

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA MECÂNICA**

Ricardo Luís Schaefer

**ESTUDO DA RESPOSTA SUBJETIVA A VIBRAÇÕES  
EM AERONAVES**

Florianópolis

2011



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA MECÂNICA**

Ricardo Luís Schaefer

**ESTUDO DA RESPOSTA SUBJETIVA A VIBRAÇÕES  
EM AERONAVES**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Ph.D. Samir Nagi Yousri Gerges

Florianópolis

2011

Catálogo na fonte pela Biblioteca Universitária  
da  
Universidade Federal de Santa Catarina

S294e Schaefer, Ricardo Luís  
Estudo da resposta subjetiva a vibrações em aeronaves  
[dissertação] / Ricardo Luís Schaefer ; orientador,  
Samir Nagi Yousri Gerges. - Florianópolis, SC, 2011.  
94 p.: il., grafs., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Engenharia mecânica. 2. Aeronaves - Vibração. 3.  
Aeronaves - Percepção. 4. Aeronaves - Ruído. I. Gerges,  
Samir Nagi Yousri. II. Universidade Federal de Santa  
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Mecânica. III. Título.

CDU 621

Ricardo Luís Schaefer

## **ESTUDO DA RESPOSTA SUBJETIVA A VIBRAÇÕES EM AERONAVES**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, .

---

Júlio César Passos, Dr. Eng.  
Coordenador do Curso

### **Banca Examinadora:**

---

Samir Nagi Yousri Gerges, Ph.D.  
Orientador

---

Júlio Apolinário Cordioli, Dr.Eng.

---

Roberto Jordan, Dr.Eng.

---

Erasmus Felipe Vergara Miranda, Dr.Eng.



“Um nobre exemplo torna fáceis as  
ações difíceis.”

Goethe





*Aos meus pais.  
A minha irmã.*



## AGRADECIMENTOS

Ao meu pai Irineu, minha mãe Nilva e minha irmã Edinara pelo apoio incondicional, carinho e amor. A toda a família pelo incentivo.

Ao Professor Samir Gerges, orientador deste trabalho, pela sua ajuda e contribuição.

Aos colegas de projeto Raquel e Alexandre pela amizade e companheirismo desde início deste trabalho. Aos outros colegas que passaram pelo projeto Cristián, Lian, Caio, Mateus, Alba, Dieny, Bia, Peter. Aos colegas do LVA que contribuíram de alguma forma com este trabalho: Jesus, Francine, Will, Danilo, Marcos, Daniel, Márcio, Leandro, André.

Aos professores do LVA, em especial ao Professor Jordan, que teve participação direta no desenvolvimento da dissertação.

Aos amigos Eduardo, Maksoel, Eduardo, Diogo, Everton, Paulo, Giovanni, Álisson, Bruno. A todos amigos e amigas que dividi momentos no tempo em que passei me dedicando a este trabalho.

À Capes pelo apoio financeiro.

Ao CNPQ pelo apoio financeiro.

À EMBRAER pela oportunidade e incentivo, em especial ao Engenheiro Sideto, pelo apoio técnico.

Aos colegas de projeto da USP, UFSCar e UNICAMP.

À DEUS.



## RESUMO

Com a crescente demanda pelo transporte aéreo, os fabricantes de aeronaves buscam melhorar o conforto interno destas. A vibração em conjunto com o ruído são alguns dos fatores que mais influenciam a percepção do conforto pelos passageiros de aviões. Desse modo, o objetivo deste estudo foi relacionar como as pessoas percebem a vibração com os parâmetros físicos dos estímulos. Para isso, foram realizados ensaios subjetivos para a pesquisa da diferença de limiar de vibração, do limiar absoluto de vibração e da percepção do conforto por meio da reprodução de quatro estímulos vibracionais gravados em voos reais e reproduzidos em um simulador (mock-up) no Laboratório de Vibrações e Acústica da UFSC. Com a análise dos resultados desses ensaios, foi possível compreender como as pessoas percebem as vibrações e relacionar alguns parâmetros físicos dos estímulos, tais como amplitudes de vibração por bandas de frequência, com as respostas da percepção de conforto dos jurados, com o auxílio de métodos estatísticos, como análise de regressão e redes neurais artificiais.

**Palavras-chave:** Vibração, Percepção e Subjetividade.



## ABSTRACT

With the increasing demand for air transport, aircraft manufacturers seek to improve their internal comfort. The vibration jointly with noise are among the factors that most influence the perception of the comfort for air travelers. Thus the objective of this study was to compare how people perceive the vibration with the physical parameters of the stimuli. For this, studies have been conducted to survey the subjective difference in vibration threshold, the absolute threshold of vibration and the perception of comfort by playing four vibrational stimuli recorded and played back in real flight in a simulator (mock-up) in Acoustics and Vibration Laboratory at UFSC. By analyzing the results of these tests, it was possible to understand how people perceive the vibrations and relate some physical parameters of stimuli, such as vibration amplitude in frequency bands, with the responses of the jury above perception of comfort, with the assistance of statistics methods such as regression analysis and artificial neural networks.

**Keywords:** Vibration, Perception e Subjective.





## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUCAO</b> .....	1
1.1 OBJETIVOS .....	3
1.1.1 Objetivo Geral .....	3
1.1.2 Objetivos Específicos .....	3
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	5
2.1 LIMIAR DE PERCEPÇÃO E DIFERENÇA DE LIMIAR .	5
2.2 CONFORTO (PARÂMETROS DA VIBRAÇÃO QUE INFLUENCIAM O CONFORTO) .....	8
2.2.1 Magnitude de vibração .....	9
2.2.2 Frequência de vibração .....	10
2.2.3 Tempo de exposição à vibração .....	11
2.3 VIBRAÇÕES COMPLEXAS .....	11
2.3.1 Parâmetros subjetivos .....	13
2.3.2 Parâmetros Intra-sujeitos .....	14
2.3.3 Parâmetros Inter-sujeitos .....	14
2.3.4 Poltrona e postura dos jurados .....	17
2.4 FERRAMENTAS DE ANÁLISE ESTATÍSTICA .....	18
2.4.1 Análise de regressão .....	19
2.4.2 Redes neurais .....	20
<b>3 SIMULADOR DE VIBRAÇÕES</b> .....	23
<b>4 INFLUÊNCIA DO RUÍDO NA PERCEPÇÃO DE VIBRAÇÃO</b> .....	33
4.1 INTRODUÇÃO .....	33
4.2 METODOLOGIA .....	33
4.2.1 Voluntários .....	33
4.2.2 Equipamentos e estímulos .....	34
4.2.3 Procedimento .....	35
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	36
4.3.1 Variação do limiar de percepção de vibração durante o ensaio .....	36
4.3.2 Influência do som nos limiares de percepção de vibração .....	37
4.4 CONCLUSÕES .....	38
<b>5 DIFERENÇA DE LIMIAR</b> .....	41
5.1 METODOLOGIA .....	41
5.2 RESULTADOS .....	44
5.2.1 Caracterização da amostra .....	44

5.2.1.1	Primeira e segunda etapa .....	44
5.2.1.2	Terceira etapa .....	44
<b>5.2.2</b>	<b>Resultados primeira etapa .....</b>	<b>45</b>
<b>5.2.3</b>	<b>Resultados segunda etapa .....</b>	<b>46</b>
<b>5.2.4</b>	<b>Resultados da terceira etapa .....</b>	<b>47</b>
5.3	CONCLUSÃO .....	49
<b>6</b>	<b>LIMIAR DE PERCEPÇÃO .....</b>	<b>51</b>
6.1	METODOLOGIA .....	51
6.2	RESULTADOS .....	54
<b>6.2.1</b>	<b>Caracterização da amostra .....</b>	<b>54</b>
<b>6.2.2</b>	<b>Resultados do ensaio .....</b>	<b>54</b>
6.3	ANÁLISE SUGERIDA PELA ISO 2631/1997 .....	56
<b>6.3.1</b>	<b>Metodologia .....</b>	<b>57</b>
6.3.1.1	Metodologia descrita pela norma .....	57
6.3.1.2	Metodologia utilizada no ensaio .....	58
<b>6.3.2</b>	<b>Resultados .....</b>	<b>60</b>
6.4	CONCLUSÕES .....	61
<b>7</b>	<b>CONFORTO .....</b>	<b>63</b>
7.1	METODOLOGIA .....	63
<b>7.1.1</b>	<b>Escolha dos Adjetivos .....</b>	<b>67</b>
7.2	RESULTADOS .....	67
<b>7.2.1</b>	<b>Diferencial Semântico .....</b>	<b>67</b>
<b>7.2.2</b>	<b>Redes Neurais .....</b>	<b>72</b>
<b>7.2.3</b>	<b>Análise de Regressão .....</b>	<b>74</b>
7.3	CONCLUSÃO .....	80
<b>8</b>	<b>CONCLUSÕES FINAIS .....</b>	<b>83</b>
<b>9</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS ...</b>	<b>85</b>

## LISTA DE FIGURAS

1	Gráfico de dispersão dos limiares de percepção de vibração dos pés de 377 indivíduos normais (INAMI; CHIBA; TOYAMA, 2005).....	6
2	Níveis de voo medidos nas três direções do sinal A (parte central da aeronave).....	24
3	Níveis de voo medidos nas três direções do sinal B (parte central da aeronave).....	24
4	Níveis de voo medidos nas três direções do sinal C (parte traseira da aeronave). ....	25
5	Níveis de voo medidos nas três direções do sinal D (parte frontal da aeronave). ....	25
6	Localização das poltronas da aeronave onde foram realizadas as medições de vibração. ....	26
7	Poltrona dupla utilizada no simulador. ....	26
8	Poltrona simples utilizada no simulador.....	27
9	<i>Buttkicker Concert</i> . ....	28
10	Disposição dos excitadores de vibração instalados. ....	29
11	Amplificador de potência BKA-1000.....	29
12	Amplificador de potência MK-3.0. ....	29
13	Reposta do piso no eixo $z$ para excitação na mesma direção em diferentes níveis, com a configuração da poltrona simples (TEIXEIRA, 2010). ....	30
14	Conversor digital/analógico utilizado no simulador. ....	31
15	Exemplo de controle de vibração. ....	32
16	Simulador de aeronaves ( <i>mock-up</i> ) da UFSC. ....	34
17	Localização das gravações dentro da aeronave. ....	34
18	Configuração do experimento. ....	35
19	Limiar de percepção de vibração dos 10 voluntários apresentados primeiro e por último. ....	36
20	Média dos limiares de percepção de vibração dos voluntários para a primeira avaliação e a última avaliação. .	37
21	Limiares de percepção de vibração de todos os voluntários para avaliação com e sem ruído.....	38
22	Médias dos valores de limiar de percepção de vibração com e sem ruído para o sinal gravado na parte traseira da aeronave. ....	38

23	Médias dos valores de limiar de percepção de vibração com e sem ruído para o sinal gravado na parte central da aeronave. . . . .	39
24	Médias dos valores de limiar de percepção de vibração com e sem ruído para o sinal gravado na parte frontal da aeronave. . . . .	39
25	Simulador de aeronaves da UFSC. . . . .	42
26	Tela do software do ensaio de diferença de limiar. . . . .	43
27	Distribuição do número de viagens nos últimos 12 meses dos participantes do ensaio de diferença de limiar (primeira e segunda etapas). . . . .	45
28	Distribuição do número de viagens dos participantes nos ensaios da terceira etapa. . . . .	46
29	Tela do software do ensaio de limiar de percepção. . . . .	52
30	Distribuição do número de viagens nos últimos 12 meses dos participantes do ensaio de limiar de percepção. . . . .	54
31	Resultado ensaio de limiar de percepção para cada posição da poltrona (diferença em dB). . . . .	55
32	Definição da direção dos eixos ortogonais (2631-1, 1997). . . . .	57
33	Radiação sonora do piso vibrante. . . . .	64
34	Exemplo de tela apresentada para o jurado no ensaio de Diferencial Semântico. . . . .	65
35	Exemplo de tela apresentada para o jurado no ensaio de Escala de Resposta. . . . .	66
36	Boxplot dos resultados do ensaio de diferencial semântico para o sinal A. . . . .	68
37	Boxplot dos resultados do ensaio de diferencial semântico para o sinal B. . . . .	69
38	Boxplot dos resultados do ensaio de diferencial semântico para o sinal B-. . . . .	70
39	Boxplot dos resultados do ensaio de diferencial semântico para o sinal B+. . . . .	70
40	Boxplot dos resultados do ensaio de diferencial semântico para o sinal C. . . . .	71
41	Boxplot dos resultados do ensaio de diferencial semântico para o sinal C-. . . . .	71
42	Boxplot dos resultados do ensaio de diferencial semântico para o sinal A+. . . . .	71

43	Boxplot dos resultados do ensaio de diferencial semântico para o sinal D. ....	72
44	Boxplot dos resultados do ensaio de diferencial semântico para o sinal D-. ....	72
45	Boxplot dos resultados do ensaio de diferencial semântico para o sinal D+. ....	72
46	Resultado de análise de regressão para o adjetivo conforto para o primeiro ensaio. ....	74
47	Resultado de análise de regressão para o adjetivo conforto para o segundo ensaio. ....	75
48	Resultado de análise de regressão para o adjetivo constância para o primeiro ensaio. ....	76
49	Resultado de análise de regressão para o adjetivo constância para o segundo ensaio. ....	76
50	Resultado de análise de regressão para o adjetivo força para o primeiro ensaio. ....	77
51	Resultado de análise de regressão para o adjetivo força para o segundo ensaio. ....	78
52	Resultado de análise de regressão para o adjetivo suportabilidade para o primeiro ensaio. ....	78
53	Resultado de análise de regressão para o adjetivo suportabilidade para o segundo ensaio. ....	79



## LISTA DE TABELAS

1	Resultado da primeira etapa do ensaio. . . . .	45
2	Resultado da segunda etapa do ensaio. . . . .	46
3	Comparação entre os resultados dos jurados que viajaram de avião e que não viajaram, que participaram da segunda etapa do ensaio. . . . .	47
4	Frequência de respostas dos jurados que julgaram diferentes os sinais na terceira etapa dos ensaios (NV - nível de vibração). . . . .	48
5	Níveis globais de vibração (dB) dos sinais gravados em voo. . . . .	53
6	Resultados dos níveis de vibração da primeira etapa do ensaio de limiar de percepção. . . . .	55
7	Resultados do ensaio de limiar de percepção excluindo os <i>outliers</i> . . . . .	56
8	Resultado aplicação da norma nos sinais de limiar gravados no ensaio. . . . .	60
9	Valores dos coeficientes de eficiência para Redes Neurais dos ensaios de conforto de vibração. . . . .	73
10	Valores das retas encontradas para cada adjetivo. . . . .	80
11	Ponto de encontro e ânulo entre retas médias dos adjetivos e reta ideal. . . . .	80





## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LVA - Laboratório de Vibrações e Acústica UFSC - Universidade

Federal de Santa Catarina

NV - Nível de vibração

r.m.s. - raiz quadrada da média (*root mean square*)

r.s.s. - raiz quadrada da soma (*root sum square*)



## LISTA DE SÍMBOLOS

- $\psi$  - magnitude psicológica de um estímulo  
 $\varphi$  - magnitude física de um estímulo  
 $k$  - constante em função das unidades das variáveis psicológicas de um estímulo  
 $n$  - constante que depende do aumento da percepção de um estímulo  
 $Hz$  - Herz, unidade de frequência em ciclos por segundo  
 $a_{wi}$  - valor da aceleração *r.m.s.* ponderada por meio de vetores, no eixo  $i$   
 $\varphi_s$  - magnitude psicológica do som  
 $\varphi_v$  - magnitude psicológica de vibração  
 $k_s$  - constante relacionada a  $\varphi_s$   
 $k_v$  - constante relacionada a  $\varphi_v$   
 $\psi_s$  - magnitude física do som  
 $\psi_v$  - magnitude física de vibração  
 $n_s$  - constante que depende do aumento do som  
 $n_v$  - constante que depende do aumento de vibração  
 $L_p$  - nível de pressão sonora  
 $c$  - constante  
 $w_b$  - vetor de pesos de ponderação para vibração  
 $L_{AE}$  - valor de exposição ao ruído, depende do tempo de exposição e nível de pressão sonora  
 $VDV$  - valor de dose de vibração, depende do tempo de exposição e nível de vibração  
 $a(t)$  - aceleração  
 $eVDV$  -  $VDV$  para baixo fatores de crista  
 $t(s)$  - tempo  
 $\beta_n$  - constantes da análise de regressão  
 $y$  - variável resposta da análise de regressão  
 $x_k$  - variáveis regressoras  
 $\varepsilon$  - erro de regressão  
 $m$  - número de entradas para o modelo de redes neurais  
 $dB$  - escala decibel



# 1 INTRODUCAO

Nos últimos anos, o transporte aéreo vem apresentando crescente importância como alternativa para o transporte de passageiros e cargas (QUEHL, 2001).

No Brasil, este meio de transporte apresentou um crescimento de 13,6% para o transporte de passageiros e 7,6% para o transporte de carga somente no ano de 2008, segundo o Anuário de Transporte Aéreo da ANAC<sup>1</sup> deste ano, considerando voos domésticos e internacionais. Segundo o Anuário de Transporte Aéreo de 2009, a maioria das empresas aéreas aumentou o número de assentos disponíveis, e mesmo assim a ocupação dos assentos aumentou ou se manteve, devido à crescente procura por este tipo de transporte.

Esse crescimento demanda um aumento também na fabricação de aeronaves. Por isso, os fabricantes de aeronaves buscam melhorias nos processos de produção para que seus produtos possam cada vez mais atender às necessidades dos usuários, aumentando a qualidade e o conforto com menores custos de manutenção e operação.

Para a indústria aeronáutica, o conforto passou a ser fator determinante para a venda dos produtos há pouco tempo, ao contrário da indústria automobilística.

O conforto do passageiro dentro de uma aeronave é uma combinação complexa de vários fatores, dentro dos quais se inserem ruído e vibração, que são parâmetros fortemente ligados. Isso porque as estruturas e seus elementos vibram, quando o equipamento está em funcionamento, e podem emitir sons em várias frequências, como explica Gerges (2000).

Bitencourt et al. (2006) verificaram em seus estudos que ruído e vibração estão entre os fatores que mais influenciam o conforto, juntamente com a poltrona, atendimento e a temperatura dentro da cabine de uma aeronave.

Devido ao alto custo do petróleo, muitas restrições são impostas para tratamento de ruído e vibração nas aeronaves, pois estes tratamentos incrementam o peso das aeronaves, e conseqüentemente, o consumo de combustível.

Porém, se a fonte do desconforto é conhecida, tanto para ruído como para vibração, facilita-se a viabilização de soluções, ou seja, torna-

---

<sup>1</sup>Agência Nacional de Aviação Civil - Brasil

se mais fácil e factível encontrar uma solução que aumente o conforto do passageiro sem aumentar consideravelmente o custo de fabricação e operação das aeronaves.

No Brasil, alguns estudos com essa temática foram realizados, dentre os quais podemos citar as pesquisas de semântica para a caracterização apropriada da vibração e ruído, estudos sobre instrumentos simuladores de aeronaves, entre outros (PAUL, 2009) (BITENCOURT, 2008).

Em um desses estudos Teixeira (2010), um simulador de aeronaves foi projetado e montado na UFSC, se mostrando uma alternativa para a realização dos ensaios de conforto.

O conforto global dentro da aeronave é composto por diversos fatores que são citados pelos próprios usuários, como temperatura, pressão interna (ou variação da pressão interna), ruído e vibração, tempo de voo, tempo de espera, atendimento, espaço entre as poltronas, entre outros. Já o conforto vibratório refere-se ao conforto do passageiro somente relacionado às sensações provocadas pelo movimento oscilatório da aeronave. E o conforto vibroacústico, por sua vez, se refere ao conforto relacionado aos estímulos de ruído e vibração.

