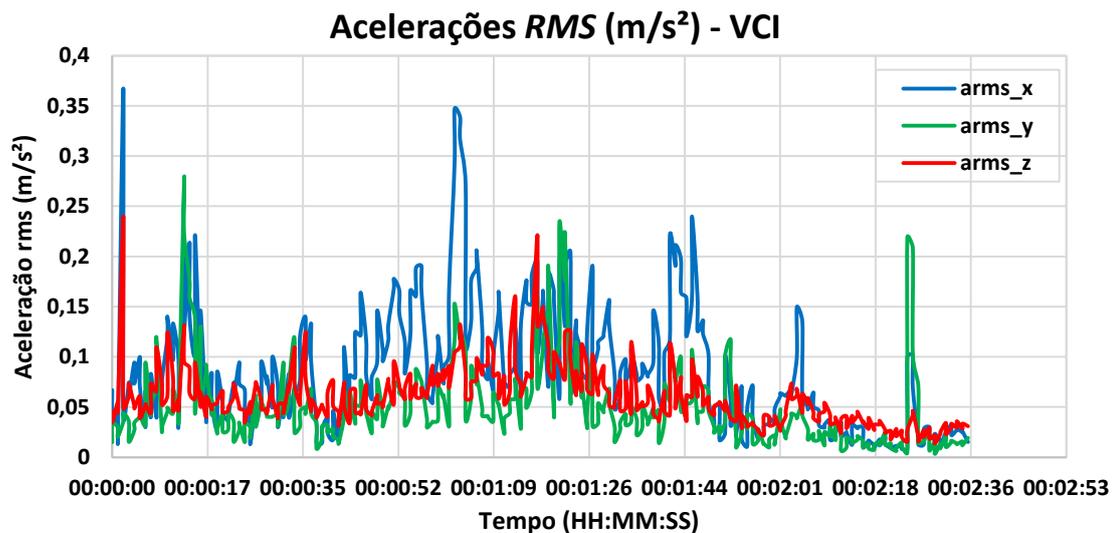


Figura 4.1 - Gráfico de acelerações *rms* posição 1 (Ida).

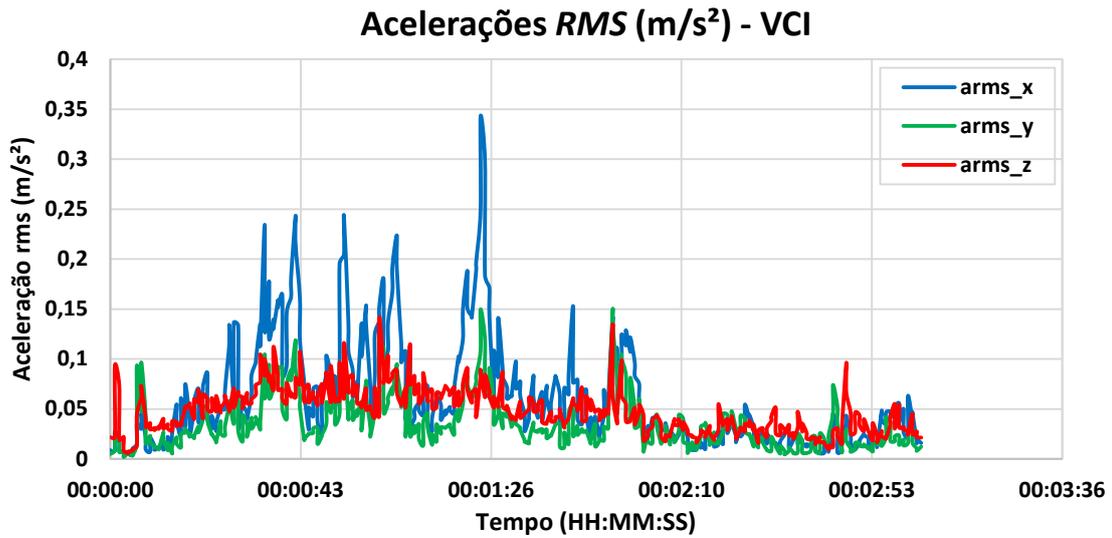


Figura 4.2 - Gráfico de acelerações rms posição 1 (Volta).

Percebe-se claramente picos de vibração na direção lateral do Aeromóvel (Figura 4.1 e 4.2) no meio do trajeto que corresponde à situação em que o veículo encontra-se em velocidade máxima de 40 km/h. Próximo às paradas há aumento de aceleração na direção longitudinal (y) referente às paradas e acelerações para chegada e partidas, respectivamente. Avaliou-se estas vibrações quanto os riscos à saúde e aplicou-se as recomendações da Norma ISO 2631-1 [1997]. Como resultado, obteve-se o gráfico indicativo da Figura 4.3.

