

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

ANÁLISE DO CONFORTO QUANTO À VIBRAÇÃO NO TRANSPORTE HIDROVIÁRIO DE
PASSAGEIROS

por

Gustavo Felipe Amaral Pernas

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, novembro de 2018

ANÁLISE DO CONFORTO QUANTO À VIBRAÇÃO NO TRANSPORTE HIDROVIÁRIO DE
PASSAGEIROS

por

Gustavo Felipe Amaral Pernas

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
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Mecânica dos Sólidos**

Orientador: Prof. Juan Pablo Raggio Quintas

Coorientador: Prof. Herbert Martins Gomes

Comissão de Avaliação:

Prof. Juan Pablo Raggio Quintas

Prof. Rogério José Marczak

Prof. Jakson Manfredini Vassoler

Porto Alegre, 12 de novembro de 2018.

“Investir em conhecimento rende sempre os melhores juros.”

Benjamin Franklin.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, pelo incentivo para ingressar na universidade e por todo o imenso apoio que recebi ao longo de todos esses anos.

À minha namorada, Adriana, por toda motivação nessa etapa final da faculdade e por sempre estar ao meu lado nos momentos difíceis.

Ao meu orientador Prof. Juan Pablo e ao meu coorientador Prof. Herbert, que se mostraram extremamente solícitos sempre que necessitei e deram apoio inestimável para a confecção deste trabalho.

À empresa Catsul, por ceder o espaço na embarcação e por disponibilizar informações importantes de forma atenciosa.

A todos os professores que tive ao longo do curso, que contribuíram para minha formação acadêmica e, principalmente, para o desenvolvimento de capacidades de resiliência e antifragilidade.

A todos os amigos que conquistei na universidade durante esse período, por mostrarem que o companheirismo e empatia podem superar todas as adversidades.

PERNAS, G. F. A. **Análise do Conforto Quanto à Vibração no Transporte Hidroviário de Passageiros**. 2018. 15f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

RESUMO

As grandes transformações da mobilidade urbana aumentam a necessidade de meios alternativos de transporte. Com isso, o desenvolvimento de novas opções, como o transporte hidroviário, se torna importante, sendo necessário verificar e comprovar a qualidade dos serviços disponíveis. Portanto, analisar a condição de conforto dos passageiros de uma embarcação se torna essencial para garantir a qualidade desse transporte e que ele seja, de fato, uma boa alternativa. Este trabalho tem como objetivo analisar quantitativamente o conforto relativo à vibração na área de convivência dos passageiros de uma embarcação do tipo catamarã. As medições foram feitas na região metropolitana de Porto Alegre, ao se realizar o trajeto convencional na travessia entre as cidades de Porto Alegre e Guaíba, através da empresa CATSUL, prestadora do serviço. Os dados coletados foram analisados com relação à vibração de corpo inteiro (VCI), através dos valores de aceleração *rms* (m/s^2) nos eixos x, y e z. Ao comparar os valores obtidos com diversas normas, a embarcação se mostrou confortável em todas as medições feitas.

PALAVRAS-CHAVE: vibração de corpo inteiro, catamarã, conforto de passageiros.

PERNAS, G. F. A. **Analysis of Comfort Regarding Vibration in Water Passenger Transport.** 2018. 15f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

ABSTRACT

The major changes in urban mobility increases the need for alternative modes of transport. Therefore, the development of new options, such as waterway transportation, becomes important, and it is necessary to verify and assure the quality of the services available. Therefore, analysing the comfort condition of the passengers of a boat becomes essential to guarantee the quality of this transport and that it is, in fact, a good alternative. This work aims to analyse quantitatively the comfort related to vibration in the living area of passengers of a catamaran-type boat. Measurements were performed in the metropolitan area of Porto Alegre, when the conventional route was taken in the crossing between the cities of Porto Alegre and Guaíba, through the company CATSUL, service provider. The collected data were analysed with respect to the whole body vibration (WBV), through the rms acceleration values (m/s^2) in the x, y and z axes. When comparing the obtained values with several standards, the boat was comfortable in all the measurement points.

KEYWORDS: whole body vibration, catamaran, passenger comfort.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Principais hidrovias brasileiras.....	2
Figura 2.2: Sistema de propulsão típico de um barco catamarã	3
Figura 2.3: Eixos e orientações de medição para a posição sentada	5
Figura 2.4: Desenho esquemático de um <i>seat pad</i> em corte	7
Figura 3.1: CatSul II, embarcação analisada	8
Figura 3.2: Medidor e <i>seat pad</i> comercial Quest VI-400 Pro.....	8
Figura 4.1: Sinais de aceleração medidos no piso e no assento da parte frontal da embarcação, com seus respectivos espectros de frequência	9
Figura 4.2: Faixas de vibração obtidas para cada ponto da embarcação	10
Figura 4.3: Valores <i>SEAT</i> médios para os eixos x, y e z	11
Figura 4.4: Valor de aceleração <i>rms</i> na parte traseira da embarcação, medido no assento	11
Figura 4.5: Valores limites para vibração referentes à saúde no ponto crítico analisado	12
Figura 4.6: Limites de conforto de acordo com as normas BS 6841, ISO 2631 e ISO 6954	13
Figura 4.7: Limites de conforto de acordo com estudos mencionados em Griffin, 1990.....	13
Figura A.1: Certificado de calibração do equipamento VI-400 Pro.....	16
Figura A.2: Linha padrão de operação da CatSul	17
Figura A.3: Área de convivência de passageiros do Catsul II	17
Figura A.4: Pontos medidos no interior da embarcação	18
Figura A.5: Sinais de aceleração medidos no piso e no assento da parte traseira da embarcação, com seus respectivos espectros de frequência	18
Figura A.6: Valor de aceleração <i>rms</i> na parte frontal da embarcação, medido no assento.....	20

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Fatores multiplicativos de acordo com a ISO 2631-1	5
Tabela 2.2: Valores limites de vibração, (m/s^2), para 8 horas	6
Tabela 3.1: Especificações da embarcação CatSul II	7
Tabela 4.1: Vibração ponderada no piso para diferentes lugares	9
Tabela 4.2: Fatores de crista para as partes traseira e frontal da embarcação, medidos no assento	10
Tabela 4.3: Análise de variância ANOVA para o eixo z	14
Tabela A.1: Valores SEAT para todos os pontos medidos.....	19
Tabela A.2: Análise de variância ANOVA para o eixo x.....	20
Tabela A.3: Análise de variância ANOVA para o eixo y.....	20

ÍNDICE	Pág.
AGRADECIMENTOS	iv
RESUMO	v
ABSTRACT	vi
LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS	viii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos	1
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	2
2.1 Transporte hidroviário de passageiros	2
2.1.1 Catamarã.....	2
2.1.2 Fontes de vibração em uma embarcação	3
2.2 A vibração no corpo humano	3
2.3 Normas para análise de vibração de corpo inteiro	4
2.4 Transmissibilidade	6
2.5 <i>Seat pad</i>	6
3 METODOLOGIA.....	7
3.1 Métodos utilizados e embarcação analisada.....	7
3.2 Trajeto e pontos medidos	8
3.3 Equipamentos utilizados	8
4 RESULTADOS	8
4.1 Análise de vibração em nove pontos distintos da embarcação	8
4.2 Análise do valor <i>SEAT</i> médio dos assentos da embarcação	10
4.3 Análise de vibração durante todo o trajeto Porto Alegre — Guaíba	11
4.4 Avaliação sobre a saúde e o conforto de passageiros no ponto crítico da embarcação ..	12
4.5 Análise de variância ANOVA	13
5 CONCLUSÕES	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	14
ANEXO.....	16
APÊNDICE.....	17

1 INTRODUÇÃO

A importância dos meios de transporte em nosso cotidiano é evidente, bem como dos estudos para a otimização de sistemas já implantados e para a elaboração de novos sistemas. Um dos principais recursos naturais do Brasil é o modal aquaviário e podemos utilizar esse recurso em benefício de todos. O Brasil dispõe de uma vasta rede hidroviária, que somam aproximadamente 42 mil quilômetros de extensão, segundo o caderno setorial de recursos hídricos do Ministério do Meio Ambiente. Entretanto, todo esse potencial não é muito bem aproveitado, como explica Allama, 2011, que um país continental com 29 mil quilômetros de vias naturalmente navegáveis aproveita economicamente apenas 13 mil quilômetros delas, sendo que se incluídas as águas fluviolacustres, seriam 63 mil quilômetros de vias navegáveis.

Com esse grande potencial, é necessário realizar uma avaliação completa das embarcações que são utilizadas no transporte aquaviário. Um estudo importante a ser feito é em relação à saúde e ao conforto dos passageiros, que pode ser quantificada, dentre outras formas, através da análise da vibração da embarcação. É importante salientar que o conforto é o estado de quem se sente confortado, ou seja, sua determinação depende muito do sujeito, é algo difícil de se definir que depende de vários fatores, como temperatura, cheiro, umidade, ruído e vibração. O conforto quanto à vibração sofrida pelo corpo humano não é facilmente previsível, visto que cada pessoa tem sua sensação particular em relação a isso, mas existem diversos estudos que tentam quantificar essa sensação.