Quando a percepção do conforto vibratório dentro de uma aeronave é alterado, conseqüente altera-se também o conforto global da mesma.

Para que isso seja possível, necessita-se conhecer de forma clara que fator ou parâmetro da vibração tem a maior contribuição para o desconforto vibratório.

Como se pode relacionar um parâmetro físico (calculável) ao um fator subjetivo de desconforto? Para responder a esta questão, propõe-se a utilização de sinais complexos de excitação (gravados em aeronaves), com a obtenção de respostas de diversas pessoas em torno da sensação da vibração, e através da análise das respostas, determinar relações entre os parâmetros que mais contribuem para o desconforto global.

Com o conhecimento das características da vibração que mais influenciam o desconforto, é possível realizar um tratamento para a minimização desses fatores.

Para relacionar os parâmetros da vibração com o desconforto existem muitas técnicas que podem ser utilizadas, e neste estudo serão utilizadas técnicas de regressão linear e redes neurais artificiais.

Ainda no presente estudo, os ensaios de conforto foram realiza-

dos em um simulador de aeronaves (*mock-up*) que buscou reproduzir as características de um voo real. Neste caso, reproduziram-se apenas sinais de vibração e ruído. Vale lembrar que somente a vibração variou. O simulador utilizado reproduz os movimentos vibratórios numa faixa específica de frequência, e também é dotado de um sistema de reprodução de ruído com a utilização de fones de ouvido (TEIXEIRA, 2010).

Neste trabalho, o simulador foi utilizado para realização de ensaios de diferença de limiar de vibração, que é a menor mudança no nível de vibração perceptível aos humanos; limiar de percepção de vibração, que é o menor nível de vibração que é percebido pelos humanos; e também ensaio de conforto, que tem o objetivo de avaliar (qualitativamente e quantitativamente) as vibrações pelos jurados.

Nos ensaios de conforto, foram utilizadas ferramentas específicas para a aquisição dos dados subjetivos, que são métodos capazes de determinar as representações e julgamentos que as pessoas atribuem aos estímulos, segundo Bitencourt (2008), como por exemplo o método de escala de resposta e o método de diferencial semântico.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Estudar o comportamento dos jurados com relação a sinais complexos de vibração e julgar as relações entre as variáveis físicas da vibração com as respostas subjetivas adquiridas através dos ensaios em simulador de aeronave.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- Estudar o comportamento das pessoas com relação a vibração;
- Definir interface de coleta de dados subjetivos;
- Definir sinais de excitação de vibração;
- Definir métodos de coleta de dados subjetivos do ensaio;

- Definir os adjetivos para coleta de dados subjetivos;
- Definir sistema de coleta de dados físicos do ensaio;
- Realizar ensaios subjetivos no simulador;
- Determinar uma matriz de ensaio onde as características que influenciam o conforto global da aeronave devem ser variadas;
- Definir os métodos estatísticos que possam satisfazer a necessidade de correlação entre as variáveis;
- Relacionar os parâmetros físicos da vibração com os parâmetros subjetivos avaliados pelas pessoas com o auxílio da ferramenta(s) estatística selecionada(s).



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, serão apresentados, de forma resumida, os principais estudos que direcionaram a execução desta pesquisa.

Uma primeira análise da literatura, sobre estudos de conforto, revelou uma abundância de estudos de modelos técnicos e principalmente ergonômicos (associados ao design do assento). Nestes estudos, a definição de conforto é multidimensional, influenciado por outros fatores de natureza ambiental, situacional e individual.

Quehl (2001) constatou, em seus estudos, que ruído e vibração são os fatores mais importantes com relação ao conforto em aeronaves.

Alguns estudos visando o entendimento dos fatores que afetam o conforto (ou o desconforto) vibroacústico de aeronaves com ensaios subjetivos foram desenvolvidos nos projetos *Identificação de um índice de conforto em passageiros de avião* (Idea - PACI)<sup>1</sup> e *Ambiente amigável na cabine de avião* (FACE<sup>2</sup>). Como esses projetos são desenvolvidos na Europa, com adjetivos em outras línguas, os resultados são válidos somente para usuários europeus.

### 2.1 LIMIAR DE PERCEPÇÃO E DIFERENÇA DE LIMIAR

O interesse na percepção subjetiva da vibração está se tornando cada dia mais difundido. A Norma ISO 2631-1 (1997), que se refere a excitações senoidais baseadas na percepção da vibração, aborda os limites de percepção de vibração do corpo todo, em todas as direções, ou contornos de conforto. O limiar da percepção para banda de 1 a 100 Hz é de aproximadamente  $0,001m/s^2$  (um valor mais preciso depende da frequência, direção da vibração e duração da exposição). Entretanto, os artigos relevantes mostram diferenças significativas em termos de padrões de limiar apresentados, assim como dados de diferentes laboratórios. Isso provavelmente ocorre devido às diferenças nos métodos de medidas psicofísicas utilizados (GRIFFIN, 1996), e o local onde os experimentos são realizados.

Medidas da sensação de vibração vêm sendo utilizadas, por muitas décadas, na área da saúde, para identificar, localizar e categorizar alterações dos nervos (HUBBARD et al., 2004) e ultimamente vêm sendo

---

<sup>1</sup>Identification of an Aircraft Passenger Comfort Index - [www.idea-paci.org](http://www.idea-paci.org)

<sup>2</sup>Friendly Aircraft Cabin Environment - [face.aeronautica.alenia.it](http://face.aeronautica.alenia.it)

associadas com a percepção do conforto de veículos. Entretanto, poucas informações a respeito da determinação do limiar de vibração para sinais complexos (com atuação de múltiplas frequências) são fornecidas na literatura, pois a maioria dos estudos utilizam sinais senoidais.

Schaefer et al. (2009), em um estudo sobre a percepção do limiar de vibração em situação de laboratório, constataram que o ruído influencia significativamente no limiar de percepção de vibração. Estes resultados concordaram com os apresentados por Griffin (1996), que afirma que as pessoas ouvem a vibração antes de senti-la. O ensaio bem como os resultados deste estudo estão demonstrados no Capítulo 4.

Bartlett et al. (1998) e Inami, Chiba e Toyama (2005) estudaram o efeito da idade, do sexo e do peso na percepção do limiar de vibração e mostraram que sujeitos com idades entre 20 e 30 anos (faixa etária abordada nos estudos realizados no mock-up da UFSC) não apresentam diferenças na percepção do limiar vibratório em função da idade. Por outro lado, na Figura 1, retirada de Inami, Chiba e Toyama (2005), pode-se observar que a percepção da vibração nos pés diminui com a idade.

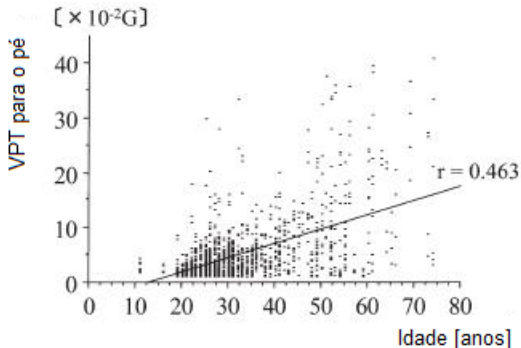


Figura 1: Gráfico de dispersão dos limiares de percepção de vibração dos pés de 377 indivíduos normais (INAMI; CHIBA; TOYAMA, 2005).

Mansfield e Griffin (2000b) estudaram o limiar de percepção, quando um sujeito é estimulado entre duas magnitudes de vibração apenas suficientemente distintas a ponto do indivíduo perceber esta

diferença. O objetivo era responder se os resultados são coerentes com a Lei de Weber (ou Lei de Weber-Fechner)<sup>3</sup>. Para isto, foram feitos ensaios com dez homens e dez mulheres, e foram reproduzidas três diferentes magnitudes de vibração com mesma forma de onda, e outra com forma de onda similar a medida em um carro de passeio.

Ainda o mesmo estudo (MANSFIELD; GRIFFIN, 2000b), observou-se que o limiar para cada forma de onda foi diferente, mas quando a diferença foi expressa em termos relativos, notou-se que o limiar foi aproximadamente 13%, independentemente de ambas as magnitudes de vibração e forma de onda, obedecendo, portanto, a lei de Weber. Esse mesmo estudo não observou diferença significativa entre as respostas de homens e mulheres.

Bellman et al. (2000) realizaram um estudo para determinar o limiar e diferença de limiar de vibração, utilizando sinais senoidais com vibração no piso. Foram determinados limiares de percepção da vibração, diferenças do limiar em relação à frequência, diferenças de limiar em relação à magnitude e método EVLC (*equal-vibration level contours*). Os resultados encontrados para o limiar de percepção foram comparados com outros dados encontrados na literatura, e uma grande diferença foi encontrada para frequências superiores a 16 Hz. O método EVLC demonstrou um aumento na percepção de vibração em 2,3 dB por oitava entre 6 e 63 Hz, e de 6 dB para frequências maiores.

Esse estudo foi motivado porque os dados existentes na literatura sobre a percepção da vibração senoidal apontam diferentes resultados das normas, e os dados provenientes de diferentes laboratórios também mostram diferenças de respostas consideráveis, isto devido a diferentes métodos psicofísicos utilizados em cada um deles. Além disto, existem informações incompletas para a diferença do limiar de percepção para diferentes magnitudes e frequências.

Matsumoto, Maeda e Oji (2002) determinaram diferenças de limiares de vibração em várias frequências (4; 8; 16; 31,5; 63 e 80 Hz) e encontraram valores diferentes para cada frequência, o que sugere que a diferença de limiar é também função da frequência de excitação. A razão de Weber encontrada nestes estudos ficou em torno de 5,2 e

---

<sup>3</sup>A Lei de Weber afirma que são percebidas mudanças relativas e não absolutas na estimulação física. Ou seja, se alguém carrega uma massa de um quilograma com os braços, e adiciona-se mais um quilograma a quantidade carregada, provavelmente diferença será percebida. Porém, se alguém carrega uma massa de cinquenta quilogramas com os braços e adiciona-se um quilograma a quantidade carregada, provavelmente a diferença de massa adicionada não será percebida.

6,5%. Os autores sugerem que esse menor valor é devido ao método para obtenção das respostas subjetivas utilizado no ensaio.

## 2.2 CONFORTO (PARÂMETROS DA VIBRAÇÃO QUE INFLUENCIAM O CONFORTO)

Uma das definições de conforto está relacionada com o bem estar. Alguns movimentos podem ser uma fonte de prazer e satisfação. Entretanto, nos estudos que relacionam vibração e conforto, os autores têm como preocupação principal verificar os movimentos que são responsáveis pelo desagrado, insatisfação e desconforto, segundo Griffin (1996).

Este mesmo autor refere que muitos fatores se combinam para determinar a sensação de bem estar em um fator individual. A vibração é apenas um destes fatores e, considerado sozinho, não pode determinar ou realizar uma previsão global da satisfação com o ambiente. Sendo assim, o termo "desconforto de vibração" refere-se ao desconforto gerado apenas pela vibração.

Os primeiros estudos nesta área buscavam relacionar somente os efeitos de variação da frequência. Posteriormente, outros estudos investigaram vibrações complexas, incluindo múltiplas frequências de vibração, múltiplos eixos de vibração e choques. Observa-se que a complexidade das variáveis de vibração, tais como, frequência, eixos, posição de medição, mais os aspectos individuais, dificultam a avaliação do conforto de vibração, conforme Griffin (1996). Esses estudos, utilizaram métodos de aquisição de respostas subjetivas para quantificar o conforto.

As variáveis citadas pelo autor são separadas por intrínsecas e extrínsecas. As extrínsecas: magnitude de vibração e combinações de magnitudes, frequência de vibração e combinações de frequências, direção de vibração e combinação de direções, posição da coleta dos dados de vibração e combinação de posições, duração da vibração e combinações de durações. Ainda existem outras variáveis não relacionadas à vibração como: ruído, temperatura, comportamento dinâmico da poltrona e outros. As variáveis intrínsecas podem estar relacionadas aos sujeitos de modo individual (postura do corpo, posição do corpo, orientação do corpo (em pé, sentado, deitado), e relacionadas à variabilidade das características dos sujeitos (massa corpórea, tamanho do

corpo, resposta dinâmica do corpo, idade, gênero, experiência, expectativa, atitude, personalidade, preparo físico) (GRIFFIN, 1996).

### 2.2.1 Magnitude de vibração

Sabe-se que quando se incrementa a magnitude de uma vibração, o desconforto também aumenta. Mas, segundo Griffin (1996), duas perguntas devem ser feitas: (a) até que ponto o desconforto é aumentado com o aumento da magnitude de vibração? e (b) a taxa de incremento do desconforto com o incremento da magnitude de vibração é a mesma para todos os estímulos de vibração?

Stevens (1975) sugere que a relação entre a magnitude psicológica e a magnitude física é descrita por:

$$\psi = k\varphi^n, \quad (1)$$

onde  $\psi$  é a magnitude psicológica;  $\varphi$  é a magnitude física;  $k$  é uma constante que depende das unidades empregadas; e  $n$  é a constante que determina o aumento da sensação de vibração.

Segundo Griffin (1996), esperam-se fatores diferentes para cada tipo de estímulo. Essas constantes podem ser obtidas através de diversos procedimentos de ensaio, inclusive o método de estimativa de magnitude, que é um método no qual o jurado atribui um número a algum atributo (LIMA, 2005). Segundo Poulton (1968), o método de ensaio também tem influência neste fator, ou seja, para cada método de ensaio será encontrado um fator  $n$ .

Hiramatsu e Griffin (1984) encontraram expoentes similares para a Lei de Stevens para uma faixa de diferentes durações de vibração no eixo vertical, entre 2 e 50 segundos, ou seja, para vibrações verticais a sensação de vibração respeita a Lei de Stevens para um tempo de ensaio entre 2 e 50 segundos.

Pequenas mudanças na postura podem alterar a transmissão da vibração para o corpo, e isso tem influência no desconforto gerado por esta vibração, já que algumas faixas de frequência podem ser atenuadas, e outras aumentadas. Esses resultados são descritos por Griffin (1975).

Fothergill e Griffin (1977a) compararam os resultados obtidos em alguns estudos, que sugerem os níveis de vibração para o desconforto, em sinais do tipo seno em frequências de 8 e 10 Hz.

### 2.2.2 Frequência de vibração

Segundo Griffin (1996), uma magnitude constante não produz o mesmo desconforto para todas as frequências de vibração, para qualquer unidade de magnitude de vibração (velocidade, aceleração e outras). Por exemplo, para a faixa de frequências médias (acima de 2 Hz e até 80 Hz aproximadamente) as ressonâncias do corpo tendem a amplificar a vibração, e assim cada frequência é sentida de uma forma, influenciando diretamente no conforto global.

Griffin (1996) reuniu vários estudos que encontraram as curvas de conforto para pessoas sentadas, excitadas entre frequências de 0,01 a 100 Hz em assentos rígidos. Estes estudos sugerem uma queda na curva de conforto que se inicia entre 2 e 3 Hz e se estende até 5 e 6 Hz, quando a curva inicia uma subida. Entre estes estudos, várias relações de subida da curva de conforto foram encontradas.

Segundo Griffin (1996), a curva de conforto para vibração vertical encontrado com sinais do tipo seno, por exemplo, indica apenas o desconforto relativo a este movimento. Para generalizar a curva de conforto equivalente, é necessário considerar outros eixos de vibração do assento, outros sinais de vibração (de excitação da estrutura de ensaio), outras posturas, e como algumas curvas podem ser utilizadas para prever o desconforto produzido por vibrações aleatórias, vibração com múltiplas frequências (sinais complexos), vibração em múltiplas frequências (tons centrados em várias frequências) e choques.

Miwa (1967) e Griffin (1982) sugerem que a curva equivalente de conforto é similar para os eixos x (frontal) e y (lateral) para pessoas sentadas e com assentos sem encosto para as costas. Alguns estudos sobre o conforto lateral (eixo y) e frontal (eixo x) possuem proporções aproximadamente lineares entre as frequências de 5 e 100 Hz.

Segundo Corbridge (1983), a vibração em encosto de assentos pode ser a causa dominante do desconforto em alguns veículos.

Algumas curvas de desconforto para vibração do encosto foram encontradas por (PARSONS; GRIFFIN; WHITHAM, 1982), utilizando um assento rígido e estático, submetidos à vibração através de um encosto vibrante.

Com relação à influência de um suporte para os pés no desconforto, Suggs et al. (1976) sugerem que, quando o assento é rígido, a vibração no assento causa mais desconforto que a vibração no pé, mas se o assento (revestido com almofadas) isola as vibrações em altas

frequências, a sensação de vibração no pé vai dominar a resposta subjetiva em alta frequência (ASHLEY; RAO, 1974). Miwa (1988) sugere que a curva dos pesos da frequência de aceleração é plano em baixas frequências e sofre atenuação de 12 dB por oitava acima de 18 Hz, para o desconforto gerado por vibração no pé entre as frequências de 8 a 400 Hz.

Com relação a passageiros deitados, (GRIFFIN, 1996) afirma que a natureza da superfície que suporta o corpo é importante. Para quantificar a vibração, as medidas devem ser realizadas em várias partes do corpo, e a cabeça é a que mais pode influenciar no desconforto. Para esses tipos de assento, uma grande influência no conforto com relação a vibrações horizontais está associada a presença de suportes para prevenir uma possível rotação do corpo (DUPUIS; HARTUNG, 1981).

### 2.2.3 Tempo de exposição à vibração

Quando fala-se do tempo de exposição à vibração, sabe-se que, quanto mais tempo uma pessoa é exposta a uma vibração, maior o desconforto. Por exemplo, uma pessoa exposta a uma vibração por um certo tempo, sentirá mais desconforto que quando submetida a mesma vibração por um tempo muito menor. Por isso, muitos estudos tentam descrever como o tempo influencia no desconforto provocado pela vibração, por exemplo Catterson, Hoover e Ashe (1962) e Hornick (1962).

Miwa (1968) realizou experimentos em que sujeitos julgaram o desconforto relativo produzido por curtos períodos de tempo com vibrações senoidais. Ele concluiu que o desconforto aumenta com o incremento do tempo de exposição até um limite e sugeriu que além de 2 segundos para vibração na faixa de 2 a 60 Hz, e 0,8 segundos para vibração na faixa de 60 a 200 Hz, não há incrementos no desconforto. Os testes foram realizados com tempo máximo de 6 segundos.

## 2.3 VIBRAÇÕES COMPLEXAS

Vibrações com espectros complexos, ou seja, que possuem várias faixas de frequências atuantes, são encontradas nos mais diversos tipos e em todos os meios de transporte. Para relacionar esses tipos de vibração

com o conforto, alguns métodos são empregados. Estes métodos devem ser aplicados com cautela, devido a algumas peculiaridades como o mascaramento, por exemplo, como afirma Griffin (1996).

Um desses métodos é o método do pior componente (*worst component method*) que assume que a resposta é predominada pelo componente senoidal mais severo (ou em banda de oitava ou de terça de oitava com maior magnitude) e não é afetado de nenhuma forma por outros componentes de menor severidade (GRIFFIN, 1996). Este mesmo autor ressalta que esse método é difícil de ser empregado em sinais de banda larga.

Segundo Griffin (1996), um método geral deve ser aplicável para sinais de vibração senoidais e aleatórios. Uma técnica que contempla essas premissas é o método que envolve frequência com pesos (*frequency weighting*) e média r.m.s. do sinal de vibração, e que também se refere à Norma ISO 2631-1 (1997).

Fothergill e Griffin (1977b) realizaram vários experimentos com estímulos com vários picos e também sinais com batimentos. Os resultados indicaram que o valor r.m.s. das bandas de frequência da vibração multiplicadas por pesos promovem a melhor estimativa do desconforto produzido por essas vibrações.