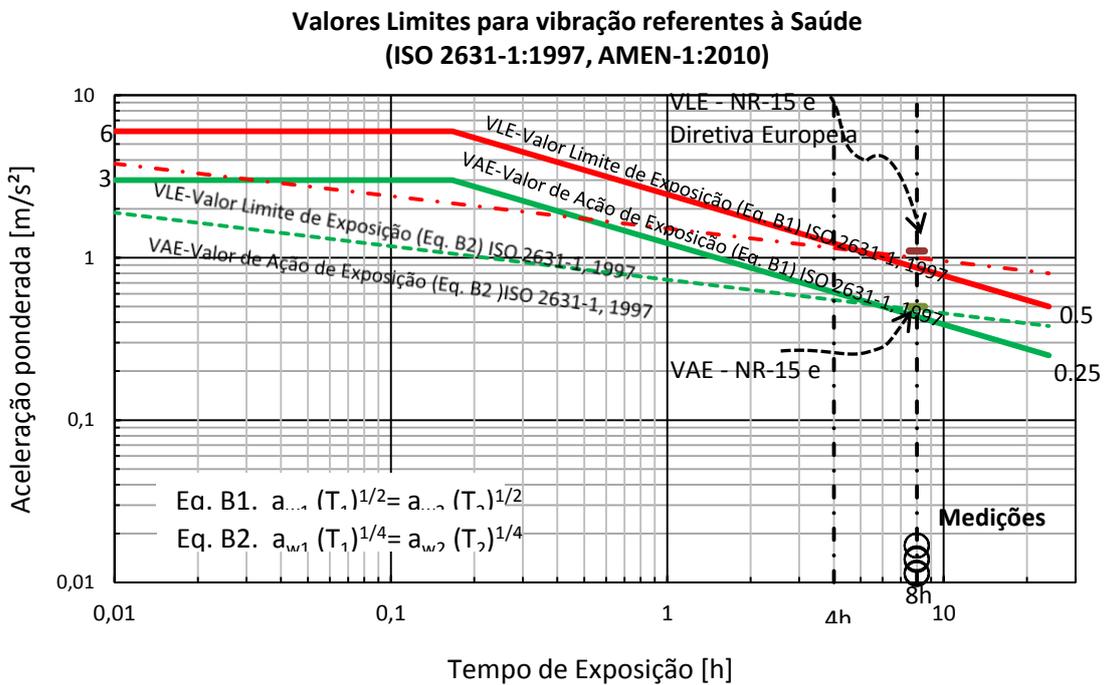


Figura 4.3 - Valores limites para vibração referentes à Saúde.

Percebe-se claramente que os níveis de vibração medidos estão muito abaixo do limite de ação de qualquer das normas ISO 2631-1 [1997], Diretiva Europeia [2002] ou NR-15 [2014]. Como os níveis de vibração são baixos (nível para avaliação do conforto) e muito próximos entre si, resolveu-se fazer uma análise de variância (ANOVA) com 1 fator e três tratamentos para verificar se os valores medidos de aceleração *rms* combinados nos três eixos (soma vetorial) são afetados pela posição de medição. Em outras palavras, pretende-se avaliar se é possível afirmar que há posição mais confortável que outra dentro do vagão. A Tabela 4.1 indica os resultados obtidos para um nível de significância de 95% feitas na ferramenta de análise estatística ANOVA do EXCEL. Como pode-se perceber o *valor-P* resultante foi de 0 e o valor de $F > F_{crit}$, indicando que os três valores médios provêm de amostras distintas. Em outras palavras, pode-se dizer que o tratamento (posição de medição) afetou o valor da aceleração medida, indicando neste caso que a posição 3 foi a que gerou mais vibração quando comparada com a posição 2, estando a posição 1 também em um nível de vibração semelhante ao da posição 2.

Tabela 4.1. Análise ANOVA de 1 fator para as acelerações combinadas nos três eixos.

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Posição 1	620	68,01422	0,1097	0,00465
Posição 2	620	66,88363	0,107877	0,004869
Posição 3	620	89,99232	0,145149	0,009477

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítica
Entre grupos	0,547487	2	0,273744	43,23277	0	3,00057
Dentro dos grupos	11,75826	1857	0,006332			
Total	12,30575	1859				

Foi-se um pouco além e compararam-se os resultados de aceleração combinada com valores indicativos de normas e artigos quanto ao conforto. Nas Figuras 4.4 e 4.5 são indicados comparativos das vibrações de cada uma das medições juntamente com classificações propostas por Normas e/ou pesquisadores da área.