A vibração pode ser definida como um movimento que se repete regular ou irregularmente em um intervalo de tempo. Segundo Rao, 2011, um corpo está em estado de vibração quando é submetido a movimentos oscilatórios em torno de um ponto de referência. De modo geral, a vibração é um movimento inerente dos corpos dotados de massa e elasticidade. A vibração recebida pelo corpo humano pode ser classificada de duas formas: a Vibração Mão-Braço (VMB) e a Vibração de Corpo Inteiro (VCI). A VMB é transmitida através de determinadas partes do corpo, como mãos e braços. Por outro lado, a VCI é transmitida ao corpo como um todo, por meio de uma superfície de suporte em contato com pés, nádegas ou costas, por exemplo. Qualquer uma delas pode trazer riscos à saúde e proporcionar desconforto em diferentes níveis.

1.1 Motivação

A relevância do tema origina-se a partir da necessidade de meios alternativos de transporte, visto que a mobilidade urbana, a partir da década de 1980, sofreu grandes transformações, aumentando ainda mais a importância dos deslocamentos diários (OLIVEIRA, 2011). Com isso, o desenvolvimento de novas opções de meios de transporte, como o transporte hidroviário, se torna importante, sendo necessário verificar e comprovar a qualidade dos serviços disponíveis. Portanto, analisar a condição de conforto dos passageiros de uma embarcação se torna essencial para garantir a qualidade desse transporte e que ele seja, de fato, uma boa alternativa.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo analisar quantitativamente a saúde e o conforto relativo à vibração na área de convivência dos passageiros de uma embarcação do tipo catamarã. Para isso, ao escolher pontos estratégicos para medição no interior do barco, foi feita uma análise do catamarã como um todo. Assim, é possível propor uma faixa de cores referente à vibração, a fim de determinar os pontos onde ela é presente em maiores e menores níveis. O trajeto completo do barco será avaliado tanto na parte traseira, quanto na parte dianteira, para definir o ponto crítico da embarcação. Após o processamento dos dados, objetiva-se avaliar o estado de vibração de acordo com situações específicas a que a embarcação é submetida, como durante o atracamento e em velocidade de cruzeiro, por exemplo. Finalmente, a análise busca classificar a embarcação em relação ao conforto e à saúde, comparando os valores obtidos com normas nacionais e internacionais. Além disso, procura-se avaliar também o valor *SEAT* médio dos assentos, a fim de verificar a atenuação de vibração dos mesmos.

positivos quanto negativos. Por isso existe o valor *rms*, que é calculado pela raiz quadrada da média dos quadrados dos valores, representando, assim, uma quantidade física.

Outro aspecto que pode ser usado para quantificar uma vibração é o cálculo do Valor de Dose de Vibração (VDV). A obtenção do VDV é similar à do valor *rms*, porém com os termos na quarta potência, ou seja, potencializa o valor dos picos. Seu uso é indicado em casos em que os picos da oscilação têm variações bruscas em relação à variação *rms* usual. Para quantificar essa variação, o fator de crista (FC) pode ser usado. O FC é obtido pela relação entre a aceleração *rms* (a_w) e a de pico (*Lpk*), como mostrado na equação (2.1).

$$FC = \frac{Lpk}{a_w} \quad (2.1)$$

O FC é um valor que quantifica o quanto que o pico máximo está longe do valor *rms* do sinal. Segundo Lopes, 2012, para um $FC \leq 9$, o método básico para avaliação (utilizando o valor *rms*) é suficiente, caso contrário é preciso utilizar métodos alternativos mais sensíveis a picos, como o VDV, por exemplo. Se o fator de crista for maior do que 9, a vibração pode ocasionar problemas na coluna cervical.

O valor *rms*, portanto, torna-se a medida de amplitude mais importante, pois mostra a energia e o potencial destrutivo do movimento vibratório (Fernandes, 2000). O valor *rms*, a_w , em m/s^2 , de uma função $a_w(t)$ da aceleração, contido em um intervalo de tempo $0 \leq t \leq T$ é representado pela equação (2.2).

$$a_w = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [a_w(t)]^2 dt} \quad (2.2)$$

O método do Valor de Dose de Vibração (VDV), em $m/s^{1,75}$, é definido como na equação (2.3).

$$VDV = \sqrt[4]{\int_0^T [a_w(t)]^4 dt} \quad (2.3)$$

2.3 Normas para análise de vibração de corpo inteiro

Existem diversos métodos e diversas normas que tentam analisar a magnitude da vibração e seus efeitos no corpo humano, tanto em relação à saúde quanto ao conforto. O parâmetro padrão utilizado para avaliação é o valor *rms*. Com o objetivo de refletir os diferentes efeitos, dependendo de sua frequência, a que o ser humano está exposto, utiliza-se a vibração filtrada por curvas de ponderação.

A norma ISO 2631-1, 1997, é uma norma importante a ser considerada, pois a grande maioria das outras normas a tem como referência. Outro ponto importante a destacar é que ela resulta de grandes estudos, citando boas referências, como o Griffin, por exemplo.

A norma ISO 2631-1, 1997, tem como uma das propostas primárias definir métodos de quantificar a vibração de corpo inteiro em relação à saúde humana e ao conforto, tendo uma faixa de frequências considerada entre 0,5 Hz e 80 Hz. A norma também cita que a duração da medição deve ser suficiente para garantir que a vibração é típica da vibração exposta e que o instrumento de medição, para a posição sentada, deve estar alinhado com o sistema de coordenadas mostrado na Figura 2.3. Os equipamentos de medição devem ser colocados na interface entre o corpo humano e a fonte de vibração.

Como já mencionado, utiliza-se a vibração filtrada por curvas de ponderação. Elas dão um peso W_i para cada banda de frequência, de acordo com sua maior, ou menor, relevância. A Equação (2.4) é utilizada para o cálculo de aceleração ponderada, em m/s^2 . Nela, W_i é o fator de ponderação recomendado pela norma e a_i é a aceleração *rms* para as dadas frequências.

$$a_{wi} = \sqrt{\sum_i [W_i * a_i]^2} \quad (2.4)$$

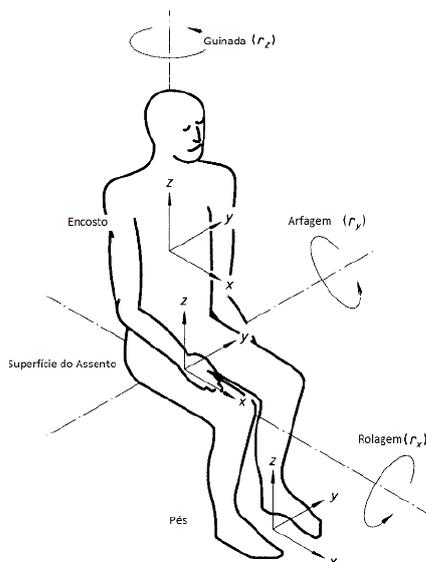


Figura 2.3: Eixos e orientações de medição para a posição sentada.
(Fonte: Adaptado de ISO 2631-1, 1997)

A fim de facilitar as comparações, é importante obter um valor único de aceleração. Mediante à definição dos fatores de correção, k_x , k_y e k_z , o valor da aceleração total ponderada, a_v , em m/s^2 , é definido pela equação (2.5).

$$a_v = \sqrt{k_x^2 * a_{wx}^2 + k_y^2 * a_{wy}^2 + k_z^2 * a_{wz}^2} \quad (2.5)$$

Os fatores de correção utilizados de acordo com a norma ISO 2631-1 encontram-se na Tabela 2.1. Caso a vibração consista em diferentes magnitudes com tempos de exposição diferentes, deve-se determinar a aceleração ponderada total equivalente, a_{we} , de acordo com a equação (2.6), sendo a_{vi} a vibração com um tempo de exposição T_i .

$$a_{we} = \sqrt{\frac{\sum (a_{vi})^2 * T_i}{\sum T_i}} \quad (2.6)$$

Tabela 2.1: Fatores multiplicativos de acordo com a ISO 2631-1.