Griffin (1976) comparou o desconforto produzido por vibrações senoidais e vibrações aleatórias distribuídas em bandas de um terço de oitava, e chegou à conclusão que os dois tipos de vibração, quando o seno e a banda de vibrações aleatórias são centradas na mesma frequência, o desconforto gerado é similar, mas a vibração aleatória é ligeiramente mais desconfortável. Ele também afirma que neste caso o fator de menor crista (*low crest factor*) pode ser mais adequado para prever o desconforto do que o peso de frequências e a média r.m.s.

Para comparação de dois ou mais eixos vibrando simultaneamente, o método da soma das raízes quadradas r.s.s. (*root-sum-of-square*) foi utilizado para descrever o desconforto para movimentos translacionais e em baixas frequências (menores que 10 Hz), e foi o método que melhor se adequou aos resultados segundo Fairley e Griffin (1988). Este método considera cada componente  $a_{wi}$  por meio de um somatório:

$$r.s.s. = \sqrt{(\sum a_{wi}^2)}, \quad (2)$$

onde  $a_{wi}$  é o valor da aceleração r.m.s. com peso no eixo  $i$ .



Segundo Parsons e Griffin (1983), o método *r.s.s.* se comportou de forma satisfatória na predição do conforto para vários eixos e em vários locais de medição de vibração no ensaio. Porém, os valores de ponderação para o espectro de frequência devem ser obtidos através de estudos semelhantes e que considerem os mesmos locais, eixos e faixa de frequência. Essa determinação é necessária pois cada situação requer ponderações específicas.

Quando o sinal de vibração contém solavancos ocasionais, o desconforto produzido não pode ser predito por média *r.m.s.* segundo Clarke et al. (1965). Nestes casos, o mesmo autor sugere a utilização do fator de crista para determinação deste parâmetro, porém este fator depende do método usado para o cálculo e da duração do sinal em que o fator é calculado.

Devido a esses problemas, a ISO 2631-1 (1997), em uma alteração, indica que os fatores de crista devem ser determinados a partir de valores de aceleração com pesos em relação a frequência, em um período mínimo de 1 minuto.

Alguns trabalhos ((ALLEN, 1976), (ALLEN, 1977), (ALLEN, 1979), (PAYNE, 1976), (PAYNE, 1978)) propuseram a utilização de um índice de resposta dinâmica (DRI - *dynamic response index*) para a avaliação de movimentos contendo choques. Este valor é proporcional a um pico em um sinal de um sistema de um grau de liberdade, com frequência natural de 8,4 Hz e fator de amortecimento de 0,224.

Outro fator que pode prever melhor o desconforto relacionado aos choques, é o índice de Qualidade de Impacto - IRQI (*impact ride quality index*), que foi proposto por Payne (1976). Nesse mesmo trabalho ainda foi proposto outro índice, o índice de Qualidade de Vibração.

Esses índices foram propostos na tentativa de quantificar o conforto por meio de apenas um número. Com esses estudos, os autores chegaram a conclusão que para cada caso há um índice que consegue relacionar os parâmetros de vibração de maneira mais satisfatória que outro. Isso porque há muitas variáveis envolvidas no mecanismo de percepção de vibração pelos humanos.

### 2.3.1 Parâmetros subjetivos

Além da magnitude de vibração, frequência, direção, posição de medição e tempo de exposição ao estímulo, outros fatores afetam o

conforto relacionado à vibração. Esses outros parâmetros são definidos por Griffin (1996), como intra-sujeitos, que são aqueles que mudam nas pessoas com o passar do tempo, e inter-sujeitos, que são as diferenças entre os sujeitos (individualidade).

### 2.3.2 Parâmetros Intra-sujeitos

A orientação (direção) em que a pessoa é inserida no ensaio é um fator que pode alterar o conforto vibratório. Parsons, Griffin e Whitham (1982) comprovaram que uma vibração no encosto das costas na direção frontal (y) causa muito mais desconforto que a mesma vibração na direção lateral do encosto.

Segundo Griffin (1996), o principal efeito da mudança de posição quando o passageiro está sentado é a alteração do local de transmissibilidade da principal vibração ao corpo. E essa mudança do corpo na posição sentada muda o conforto relacionado à vibração.

### 2.3.3 Parâmetros Inter-sujeitos

Segundo Griffin (1996), a variabilidade dos parâmetros inter-sujeitos dependem dos sujeitos que forem escolhidos para o ensaio, e também do procedimento adotado para a obtenção das respostas subjetivas. Sabe-se que as pessoas respondem com mais segurança quando requisitadas a julgar o desconforto (ou conforto) de dois estímulos, do que se requisitadas para regular o nível de vibração em estímulos até que este possa ser dito desconfortável.

É sabido também que, se sujeitos estão julgando dois níveis de vibração na mesma frequência, as respostas terão menos variabilidade do que se o mesmo grupo de sujeitos avaliasse, com relação ao conforto, dois estímulos que estão centrados em frequências diferentes, ou seja, estímulos que vibram de formas diferentes. Isso ocorre porque cada estímulo é transmitido de forma diferente para cada pessoa, devido às diferenças fisiológicas de cada pessoa (GRIFFIN, 1996), ou seja, há uma sensibilidade em função da frequência de vibração.

Com relação ao tamanho do corpo, muitos trabalhos publicados ((GRIFFIN, 1982), (PARSONS; GRIFFIN; WHITHAM, 1982), (PARSONS; GRIFFIN, 1978) e (OBORNE; HEALTH; BOARER, 1981)) encontraram mu-

danças na curva de conforto com relação às variações nas dimensões do corpo das pessoas estudadas. Algumas dessas características podem depender também das configurações do ensaio como poltrona, tamanho da coxa e perna, ou seja, a combinação configuração da poltrona e dimensões do corpo pode gerar mudanças na sensação de conforto.

Griffin (1982) apresentou resultados que sugerem que para frequências entre 2 e 100 Hz, quanto maior a transmissibilidade da vibração até a cabeça da pessoa, maior a sensibilidade à vibração.

Griffin e Whitham (1978) analisaram o conforto de vibração de 28 crianças (de 8 a 16 anos) e 56 pessoas (17 a 70 anos) e chegaram à conclusão que há pouca influência da idade das pessoas no julgamento do conforto da vibração.

Esse mesmo estudo verificou a relação entre o sexo dos participantes e o julgamento do conforto à vibração. A conclusão foi de que não há diferença significativa entre o julgamento do conforto para os dois gêneros. Essa conclusão também foi obtida por Griffin (1982) e Parsons e Griffin (1982).

Fothergill (1972) apresentou evidências de que os estímulos com menor e maior intensidade são julgados mais e menos desagradáveis na segunda vez do que na primeira vez que os estímulos são apresentados. Uma alternativa para diminuir esta influência em métodos absolutos é apresentar os estímulos de forma aleatória.

Sabe-se também que ruído e vibração se influenciam entre si no conforto global. Os estudos que buscam a relação que o ruído tem no conforto da vibração, outros tratam da influência que a vibração tem no conforto de ruído, outros tratam do conforto dos dois estímulos combinados, e outros ainda de vários estímulos combinados, além de ruído e vibração. Alguns destes estudos estão citados nesta seção.

Fleming e Griffin (1975) expuseram sujeitos sentados a vibração e ruído, os quais eram perguntados sobre qual estímulo era preferível para ser reduzido. Dessa forma, determinaram um gráfico onde se verifica que nesta divisão 50% das pessoas preferem diminuir o ruído, e 50% diminuir a vibração.

Com relação aos dois estímulos, a Lei de Stevens indica que as magnitudes subjetivas,  $\psi_s$  para ruído e  $\psi_v$  para vibração, são dadas por:

$$\psi_s = k_s \varphi_s^{n_s}, \quad (3)$$

$$\psi_v = k_v \varphi_v^{n_v}, \quad (4)$$

onde  $\varphi_s$  e  $\varphi_v$  são as magnitudes físicas do ruído e vibração,  $k_s$ ,  $k_v$ ,  $n_s$  e  $n_v$  são constantes. Essa formulação foi proposta por Griffin (1996).

Esta equação pode ser reescrita em termos de unidades logarítmicas de nível de pressão sonora,  $L_p$ , com o valor de 0,6 para o expoente de ruído -  $n_s$ :

$$0,03 \times L_p = n_v \times \log_{10}(\varphi_v) + c, \quad (5)$$

sendo  $c$  é uma constante. Com uma regressão linear com base nos dados obtidos por Fleming e Griffin (1975), a condição para a equalização subjetiva é descrita por:

$$0,03 \times L_p = 0,99 \times \log_{10}(\varphi_v) + 2,77. \quad (6)$$

Estes valores foram obtidos através de ensaios com tons puros e vibrações senoidais com duração de 10 segundos. Entretanto, os resultados podem ser aplicados para outras frequências aplicando os pesos da curva de ponderação  $A$  para o ruído, os pesos  $W_b$  para a vibração e outras durações utilizando as curvas de dependência do tempo inerente à exposição de nível de ruído  $L_{AE}$  para ruído e o valor de dose de vibração  $VDV$  para vibração que serão definidos nos próximos parágrafos.

O  $L_{AE}$  é definido por Gerges (2000) como sendo:

$$L_{AE} = 10 \log_{10} \left( \frac{1}{T} \right) \int_0^T \frac{P^2(t)}{P_0^2} dt. \quad (7)$$

Já o  $VDV$  é definido por:

$$VDV = \left[ \int_0^T a^4(t) dt \right]^{\frac{1}{4}}, \quad (8)$$

onde  $a(t)$  se refere à aceleração da vibração ponderada com os pesos  $W_b$ .

Quando a vibração possuir um fator de crista na faixa de 3 a 6, o  $VDV$  pode ser estimado pelo  $eVDV$ :

$$eVDV = \left[ (1,4a(t))^4 \sqrt[4]{(t(s))} \right]^{\frac{1}{4}}, \quad (9)$$

onde  $a(t)$  é a aceleração da vibração em metros por segundo ao quadrado *r.m.s.* e  $t(s)$  é a duração da vibração em segundos. As unidades de  $L_{AE}$  e  $VDV$  ( $eVDV$ ), são  $dB$  e  $ms^{-1,75}$ , respectivamente.

A relação entre essas novas variáveis é proposta por Howarth e Griffin (1989):

$$L_{AE} = 29,3 \log_{10}(V_{VDV}) + 89,2. \quad (10)$$

A Equação 10 permite a aplicação de predição em sinais complexos (espectros de frequências) de ruído e vibração, para comparação com outros dados experimentais.

Howarth e Griffin (1989) também investigaram a influência de ruído no conforto de vibração, da vibração no conforto de ruído e a reação complexa gerada pela combinação de ruído e vibração. Nesses estudos concluíram que, apesar da vibração ter pouco efeito nas respostas relativas ao conforto de ruído, a avaliação da vibração pode ser mudada pelo ruído, dependendo das magnitudes destes dois estímulos.

Os parâmetros que consideram o nível de exposição sonora,  $\phi_n$ , e valor de dose de vibração,  $\phi_v$ , e podem realizar a predição de desconforto são descritos por:

$$\psi = 22,7 + 243\phi_v^{1,188} + 0,265\phi_n^{0,036}, \quad (11)$$

onde  $\phi_n$  corresponde ao *antilog* do nível de exposição sonora,  $L_{AE}$ , como foi já definido por Griffin (1996).

### 2.3.4 Poltrona e postura dos jurados

Para poltronas que não são rígidas, são esperadas outras curvas, devido à mudança no comportamento dinâmico do assento, e, conseqüentemente, a mudança da vibração que é realmente transmitida para a pessoa.

Devido a essas mudanças no comportamento dinâmico de cada poltrona, os limites de conforto não podem ser aplicados a cadeiras com comportamento diferentes. Portanto, para cada tipo de poltrona com comportamento dinâmico diferente, teremos curvas de limites de conforto com formas e valores diferentes. Segundo Griffin (1996), outros fatores que influenciam na forma e magnitude da curva de limite de conforto de vibração são o descanso dos pés (se houver, ou se está

apoiado diretamente no piso), o encosto para as costas, o método de obtenção dos dados subjetivos, a qualidade dos estímulos, além de outros fatores.

O local em que os pés das pessoas estão dispostos também influencia nas curvas de conforto de vibração, ou seja, se os pés estão suspensos, em um suporte estacionário, ou em um suporte que vibra juntamente com o assento. Neste último caso, ainda deve ser levado em conta fatores de ressonâncias ou atenuações que este suporte pode causar.

O encosto para as costas influencia diretamente na transmissão de vibração para a cabeça de pessoas sentadas (ROWLANDS, 1977), (GRIFFIN et al., 1979), (JOHNSTON, 1979), (MOSELEY; LEWIS; GRIFFIN, 1981), e (PADDAN; GRIFFIN, 1988a) (PADDAN; GRIFFIN, 1988b). Segundo Griffin (1996), o encosto pode reduzir a vibração vertical do corpo quando a magnitude da vibração vertical do encosto é menor que a vibração das costas da pessoa. Isso pode ocorrer quando a almofada da poltrona tem grande amplificação em algumas ressonâncias.

A postura das pessoas sentadas (postura firme e relaxada) altera a pressão de contato entre o corpo e a poltrona e altera o conforto relacionado à vibração. Logo, para efeito de comparação, todas as pessoas ensaiadas devem apresentar a menor variação possível em relação à postura no assento, e foram instruídas com relação à postura adequada que deviam apresentar no decorrer do ensaio.

## 2.4 FERRAMENTAS DE ANÁLISE ESTATÍSTICA

Atualmente, existem diversas ferramentas estatísticas que podem ser utilizadas para a determinar a relação entre variáveis físicas e subjetivas. Entre elas pode-se destacar análise de regressão linear simples e múltipla, regressão não linear, *cluster*, redes neurais artificiais, lógica *fuzzy*, modelo *rash*, *conjoint analysis*, algoritmos genéticos, modelo BTL, *grounded theory*.

De acordo com a bibliografia consultada (SORRENTINO; CONCILIO, 2003) (SAMANTA, 2004), resultados consistentes foram encontrados com regressão linear simples e múltipla, e mais atualmente através de modelos de redes neurais. Logo, os métodos estatísticos que serão tratados neste capítulo são somente regressão linear (simples e múltipla) e redes neurais.

### 2.4.1 Análise de regressão

A análise de regressão é uma ferramenta muito utilizada para investigar o relacionamento existente entre variáveis de um processo, segundo Werkema e Aguiar (1996). Este mesmo autor afirma que a análise de regressão se baseia no emprego de uma equação para relacionar as variáveis de um processo.

Segundo Ezekiel e Fox (1959), o método de regressão e correlação foi desenvolvido por Karl Pearson, e citado pela primeira vez no ano de 1903. Esse estudo tratava da relação entre a estatura de crianças e a estatura de seus pais. Devido à natureza do estudo, o método recebeu o nome de regressão. Esse mesmo autor cita que a técnica foi muito utilizada nas décadas de 1920 e 1930 no campo da agricultura, para o gerenciamento dos empreendimentos rurais, preços de produtos, mercado de *commodities*, estimativa de safra, abastecimento, análise de demanda e aspectos macroeconômicos.

Montgomery e Peck (1992) afirmam que os modelos de regressão podem ser usados para descrição e interpretação de dados, estimativa de parâmetros, predição e estimativa de valores de variáveis, e controle de processos.

A análise de regressão pode ser simples ou múltipla, linear ou não-linear (curvilinear). A regressão linear simples relaciona um parâmetro a apenas uma variável. Montgomery e Peck (1992) definem a regressão linear simples como um modelo descrito apenas por uma variável regressora (independente, explicativa ou preditora), e pode ser definido por:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon, \quad (12)$$

onde  $\beta_0$  e  $\beta_1$  são constantes chamadas de coeficientes de regressão,  $\varepsilon$  é o erro aleatório do componente,  $x$  é a variável regressora e  $y$  a variável dependente ou variável resposta.

A regressão linear múltipla, por sua vez, é definida por Montgomery e Peck (1992) como um modelo de regressão que envolve mais que uma variável regressora, sendo definida por:

$$y = \beta_0 + \beta_1 \times x_1 + \beta_2 \times x_2 + \dots + \beta_k \times x_k + \varepsilon. \quad (13)$$

onde  $y$  é a variável resposta,  $x_k$  representa as variáveis regressoras,  $\beta_n$  as constantes relativas a cada variáveis regressoras  $x_n$  e  $\varepsilon$  o erro

aleatório do componente.

Segundo Montgomery e Peck (1992) o valor de cada coeficiente de regressão  $\beta_n$  representa a mudança esperada na resposta para a variação de uma unidade em  $x_n$  quando os outros parâmetros permanecem constantes. Algumas suposições estão associadas ao Modelo de Regressão Linear Múltipla, e são descritos por Werkema e Aguiar (1996):

- o erro tem média zero e variância desconhecida  $\sigma^2$ ;
- um erro qualquer não depende de qualquer outro erro;
- os erros têm distribuição normal.

A análise de regressão foi uma ferramenta muito utilizada para a predição e determinação da relação entre variáveis. A norma ISO 2631-1 (1997) utilizou o método de regressão linear para determinar os pesos (ou fatores de multiplicação) para os parâmetros que variam nos ensaios de conforto.

Paul (2009) desenvolveu um modelo de conforto acústico para aeronaves comerciais utilizando regressão linear. Em seu desenvolvimento foram utilizados 3 modelos psicoacústicos (agudeza conforme Aures, intensidade de flutuação e tonalidade conforme Aures). Considerando 29 dos 33 sons avaliados nos ensaios subjetivos, foi modelada a variável dependente *conforto* com um coeficiente de determinação de 77%. Segundo o autor Paul (2009), este resultado foi satisfatório, pois 88% das observações obtidas nos ensaios subjetivos puderam ser consideradas.

## 2.4.2 Redes neurais

Redes neurais são ferramentas baseadas num conjunto de elementos neurais, que são unidades de processamento básico que se influenciam entre si, equivalente ao sistema neural do sistema biológico humano (MASSAD et al., 2004).

O tratamento dos dados ocorre através dos vários neurônios que são alimentados com  $m$  entradas, ou um sinal de entrada, que é o conjunto de dados o qual se deseja retirar alguma informação. O valor (ou sinal) de saída é a resposta da rede neural de acordo com os dados de entrada. Em estatística, sinal de entrada trata-se da variável independente e sinal de saída da variável dependente.



O sistema nervoso dos mamíferos é organizado em camadas hierárquicas, onde uma camada envia seu sinal de saída a próxima camada e assim através de todas as camadas. A rede neural artificial pode possuir esta mesma organização.

D'Ischia, Paonessa e Bridisi (2007) fizeram um estudo sobre a possibilidade de se determinar um índice de conforto vibroacústico para aeronaves. Este índice de percepção pode ser traduzido como um índice de desconforto, pois quanto mais alto, maior o incômodo do passageiro. A essência do trabalho de D'Ischia, Paonessa e Bridisi (2007) foi criar uma rede neural usando como entradas o nível de pressão sonora e o nível de vibração que, com estes dados, estimasse um índice de percepção para estes parâmetros. O índice de correlação encontrado foi satisfatório e demonstra que a rede neural treinada forneceu resultados também satisfatórios.

Sorrentino e Concilio (2000) utilizaram redes neurais para desenvolver um modelo de conforto somente acústico, onde os parâmetros foram *loudness*, *sharpness*, *roughness*, *tonality* e *fluctuation strength*. Nesta análise, foram utilizados 23 sinais de voo que representam diferentes situações de voo. Os dados físicos da análise foram obtidos através dos sinais de reprodução, e os dados subjetivos obtidos com o auxílio de questionários respondido pelos jurados, que ao total somaram 450. Na confecção do modelo foram utilizados duas tipologias diferentes de redes neurais, onde a quantidade de neurônios da camada oculta de cada rede foi definida através de um processo de cálculo iterativo.

D'Ischia (2003) pesquisou uma forma de determinar um índice de conforto vibro-acústico, tendo por finalidade a entrada de parâmetros físicos e a possibilidade de se estimar um único índice de conforto para cabines de aeronaves. Neste trabalho, os parâmetros de entrada foram somente nível de pressão sonora e o nível vibratório.