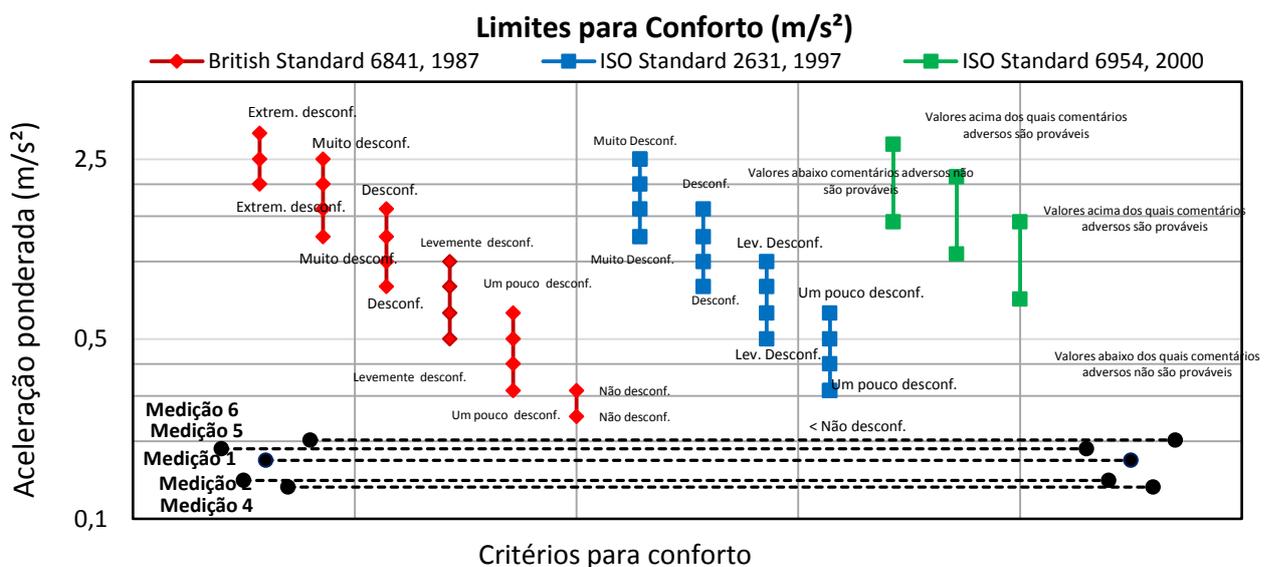


Figura 4.4 - Comparativos de níveis de conforto aceitáveis para as medições conduzidas.

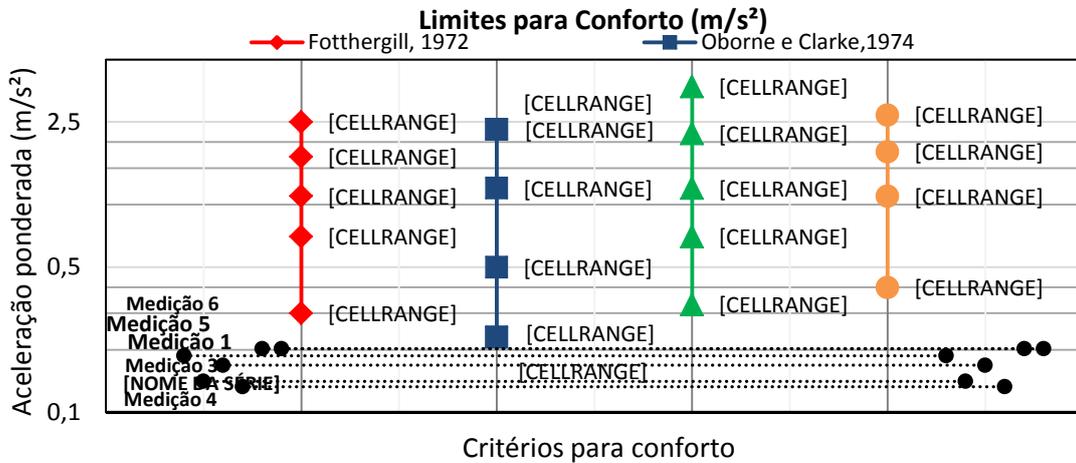


Figura 4.5 - Comparativos de níveis de conforto aceitáveis para as medições conduzidas.

4.2 Avaliação da transmissibilidade com dois seat pads

Avaliou-se a vibração utilizando-se dois *seat pads* no banco e no piso durante um trajeto de ida do Aeromóvel na posição central da lateral esquerda (semelhante à posição 1). A Figura 4.6 indica o posicionamento destes dois dispositivos no banco.

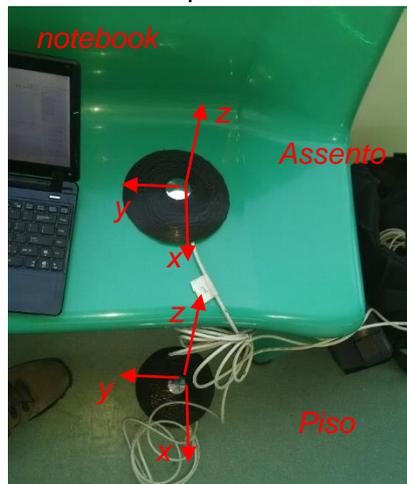


Figura 4.6 - *Seatpad* posicionado no assento e piso do banco central do Aeromóvel. Eixos coordenados indicam orientação final dos acelerômetros.

Percebe-se na Figura 4.6 o tipo de banco em fibra de vidro. O objetivo desta medição é avaliar conteúdo de frequências das vibrações nesta situação e posição assim como poder avaliar a transmissibilidade e os índices SEAT (*Seat Effectiveness Acceleration Transmissibility*) que podem dar indicação sobre o conforto dos assentos.

A Figura 4.7 indica os sinais medidos durante o trajeto e os respectivos espectros de frequências. Observa-se que em ambos os *seat pads* foi possível verificar que a maior vibração ocorre na direção x, ou seja, lateral ao vagão do Aeromóvel, correspondente ao balanço lateral característicos de veículos guiados sobre trilhos. Estas oscilações ficaram em torno de 0,66 Hz.