Fator de correção	Saúde		Conforto	
	Piso	Assento	Piso	Assento
k_x	1,4	1,4	0,25	1
k_y	1,4	1,4	0,25	1
k_z	1	1	0,4	1

A norma ISO 2631-1, 1997, nos permite, a partir de medições do valor *rms* em um período de tempo qualquer, extrapolar os valores obtidos, a fim de obter a exposição a que um trabalhador é submetido em uma jornada de trabalho de 8 horas. Para isso, a equação (2.7) é utilizada, sendo T_0 a duração da jornada de 8 horas, T a jornada efetiva do trabalhador e a_{we} a aceleração ponderada total equivalente. $A(8)$ é entendida como a vibração total ponderada a que um determinado sujeito está exposto no período de 8 horas.

$$A(8) = a_{we} * \sqrt{\frac{T}{T_0}} \quad (2.7)$$

Existem dois tipos de avaliação para esse resultado. O Valor de Ação de Exposição (VAE) refere-se à exposição diária, que é um indicativo da necessidade de ações para diminuir o nível de vibração. O Valor Limite de Exposição (VLE) indica que há risco à saúde ocupacional, caso for ultrapassado, e os níveis de vibração podem ser considerados insalubres. A norma ISO 2631-1, 1997, utiliza duas equações para criar um gráfico com faixas aceitáveis de VAE e VLE para a aceleração ponderada de acordo com o tempo de exposição. As duas equações foram criadas com relação aos diversos estudos envolvendo a confecção da norma. As equações constam nos índices (2.8) e (2.9).

$$a_{w1}(T_1)^{\frac{1}{2}} = a_{w2}(T_2)^{\frac{1}{2}} \quad (2.8)$$

$$a_{w1}(T_1)^{\frac{1}{4}} = a_{w2}(T_2)^{\frac{1}{4}} \quad (2.9)$$

A partir desses dados, podemos comparar o valor obtido de $A(8)$ com a Tabela 2.2, que mostra os valores limites VAE e VLE para um tempo de exposição de 8 horas de acordo com diferentes normas. Assim, temos uma análise da vibração em relação à saúde.

Tabela 2.2: Valores limites de vibração, (m/s²), para 8 horas.

Limites	VAE	VLE
ISO 2631-1	0,43*	0,86*
Diretiva Europeia	0,50	1,15
NR-15	0,50	1,10
NHO-09	0,50	1,10

* Valores obtidos por interpolação do gráfico da ISO 2631-1, 1997.

Para realizar uma análise da vibração em relação ao conforto, o valor *rms* calculado será comparado com diferentes normas e estudos. As normas que possuem critérios para conforto são a ISO 2631 (1997), a ISO 6954 (2000) e a British Standard 6841 (1987). Para quantificar a sensação de conforto, Griffin, 1990, listou quatro trabalhos anteriores às normas ISO 2631-1 e ISO 6954, que realizaram estudos em laboratório e pesquisas de campo com diversos voluntários. Os trabalhos foram coordenados por Fotthergill (1972), Osborne e Clarke (1974), Jones e Clarck (1974) e Fotthergill e Griffin (1977). É bom salientar que existem pontos dentro de uma mesma norma cujos critérios para conforto se sobrepõe, ou seja, os limites referentes ao conforto ainda podem ser controversos, abrindo margem para questionamentos.

2.4 Transmissibilidade

Um método muito utilizado para mensurar o conforto de um assento é o valor *SEAT* (*Seat Effective Amplitude Transmissibility*), que é definido como sendo uma porcentagem proveniente da divisão do valor de vibração do assento pelo valor de vibração do piso, portanto esse valor pode ser avaliado para os três eixos coordenados. Um valor *SEAT* de 100% indica que não houve amplificação nem atenuação de vibrações no assento. Um valor superior a 100% indica amplificação, já um valor inferior indica atenuação. A equação (2.10) mostra a fórmula para cálculo do valor *SEAT*, onde $a_{w2,rms}$ representa a aceleração no assento e $a_{w1,rms}$ a aceleração no piso.

$$SEAT (\%) = \frac{a_{w2,rms}}{a_{w1,rms}} * 100 \quad (2.10)$$

2.5 Seat pad

Um *seat pad* é um equipamento que pode ser usado para captar as vibrações de uma superfície. São feitos de materiais flexíveis em formato de disco, cuja função é manter as propriedades dinâmicas da interface entre o usuário e a superfície o mais próximo possível da

realidade. O equipamento usado para medição consiste em um acelerômetro de 3 eixos fixado no interior do *seat pad*. A Figura 2.4 mostra um modelo em corte de um *seat pad* convencional.

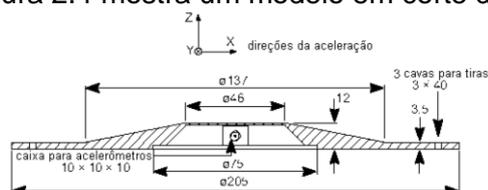


Figura 2.4: Desenho esquemático de um *seat pad* em corte. (Fonte: Griffin, 1990).

3 METODOLOGIA

Para efetuar a análise de saúde e de conforto quanto à vibração em uma embarcação, foram feitas medidas dos valores de aceleração *rms* para posterior comparação com as normas. Para ter dados capazes de produzir resultados que reflitam a realidade, foram realizadas as seguintes etapas:

- 1) Calibração do equipamento de medição;
- 2) Ida ao local das medições;
- 3) Definição dos pontos críticos da embarcação;
- 4) Medição do valor *rms* nesses pontos;
- 5) Análise completa dos dados utilizando *softwares*;
- 6) Comparação dos valores obtidos com valores definidos pelas normas.

3.1 Métodos utilizados e embarcação analisada

As medições foram feitas na região metropolitana de Porto Alegre, RS, ao se realizar o trajeto convencional na travessia entre as cidades de Porto Alegre e Guaíba. O trajeto é feito em embarcações do tipo catamarã, pela empresa prestadora do serviço, CATSUL. Durante o trajeto do barco, um transdutor *seat pad* duplo foi utilizado em nove diferentes pontos da embarcação, a fim de medir a aceleração *rms* com a embarcação na velocidade de cruzeiro. Assim, foi possível comparar níveis de conforto em diferentes zonas dentro do catamarã. De acordo com a orientação estabelecida pela norma ISO 2631-1, 1997, o *seat pad* foi posicionado na interface entre o usuário e o assento e entre os pés e o piso da embarcação, com os eixos ajustados conforme é mostrado na Figura 2.3. Além disso, também foi utilizado um *seat pad* comercial, que foi posicionado nos assentos dos pontos extremos da embarcação, fundo e frente, e coletou dados durante o trajeto inteiro, desde a saída do cais até o atracamento. Isso nos possibilita quantificar a vibração em diferentes estados de uso, como, por exemplo, nos trechos em que ocorre o atracamento e nos momentos em que a embarcação é manobrada.

A embarcação analisada na travessia foi o Catsul II, cujas especificações estão listadas na Tabela 3.1. A Figura 3.1 mostra uma foto da embarcação. Trata-se de um barco moderno e seguro, com navegação por GPS, que realiza a travessia entre Porto Alegre e Guaíba em até 30 minutos (CATSUL). As medições foram feitas na área de convivência de passageiros, mostrada na Figura A.3, no Apêndice.

Tabela 3.1: Especificações da embarcação CatSul II.

Tipo	Catamarã
Comprimento total	19,5 m
Largura	5,8 m
Calado	1,1 m
Tipo de propulsão	2 motores a <i>diesel</i>
Potência máxima	2 x 470 HP
Rotação correspondente	1875 rpm
Propulsor	2 hélices
Velocidade de serviço	26 nós (48 km/h)
Capacidade de passageiros	120 pessoas sentadas



Figura 3.1: CatSul II, embarcação analisada.

3.2 Trajeto e pontos medidos

A travessia convencional da embarcação entre Porto Alegre e Guaíba realiza apenas uma parada no meio do trajeto, no Barra Shopping Sul. Sendo assim, a linha da CATSUL realiza o percurso: Centro — Barra Shopping — Guaíba e Guaíba — Barra Shopping — Centro. A Figura A.2, no Anexo, ilustra essa trajetória.

Para realizar as medições, o *seat pad* comercial foi colocado em duas posições: na traseira e na frente, ambas na parte central do catamarã. Já o *seat pad* duplo foi colocado em nove posições distintas: na traseira, no meio e na frente, tanto na parte central, quanto nas laterais da embarcação. A Figura A.4, no Apêndice, ilustra melhor os pontos medidos. Os pontos não foram simétricos porque os assentos encontravam-se ocupados no momento da medição.

3.3 Equipamentos utilizados

O equipamento usado foi o *seat pad* comercial Quest VI-400 Pro, mostrado na Figura 3.2, com capacidade de armazenar os dados medidos de até quatro canais em sua memória interna (QUEST-TECHNOLOGY). Os dados captados pelo transdutor serão importados utilizando o *software QuestSuite Professional II* e analisados em conjunto com uma planilha do Microsoft Excel. As planilhas são a aplicação da norma ISO 2631-1, 1997, e foram elaboradas e utilizadas em trabalhos anteriores, como, por exemplo, em Picoral Filho, 2018.



Figura 3.2: Medidor e *seat pad* comercial Quest VI-400 Pro.