O nível vibratório é considerado como o valor de maior magnitude absoluta de vibração dentro do espectro de aceleração. Já o nível de pressão sonora considerado é dividido em bandas de frequência, onde na escolha das bandas são consideradas as características da percepção humana a estímulos acústicos, onde ao total foram utilizadas 16 bandas de frequência entre 16 e 5k Hz. Com esse estudo, D'Ischia (2003) demonstrou que os métodos de redes neurais são eficientes na determinação de modelos de conforto vibroacústicos.

Em seus estudos Sorrentino e Concilio (2003) objetivavam determinar um índice de conforto vibroacústico. Para isso, com a utilização

de um *mock-up*, submeteram diversas pessoas a diversos estímulos vibratórios e acústicos típicos de aeronaves. Depois de um certo tempo, o estímulo era desligado e as pessoas respondiam o questionário. Os dados físicos do ruído e vibração utilizados no modelo eram gravados simultaneamente à reprodução dos estímulos. Para a análise dos dados foi utilizado um modelo de redes neurais.

Na continuação do trabalho (SORRENTINO; CONCILIO, 2003), os autores reduziram os dados de entrada do modelo de redes neurais através da utilização de médias, e outras simplificações. Os resultados foram prejudicados se comparados aos resultados do modelo sem simplificações, porém ainda foram considerados satisfatórios, tendo em vista a grande redução no número de parâmetros.

Alguns problemas foram encontrados neste modelo devido à grande quantidade de dados de entrada comparada com a quantidade de dados experimentais, o que dificulta o treinamento do modelo. Outro problema encontrado na confecção deste trabalho é que os dados vieram de aeronaves diferentes, o que ocasiona uma aleatoriedade maior nas características das excitações e, conseqüentemente, uma maior complexidade nos dados físicos do ensaio.

Samanta (2004) utilizou um modelo de redes neurais para classificar caixas de transmissão com defeitos. Para isso, o autor utilizou sinais de vibração de um conjunto de caixas de transmissão já classificadas como defeituosas ou não defeituosas. O modelo foi aprimorado com a utilização de algoritmos genéticos para a identificação de padrões nos sinais de vibração.

Kolich (2004) confeccionou um modelo de redes neurais utilizando como entrada dados de entrada medições de pressão no banco de automóveis, aspectos antropométricos e demográficos das pessoas, que respondiam questionários relacionados ao conforto, que eram os parâmetros de entrada subjetivos. O modelo obtido se mostrou eficaz e determinou as relações existentes entre as medições e o conforto das pessoas, possibilitando a avaliação de outros assentos sem a necessidade de ensaio com júri, determinando um parâmetro de conforto através de um modelo de redes neurais.

Kolich, Seal e Taboum (2004) utilizaram dois métodos de desenvolvimento de modelos, regressão linear e redes neurais, e os compararam. Os dois métodos se mostraram eficientes, entretanto, o modelo utilizando redes neurais resultou em um erro menor, e também possibilitou uma quantidade maior de parâmetros de entrada.

### 3 SIMULADOR DE VIBRAÇÕES

Neste capítulo são abordados detalhes da estrutura responsável pela simulação vibracional da aeronave, detalhando alguns dos componentes físicos responsáveis pela adequação das vibrações do simulador às de uma aeronave, que são: piso, poltronas e isoladores, os equipamentos responsáveis tanto pela excitação da estrutura quanto pela quantificação da resposta.

O simulador possui um sistema de simulação e coleta de dados desenvolvido em LabVIEW. Esse sistema possibilita a geração e a gravação de dados, bem como a exportação destes dados para vários formatos, facilitando assim a análise dos resultados.

Os sinais utilizados no simulador foram gravados na aeronave Embraer 190 em condições normais de cruzeiro, com o acelerômetro triaxial posicionado à frente de um dos pés da poltrona. Os sinais foram adquiridos por um tempo de 32 segundos, com taxa de amostragem de 2048 Hz, sem aplicação de filtros. Essa taxa de amostragem está de acordo com o Teorema de Nyquist, que sugere que para reprodução fidedigna de um sinal analógico a taxa de amostragem deve ser pelo menos duas vezes maior que a maior frequência que se quer reproduzir. Todos esses sinais foram gravados nos três eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$ .

Os sinais utilizados na excitação do simulador, tanto para os testes do simulador quanto para os ensaios são mostrados nas figuras 2, 3, 4 e 5.

Os sinais são mostrados em bandas de 0 a 200 Hz, pois essa é a faixa de atuação dos excitadores utilizados (5 a 200 Hz).

Por meio destas figuras, percebe-se que há grandes diferenças na forma de onda dos sinais de vibração gravados, que dependem do local da aeronave em que foi realizada a medição. Segundo Steidel (1979), os sinais podem ser considerados aleatórios (aqueles que não podem ser descritos como periódicos, sem padrões definidos de amplitude e frequência).

A localização na aeronave de gravação dos sinais é mostrado na Figura 6.

O LVA - Laboratório de Vibrações e Acústica da UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina já possuía um simulador de ambiente de aeronave que foi utilizado para vários estudos como (BITENCOURT, 2008) e (PAUL, 2009). Nesses estudos, o sistema de vibração servia apenas de ambientação, não apresentando alta fidedignidade e não possi-

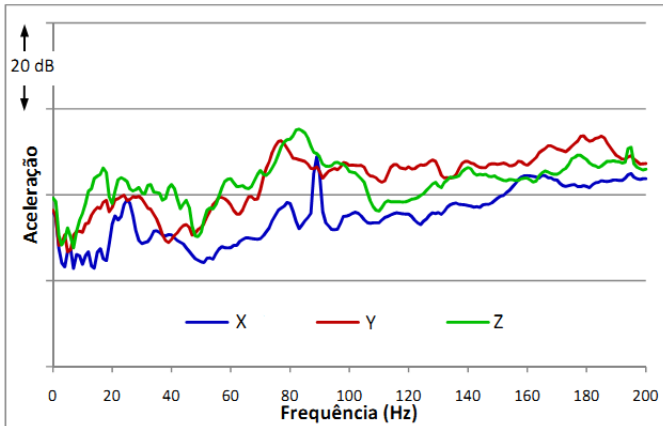


Figura 2: Níveis de voo medidos nas três direções do sinal A (parte central da aeronave).

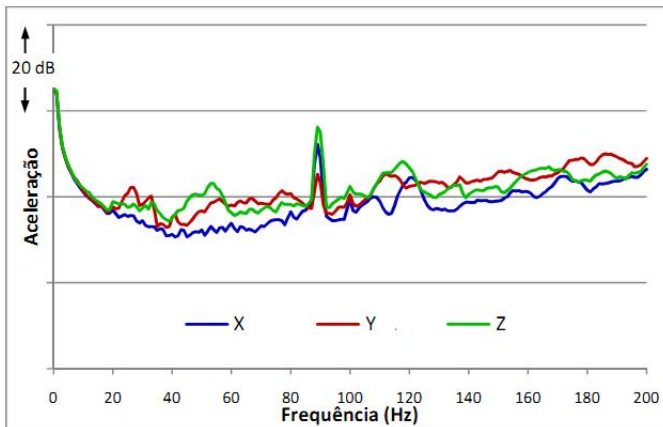


Figura 3: Níveis de voo medidos nas três direções do sinal B (parte central da aeronave).

bilitando estudos conclusivos sobre o conforto relacionado a vibração.

Com isso, Teixeira (2010) estudou e implementou algumas melhorias no simulador possibilitando assim a reprodução fidedigna de vibrações no simulador de aeronaves.

No piso do simulador foram instalados molas (na parte de baixo) de modo a possibilitar a vibração do mesmo. A rigidez de cada mola foi considerada, para equilibrar a poltrona e o voluntário no centro de

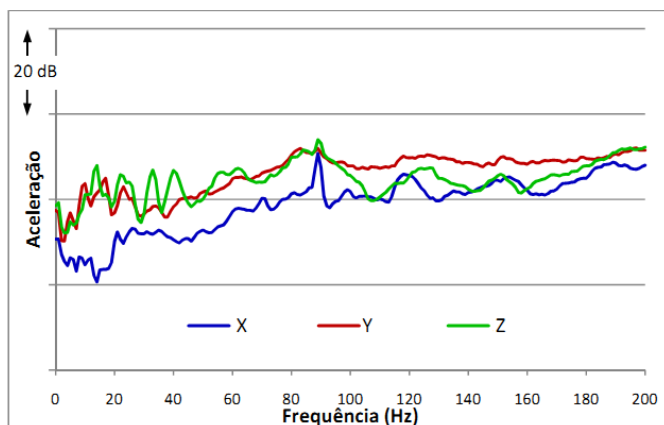


Figura 4: Níveis de voo medidos nas três direções do sinal C (parte traseira da aeronave).

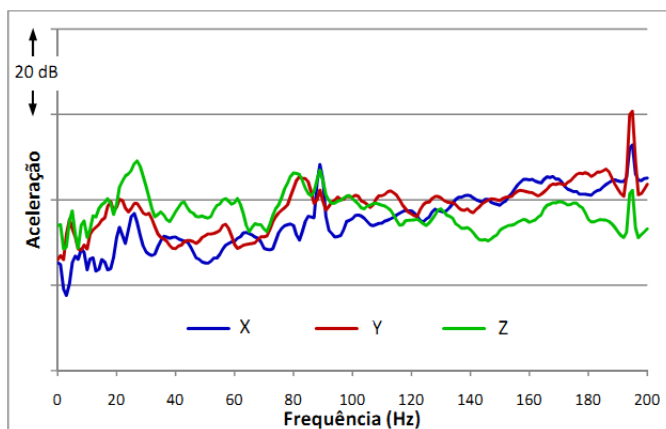


Figura 5: Níveis de voo medidos nas três direções do sinal D (parte frontal da aeronave).

massa da vibração.

Nessas mudanças também inclui a instalação de poltronas iguais às utilizadas na aeronave em estudo, tomando-se alguns cuidados para garantir a transmissibilidade da vibração para a poltrona. A utilização de assentos das próprias aeronaves diminui a variação da postura das pessoas, além da melhor ambientação do jurado, que julgam os sinais de forma mais fidedigna a uma aeronave real.



Figura 6: Localização das poltronas da aeronave onde foram realizadas as medições de vibração.

Rakheja et al. (2006) afirma que o ângulo da postura exerce grande influência nos resultados dos ensaios. Neste caso o ângulo do assento não foi alterado durante todos os ensaios, e em todos os casos, os jurados foram instruídos a posicionarem-se de forma que mais lhes parecia confortável.

Para os ensaios havia a possibilidade da utilização de poltronas duplas e poltronas simples, sendo que a poltrona simples apresentava dimensões maiores, pois era utilizada na classe executiva em aeronaves comerciais. A Figura 7 mostra a poltrona dupla utilizada no simulador, e a Figura 8 mostra a poltrona simples utilizada no simulador.



Figura 7: Poltrona dupla utilizada no simulador.

A espuma que geralmente envolve a maioria das poltronas, junta-



Figura 8: Poltrona simples utilizada no simulador.

mente com o comportamento dinâmico das poltronas, gera uma função de transferência (ou função de transmissibilidade). Essa função de transferência deve ser considerada para a predição do conforto, caso a medição dos sinais seja feita no chão.

Sobre as características da poltrona, a função de transferência vertical, frontal, a vibração do encosto das costas com relação à espuma do assento alteram o conforto da vibração, segundo Griffin (1996). Além disso, altura e a inclinação da poltrona afetam a posição dos pés, o contato com o encosto das costas e a postura do corpo; estes fatores também afetam o conforto de vibração.

A posição dos braços nos encostos também altera o conforto com relação à vibração.

Em uma comparação entre os dois modelos de poltronas, Barboza (2009) constatou que a poltrona simples transmite mais vibrações para o tronco da pessoa do que a poltrona dupla, principalmente em baixas frequências.

Em outro estudo, Iturrieta (2009) realizou ensaios com jurados nas duas poltronas, e verificou que as pessoas se sentiram mais confortáveis em relação à vibrações na poltrona simples que utilizou sinal da região central da aeronave. Já a poltrona dupla foi avaliada como mais confortável quando o sinal de excitação utilizado foi da região

frontal da aeronave. Fato interessante é que, em uma configuração real de aeronave, a poltrona dupla é utilizada na parte central e a simples na parte frontal. E por último, para o sinal da parte traseira a avaliação de conforto não teve diferença significativa entre as duas poltronas.

O sistema de excitação utilizado no simulador tem por objetivo reproduzir com maior fidelidade possível os sinais gravados em voo em uma faixa de frequência específica, relativa à percepção humana à vibrações, que é de 5 a 200 Hz.

O excitador de vibração utilizado no simulador é o comercialmente *Buttkicker* modelo *Concert*, que possui potência de 1500 W (impedância de 2  $\Omega$ ) na faixa de frequência entre 5 e 200 Hz. Esse equipamento pode trabalhar em qualquer direção, apesar da possibilidade de apresentar comportamento diferente em relação à direção, e então foram instaladas um buttkicker para cada direção (vertical, frontal e lateral). A Figura 9 mostra o equipamento, e a Figura 10 mostra os equipamentos instalados no piso do simulador.



Figura 9: *Buttkicker Concert*.

Para amplificação dos sinais de vibração foram utilizados dois amplificadores, sendo um do mesmo fabricante do excitador *buttkicker* (*Guitammer Company*) modelo BKA-1000, que possui um canal e potência de 2100 W *r.m.s.* (trabalhando em 2  $\Omega$ ).

O outro amplificador de sinal utilizado no simulador de aeronaves foi o modelo MK-3.0 do fabricante *Mark Audio* com dois canais de saída e potência de 1500 W (trabalhando em 2  $\Omega$ ) em cada canal. A Figura 12 mostra o amplificador MK-3.0.

Além do sistema de excitação, o simulador também possui um





Figura 10: Disposição dos excitadores de vibração instalados.



Figura 11: Amplificador de potência BKA-1000.



Figura 12: Amplificador de potência MK-3.0.

sistema de medição de sinais de vibração, que tem como objetivo mensurar corretamente a aceleração do piso simultaneamente nas direções frontal, lateral e vertical, possibilitando assim um processamento em

tempo real dos sinais de excitação.

Para isso, dentre as várias possibilidades de acelerômetros que poderiam ser utilizados no simulador, foi escolhido um modelo triaxial tipo 4321 da Brüel & Kjær. Esse acelerômetro possui massa de 55 gramas e faixa de frequência de 0,1 Hz a 10 kHz. O local de instalação do acelerômetro foi o mesmo local de medição dos sinais em voo em relação à poltrona.

Com o sistema de excitação e medição instalados, Teixeira (2010) realizou ensaios em torno da linearidade do sistema. A Figura 13 mostra um dos resultados obtidos neste ensaio, para o eixo vertical e poltrona simples. Por meio desta figura, percebe-se que há regiões do gráfico onde a linearidade não é respeitada, acarretando assim em diferenças nos níveis de excitação de vibração e percepção por parte dos jurados. Com essa verificação, concluiu-se que era necessário desenvolver um sistema de controle de vibração para bandas de frequência, que resultaria em uma vibração mais fidedigna, e conseqüentemente em uma avaliação de conforto também mais fidedigna.

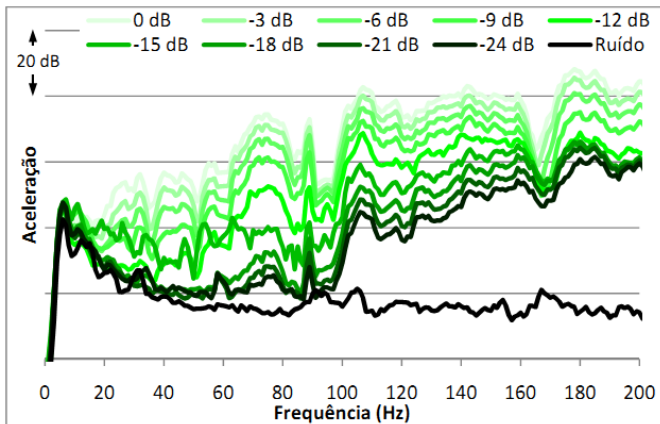


Figura 13: Reposta do piso no eixo  $z$  para excitação na mesma direção em diferentes níveis, com a configuração da poltrona simples (TEIXEIRA, 2010).

O sistema digital de controle de vibrações tem por objetivo ajustar a resposta do sistema vibrante para que fique o mais próximo possível das vibrações medidas em voo. O sistema utilizado no simulador foi desenvolvido em linguagem LabVIEW, da *National Instruments*.

Além do controle de vibrações, o software de execução do ensaio também realiza a excitação dos sinais, medição da vibração, aquisição das respostas subjetivas, bem como outros recursos disponíveis para os operadores na tela de controle e para os jurados disponíveis na tela de ensaio que fica dentro do simulador.

Para a comunicação do *software* com os outros equipamentos, utilizou-se um placa de comunicação marca RME modelo DSP 9652, ligada a um conversor digital/analógico marca RME modelo ADI-8 DS.

A placa de comunicação permite o envio de informações em 24 canais e recebimento de informações em mais 24 canais, simultaneamente. Já o conversor permite o trabalho com 8 canais de conversão para cada sentido de informação, ou seja, permite enviar 8 canais e receber 8 canais simultaneamente. A placa de comunicação possui resolução de 24 bits, e o conversor possui resolução máxima de 55,1 kHz, resoluções estas que são suficientes para o trabalho com os sinais de 2048 Hz gravados em voo.



Figura 14: Conversor digital/analógico utilizado no simulador.

Com o sistema digital de controle, é possível então realizar o controle das vibrações para cada mudança que pode ocorrer dentro do simulador, como até mesmo mudança significativa de peso entre os jurados. A Figura 15 mostra um exemplo de controle de vibração por compensação. Estimula-se o sistema com o sinal A, e verifica-se a resposta (sinal B). Com os sinais A e B, calcula-se um filtro e esse por sua vez, filtra o sinal A, gerando um novo sinal de excitação (sinal C). Excitando-se o sistema com o sinal C, teremos a forma de vibração que estava querendo excitar o sistema (sinal D).

Esse mesmo procedimento era possível ser aplicado no tratamento dos sinais de excitação do simulador, permitindo que os jurados avaliassem um sinal mais semelhante aos sinais gravados em voo, melhorando a fidedignidade das avaliações de limiar e conforto. Vale lembrar

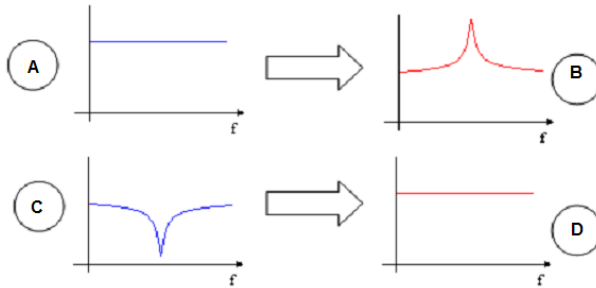


Figura 15: Exemplo de controle de vibração.

que esse controle foi utilizado apenas nos ensaios de conforto e de limiar de percepção.

Maiores detalhes sobre o simulador, bem como processamento dos sinais são encontrados em Teixeira (2010).

## 4 INFLUÊNCIA DO RUÍDO NA PERCEPÇÃO DE VIBRAÇÃO

### 4.1 INTRODUÇÃO

O interesse pela resposta humana à vibração é está crescendo, porém estudos relevantes mostram diferenças significativas entre os resultados, provavelmente devido a diferenças nos métodos de medição psicofísica utilizadas (GRIFFIN, 1996) e os locais onde os experimentos são realizados.

Medições sensação de vibração têm sido utilizados por várias décadas na área da saúde para identificar, localizar e categorizar lesões nervosas (Hubbard et al., 2004) e ultimamente elas têm sido associados com a percepção de conforto de veículos. No entanto, tem havido pouca informação sobre limites de percepção de vibração determinados para sinais de aeronaves, e não houve nenhuma investigação conhecida para determinar a influência da estimulação sonora sobre o limiar de percepção da vibração.