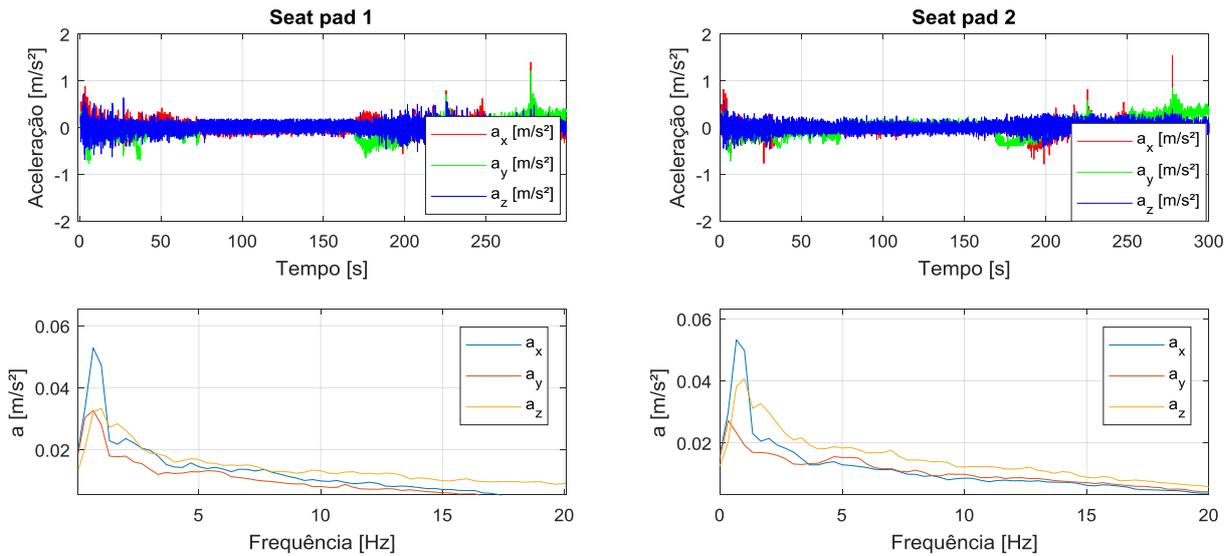


Figura 4.7 - Sinais de aceleração medidos pelos dois *seat pads* e os respectivos espectros de frequência.

A Figura 4.8(a) indica os valores SEAT avaliados para as três direções no banco naquela posição. Os valores para todas as direções ficaram altos, especificamente para as direções y (longitudinal do vagão) e z (vertical), indicando inclusive que há amplificação da vibração nestas direções (5,8% e 1,11% em valores *rms*). Isto era de se esperar num banco que é completamente rígido de fibra de vidro. Na direção x (lateral) há uma atenuação de 13,12% em valores *rms*).

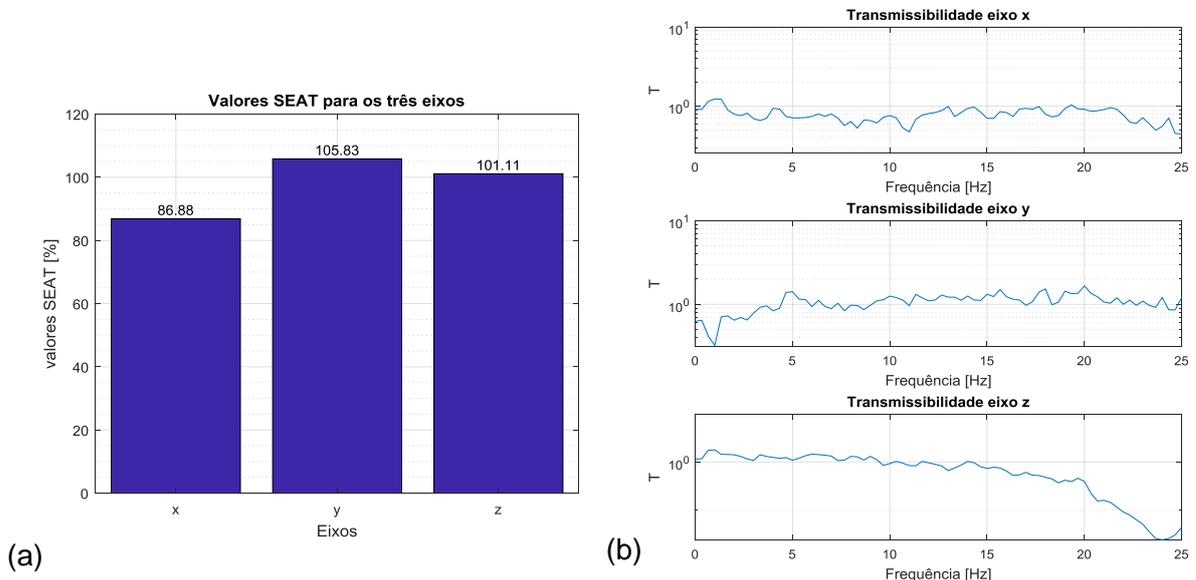


Figura 4.8 - (a)Valores do índice SEAT para cada um dos 3 eixos na Posição 1 e (b)Transmissibilidades de aceleração.

Em termos de transmissibilidade, o gráfico da Figura 4.8(b) dá uma indicação deste comportamento referente a uma medição de trecho completo de ida e volta à estação do Aeroporto. No eixo x há uma leve amplificação na faixa de 0-2,5Hz mas em grande parte do espectro até 25 Hz, a transmissibilidade é menor que 1. Para o eixo y, há atenuações até 5 Hz mas que em seguida tornam-se amplificações (menores que 2). Para o eixo z, até 10 Hz há

uma leve amplificação (transmissibilidade levemente maior que 1) mas logo em seguida há atenuações consideráveis (0,8 a 0,5). A maior atenuação no eixo z, presume-se que seja devido à flexão do banco de fibra nesta direção.