O equipamento foi calibrado em dezembro de 2017 e possui a incerteza expandida de medição (IM) correspondente a uma probabilidade de abrangência de 95% (fator de abrangência de 2), segundo consta no certificado de calibração, Figura A.1, presente no Anexo. No caso do *seat pad* duplo, os dados são adquiridos e transmitidos em tempo real para um notebook através de uma rotina desenvolvida no *software Matlab*. O *seat pad* foi confeccionado, calibrado e utilizado em trabalhos anteriores, como, por exemplo, em Stefanello, 2017.

4 RESULTADOS

4.1 Análise de vibração em nove pontos distintos da embarcação

As acelerações medidas com o catamarã navegando em linha reta e com velocidade de cruzeiro proporcionaram a determinação dos pontos mais críticos da embarcação. A Figura 4.1 indica os sinais medidos na parte frontal do centro do barco. Os sinais medidos na parte traseira do centro do barco se encontram na Figura A.5, no Apêndice.

O *seat pad 1* refere-se à medição no piso e o *seat pad 2* no assento. É possível observar que os valores de aceleração são mais intensos no piso do que no assento, o que sugere um valor *SEAT* atenuante em todas as direções. No piso, a vibração dominante ocorre na direção vertical (eixo z), comprovando que o catamarã, por possuir dois cascos, é mais estável, com relação à oscilação lateral, e que a vibração mais importante a ser observada seria oriunda do sistema de propulsão. Ao comparar os dois gráficos de aceleração no tempo, nota-se que a vibração mais atenuada pelo assento predomina na direção z, sugerindo um valor *SEAT* menor no eixo z. De acordo com as bandas de frequência, existe um pico de aceleração para uma frequência de 13,67 Hz, tanto no piso quanto no assento. Isso sugere que, na velocidade de cruzeiro, alguma parte do sistema de propulsão opera a aproximadamente 820 rpm.

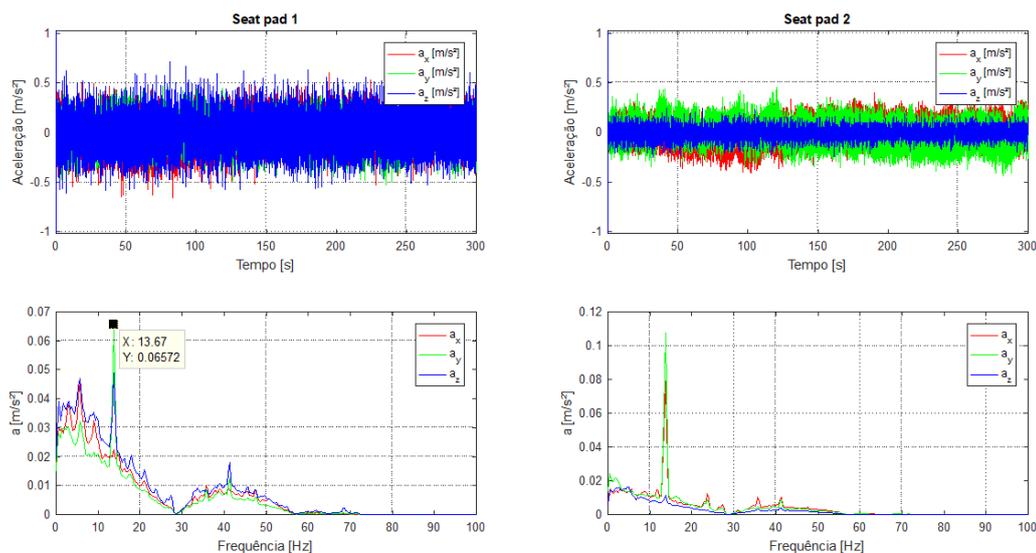


Figura 4.1: Sinais de aceleração medidos no piso e no assento da parte frontal da embarcação, com seus respectivos espectros de frequência.

Para comparar melhor os valores em diferentes pontos da embarcação, os valores de aceleração foram colocados na Tabela 4.1. A norma ISO 2631-1, 1997 diz que é possível utilizar, para fins de avaliação, o valor *rms* total ponderado ou o maior valor dos eixos. Mas, a vibração total ponderada é recomendada para avaliação de conforto. Além disso, serão utilizados os valores obtidos no piso, por retratarem melhor a vibração oriunda da fonte, visto que o assento pode atenuar os valores de forma diferente para cada posição. Por isso, a comparação foi feita com base no valor de aceleração *rms* total ponderada obtido no piso.

Tabela 4.1: Vibração ponderada no piso para diferentes lugares.

<i>Rms</i> total ponderada no piso	
Posição	<i>Rms</i> [m/s²]
Frente-Direita	0,1725
Frente-Centro	0,1852
Meio-Centro	0,2215
Frente-Esquerda	0,2364
Meio-Direita	0,2391
Traseira-Esquerda	0,2648
Meio-Esquerda	0,2989
Traseira-Centro	0,3024
Traseira-Direita	0,3271

Foi elaborada uma faixa de cores para melhor destaque: vibração mais leve: $rms < 0,20$, em azul; vibração moderada: $0,20 \leq rms \leq 0,25$, em amarelo e vibração mais forte: $rms > 0,25$, em vermelho. Em seguida, cada ponto foi adicionado na planta do catamarã, com sua faixa de cor correspondente. Assim, a Figura 4.2 pode ilustrar melhor os resultados obtidos.

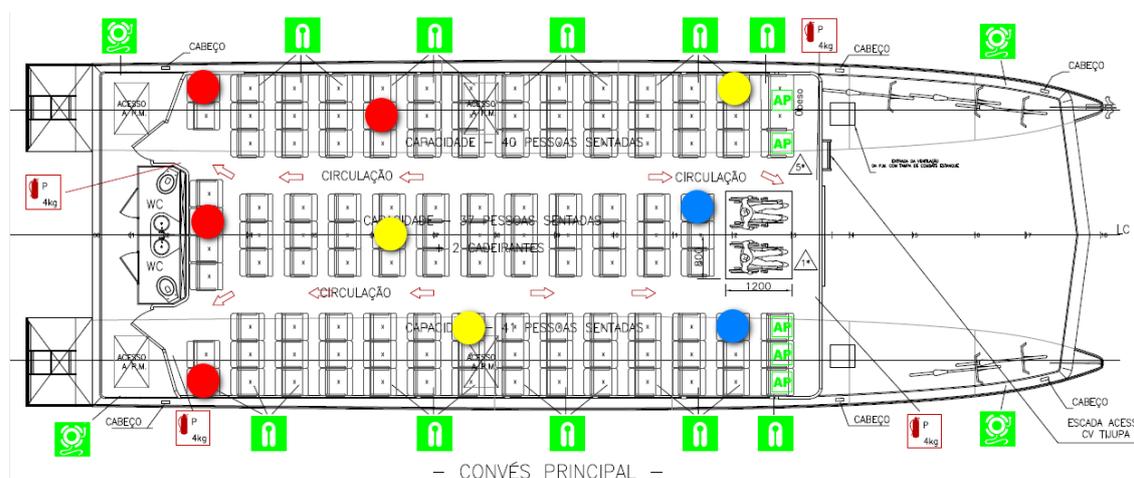


Figura 4.2: Faixas de vibração obtidas para cada ponto da embarcação.

Com isso, é possível observar que a parte traseira da embarcação tem vibrações muito mais acentuadas. Entretanto, é difícil confiar nos valores centrais, pois para pontos muito próximos, com valores parecidos, a confiabilidade de que os valores são, de fato, diferentes diminui.

Para garantir que o valor rms é, de fato, um bom valor para avaliar o problema, na Tabela 4.2 estão listados os fatores de crista para os pontos que serão avaliados: na parte traseira e frontal, ambas no centro da embarcação medidas no assento. Como todos os valores para o fator de crista ficaram abaixo de 9, o valor rms pode ser usado sem nenhum problema, pois seu valor será muito próximo ao VDV.

Tabela 4.2: Fatores de crista para as partes traseira e frontal da embarcação, medidos no assento.

TRASEIRA CENTRO			
	x	y	z
Lpk (m/s ²)	0,5344	0,2503	0,2892
aw rms (m/s ²)	0,1340	0,0668	0,0971
Fator de crista	3,99	3,75	2,98
FRENTE CENTRO			
	x	y	z
Lpk (m/s ²)	0,1604	0,2541	0,2530
aw rms (m/s ²)	0,0415	0,0567	0,0561
Fator de crista	3,86	4,49	4,51

4.2 Análise do valor SEAT médio dos assentos da embarcação

Por se tratar do mesmo assento em todas as posições, o valor SEAT deveria ser igual para todas elas. Entretanto, não foi o que se observou, os valores SEAT variaram bastante. Isso pode sugerir uma má qualidade dos assentos, pois ficou evidente que eles não se comportam de forma linear. Os valores SEAT para todos os pontos medidos se encontram na Tabela A.1, no Apêndice.