Dados os custos associados com a realização deste tipo de estudo em vôos real, o uso de um simulador de cabine (*mock-up*) fixo ao solo, capaz de reproduzir sinais de vibração registrado em um vôo real com confiabilidade, é recomendado.

O objetivo deste ensaio, é verificar a influência de um estímulo sonoro na aeronave e também a variação do limiar de percepção de vibração com e sem a presença estímulo sonoro.

### 4.2 METODOLOGIA

#### 4.2.1 Voluntários

Dez voluntários participaram do ensaio. A idade dos jurados estava compreendida entre 20 e 30 anos. Todos se declararam livres de doenças ou histórico de problemas de saúde relevantes. A postura foi normal, onde todos foram orientados a sentar-se de maneira confortável, apoiando toda a sola do pé no piso.

Os efeitos da idade, sexo, peso e tamanho no limiar de percepção de vibração não foram considerados neste estudo, mas de acordo com

(BARTLETT et al., 1998) e (INAMI; CHIBA; TOYAMA, 2005), pessoas com idade entre 20 e 30 anos não demonstraram grande diferença nos limites de percepção de vibração.

#### 4.2.2 Equipamentos e estímulos

O ensaio foi realizado no simulador de cabine (*mock-up*) do Laboratório de Vibrações e Acústica (LVA) da Universidade Federal de Santa Catarina (Figura 16)



Figura 16: Simulador de aeronaves (*mock-up*) da UFSC.

Sinais de ruído e vibração foram gravados durante um teste de voo usando um equipamento portátil. Os estímulos foram gravados em três pontos diferentes da aeronave (parte frontal, central e traseira) (Figura 17).

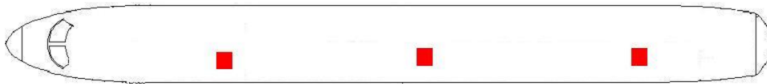


Figura 17: Localização das gravações dentro da aeronave.

Os sons foram reproduzidos usando um conversor digital-analógico programável, um equalizador da *Head Acoustics* com fones de ouvido tipo *Sennheiser* HD600. Vibrações no eixo vertical foram reproduzidos por meio de um vibrador eletrodinâmico (*Buttkicker*) que foi ligado a um computador portátil, um amplificador e uma placa

de comunicação,  $BK$ ) como é mostrado na Figura 18.

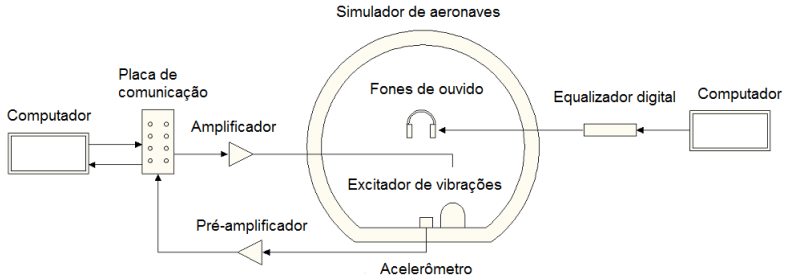


Figura 18: Configuração do experimento.

### 4.2.3 Procedimento

Para verificar a influência do ruído no limiar de percepção de vibração, o método dos limites proposto por (FECHNER, 1860) e posteriormente descrito por (GELFAND, 1998), foi adaptado. O experimento foi explicado para os 10 voluntários antes do ensaio, que foi dividido em duas etapas. Na primeira etapa o limiar de percepção de vibração foi determinado sem estímulo de som no fone, e na segunda etapa, o limiar de percepção de vibração foi determinado com a presença de ruído no fone.

Para observar se existia variação do limiar de percepção de vibração durante o ensaio, o limiar de percepção de vibração para o sinal gravado no assento frontal foi determinado duas vezes, sendo apresentado por primeiro e por último. Ou seja, o voluntário determinava o limiar de percepção de vibração para o sinal gravado no assento da frente, do meio, da traseira, e novamente para o sinal gravado no assento da frente.

Para a análise dos resultados foi utilizado o teste de Wilcoxon, que é um teste pareado e não paramétrico (MASSAD et al., 2004).

## 4.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.3.1 **Variação do limiar de percepção de vibração durante o ensaio**

A Figura 19 mostra a comparação dos limiares de percepção de vibração encontrados para todos os voluntários do sinal gravado no assento traseiro avaliados primeiro e por último, sem ruído. As linhas claras representam os resultados da primeira avaliação e as linhas escuras representam os resultados da última avaliação.

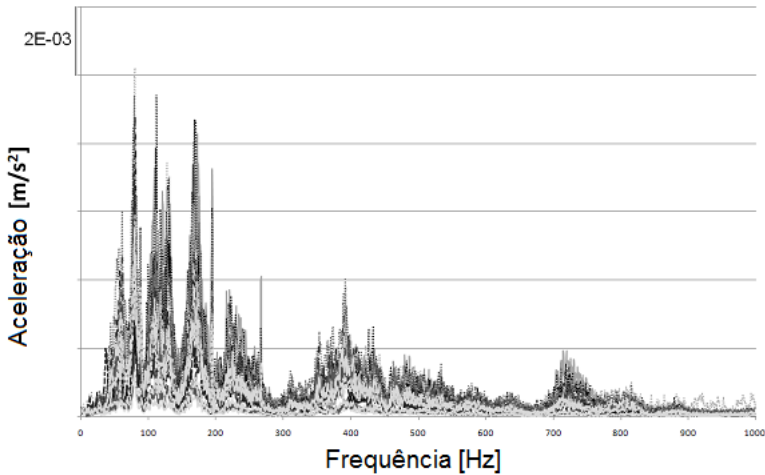


Figura 19: Limiar de percepção de vibração dos 10 voluntários apresentados primeiro e por último.

A análise estatística foi realizada para verificar se existia diferença significativa entre as respostas do início e do final do ensaio. As médias dos limiares de percepção de vibração são mostrados na Figura 20.

A análise estatística mostrou que não há diferença significativa entre os valores (Wilcoxon, 95% de significância), que apontam que a resposta do limiar de percepção de vibração não muda no decorrer do experimento. Os mesmos resultados foram encontrados nos ensaios com estímulo sonoro simultâneo no fone de ouvido.



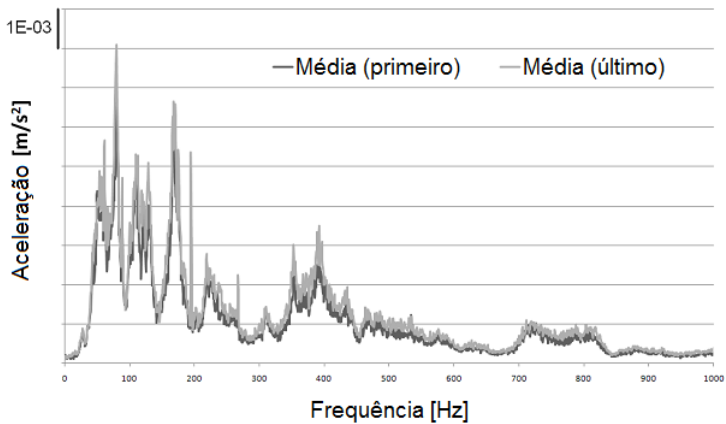


Figura 20: Média dos limiares de percepção de vibração dos voluntários para a primeira avaliação e a última avaliação.

### 4.3.2 Influência do som nos limiares de percepção de vibração

Os resultados dos limiares de percepção de vibração para o assento traseiro com e sem estímulo de som são mostrados na Figura 21. As linhas claras representam os resultados do ensaio com som e as linhas escuras sem som.

Os espectros mostram que há uma diferença nos valores de limiar de percepção de vibração com e sem ruído. As linhas claras que representam os resultados com o ensaio com ruído possuem maior amplitude. Para verificar se esta diferença é significativa, foi realizado uma análise estatística. As médias dos valores de limiar de percepção de vibração com e sem ruído para o assento traseiro são mostrados na Figura 22.

A análise estatística mostrou que há diferença significativa (Wilcoxon, 95% de significância), que revela que a resposta para os limiares de percepção de vibração muda com o estímulo sonoro no fone de ouvido. O mesmo resultado foi encontrado para os sinais gravados nas partes frontal e central da aeronave (Figuras 23 e 24). Os resultados encontrados estão de acordo com o que afirma (GRIFFIN, 1996) que afirma que as pessoas ouvem a vibração antes de senti-la.

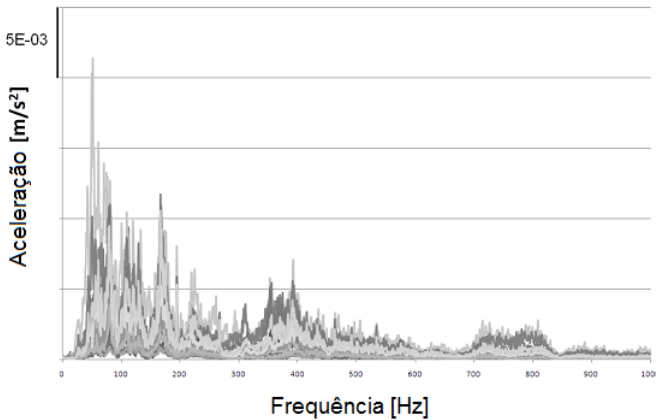


Figura 21: Limiares de percepção de vibração de todos os voluntários para avaliação com e sem ruído.

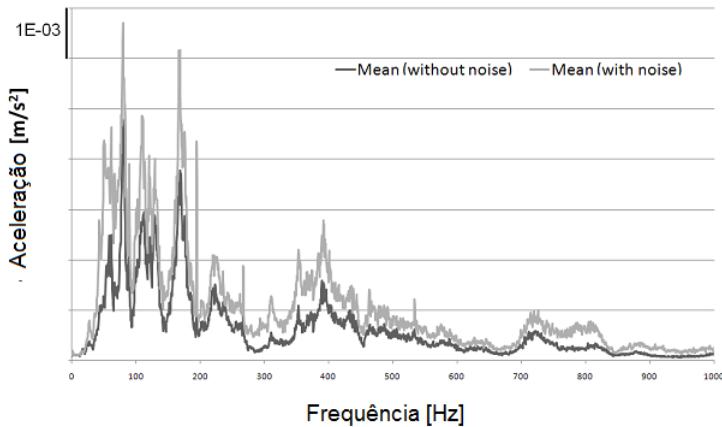


Figura 22: Médias dos valores de limiar de percepção de vibração com e sem ruído para o sinal gravado na parte traseira da aeronave.

#### 4.4 CONCLUSÕES

A partir dos resultados encontrados nos ensaios é possível afirmar que a resposta dos voluntários sobre o limiar de percepção de vibração não mudaram no decorrer do ensaio e que o som afeta esse limiar, diminuindo a percepção quando o estímulo está presente no mo-

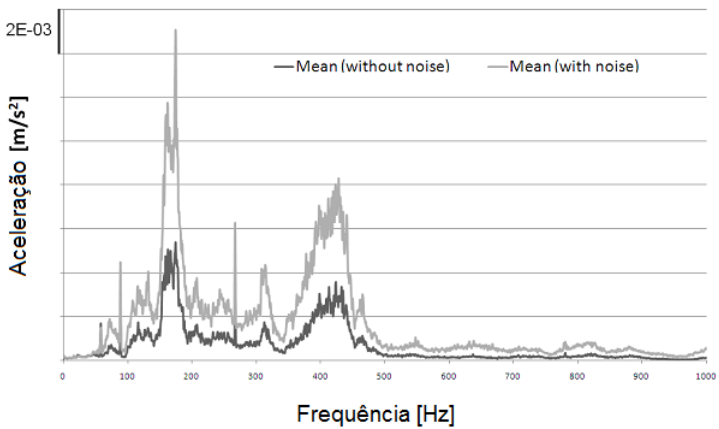


Figura 23: Médias dos valores de limiar de percepção de vibração com e sem ruído para o sinal gravado na parte central da aeronave.

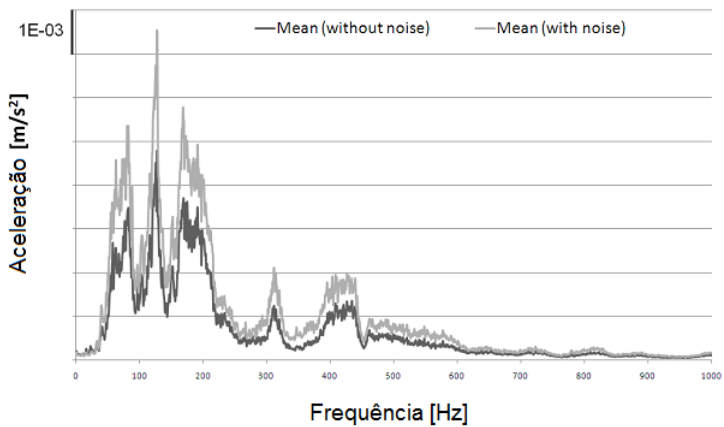


Figura 24: Médias dos valores de limiar de percepção de vibração com e sem ruído para o sinal gravado na parte frontal da aeronave.

mento do ensaio. A avaliação do limiar de percepção de vibração é importante para os ensaios futuros de percepção de conforto em cabine de aeronave, servindo como guia para esses futuros ensaios, onde se faz necessário estudos que levam em conta os efeitos combinados de percepção e vibração.



## 5 DIFERENÇA DE LIMIAR

O limiar de percepção e a diferença de limiar para vibração são parâmetros que dependem de muitos aspectos e, por isso, divergem muito nos estudos onde foram determinados. A diferença de limiar é a mínima mudança no nível de vibração que é percebida pelas pessoas. Esses parâmetros sofrem muitas influências e que podem ser controláveis ou incontroláveis, e quando controláveis podem ser fixas ou variáveis.

As influências que não podem ser controladas podem ser exemplificadas pelas características intrínsecas a cada pessoa, como expectativa, estado emocional, e outros.

As influências que podem ser controladas e que são fixas, ou seja, não mudam no decorrer do ensaio são: método de obtenção de respostas subjetivas, posição da pessoa (em pé, sentado), poltrona, entre outros. As influências que são controladas e podem variar durante o ensaio são sinal de excitação, amplitude do sinal, entre outros.

Como um dos objetivos do trabalho, é determinar uma matriz de ensaio onde as características que influenciam o conforto global da aeronave devem ser variadas, há a necessidade de determinar o nível de diferença de limiar vibratório para sinais típicos de aeronaves.

Sendo assim, somente através de um ensaio de limiar de percepção estimulados com sinais semelhantes aos sinais que serão utilizados no ensaio de conforto, podemos garantir que todos os sinais serão avaliados no ensaio de conforto e suas diferenças serão sentidas pelos jurados.

Neste capítulo serão apresentados a metodologia e resultados do ensaio de diferença de limiar de vibração.

### 5.1 METODOLOGIA

Para o ensaio de diferença de limiar foi utilizado o simulador de aeronaves da UFSC (Figura 25) que possui estrutura semelhante à de um avião, e poltrona de avião, para que a função transferência da poltrona seja a mesma para o ensaio de limiar, e para os outros ensaios (diferença de limiar e conforto vibratório).

Primeiramente, realizou-se um ensaio com apenas um integrante do projeto, com o intuito de determinar os valores dos deltas iniciais



Figura 25: Simulador de aeronaves da UFSC.

para o ensaio. Com esse, foi definido com o restante do grupo que seriam utilizados 10 níveis diferentes para comparação com um sinal denominado referência, que possuía espectro de frequência semelhante ao encontrado em sinais gravados dentro da aeronave. Os níveis utilizados para a comparação, em relação a referência (0 dB) foram: -5, -4, -3, -2, -1, +1, +2, +3, +4 e +5 dB. A referência é um sinal gravado em um voo real de uma aeronave comercial, com amostragem de 2048 Hz nos três eixos ortogonais.

Os ensaios foram realizados em um simulador de aeronave capaz de reproduzir sinais controlados de som e vibração com fidedignidade.

Para facilitar e padronizar a realização dos ensaios e diferença de limiar de percepção de vibração desenvolveu-se um software capaz de reproduzir vibração em três eixos ( $x$ ,  $y$  e  $z$ ) e ruído simultaneamente.

Para o ensaio de diferença de limiar, o jurado era submetido a vibração e ao ruído de uma determinada poltrona da aeronave. Neste caso, foi utilizado um sinal gravado na parte frontal de uma aeronave média.

O método subjetivo utilizado foi comparação pareada de similaridade. O método de comparação pareada geralmente se refere a qualquer processo de comparar unidades aos pares, para o julgamento baseado em algum critério, como por exemplo, qual é preferido ou qual apresenta certa característica (LEITE, 2006). A Figura 26 apresenta como funciona a interface entre o usuário e software desenvolvido para o ensaio.

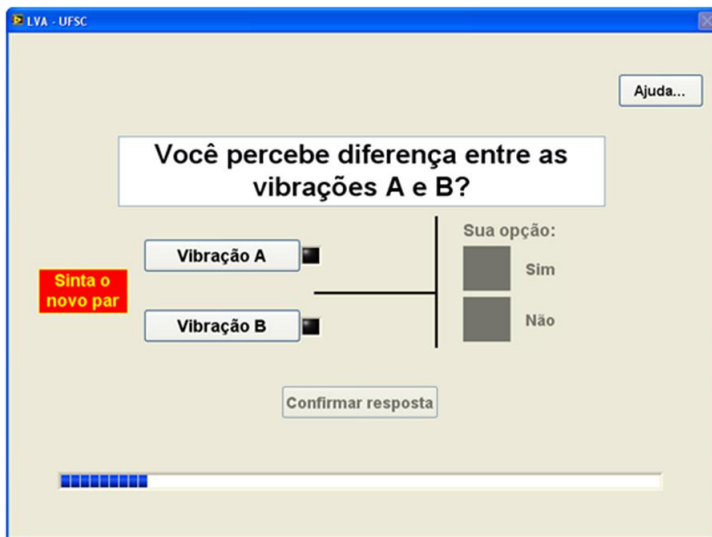


Figura 26: Tela do software do ensaio de diferença de limiar.

Para este ensaio, foi calculado um novo sinal considerando a função transferência do sistema vibrante, garantindo assim uma maior semelhança entre o sinal avaliado pelos jurados e o sinal medido em voo. Através deste sinal filtrado foram calculados os valores de amplificação e atenuação. Esse processo foi realizado através de rotinas desenvolvidas LavVIEW®.

Após uma análise dos resultados preliminares, que mostraram uma possível nível de diferença de limiar menor que 1 dB, foram inseridos mais dois níveis para comparação:  $-0,5$  e  $+0,5$  dB.

Para fins de organização, definiu-se a primeira fase do ensaio como sendo os resultados encontrados antes da análise preliminar (antes da inserção dos níveis de  $-0,5$  dB e  $0,5$  dB) e segunda etapa como após a análise preliminar.

Foi realizada ainda uma terceira etapa, onde os níveis foram comparados todos entre si, e como nesta etapa houve um grande número de combinações (todos os estímulos comparados com todos) somente jurados envolvidos de alguma forma com a pesquisa participaram desta etapa. Isso porque o tempo de ensaio era muito grande, e pessoas que não tinham nenhuma ligação com a pesquisa poderiam responder

qualquer coisa para que o ensaio terminasse logo. Realizando o ensaio somente com pessoas ligadas à pesquisa, as respostas são mais confiáveis em um tempo de ensaio tão grande. Pelo mesmo motivo, também foram excluídos os níveis -5 e 5 dB (extremos) para reduzir a tarefa associada e o tempo do ensaio.

## 5.2 RESULTADOS

### 5.2.1 Caracterização da amostra

#### 5.2.1.1 Primeira e segunda etapa

Para o ensaio de diferença de limiar participaram 64 pessoas, onde 45 são do sexo masculino e 19 do sexo feminino. Das 64 pessoas, a primeira etapa foi constituída de 43 jurados, enquanto que a segunda etapa de 21 jurados. A divisão por etapas ocorreu, depois de uma análise preliminar dos resultados, constatou-se a necessidade de mais uma divisão de valores de limiar (0,5 dB de diferença entre os sinais).