5 CONCLUSÕES

De acordo com os dados obtidos nas medições de vibração de corpo inteiro para fins de avaliação de conforto, o Aeromóvel mostrou-se confortável para os diversos autores e valores indicativos de Normas. Assim, para fins de avaliação de conforto pode se concluir que o sistema Aeromóvel se encontra dentro de todos os limites propostos, inclusive apresenta um nível de conforto segundo a norma ISO-2631 [1997] classificado como levemente confortável com picos de acelerações entre $0,315 \text{ m/s}^2$ e $0,63 \text{ m/s}^2$. Desconsiderados os picos o veículo poderia inclusive ser classificado como confortável com acelerações inferiores a $0,315 \text{ m/s}^2$.

No que diz respeito a saúde o veículo se encontra muito abaixo dos limites propostos pelo gráfico (VAE e VLE), não caracterizando qualquer risco para usuário e operador caso o tivesse a bordo. Os níveis de aceleração medidos entre $0,01 \text{ m/s}^2$ a $0,02 \text{ m/s}^2$ são bastante baixos neste tipo de veículo quando comparado com, por exemplo, trem urbano, principalmente devido à baixa velocidade e devido à relativa planicidade da via de tráfego do Aeromóvel.

As vibrações, segundo a ISO 2631-1 [1997], não apresentam, em nenhum dos locais avaliados, risco à saúde dos ocupantes do Aeromóvel.

O tipo de banco em fibra de vidro favoreceu aos altos valores de índice SEAT para a direção vertical e lateral dos ocupantes, sendo o tratamento deste banco, uma solução de baixo custo possível de ser feito para melhorar ainda mais a qualidade do conforto durante do trajeto da viagem. Havendo a necessidade de melhoria no projeto relativo a vibrações observa-se que um ponto a ser levado em consideração seria a alteração dos bancos principalmente no que se diz respeito ao eixo x (balanço lateral), o qual apresenta as maiores acelerações do sistema, o que de fato é característico em veículos rodoviários segundo Reis [2015].

A indicação, pela análise de variância ANOVA, de locais mais confortáveis que outros dentro do Aeromóvel, fornece informações relevantes que projetos futuros poderão tirar proveito através da alteração das disposição dos assentos, para aumentar ainda mais o conforto dos passageiros. Deve se salientar também que a posição no carro determina diferenças na vibração sentida pelo usuário e através da análise de ANOVA pode se comprovar dentro de um intervalo de confiança de 95% que a posição mais sujeita a vibrações se encontra na dianteira do carro e é chamada de posição 3. Possivelmente a presença de conjuntos mecânicos e de um compressor de ar, ausentes em outras regiões do carro, contribuem para o aumento da vibração no local.

Devido a geometria, construção e projeto dos bancos as vibrações são acentuadas em dois eixos (y e z) e atenuadas no eixo x (eixo de maior vibração devido ao balanço lateral). Para futuros projetos poderia ser revisto a questão dos bancos que possivelmente devido ao braço de alavanca apresentam uma intensidade maior de vibração.

Trabalhos futuros poderão avaliar outras grandezas relativas ao conforto geral dos passageiros como conforto acústico, térmico e ergonômico e que não foram avaliados neste trabalho. Na ausência de maiores estudos a respeito de nível de conforto em veículos sobre trilhos deixa-se aqui a contribuição.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Balbinot, A., “**Caracterização dos níveis de vibração em motoristas de ônibus : um enfoque no conforto e na saúde**”, Tese de Doutorado, PROMEC, UFRGS, Porto Alegre, 2001.

Becker, T., “**Desenvolvimento de uma mesa vibratória para estudos sobre vibração no corpo humano, medições em um grupo de motoristas e ajuste de um modelo biodinâmico**”, Tese de Doutorado, PROMEC, UFRGS, Porto Alegre, 2006.

Bruel and Kjaer, “**Primer: Human Vibration. Booklet**”. Ed. Bruel and Kajer, Denmark, 31p.1989.

CNT (Confederação Nacional do Transporte). “**Transporte Metroviário de Passageiros**”. 2016. <http://cms.cnt.org.br/Imagens%20CNT/PDFs%20CNT/2016%20CNT%20>

[Pesquisa%20Metroferrovi%C3%A1ria%20\(web\).pdf](http://cms.cnt.org.br/Imagens%20CNT/PDFs%20CNT/2016%20CNT%20). Acessado em 01/10/2017.

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. “**Análise de níveis de vibração em usuários de trens urbanos**”. Revista Liberato, v. 18, p. 276-296, 2017.

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**”. 5th Ed. McGraw-Hill, 1456p. 2002. ISBN: 0-07-137081-1.

ISO 2631-1:1997. “**Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole body vibration – Part 1: General requirements**”. International Organization for Standardization, 2007.

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.

Kaderli F. “**Análise de Conforto quanto a vibração em Veículos de Passeio**”. 2010. 22f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica , UFRGS, Porto Alegre, 2010.

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>. Acessado 30/04/2016.

NR-09. “**Norma Regulamentadora No.09. Programa de prevenções de riscos ambientais - Anexo Nº1 Vibrações**”. 2014. <http://www.guiatrabalhista.com.br/legislacao/nr/nr9.htm>. Acessado 26/04/2016.