Para avaliar a atenuação nos assentos, foi calculado um valor SEAT médio, nos eixos x, y e z. Esses valores são mostrados na Figura 4.3.

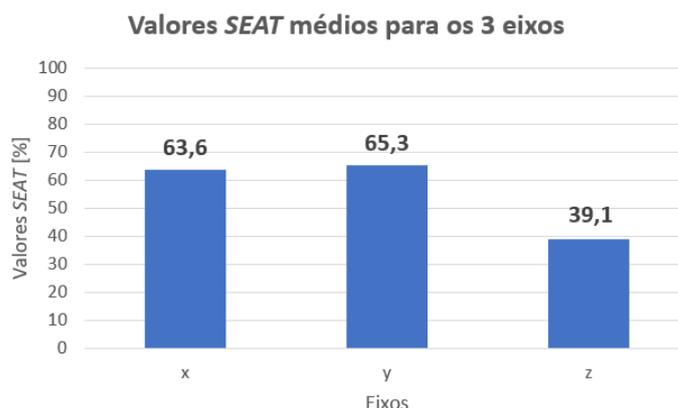


Figura 4.3: Valores SEAT médios para os eixos x, y e z.

No eixo x, por exemplo, o número 63,6% indica a vibração no assento em relação à vibração no piso, ou seja, o assento atenuou 36,4% de vibração. Esses valores indicam que o assento atenuou as vibrações em todas as direções, sendo que na direção vertical (no eixo z) a diferença foi a maior de todas, com valor médio de 60,9% de atenuação.

4.3 Análise de vibração durante todo o trajeto Porto Alegre — Guaíba

A aceleração ponderada foi calculada, com o auxílio da planilha do Excel, de acordo com os valores *rms* medidos e com os fatores K estabelecidos pela norma ISO 2631-1, 1997. Para a parte frontal, o valor calculado foi de 0,12 m/s², já para a parte traseira o valor foi de 0,16 m/s². Com isso, foi comprovado que o catamarã vibra mais na parte traseira, próxima à localização dos motores. Logo, para analisar o trajeto completo, será utilizado o valor *rms* da zona mais crítica da embarcação: a parte traseira. O gráfico com os valores de aceleração pelo tempo da parte frontal encontra-se na Figura A.6, no Apêndice. A Figura 4.4 apresenta o gráfico da aceleração *rms* na parte traseira da embarcação, medida no assento.

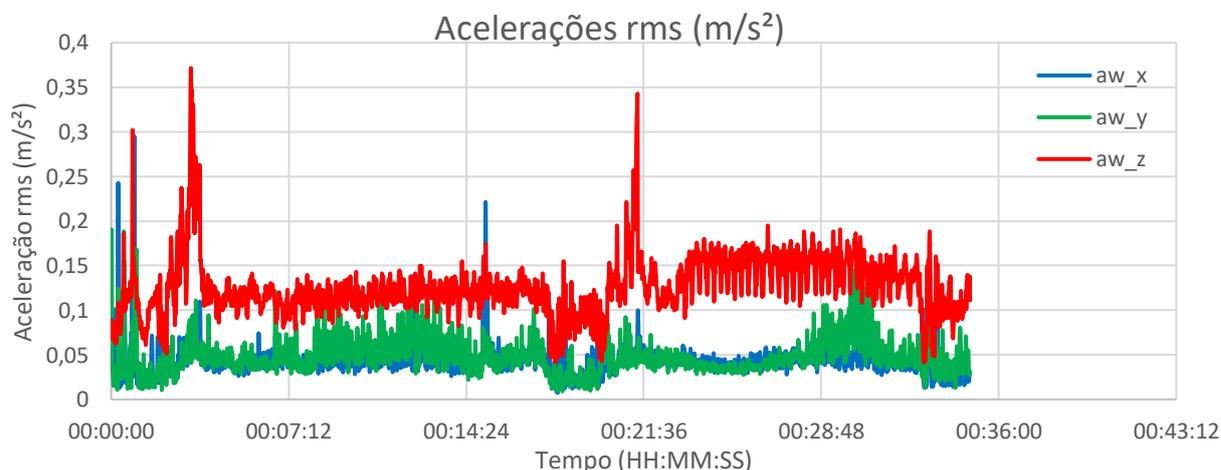


Figura 4.4: Valor de aceleração *rms* na parte traseira da embarcação, medido no assento.

Esses valores foram obtidos no trajeto entre Porto Alegre e Guaíba, com parada no meio do caminho no Barra Shopping. Pode-se observar grande variação na vibração em certos trechos. No início da medição e aos 21 minutos, nota-se uma vibração muito maior do que no restante do tempo. Isso pode ser explicado pelo fato de que a embarcação está parada no cais do centro e no cais do Barra Shopping, respectivamente. Nesses trechos, a rotação do motor é menor, transmitindo baixas frequências. Então, o fato de que baixas frequências induzem vibrações maiores indica a presença de alguma ressonância da estrutura da embarcação com o

motor. Esse fato deixa de ocorrer quando o catamarã é acelerado, pois a rotação do motor aumenta, causando uma diminuição no nível de vibração.

Durante os trechos em que a embarcação se encontra em velocidade de cruzeiro, as vibrações se mantêm coerentes, com exceção da aceleração no eixo x aos 15 minutos, que, provavelmente, trata-se de um erro de medição. Outro fato interessante de se analisar é o aumento da vibração lateral (no eixo y) aos 28 minutos. Isso ocorre porque a embarcação está fazendo curvas para ajustar o trajeto até o cais de Guaíba. Para concluir, no fim do percurso os picos de aceleração vertical desaparecem, mesmo com o atracamento da embarcação. Isso ocorreu porque, no momento da chegada a Guaíba, o piloto desligou o motor do catamarã, tornando a embarcação exposta somente a vibrações da água do lago, sem as ressonâncias impostas por baixas rotações do motor.

4.4 Avaliação sobre a saúde e o conforto de passageiros no ponto crítico da embarcação

A avaliação da saúde e do conforto do catamarã será realizada no ponto crítico da embarcação. Com os valores de aceleração retirados da medição feita durante todo o trajeto na parte traseira da embarcação, a aceleração ponderada, como já visto, foi de 0,16 m/s². Esse valor será a base para as análises. A Figura 4.5, mostra um gráfico com os valores limites para vibração referentes à saúde de acordo com o tempo de exposição.

Nota-se que o valor extrapolado para um período de 8 horas passa nos requisitos de todas as normas estudadas: ISO 2631-1, Diretiva Europeia, NHO-09 e NR-15. Ou seja, numa situação de exposição de 8h (por exemplo, do capitão que pilota a embarcação), esta não seria insalubre.

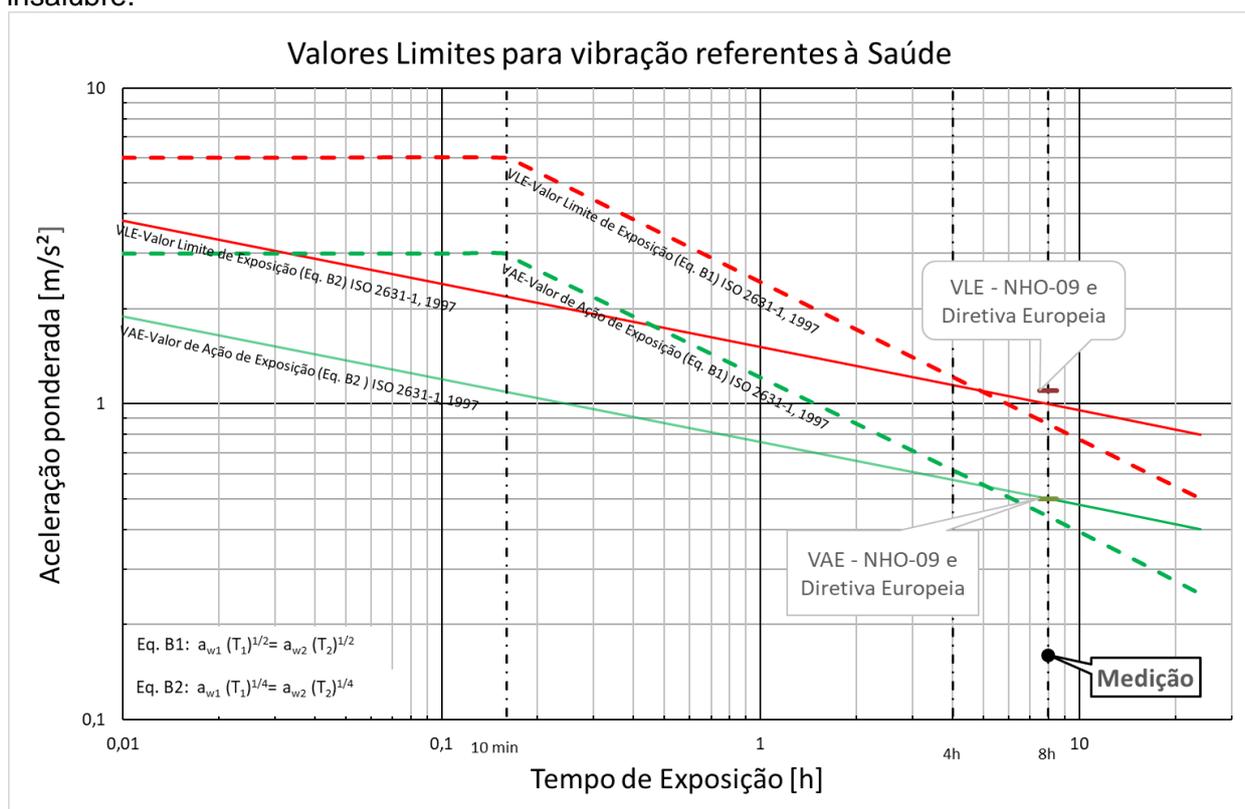


Figura 4.5: Valores limites para vibração referentes à saúde no ponto crítico analisado.