A idade dos jurados está compreendida entre a faixa de 18 a 49 anos (média 23,1 anos e desvio padrão de 4,89 anos). Desses, 53 já tinham viajado de avião e 11 não. Porém, somente 28 haviam viajado nos últimos 12 meses, e o gráfico com a distribuição da quantidade de viagens nos últimos 12 meses dos jurados é demonstrado na Figura 27.

Dos jurados que já haviam viajado de avião, 30 afirmaram ser indiferentes da vibração da aeronave, 9 sentem-se incomodados pela vibração e 14 não se sentem incomodados com a vibração da aeronave.

#### 5.2.1.2 Terceira etapa

Na terceira etapa, apenas 11 jurados participaram do ensaio, por se tratar de um grupo limitado a pessoas ligadas de alguma forma ao projeto de pesquisa, sendo 8 do sexo masculino e 3 do sexo feminino.

A idade dos jurados está compreendida na faixa de 18 a 29 anos (média de 24,09 anos e desvio padrão de 3,75 anos). Desses, 10 já viajaram de avião. Porém 7 dos jurados não haviam viajado nos 12 meses que antecediam o ensaio, conforme distribuição mostrada na Figura 28.



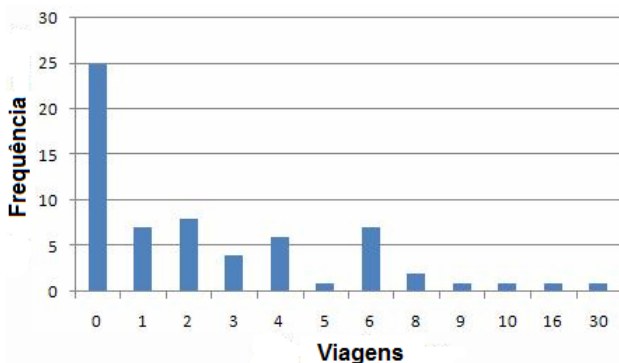


Figura 27: Distribuição do número de viagens nos últimos 12 meses dos participantes do ensaio de diferença de limiar (primeira e segunda etapas)

### 5.2.2 Resultados primeira etapa

Na primeira etapa, conforme definido acima, estão incluídos somente as avaliações dos 43 jurados da primeira etapa. Os resultados encontrados nesta etapa estão demonstrados na Tabela 1.

Tabela 1: Resultado da primeira etapa do ensaio.

Nível de vibração (dB)	-5	-4	-3	-2	-1
Sentiram diferença	100%	98%	93%	72%	37%
Não sentiram diferença	0%	2%	7%	28%	63%
Nível de vibração (dB)	1	2	3	4	5
Sentiram diferença	53%	84%	98%	100%	100%
Não sentiram diferença	47%	16%	2%	0%	0%

Por meio da Tabela 1 percebe-se uma diferença entre os resultados encontrados para os valores positivos dos níveis com relação aos negativos. Para os valores de amplificação positivos a diferença de limiar é menor que 1 dB, considerando que a diferença de limiar consiste de 50% da opinião das pessoas. Já para os níveis negativos, o limiar esta compreendido entre a faixa de -2 a -1 dB. Devido a esses resultados foram incluídos os níveis de -0,5 dB e 0,5 dB para verificar se esta diferença era percebida pelos voluntários.

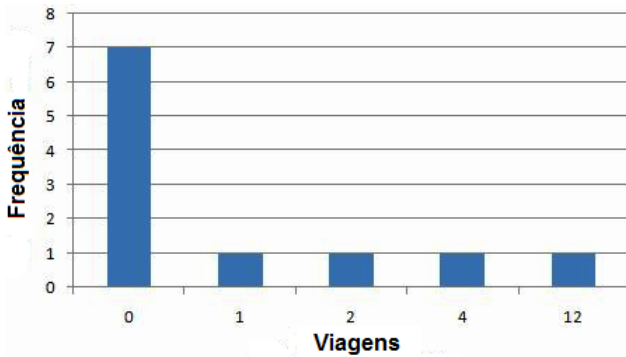


Figura 28: Distribuição do número de viagens dos participantes nos ensaios da terceira etapa.

### 5.2.3 Resultados segunda etapa

Na segunda etapa, conforme definido acima, estão incluídos somente as avaliações de 21 jurados, nas quais os níveis de  $-0,5$  e  $+0,5dB$  foram considerados. Esses níveis foram incluídos, depois da análise preliminar dos resultados, que demonstrou a necessidade de utilizar diferenças menores entre os sinais de vibração. Os resultados encontrados nesta etapa estão demonstrados na Tabela 2.

Tabela 2: Resultado da segunda etapa do ensaio.

Nível de vibração (dB)	-5	-4	-3	-2	-1	-0,5
Sentiram diferença	86%	90%	81%	76%	43%	19%
Não sentiram diferença	14%	10%	19%	24%	57%	81%
Nível de vibração (dB)	0,5	1	2	3	4	5
Sentiram diferença	19%	67%	90%	100%	100%	100%
Não sentiram diferença	81%	33%	10%	0%	0%	0%

Com a Tabela 2 também percebe-se diferença entre os resultados encontrados para os valores positivos dos níveis com relação aos negativos. Apesar da diferença entre os valores dos votos, os valores de diferença de limiar positivo também está na faixa menor que 1 dB (entre 0,5 e 1 dB) e para os níveis negativos também se encontra na faixa entre -1 e -2 dB.

Para fins de comparação, a Tabela 3 mostra os resultados dos votos dos voluntários que já haviam viajado de avião e dos que não viajaram de avião. Os valores correspondem à porcentagem de pessoas que sentiram diferença entre os estímulos. Apesar da diferença entre os valores encontrados, os limiares (nível em que 50% das pessoas sentem diferença) são iguais. Além disso, pode-se perceber que não existe uma tendência de diferença, o que sugere que as diferenças encontradas são aleatórias.

Tabela 3: Comparação entre os resultados dos jurados que viajaram de avião e que não viajaram, que participaram da segunda etapa do ensaio.

Nível de vibração (dB)	-5	-4	-3	-2	-1	-0,5
Já viajaram (53)	94%	96%	91%	70%	38%	6%
Não viajaram (11)	100%	91%	82%	91%	45%	9%
Nível de vibração (dB)	0,5	1	2	3	4	5
Já viajaram (53)	6%	58%	85%	98%	100%	100%
Não viajaram (11)	9%	55%	91%	100%	100%	100%

### 5.2.4 Resultados da terceira etapa

A terceira etapa, conforme definido acima, participaram apenas pessoas que possuíam ligação com o grupo de pesquisa, totalizando 11 avaliações. Isso se fez necessário devido à complexidade da tarefa

associada (55 pares para comparar) ao tempo longo de ensaio, que inviabiliza a participação de pessoas que não estejam comprometidas com o projeto (júri especializado). Devido também ao tempo de ensaio, foram retirados os níveis extremos  $5\text{ dB}$  e  $-5\text{ dB}$ , fazendo com que o ensaio ficasse mais curto. Nesse ensaio todos os estímulos foram comparados com todos. O resultado é mostrado na Tabela 4.

Tabela 4: Freqüência de respostas dos jurados que julgaram diferentes os sinais na terceira etapa dos ensaios (NV - nível de vibração).

NV (dB)	-4	-3	-2	-1	-0,5	Ref
-3	18%	-				
-2	9%	18%	-			
-1	91%	55%	36%	-		
-0,5	91%	91%	82%	45%	-	
Ref	91%	82%	64%	27%	9%	-
0,5	91%	82%	82%	18%	27%	9%
1	91%	100%	82%	55%	45%	64%
2	100%	100%	100%	91%	73%	100%
3	100%	91%	91%	100%	91%	100%
4	100%	100%	100%	100%	100%	100%
NV (dB)	0,5	1	2	3		
1	36%	-				
2	73%	55%	-			
3	82%	91%	73%	-		
4	91%	100%	100%	82%		

Como pode ser visto na Tabela 4, trata-se de uma matriz simétrica em relação à sua diagonal principal. Isso se deve ao fato que a comparação foi realizada somente uma vez, ou seja, a combinação  $-1\text{dB}$  foi comparado com  $4\text{dB}$ , mas a combinação  $4\text{ dB}$  comparado a  $-1\text{ dB}$  não foi feita.

As variações dos valores de percepção encontrados para mesmas diferenças de nível de vibração podem ser explicadas pela Figura 13, onde pode-se verificar a vibração medida no piso para vários sinais de vibração amplificados. Por meio desta figura, é possível perceber que há pequenas distorções nos sinais em regiões pontuais, principalmente nas regiões entre  $80$  e  $100\text{ Hz}$ , e entre  $160$  e  $180\text{ Hz}$ . Nessas regiões, os níveis

de vibração são mais próximos, não mantendo a diferença buscada no ensaio. Essa não linearidade pode influenciar nas respostas dos jurados, fazendo com que diferenças de níveis semelhantes entre os sinais, não são avaliadas da mesma forma pelos jurados.

### 5.3 CONCLUSÃO

Com relação à amostra conter pessoas que já viajaram de avião e de pessoas que não viajaram, conclui-se que os resultados das pessoas que não viajaram não influenciaram no resultado total, uma vez que não foi observada diferença.

Através dos resultados apresentados nas três etapas, conclui-se que a diferença de limiar de percepção da vibração para o sinal utilizado está em torno de 1 dB (ponto onde 50% das pessoas notaram diferença). Contudo, para que a maioria (mais que 90%) das pessoas percebam a diferença entre as vibrações foi constatado uma diferença mínima de 3 dB. Através desta constatação, sugeriu-se a utilização de um nível de no mínimo 3 dB de diferença entre os níveis de vibração dos sinais na execução do ensaio de limiar absoluto e conforto de vibração.

A diferença verificada para as comparações positivas e negativas está associada a não linearidades do sistema de excitação onde o ensaio foi executado. Com isso, sugeriu-se a realização de medições de vibração no piso do simulador, para quantificação exata dos sinais que os jurados avaliaram nos ensaios que seguiam.



## 6 LIMIAR DE PERCEPÇÃO

O limiar de percepção pode ser considerado como o limite de amplitude da vibração em que as pessoas sentem a vibração.

Para o limiar de percepção servem as mesmas considerações já feitas para a diferença de limiar.

Na literatura existem muitos trabalhos que determinaram os limites de vibração para vários tipos de sinais e com diversos tipos de estrutura para aplicação de vibração (MANSFIELD; GRIFFIN, 2000a) (BELLMAN; REMMERS, 2003) (BELLMAN et al., 2000) (BELLMAN, 1972) (MATSUMOTO; MAEDA; OJI, 2002). Os mais comuns são trabalhos que determinaram os limites utilizando sinais do tipo senoidal, variando ou não a frequência. Mas é de conhecimento geral que, quando as excitações encontradas no cotidiano das pessoas ocorrem por estímulos diferentes de senóides (tons), a percepção da vibração muda, e sabe-se pouco de como essa mudança acontece.

Como um dos objetivos do trabalho é determinar uma matriz de ensaio onde as características que influenciam o conforto global da aeronave devem ser variadas, há a necessidade de determinar o nível de limiar vibratório mínimo para sinais típicos de aeronaves. Somente através deste modo será possível afirmar que o nível de vibração julgado pelas pessoas são sentidos por todos os jurados.

O objetivo deste capítulo é apresentar a metodologia e os resultados do ensaio de limiar de percepção de vibração.

### 6.1 METODOLOGIA

Para o ensaio de limiar de percepção de vibração foi utilizado o simulador da UFSC (Figura 25), com configurações muito semelhantes às do ensaio de diferença de limiar. A grande diferença foi a utilização de um sistema de aquisição de dados, que media a vibração indicada como limiar pelo jurado.

Para o ensaio de determinação do limiar de percepção de vibração foi utilizado o simulador de aeronaves da UFSC (Figura 25) que apresenta forma semelhante a uma aeronave. Esse simulador ainda possui sistemas de excitação de vibração e ruído fidedignos, capazes de reproduzir sinais gravados em voo. Para este ensaio o mock-up foi equipado com uma poltrona de aeronave.

Neste ensaio foi utilizado o método dos limites. No método dos limites, apresenta-se ao jurado um sinal vibratório em uma interface pré-determinada pelo experimentador, o indivíduo responde "sim" sempre que perceber a vibração ou não se não sentir a vibração. Séries ascendentes e descendentes são apresentadas de forma alternada. Na série ascendente o estímulo começa abaixo do suposto limiar de percepção e é aumentada nas sucessivas apresentações de vibração. Ao contrário, na série descendente o nível de vibração inicia-se acima do suposto limiar e vai decaindo a cada apresentação do estímulo. Há sempre uma transição de série a cada resposta "sim" na série ascendente e "não" na série descendente. A diferença entre os níveis das vibrações decai constantemente em cada série e a cada troca de série o delta diminui, segundo Katz (1966).

O limiar da percepção é calculado pela última troca na última série, terminando com a resposta "sim". Ao júri é apresentada interface mostrada na Figura 29

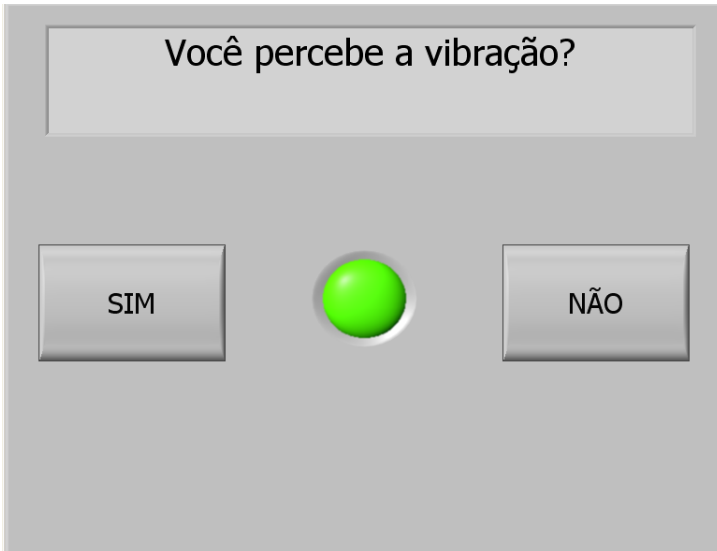


Figura 29: Tela do software do ensaio de limiar de percepção.

Neste ensaio foram utilizados três sinais correspondentes a gravações na parte frontal, central e traseira da aeronave. Estes sinais possuem frequência de amostragem de 2048 Hz e tempo de aproximadamente de 30 segundos (em média). Para estes sinais, o primeiro



estímulo corresponde aos valores medidos em voo mais 6 dB. Sempre que o jurado respondia que estava sentindo a vibração este diminuía 3 dB, até que a resposta era não, e o estímulo passava a ser aumentado em 1,5 dB e quando novamente a resposta era sim, o estímulo era diminuído em 0,75 dB até que a resposta novamente era "não". Depois disso, o sinal era aumentado novamente em 0,75dB até nova respostas "sim", e diminuindo novamente 0,75dB até nova resposta "não", para a confirmação do resultado.

O resultado do limiar de percepção é considerado o nível mínimo que o jurado sente na etapa ascendente, e quando confirmado o mesmo nível, por duas vezes.

Os valores em decibéis mostrados nas tabelas da seção resultados foram calculados através da seguinte equação:

$$V_{dB} = 20 \log \left( \frac{V_{ms^{-2}r.m.s.}}{10^{-6}} \right) \quad (1)$$

Para facilitar uma comparação com os níveis gravados em voo, a Tabela 5 mostra os níveis calculados através da Equação 1.

Tabela 5: Níveis globais de vibração (dB) dos sinais gravados em voo.

Posição	Nível de vibração (dB)
D	127,72
B	143,97
C	139,96
Sen	127,77

onde o sinal D corresponde a um sinal gravado na parte frontal da aeronave, o sinal B na parte central, e o sinal C na parte traseira. Vale lembrar que o sinal Sen equivale a um sinal senoidal de 120Hz, que foi utilizado para comparação com os outros sinais, já que geralmente os resultados da literatura utilizavam estímulos de vibração com tons únicos (senóides).

## 6.2 RESULTADOS

### 6.2.1 Caracterização da amostra

Para o ensaio de limiar de percepção de vibração participaram 53 pessoas, onde 42 eram do sexo masculino e 11 do sexo feminino.

As idades dos jurados estão compreendidas na faixa de 18 a 32 anos (média de 23,9 anos e desvio padrão de 3,47 anos). Desses, 49 já tinham viajado de avião e 4 não. Porém, somente 17 haviam viajado nos últimos 12 meses, e o gráfico com a distribuição da quantidade de viagens nos últimos 12 meses dos jurados é demonstrado na Figura 30.

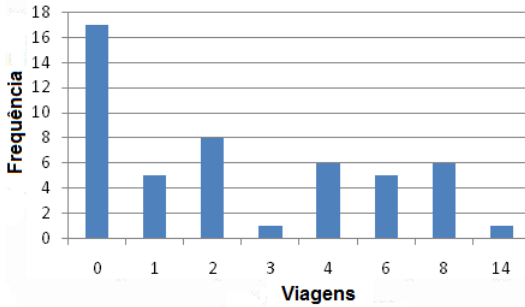


Figura 30: Distribuição do número de viagens nos últimos 12 meses dos participantes do ensaio de limiar de percepção.

### 6.2.2 Resultados do ensaio

Os resultados do ensaio de limiar de percepção de vibração são apresentados na Tabela 6, na qual podem ser visualizadas as medianas, os valores máximos e mínimos de percepção do nícnwl de limiar em nível de vibração ( $m/s^{-2}r.m.s.$ ) para os sinais de três poltronas e visualizados na Figura 31, que mostra um gráfico de caixa com as respostas dos jurados.

Os resultados mostram que houve diferença nos valores de percepção do limiar para sinais diferentes, já que o nível global do limiar varia significativamente em cada sinal de estímulo. Com a Tabela 6 observa-se que a dispersão de percepção do limiar para o sinal B é

maior do que para os sinais D e C.

Tabela 6: Resultados dos níveis de vibração da primeira etapa do ensaio de limiar de percepção.

	Nível de vibração (dB)		
	D	B	C
Mediana	124,0	137,2	131,7
Máximo	136,7	155,2	149,7
Mínimo	102,2	111,7	106,2

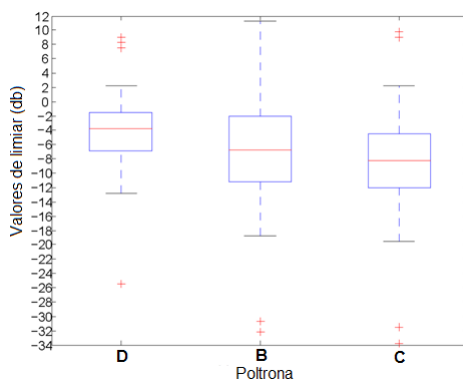


Figura 31: Resultado ensaio de limiar de percepção para cada posição da poltrona (diferença em dB).

A Tabela 7 apresenta os resultados de nível de vibração obtidos quando os "outliers" são excluídos da base de dados. Os "outliers" são considerados os valores que são fora de padrão e que possuem alta dispersão. Geralmente, esse tipo de comportamento é associado a algum fator externo que influenciou o ensaio.

Com os gráficos e tabelas dos resultados, é possível perceber que para a parte da frente da aeronave (poltrona D), que possui menor nível absoluto, os valores de limiar indicados pelos jurados possuem níveis maiores.

Ainda pode-se perceber que o sinal B (localização central da aeronave) possuiu maior dispersão nos votos dos jurados.

Tabela 7: Resultados do ensaio de limiar de percepção excluindo os *outliers*.