NR-15. “**Norma Regulamentadora No.15. Atividades e operações insalubres - Anexo Nº8 Vibrações**”. 2014. <http://www.guiatrabalhista.com.br/legislacao/nr/nr15.htm>. Acessado 24/04/2016.

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

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

Reis, C. M., "**Análise do conforto em embarcações do modal aquaviário no transporte coletivo de passageiros em Porto Alegre**", 15f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, UFRGS, Porto Alegre, 2015.

Savioneck D. "**Medição e Avaliação da Exposição Humana à Vibração Transmitida ao Sistema Mão – Braço Durante a atividade Ciclística**". 15f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, UFRGS, Porto Alegre, 2010.

Stefanello , J., "**Evaluation of the floor-seat transmissibility (SEAT) in riding vehicles and verification of vibration levels regarding health and comfort in WBV**", Proceedings of the COBEM 2017, Dezembro, Curitiba, 2017.



Figura A.1 Interior do Aeromóvel.

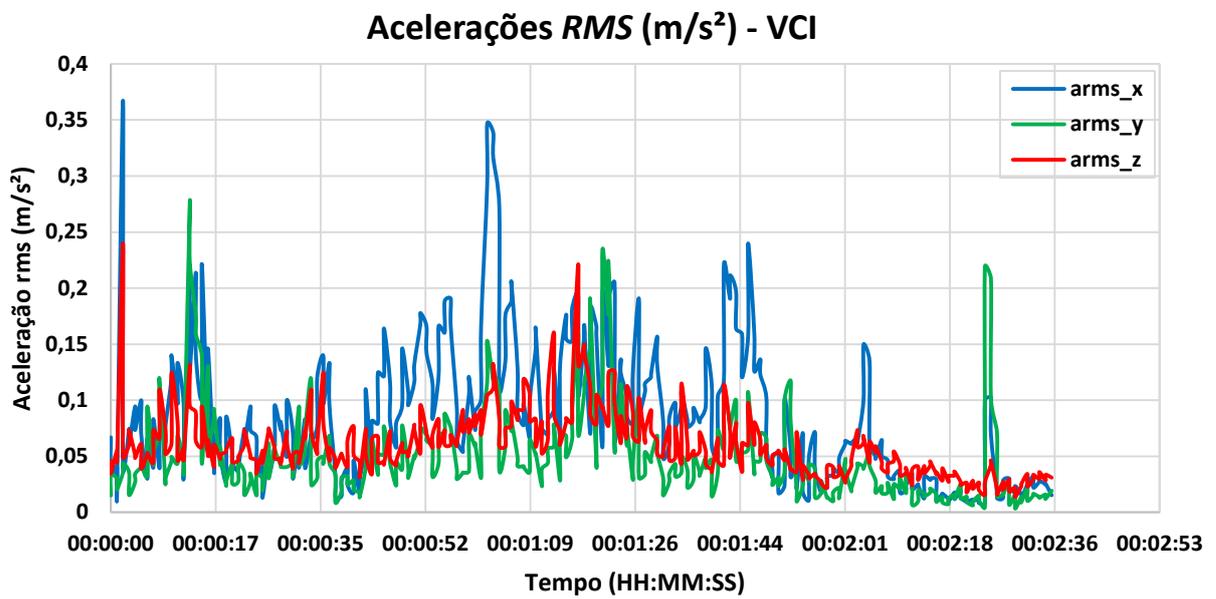


Figura A.2 - Gráfico de acelerações rms posição 1 (Ida).

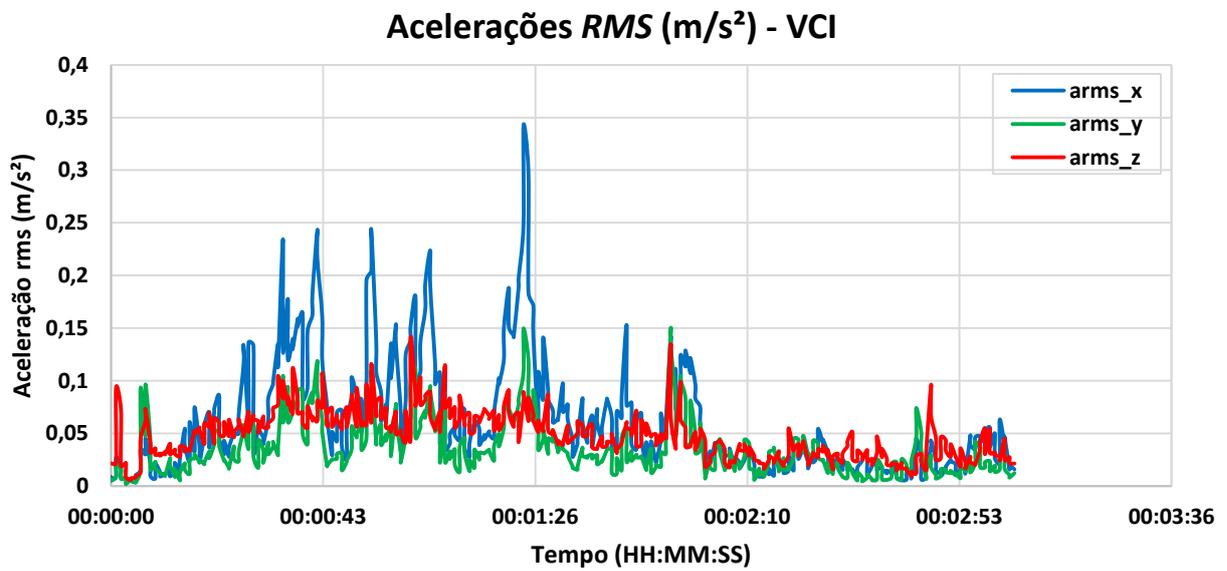


Figura A.3 - Gráfico de acelerações rms posição 1 (Vinda).