Para a classificação quanto ao conforto, foram utilizadas as Figuras 4.6 e 4.7, que ilustram a faixa completa de limites de conforto para cada estudo diferente. Com isso, fica evidente dizer que o catamarã é confortável, visto que a parte crítica da embarcação atingiu níveis considerados confortáveis para todas as normas e pesquisas da área.

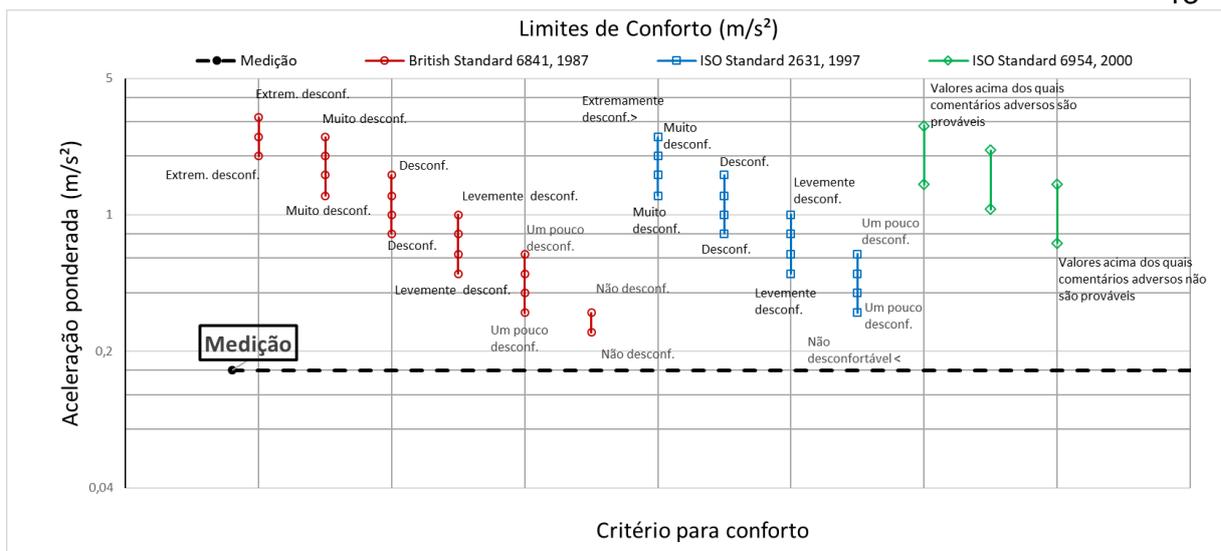


Figura 4.6: Limites de conforto de acordo com as normas BS 6841, ISO 2631 e ISO 6954.

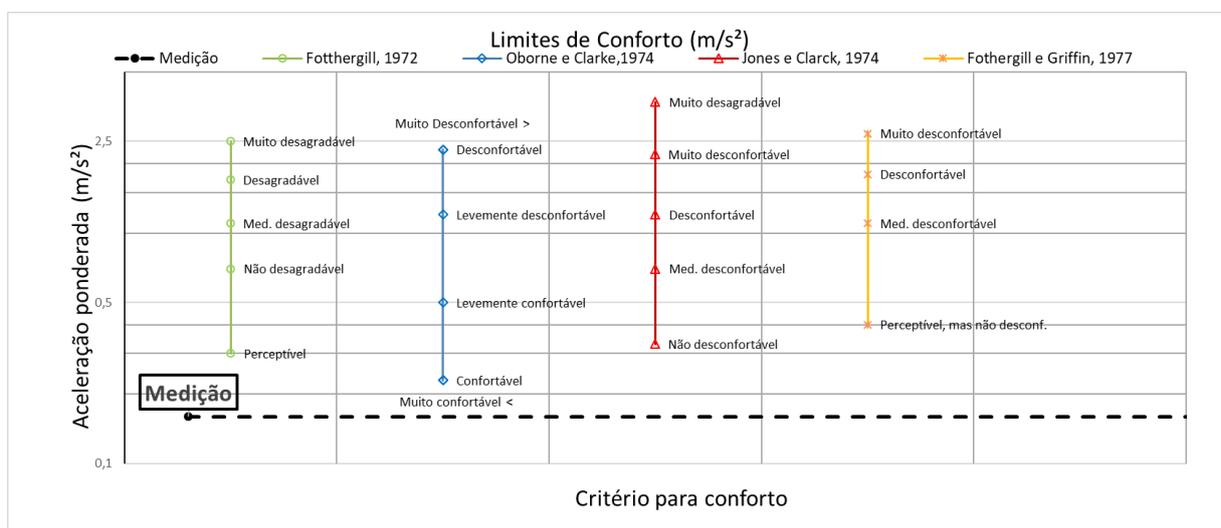


Figura 4.7: Limites de conforto de acordo com estudos mencionados em Griffin, 1990.

4.5 Análise de variância ANOVA

Para comprovar estatisticamente que os valores de vibração medidos na parte dianteira e na parte traseira são, de fato, diferentes, foi decidido fazer uma análise de variância para verificar estes valores. Essa análise, basicamente, visa verificar se existe uma diferença significativa entre as médias do grupo de valores de vibração nas duas posições. A análise foi feita através da ferramenta de análise estatística ANOVA do Excel, comparando valores de aceleração *rms* obtidos na parte dianteira e na parte traseira do catamarã, para cada um dos eixos x, y e z. A Tabela 4.3 indica os resultados obtidos da comparação entre valores do eixo z, para uma confiança de 95%.

Os resultados mostram um valor-P menor do que 0,05, isso significa que a hipótese de que existe diferença significativa entre os valores medidos de aceleração entre um ponto e outro da embarcação é verdadeira. Ou seja, pode-se garantir com 95% de confiança que a parte traseira do catamarã vibra mais do que a parte dianteira. Os resultados da análise ANOVA para os eixos x e y chegam à mesma conclusão e estão listados nas Tabelas A.2 e A.3, respectivamente, no Apêndice.

Tabela 4.3: Análise de variância ANOVA para o eixo z.

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Coluna 1	2061	259,58	0,126	0,001149
Coluna 2	2061	189,07	0,092	0,001300

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	1,21	1	1,2063	989	9E-195	3,84
Dentro dos grupos	5,02	4120	0,0012			
Total	6,23	4121				

5 CONCLUSÕES

É possível concluir com 95% de confiança que, para a embarcação Catsul II, a vibração é mais intensa na parte traseira, em comparação com sua parte frontal. Além disso, a vibração dominante no piso ocorre na direção vertical (eixo z), com pouca vibração lateral, isso demonstra a boa estabilidade esperada de uma embarcação com dois cascos. De acordo com os altos valores de aceleração obtidos durante o atracamento, é possível que existam frequências naturais na estrutura da embarcação que entram em ressonância com o motor em baixa rotação.

Os assentos se mostraram confortáveis, visto que atenuam a vibração do piso em todas as direções, principalmente na direção vertical (eixo z). Porém, devido a diferença considerável entre os valores *SEAT*, os assentos não se comportam de maneira linear.

Para avaliação do risco à saúde, o cálculo do valor *rms* para uma extrapolação de 8 horas de exposição deixa evidente que a embarcação não traz nenhum risco à saúde. Finalmente, o catamarã se mostrou confortável de forma geral, visto que na zona crítica da embarcação (parte traseira), o valor de aceleração medido se mostrou confortável de acordo com o que é proposto pelas normas e pesquisas de referência.

Para futuros trabalhos, seria interessante avaliar outras formas de conforto, como o conforto quanto ao ruído, e comparar todos esses valores com dados de pesquisas de outros autores, referentes a outros meios de transporte, a fim de realizar uma comparação global do conforto para diferentes meios de transporte, avaliando também o risco quanto à saúde.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Allama, J. A. M., “**A Terceira Onda da Hidrovia Brasileira**”, 7° Seminário de Transporte e Desenvolvimento Hidroviário Interior, Porto Alegre, 2011.