	Nível de vibração (dB)		
	D	B	C
Mediana	-3,75	-6,75	-8,25
Máximo	7,5	11,25	9,75
Mínimo	-12,75	-18,75	-19,5

### 6.3 ANÁLISE SUGERIDA PELA ISO 2631/1997

Com a dispersão nos resultados, foram aplicadas as ponderações sugeridas pela norma ISO 2631-1 (1997), que sugere um índice ponderado, ou seja, um único valor ponderado por pesos que variam de acordo com a faixa de frequência, para sensação de vibração com sinais complexos.

O objetivo desta seção é comparar os resultados da pesquisa do limiar de percepção de vibração realizada em um simulador de aeronave, com três sinais de voo, frontal, meio e traseira da aeronave e um sinal senoidal com a norma (2631-1, 1997) e descrever os procedimentos realizados para se obterem tais resultados.

No ensaio de limiar de percepção de vibração, foram gravados espectros dos níveis descritos pelos voluntários como sendo do limiar de percepção de vibração, ou seja, o menor nível perceptível de vibração.

A Norma ISO (2631-1, 1997) (*Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration*) define métodos de quantificação da vibração em relação à saúde, conforto e da percepção.

A parte 1 (*General requirements*) define os métodos de medições de vibrações e indica os principais fatores que, combinados, determinam a gravidade da vibração.

Para a percepção, a norma define que o vetor  $a_v$  (metodologia de cálculo demonstrado no decorrer do capítulo) possui valor entre 0,010 e 0,015  $m/s^2$  pico, e a faixa aceitável está compreendida entre 0,010 e 0,020  $m/s^2$  pico, devido à grande variação de sensibilidade dos indivíduos.

### 6.3.1 Metodologia

#### 6.3.1.1 Metodologia descrita pela norma

Para o cálculo do parâmetro  $a_v$  para percepção, a Norma ISO(2631-1, 1997) define os seguintes passos:

1. Os eixos de coordenadas ortogonais são definidos conforme Figura 1 da norma, reproduzida na Figura 32.

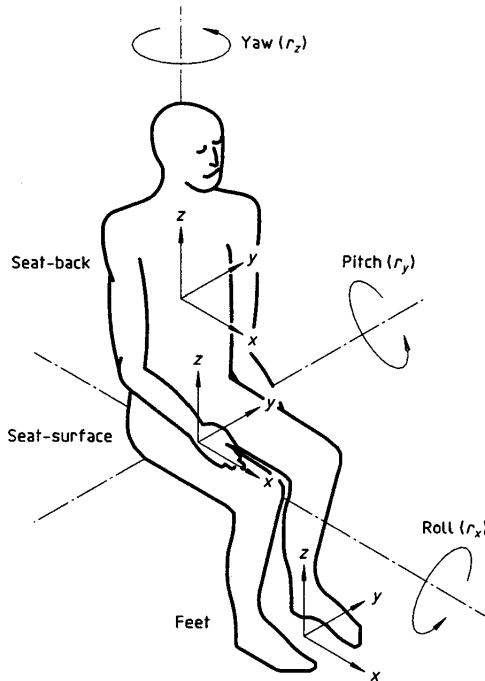


Figura 32: Definição da direção dos eixos ortogonais (2631-1, 1997).

2. Os transdutores devem ser posicionados entre as principais superfícies que podem ser fontes de transmissão de vibração para o corpo. Caso isso não seja possível, os acelerômetros devem ser posicionados em locais rígidos da estrutura ligados ao centro de rotação ou ao centro de gravidade. A avaliação desses dados

requer conhecimentos em torno do comportamento dinâmico da estrutura vibrante.

3. A vibração dever ser medida em banda de 1/3 de oitava, com duração suficiente para avaliações estatísticas precisas e deve garantir uma amostra típica do sinal que está sendo avaliado.
4. A partir disso, aplica-se o método dos pesos das frequências (*Frequency weighting*), que nada mais é que a multiplicação dos valores de vibração em bandas, por vetores definidos pela norma.
5. As Tabelas 3 e 4 da norma determinam os valores dos pesos ( $w$ ) para cada banda de 1/3 de oitava e para cada sinal avaliado.
6. Para o caso de percepção, o vetor  $w_k$  deve ser usado para a vibração da superfície do assento, e para pessoas em pé. Já o vetor  $w_d$  pode ser usado para os eixos x e y para ensaios sentados e em pé.
7. Com o sinal em banda de 1/3 de oitava, e os pesos das Tabelas 3 e 4 da norma, aplica-se a equação:

$$a_w = [\sum (w_i \cdot a_i)]^{1/2}, \quad (2)$$

onde  $a_w$  é a aceleração resultante depois da aplicação dos pesos. Os pesos  $w_i$  são provenientes das Tabelas 3 e 4. O valor  $a_i$  é a aceleração em *r.m.s.* referente à  $i$ -ésima banda do sinal em 1/3 de oitava.

8. Para o caso de percepção, o valor  $a_w$  é o valor final de avaliação,  $a_v$ .
9. Para sinais de percepção de vibração, somente o maior valor  $a_v$  é utilizado.

### 6.3.1.2 Metodologia utilizada no ensaio

O ensaio foi realizado no Mock-up da Universidade Federal de Santa Catarina. Neste ensaio os voluntários determinavam qual era o nível de limiar para quatro sinais de vibração diferentes (denominados D, B, C e seno).

Os sinais foram gravados pelo *software* desenvolvido em LabVIEW após a finalização do ensaio pelos voluntários, caracterizando assim o limiar de percepção da vibração. O tempo de medição foi aproximadamente 8 segundos, e o sinal abrangeu as frequências compreendidas entre 0 e 1022 Hz, com discretização de 1 Hz.

O local de medição foi um ponto logo à frente do pé do assento, local próximo aos trilhos de fixação dos assentos nas aeronaves. A medição nesta posição foi realizada pois, como o assento é estofado, a interface pés e chão do mock-up era a maior fonte de vibração. Esta posição também foi escolhida para padronizar e comparar com os sinais em voo que também foram gravados neste local.

De posse dos espectros, foram calculados em dados de banda de 1/3 de oitava para a aplicação dos pesos estipulados pela norma. Essa transformação foi realizada através de uma rotina executada no *software* Matlab.

Com isso, os pesos das Tabelas 3 e 4 da norma foram aplicados no espectro em banda de 1/3 de oitava, conforme o somatório demonstrado na equação do sub-capítulo anterior. Vale lembrar que os pesos da norma só possuem valores até 400 Hz, sendo que a parte do espectro referente a bandas maiores que 400 Hz foi descartada.

Todos esses procedimentos foram realizados para os 4 sinais executados no ensaio.

Vale lembrar que, por diversos fatores, alguns procedimentos não foram realizados conforme sugere a norma. Essas diferenças são listadas a seguir:

- apenas um acelerômetro triaxial (tipo 4321 da Brüel & Kjær) foi utilizado para a coleta dos dados de vibração, em apenas uma das superfícies de contato do corpo, desprezando as outras superfícies (glúteos, costas, braços), etc;
- o sinal de aceleração não foi coletado próximo ao corpo, e não na interface entre a estrutura e o corpo como recomenda a norma, e tampouco foram consideradas as características dinâmicas da estrutura para compensação;
- as vibrações foram gravadas em espectros (resolução de 1 Hz) e não em bandas de terço de oitava como recomenda a norma. Devido a isso, foi realizada uma transformação nos sinais, via *software* específico, que acarreta em perda de qualidade para as

frequências mais baixas, e pode gerar discrepâncias nos resultados do cálculo do  $a_v$ ;

- os valores dos vetores de ponderação utilizados foram considerados para pessoas em pé e não sentadas. Essa manobra teve que ser adotada, porque mesmo estando sentadas, a principal fonte de transmissão de vibração do sistema para o corpo dos jurados era através dos pés.

### 6.3.2 Resultados

Os resultados de  $a_v$  encontrados para os quatro sinais utilizados no ensaio estão demonstrados na Tabela 8.

Tabela 8: Resultado aplicação da norma nos sinais de limiar gravados no ensaio.

Sinal	$a_v[m/s^2]$			
	D	B	C	Sen
Mediana	0,010	0,008	0,009	0,010
Máximo	0,093	0,156	0,105	0,167
Mínimo	0,005	0,005	0,004	0,005
Média	0,014	0,016	0,018	0,019
Desv. Pad	0,016	0,028	0,022	0,031

Considerando que para a percepção, a norma (2631-1, 1997) define que o vetor  $a_v$  possui valor entre 0,010 e 0,015  $m/s^2$  pico, e a faixa aceitável está compreendida entre 0,010 e 0,020  $m/s^2$  pico, os resultados obtidos encontram-se dentro do esperado pela norma.

Outro ponto que deve ser considerado é a proximidade das medianas que são atribuídas à eficiência dos vetores de ponderação propostos pela norma.

Vale lembrar que para o sinal seno (120 Hz), os multiplicadores de ponderação foram aplicados para toda a faixa de frequência do sinal medido, e não somente para a banda centrada em 120 Hz.

Outro ponto a considerar, é que a norma se mostra confusa, calculando todos os parâmetros em  $m/s^2 r.m.s.$  e comparando os resultados com  $m/s^2$  pico.

Os resultados também mostraram relações entre frequência de vi-



bração e respostas subjetivas em frequências maiores que  $400\text{Hz}$ . Essa relação foi demonstrada na simulação dos dados, contrariando o que sugere a norma. Em frequências maiores que  $8\text{kHz}$  não foram encontradas relações entre as os níveis de vibração com as respostas subjetivas dos jurados.

## 6.4 CONCLUSÕES

Para os valores absolutos de limiar de percepção, percebe-se que para os sinais que possuem maior magnitude, os valores encontrados para o limiar foram menores, e sinal com magnitude menor, o valor do limiar foi maior. Isso leva a crer que os três sinais possuem níveis globais de limiar semelhantes. Isso foi confirmado com a aplicação da Norma ISO (2631-1, 1997).

Com os resultados encontrados (Tabela 8) é possível afirmar que mesmo vários procedimentos de medição realizados de forma diferente do que a Norma ISO (2631-1, 1997) recomenda, os valores se mostraram próximos aos sugeridos. Além disso, os parâmetros  $a_v$  possuem valores próximos para os quatro sinais, apesar das diferenças dos espectros utilizados nos ensaios, se mostrando assim parâmetro de sensibilidade de vibração importante, e um possível parâmetro de entrada para o modelo de conforto vibroacústico.



## 7 CONFORTO

Ensaio de conforto de vibração são definidos como ensaios que, em um ambiente com estímulos vibratórios, pessoas (jurados) respondem questionários sobre o seu bem estar, ou a mudança do seu bem estar, causado pelo estímulo vibratório.

O ambiente utilizado no ensaio pode ser um equipamento real ou simulador, ou seja, para adquirir dados sobre o conforto de um carro, pode-se aplicar questionários em pessoas dentro de um carro em movimento ou em um simulador que reproduz os estímulos vibratórios de um carro.

Cada ambiente de realização do ensaio (ambientes reais ou simuladores) possuem suas vantagens e desvantagens. A desvantagem dos simuladores é que algumas características do ambiente real não são reproduzidas e a resposta do jurado pode ser influenciado pela falta dessas características. Porém, geralmente, em simuladores os estímulos são reproduzidos de maneira mais padronizada, ou seja, os sinais são reproduzidos de maneira mais parecida entre os jurados. Além disso, podem ser simulados situações específicas que podem ser difíceis ou impossíveis de se reproduzir em ambiente real. Outra vantagem de reprodução em simulador, é o custo e a possibilidade de instrumentação do ambiente.

Como dados de saída do ensaio de conforto, podem ser obtidos dados subjetivos e físicos. Estes dados podem ser de diversas formas, dependendo do método de aquisição adotado.

Na próxima seção é apresentada a metodologia adotada para o ensaio de conforto vibratório.

### 7.1 METODOLOGIA

Para o ensaio de conforto de vibração, também foi utilizado o simulador de aeronaves da UFSC (Figura 25). Como relatado anteriormente, esse simulador possui formas semelhantes a uma aeronave e também poltronas de aeronaves.

Para este ensaio, o sistema de medição mediu a vibração por um tempo mínimo de 30 segundos, nos três eixos de coordenadas, no domínio do tempo. A partir destes dados, foram calculados os valores de 1/3 de oitava com a utilização de uma rotina desenvolvida em

Matlab®.

Os sinais de excitação de vibração são sinais gravados em voo. No total foram utilizados 4 sinais gravados em voo, e mais 6 variações (amplificação de 3 dB e atenuação de 3 dB) destes 4, totalizando 10 estímulos avaliados pelos jurados.

Em todos os casos, os jurados usavam um fone de ouvido com um ruído de fundo para evitar que os jurados avaliassem a vibração pelo ruído gerado pelo piso vibrante. Esse ruído é gerado quando o excitador de vibração é ligado, e o piso do simulador vibra e irradia ondas sonoras. Uma representação esquemática do processo de formação de radiação sonora pode ser observada na Figura 33.

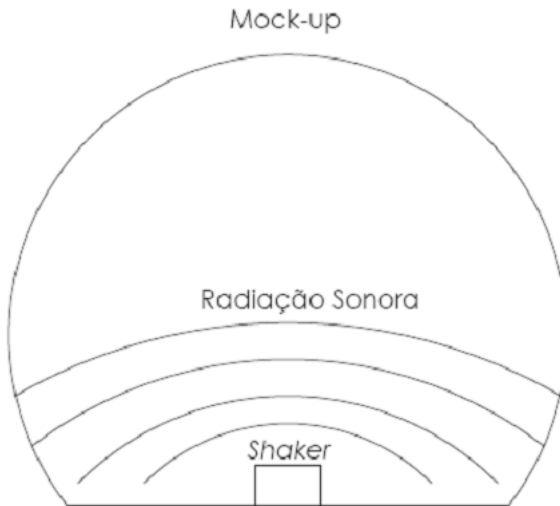


Figura 33: Radiação sonora do piso vibrante.

O ruído utilizado também é um sinal típico de voo (gravado em voo) e foi o mesmo para todos os estímulos de vibração.

Os ensaios foram divididos em duas etapas, sendo que em cada etapa os jurados avaliaram 5 estímulos. Essa divisão foi realizada a fim de evitar que o tempo de ensaio ficasse longo, a ponto de prejudicar a qualidade dos resultados pelo cansaço dos jurados. Sendo assim, cada etapa será avaliada separadamente.

Alguns dos jurados participaram tanto da primeira como da segunda etapa.

Em todos os casos os jurados avaliaram as vibrações por dois

métodos: escala de resposta e diferencial semântico. Os dois métodos trazem informações importantes, porém somente a escala de resposta será utilizada para o cálculo de relações entre os dados físicos e subjetivos.

O método de escala de resposta (ER) é um método muito utilizado na psicologia e que foi adaptado pela engenharia, onde é utilizado como uma avaliação no qual o jurado avalia os sinais reproduzidos atribuindo notas a cada característica do estímulo (ROHRMANN, 2003). Segundo (BITENCOURT, 2008), é um método simples e rápido e fornece informações quantitativas sobre a diferença entre um estímulo e outro.

Já o diferencial semântico (DS) consiste em uma técnica altamente generalizável e flexível para identificar e medir as dimensões psicológicas consideradas importantes na avaliação dos conceitos e estímulos (BITENCOURT, 2008). O DS é composto por escalas que são representadas nos extremos por pares de adjetivos bipolares (OSGOOD; SUCI; TANNENBAUM, 1975).

A Figura 34 mostra a tela que era apresentada para os jurados no ensaio de Diferencial Semântico, e a Figura 35, por sua vez, mostra a tela do ensaio apresentada aos jurados no ensaio de Escala de Resposta.



Figura 34: Exemplo de tela apresentada para o jurado no ensaio de Diferencial Semântico.

Os ensaios foram precedidos de um vídeo que explicava a metodologia do ensaio, e neste período também ocorria uma etapa de adaptação, na qual o jurado era estimulado por sinais de vibração e ruído mais intensos de forma a eliminar algum tipo de memória sensi-

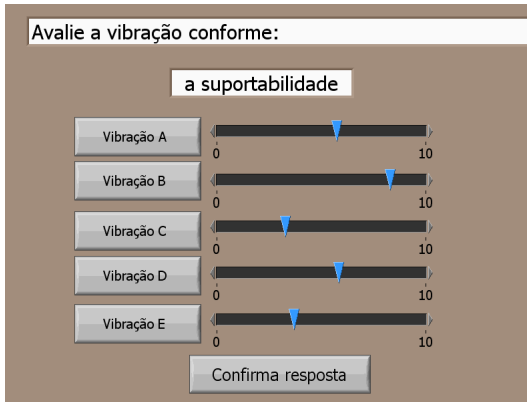


Figura 35: Exemplo de tela apresentada para o jurado no ensaio de Escala de Resposta.

tiva do jurado com relação a ruído e vibração.

Nos dois ensaios participaram dos ensaios 66 pessoas, sendo que 6 dessas realizaram as duas etapas de ensaio. Na primeira e segunda etapas, obtiveram-se 41 e 31 avaliações dos sinais, respectivamente. Os sinais foram todos gravados em voo, sendo que o sinal A na parte central, B na parte frontal, e C na parte traseira da aeronave.

Nos dois ensaios foram julgados 10 sinais, que chamamos de: A, B, B+, B- e C da primeira etapa; D, D+, D-, A+ e C- da segunda etapa. Os sinais mais e menos, equivalem aos sinais originais mais e menos 3dB, respectivamente. Todos os sinais foram gravados em voo, e alguns deles foram mostrados no Capítulo 3.

A sequência dos estímulos era aleatória para cada etapa. Por exemplo, o jurado 1 julgou os estímulos A, B, B+, B- e C na primeira etapa e os estímulos D, D+, D-, A+ e C- na segunda; já o jurado 2 julgou os estímulos C, A, B+, B e B- na primeira e os estímulos D-, D, A+, C- e D+ na segunda etapa. Essa sequência mudava a cada novo ensaio.

A aleatoriedade na apresentação dos sinais é importante para evitar uma possível tendência nas avaliações dos estímulos pelos jurados, de acordo com a ordem de que os estímulos foram apresentados.

Enquanto os jurados inserem suas respectivas opiniões sobre cada estímulo, o sistema mede a vibração do piso através de um acelerômetro triaxial, e com isso, é possível determinar as características essenciais de cada estímulo de vibração que cada jurado foi submetido. Os sinais

de vibração foram gravados no domínio do tempo e a partir destes, foram calculados os valores de vibração para cada banda de terço de oitava, por meio de uma rotina desenvolvida em Matlab<sup>®</sup>, a fim de proporcionar parâmetros para relação com os dados subjetivos.

Para o cálculo da relação dos dados físicos com os dados subjetivos foram calculados os valores de vibração para bandas 1/3 de oitava. Não foram utilizados valores ponderados, devido à limitação desta aplicação para frequências superiores a 400Hz.

### 7.1.1 Escolha dos Adjetivos

Os adjetivos foram escolhidos por meio de um estudo anterior (BITENCOURT, 2008) que coletou adjetivos através de entrevistas. O primeiro passo foi solicitar adjetivos que pudessem descrever ruídos e vibrações via correio eletrônico. Em uma segunda etapa esses adjetivos foram confirmados através de ensaios no *Mock-up*. E posteriormente, esses adjetivos foram testados em um ensaio realizado em voo, quando os jurados avaliavam a validade de cada adjetivo pré-selecionado e sugeriam outros adjetivos.

Após a coleta, os adjetivos foram utilizados em ensaios no *Mock-up* e verificados quanto à validade de cada um. Com este ensaio, concluiu-se que era possível descrever a opinião das pessoas com 5 adjetivos para ruído e 4 adjetivos para vibração. Sendo assim, utilizaram-se estes mesmos 4 adjetivos para o ensaio.

## 7.2 RESULTADOS

Neste item serão apresentados os resultados da análise dos dados do ensaio de conforto vibracional, sempre analisando a primeira e a segunda etapas individualmente.