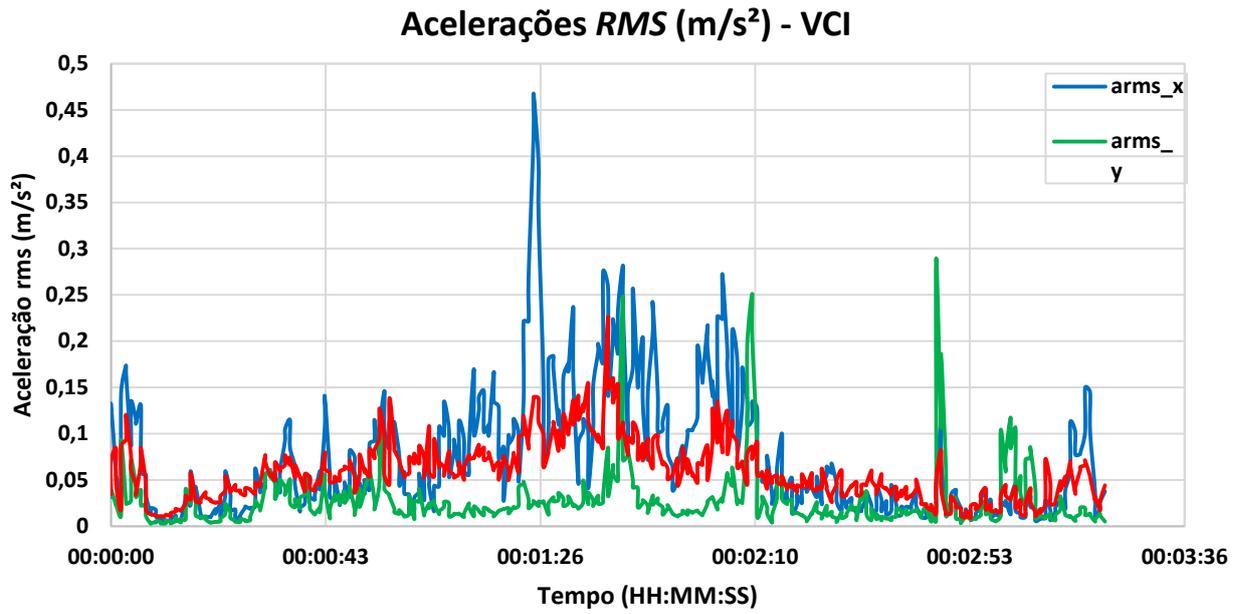


Figura A.4 - Gráfico de acelerações rms posição 2 (Ida).

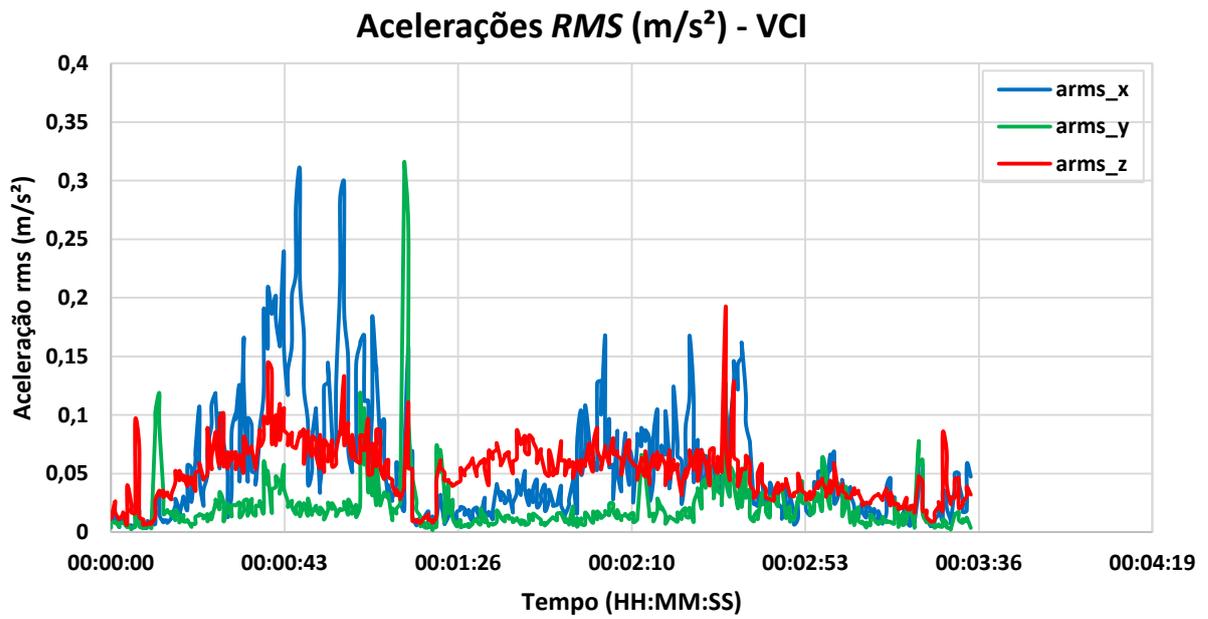


Figura A.5 - Gráfico de acelerações rms posição 2 (Vinda)