Antaq, “**Anuário Estatístico Aquaviário**”, 2017.

BS 6841, “**Guide to measurement and evaluation of human exposure to whole-body mechanical vibration and repeated shock**”, 1987.

CATSUL. CatSul Guaíba Transportes Hidroviários Ltda. “**Embarcações**”, Disponível em: <<https://www.travessiaipoaguaiba.com.br/site/default.asp?TroncoID=707064&SecaoID=493219&SubsecaoID=0>>. Acessado em: 29/09/2018.

Chaffin, D. B, Anderson, G. B. J., Martin, B. J., “**Occupational biomechanics.**”, Wiley-Interscience, U.S.A, 1999.

De Moliner, L., “**Estudo do comportamento vibratório de uma embarcação em escala reduzida.**”, Monografia (Graduação em Engenharia Naval) – Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2014.

Directive 2002/44/EC, “**On the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents**”, The European Parliament

and the Council of the European Union, Official Journal of the European Communities, L177/13-19, 2002.

Dottori, M., "**Monocascos x Catamarãs**", Revista Náutica, 2014. Disponível em: <<https://www.nautica.com.br/monocascos-x-catamaras>>. Acessado em: 29/09/2018.

EPTC, "**Transporte**", Porto Alegre. Disponível em: <http://www2.portoalegre.rs.gov.br/eptc/default.php?p_secao=229>. Acessado em: 08/11/2018.

Fernandes, J. C., "**Segurança nas vibrações sobre o corpo humano.**", 2000.

Griffin, M. J., "**Measurement and evaluation of whole-body vibration at work**", International Journal of Industrial Ergonomics, vol. 6, no. 1, pp. 45-54, 1990.

Griffin, M. J., "**Handbook of Human Vibration**", Academic Press, London, 1990.

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 6954, "**Mechanical vibration - Guidelines for the measurement, reporting and evaluation of vibration with regard to habitability on passenger and merchant ships**", International Organization for Standardization, 2000.

Lopes, J. L., "**Análise de Vibração Ocupacional de Corpo Inteiro em Máquinas Colhedoras de Cana-de-Açúcar**", Artigo técnico – Revista ABHO, 2012.

Madhuri, "**Marine Propulsion Engine Market Analysis**", Global Marine Propulsion Engine Market Research Report, U.S.A., 2017.

Ministério do Meio Ambiente, "**Caderno Setorial de Recursos Hídricos**", Brasília, 2006. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/161/_publicacao/161_publicacao_23022011031906.pdf>. Acessado em 06/11/2018.

Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil, "**Transporte Aquaviário**", Brasília, 2014. Disponível em: <<http://www.transportes.gov.br/editoria-d.html>>. Acessado em: 06/11/2018.

NHO-09, "**Normas de Higiene Ocupacional. Procedimento Técnico - Avaliação da Exposição Ocupacional a Vibração de Corpo Inteiro.**" Fundacentro. 64p, 2013.

NR-15, "**Norma Regulamentadora No.15. Atividades e operações insalubres - Anexo Nº8 Vibrações**", 2014.

Oliveira, L. A. P., "**Reflexões sobre os deslocamentos populacionais no Brasil**", IBGE, Rio de Janeiro, 2011.

Picoral filho, J. G., "**Análise do conforto quanto à vibração atuante em caminhões de carga**", Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

Quest-Technology. "**Real-time vibration Analyzer**", VI-400PRO, Owner's manual. 2005.

Rao, S. S., "**Mechanical Vibrations**", 5th Ed. Prentice Hall, 2011.

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, Curitiba, 2017.

VEPPO. Veppo & Cia Ltda. "**Horários de ônibus**", Disponível em: <http://www.rodoviaria-poa.com.br/institucional/site/df_serv.htm>. Acessado em: 29/09/2018.

Certificado de Calibração nº 16110

Solicitante do Serviço

Nome: **Universidade Federal do Rio Grande do Sul**
Departamento de Engenharia Mecânica
 Endereço: **Rua Sarmiento Leite, 425 - 2º andar - Porto Alegre - RS**

Identificação da Unidade sob Teste

Tipo: **Medidor de vibração**
 Marca: **Quest Technologies**
 Modelo: **VI-400 Pro**
 Nº de série: **12430**
 Nº do transdutor: **Dytran 3023A2 Série 4147**
Dytran 3143M1 Série 2531
 Código de identific.: **12430**
 Protocolo: **291-17**



Unidade sob teste

Condições Ambientais

Temperatura: **23 °C ± 3 °C**
 Umidade: **55 % ± 10%**

Informações administrativas

Data recebimento: **30/10/2017**
 Data da calibração: **02/12/2017**
 Data da emissão: **05/12/2017**

Notas:

- Este Certificado de calibração atende aos requisitos da NBR - ISO/IEC 17025 - 2005 e é válido apenas para a unidade sob teste acima caracterizada, não sendo extensivo a quaisquer outros instrumentos de medição ou lotes, ainda que similares.
- Todos os padrões utilizados nesta calibração são rastreados aos padrões metrológicos primários nacionais ou internacionais.
- Este certificado somente pode ser reproduzido em sua forma integral, reproduções parciais devem ser previamente autorizadas pelo Walm Lab.
- A incerteza expandida de medição (IM) é declarada como a incerteza padrão combinada, multiplicada pelo fator de abrangência $k=2$, o qual corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.
A incerteza expandida da medição foi determinada de acordo com a terceira edição Brasileira do "Guia para Expressão da Incerteza de Medição" (ISO GUM).
- As medições são realizadas três vezes consecutivas e a média das três é o resultado final.



Walter Guimarães Junior
 Gerente Técnico

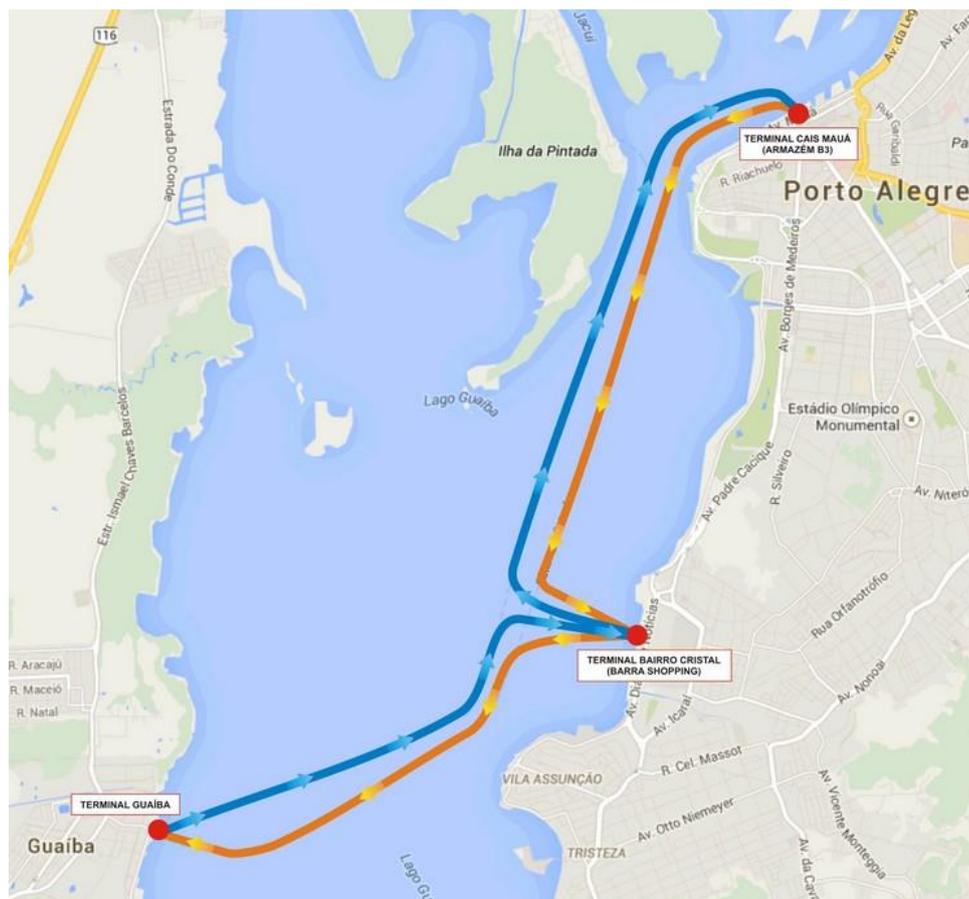


Figura A.2: Linha padrão de operação da CatSul. (Fonte: EPTC).

APÊNDICE



Figura A.3: Área de convivência de passageiros do Catsul II.