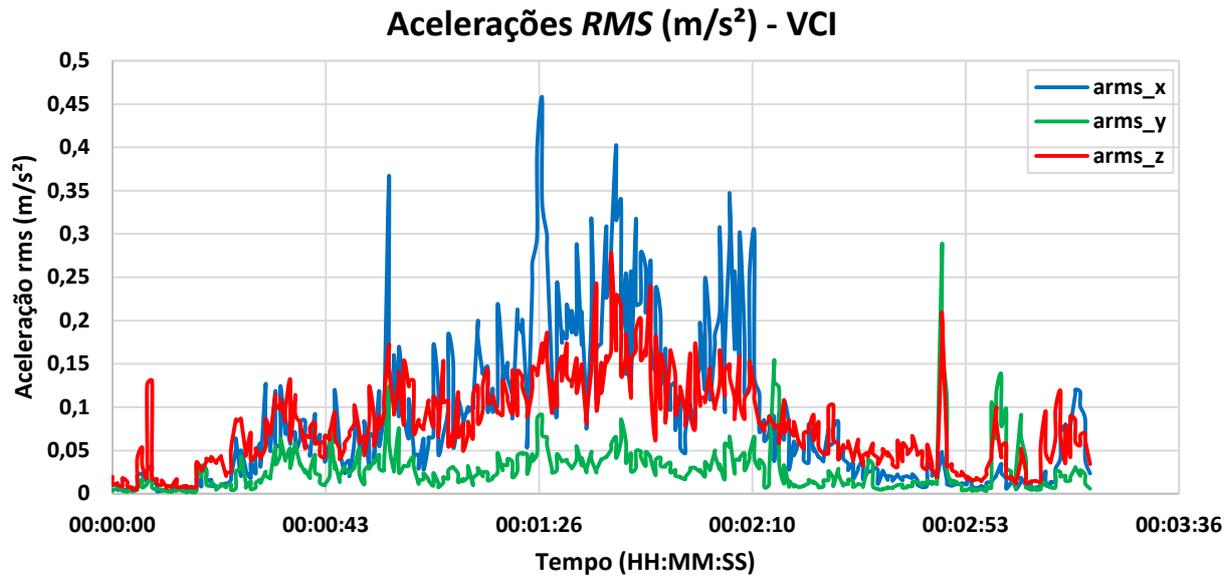


Figura A.6 - Gráfico de acelerações *rms* posição 3 (Ida).

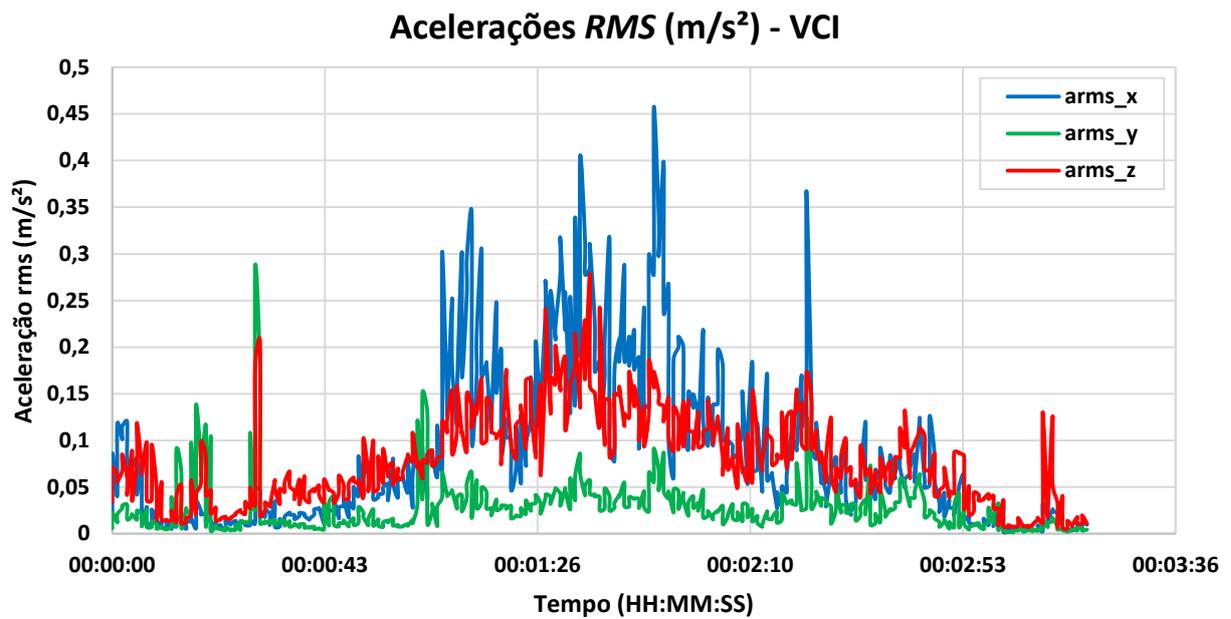


Figura A.7 - Gráfico de acelerações *rms* posição 3 (Vinda).