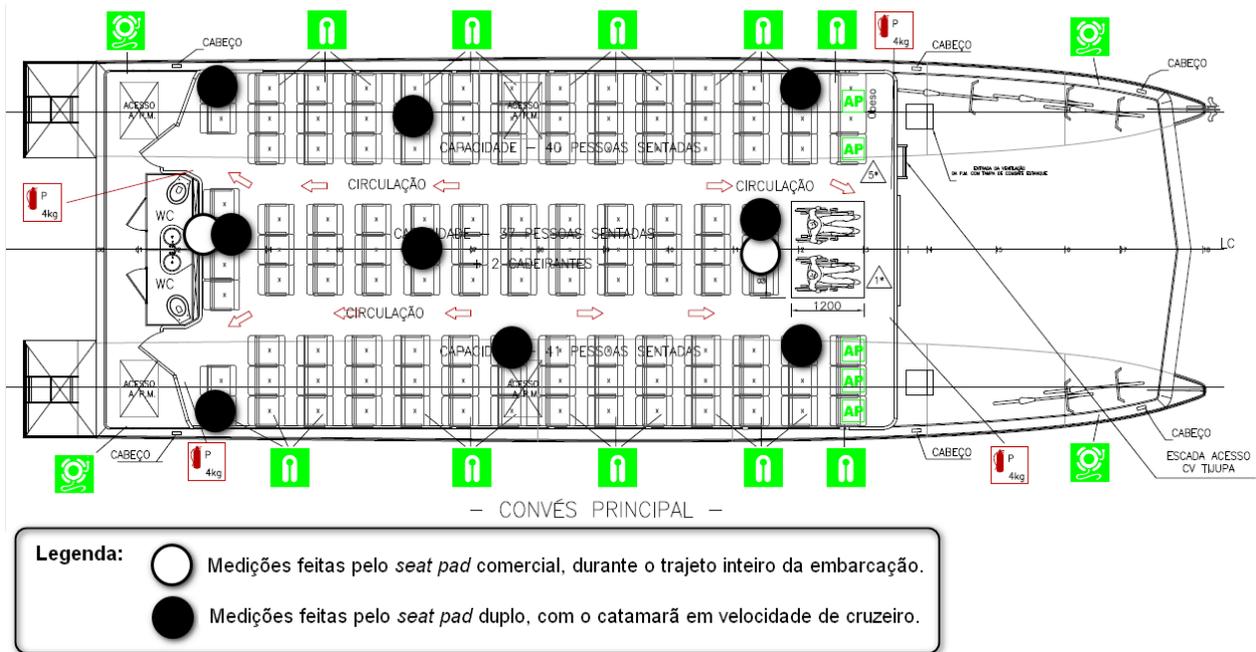


Figura A.4: Pontos medidos no interior da embarcação.

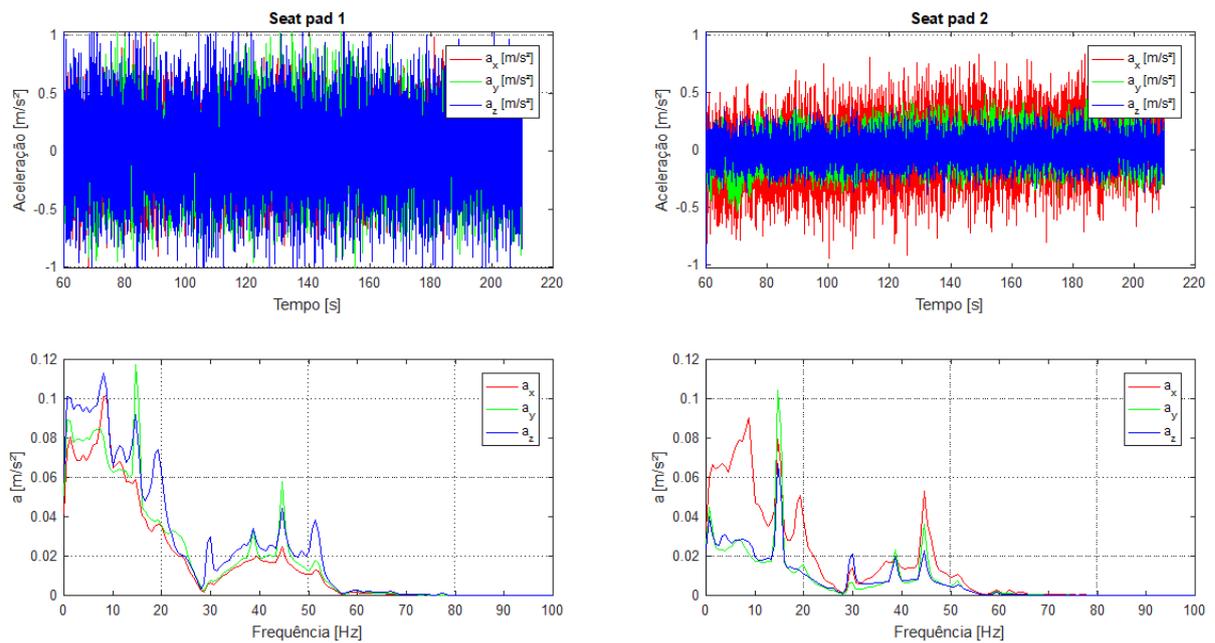


Figura A.5: Sinais de aceleração medidos no piso e no assento da parte traseira da embarcação, com seus respectivos espectros de frequência.

Tabela A.1: Valores SEAT para todos os pontos medidos.

POSIÇÃO	EIXO	VALOR SEAT (%)
Frente-Centro	X	75,67
	Y	97,70
	Z	39,52
Frente-Direita	X	52,06
	Y	61,99
	Z	55,49
Frente-Esquerda	X	67,42
	Y	89,23
	Z	58,64
Meio-Centro	X	56,27
	Y	56,67
	Z	51,79
Meio-Direita	X	61,20
	Y	68,29
	Z	31,92
Meio-Esquerda	X	90,94
	Y	58,97
	Z	39,78
Traseira-Centro	X	93,65
	Y	48,25
	Z	36,30
Traseira-Direita	X	29,22
	Y	72,74
	Z	22,84
Traseira-Esquerda	X	45,57
	Y	33,97
	Z	15,24
MÉDIA	X	63,56
	Y	65,31
	Z	39,06
MÁXIMO	X	93,65
	Y	97,70
	Z	58,64
MÍNIMO	X	29,22
	Y	33,97
	Z	15,24

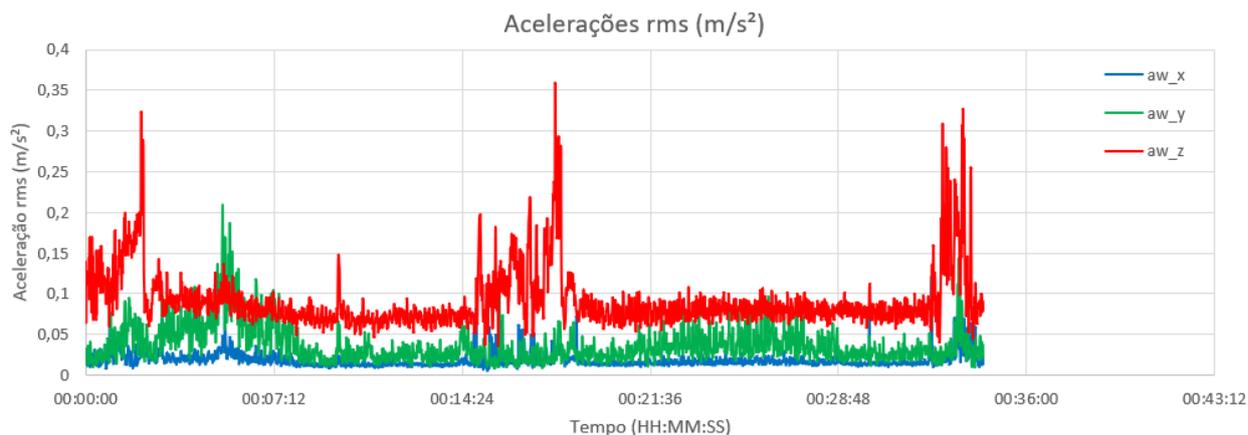


Figura A.6: Valor de aceleração *rms* na parte frontal da embarcação, medido no assento.

Tabela A.2: Análise de variância ANOVA para o eixo x.

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Coluna 1	2061	87,59	0,042	0,000268
Coluna 2	2061	39,34	0,019	0,000084

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,56	1	0,5648	3207	0	3,84
Dentro dos grupos	0,72	4120	0,0002			
Total	1,29	4121				

Tabela A.3: Análise de variância ANOVA para o eixo y.

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Coluna 1	2061	99,32	0,048	0,000424
Coluna 2	2061	76,37	0,037	0,000495

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,13	1	0,1277	276	1,9E-60	3,84
Dentro dos grupos	1,89	4120	0,0004			
Total	2,02	4121				