### 7.2.1 Diferencial Semântico

Para analisar os dados do ensaio de diferencial semântico, foram utilizados gráficos de caixa (*boxplot*). Nestes gráficos é possível verificar a distribuição das posições dos votos dos jurados. Vale lembrar que

estes dados são qualitativos e os valores da escala vertical mostram somente a posição em que o jurado atribuiu a nota. A primeira posição equivale ao 1 e a última ao valor 7, logo, o valor 4 corresponde ao ponto neutro da escala.

No ensaio os adjetivos opostos ficavam um em cada lado da escala. O adjetivo negativo ficava sempre próximo ao 1 e o positivo ao 7. Por exemplo, para os adjetivos confortável e desconfortável, o confortável ficava próximo à posição 7 e o adjetivo desconfortável próximo à posição 1. Isso é exemplificado na Figura 34.

A Figura 36 mostra um gráfico de caixa com os resultados para avaliação do estímulo A. Através dela, pode-se perceber que a mediana foi a mesma para os 4 pares de adjetivos. Também percebe-se que para o adjetivo forte a dispersão das respostas foi maior que para os outros adjetivos apesar que apenas 25% dos votos são menores que 4 (posições 4 a 2).

Para o adjetivo forte ainda percebe-se que toda a escala foi utilizada.

Em todos os adjetivos, o sinal A foi avaliado como mais positivo, pois no gráfico de caixas, todas as medianas encontram-se com valores abaixo de 4, que indica a linha neutra.

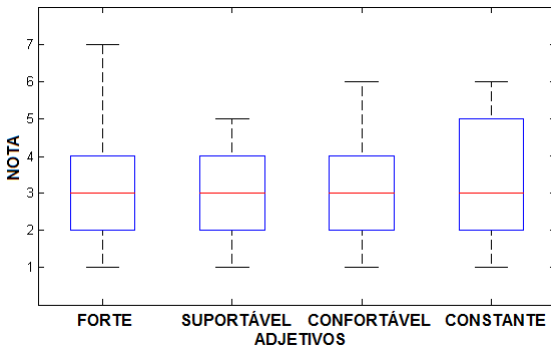


Figura 36: Boxplot dos resultados do ensaio de diferencial semântico para o sinal A.

Para o sinal B (Figura 37) também temos maior distribuição para o adjetivo forte, e também com apenas 25% (1º quartil), se diferenciando dos outros adjetivos.

Analisando a Figura 37, podemos verificar que os jurados consideraram o sinal como positivo. Para o adjetivo constante, aproximada-



mente 50% dos votos (3<sup>o</sup>, 4<sup>o</sup> quartis) se concentraram entre as posições 2 e 1, pois a mediana tem o mesmo valor que o limite entre o terceiro e quarto quartil.

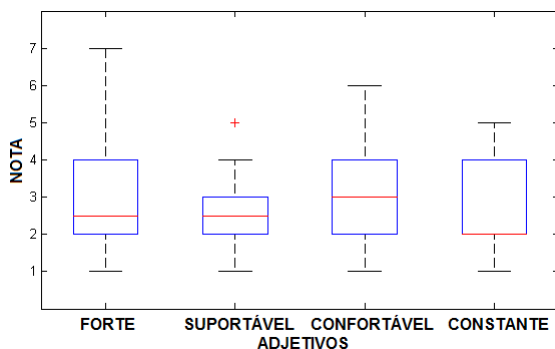


Figura 37: Boxplot dos resultados do ensaio de diferencial semântico para o sinal B.

Para o sinal B- (Figura 38) é fácil observar que neste caso os jurados avaliaram como mais positivo que para o B.

Isso é confirmado através da concentração de todas as notas para o par de forte, suportável e o confortável e de mais de 25% acima do ponto neutro (posição 4) para o par do adjetivo constante.

Fisicamente, isso é explicado devido a menor magnitude de vibração do sinal B-. Fato inverso ocorre com o sinal B+ (Figura 39), que possui maior magnitude, e aparecem muitos votos acima do ponto neutro. Apesar disso, o sinal ainda pode ser considerado como positivo, conforme avaliação dos jurados, onde as medianas ainda ficaram abaixo ou igual ao ponto neutro para todos os adjetivos.

A Figura 40 mostra as respostas para um sinal da parte traseira da aeronave, que tipicamente tem menor magnitude vibratória. Isso explica a grande concentração de respostas entre os valores 2 e 1.

Na Figura 41, que mostra o gráfico de caixas dos votos para o sinal C-, as respostas foram muito semelhantes às da Figura 40, porém com respostas mais positivas ainda.

Já para o sinal A+ (Figura 42), as medianas ficaram na mesma linha neutra ou mais próximos de 7, o que sugere que o sinal foi avaliado como ruim pelos jurados.

A Figura 43, que mostra a distribuição dos votos do sinal D, que é um sinal da parte da frente da aeronave, e também tem pouca

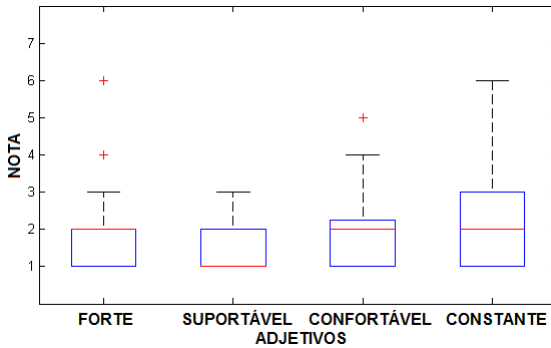


Figura 38: Boxplot dos resultados do ensaio de diferencial semântico para o sinal B-.

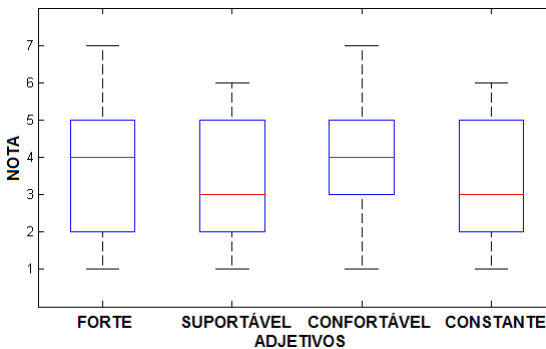


Figura 39: Boxplot dos resultados do ensaio de diferencial semântico para o sinal B+.

magnitude vibratória, as respostas possuem pouca dispersão e votos positivos (maioria entre as posições 3 e 1).

Comparando as Figuras 43 e 44, percebe-se que os jurados assinalaram a escala nos pontos mais positivos para os 3 adjetivos, o que sugere que os jurados julgaram os 3 adjetivos de forma muito semelhante, provavelmente devido à pouca magnitude vibratória do sinal.

Já na Figura 45 as notas ficaram mais próximas da linha neutra, o que pode ser explicado pela magnitude maior do sinal, em comparação ao sinais D e D-.

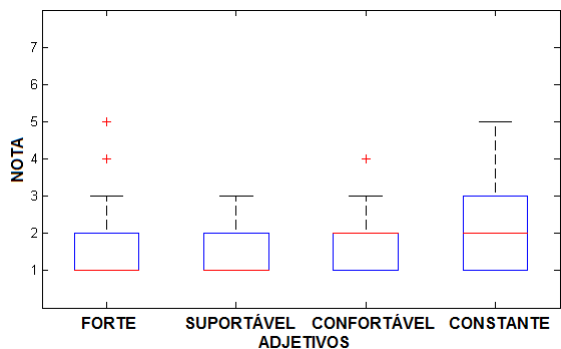


Figura 40: Boxplot dos resultados do ensaio de diferencial semântico para o sinal C.

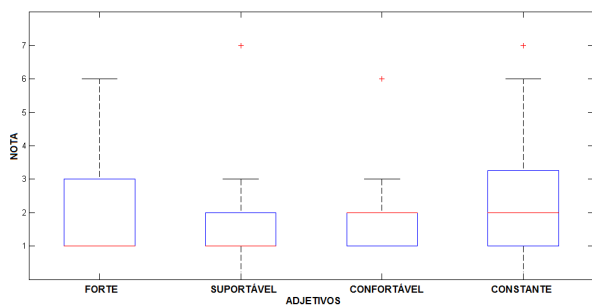


Figura 41: Boxplot dos resultados do ensaio de diferencial semântico para o sinal C-.

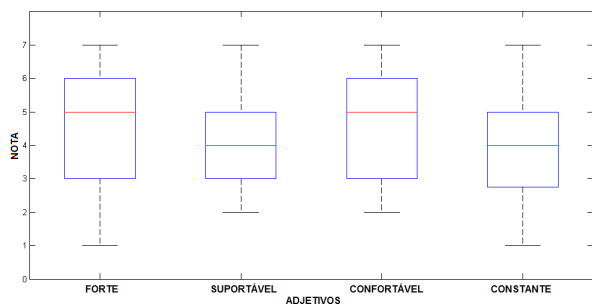


Figura 42: Boxplot dos resultados do ensaio de diferencial semântico para o sinal A+.

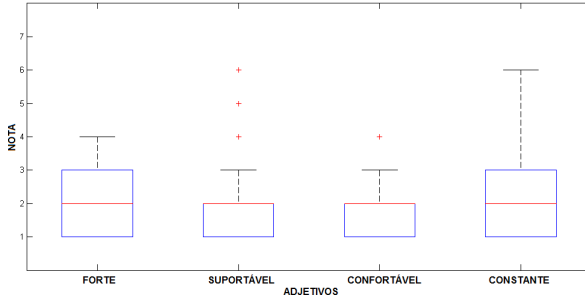


Figura 43: Boxplot dos resultados do ensaio de diferencial semântico para o sinal D.

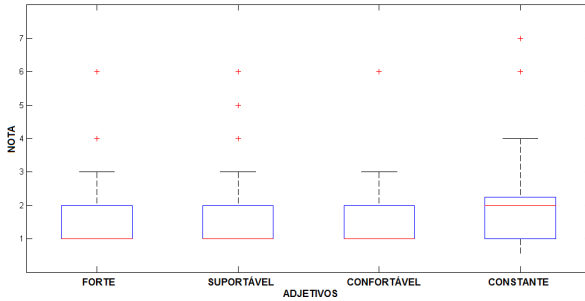


Figura 44: Boxplot dos resultados do ensaio de diferencial semântico para o sinal D-.

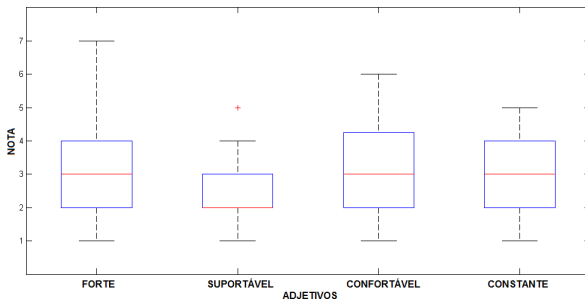


Figura 45: Boxplot dos resultados do ensaio de diferencial semântico para o sinal D+.

## 7.2.2 Redes Neurais

Os resultados de redes neurais artificiais foram simulados utilizando o Matlab®. Os dados utilizados nesta análise são provenientes

do ensaio de conforto com o método escala de resposta.

Foi utilizado um adjetivo por vez, ou seja, todos os valores de bandas de terço de oitava da vibração e uma coluna de respostas dos jurados de um adjetivo para todos os sinais. Nessa simulação foram utilizadas 20 camadas ocultas, 70% dos dados para treino, 15% para validação e 15% para testes. Esses parâmetros são padrão da rotina utilizada, e não foram variados.

Os resultados são mostrados na Tabela 9, onde TrR corresponde a eficiência do treino, VR a eficiência da validação, TeR a eficiência do teste e All da eficiência de todos juntos.

Tabela 9: Valores dos coeficientes de eficiência para Redes Neurais dos ensaios de conforto de vibração.

Adjetivo	TrR	VR	TeR	All
<b>Primeira Etapa</b>				
Conforto	0,49	0,24	0,15	0,36
Constância	0,73	0,10	0,24	0,53
Força	0,89	0,82	0,70	0,84
Suportabilidade	0,88	0,06	0,25	0,60
<b>Segunda Etapa</b>				
Conforto	0,74	0,42	0,18	0,55
Constância	0,18	0,34	0,38	0,32
Força	0,83	0,74	0,78	0,80
Suportabilidade	0,80	0,09	0,13	0,57

Através da Tabela 9, podemos perceber que para alguns adjetivos os valores encontrados são muito semelhantes para as duas fases do ensaio. Isso sugere que os adjetivos são coerentes, os jurados entenderam os adjetivos de forma semelhante e o modelo de redes neurais realmente funciona, porque nestas duas etapas foram utilizados sinais completamente diferentes, jurados diferentes e mesmo assim os resultados foram semelhantes.

O adjetivo força possui coeficientes de eficiência do modelo de 0,84 e 0,80, para a primeira e segunda etapas respectivamente. Esses valores são excelentes resultados, quando se trata de ensaios subjetivos, e possuem menos de 5% de diferença entre si, o que também é excelente.

### 7.2.3 Análise de Regressão

Para a análise de regressão foi utilizado o pacote *PLS Toolbox* para o Matlab®. Os dados utilizados nesta análise são provenientes do ensaio de conforto com o método escala de resposta.

Nessa ferramenta os dados são inseridos em formato de matriz, sendo que para a primeira etapa de ensaio a matriz foi de  $205 \times 162$ , ou seja, 41 jurados avaliando 5 sinais, totalizando 205 avaliações. Para a segunda etapa a matriz foi de  $155 \times 162$ , com 31 jurados avaliando 5 sinais. No total foram avaliados 162 parâmetros físicos, que são 54 níveis de vibração em  $m/s^2 r.m.s.$  para as bandas de 0,1Hz até 20kHz em 1/3 de oitava para os três eixos de coordenadas ( $x, y, z$ ).

Os resultados encontrados estão demonstrados nas figuras abaixo para cada adjetivo. As figuras mostram um gráfico onde o eixo horizontal representa as respostas dadas pelos jurados, e o eixo vertical os valores encontrados pela regressão. Para uma regressão ideal, todos os valores deveriam estar posicionados sobre a que inicia no ponto (0,0) e vai até o ponto (10,10), representada na figura. Também há outra linha que representa a reta média para os pontos dos ensaios em questão.

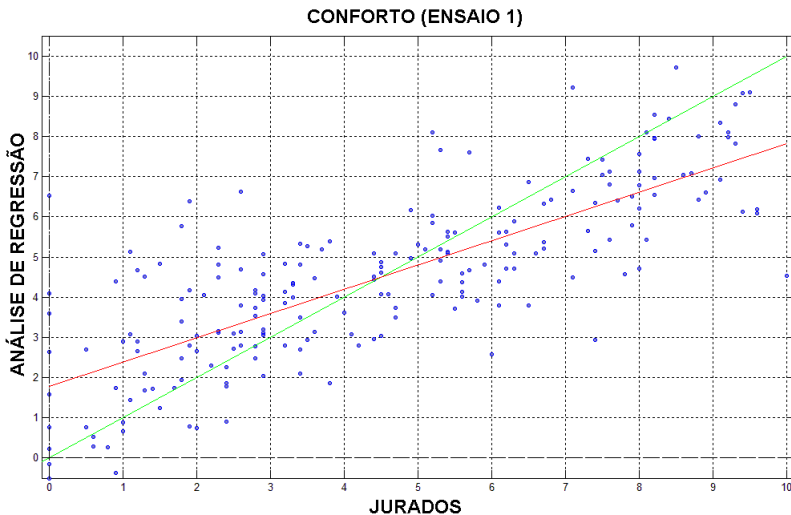


Figura 46: Resultado de análise de regressão para o adjetivo conforto para o primeiro ensaio.

Por meio da Figura 46 pode-se observar que os jurados usaram toda a escala de respostas. Também é possível verificar que a regressão foi ineficaz em várias faixas de votos, por exemplo, encontrou valores entre  $-1$  e  $7$  para sinais que receberam nota  $0$  para o conforto. A reta média cruza pela reta ideal no ponto  $4,5$  (para  $x$  e  $y$ ) como pode ser visto na Tabela 11. O ângulo entre as retas é de  $14,0^\circ$ .

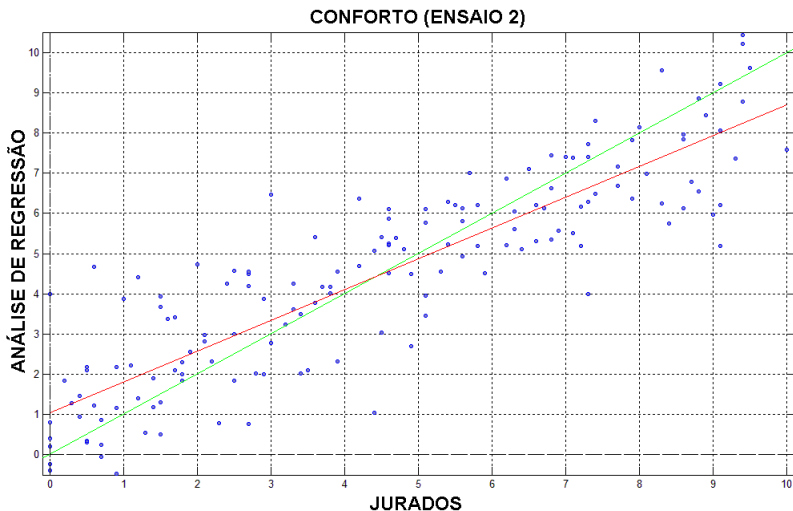


Figura 47: Resultado de análise de regressão para o adjetivo conforto para o segundo ensaio.

Através da Figura 47 pode-se observar que para o adjetivo conforto no ensaio 2 os jurados também usaram toda a escala, porém neste caso, o modelo foi muito mais efetivo, pois não ocorreram erros grosseiros para o adjetivo conforto no primeiro ensaio. Essa eficiência pode ser verificada na Tabela 10 e na Tabela 11 que mostram que esta reta foi mais paralela e possui menor ângulo entre a reta chamada ideal (que passa pelos pontos  $0$  e  $10$ ).

Para o adjetivo constância percebe-se através da Figura 48 que os jurados utilizaram toda a escala, porém apenas um assinalou o valor mínimo (zero). O modelo se mostrou robusto, apesar de apresentar valores iniciais e finais da reta elevados (Tabela 10). Isso se deve ao fato da maioria dos valores votados estarem compreendidos entre  $2$  e  $7$ , e conseqüentemente nesta região o modelo apresentou uma eficiência maior.

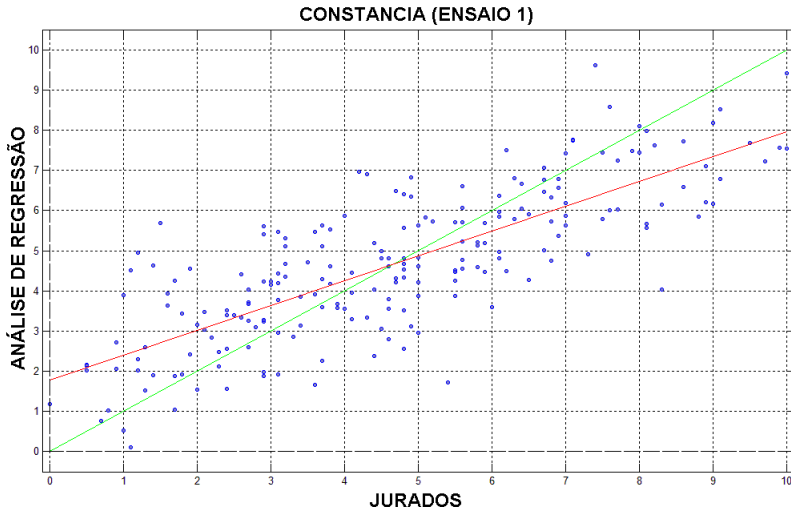


Figura 48: Resultado de análise de regressão para o adjetivo constância para o primeiro ensaio.

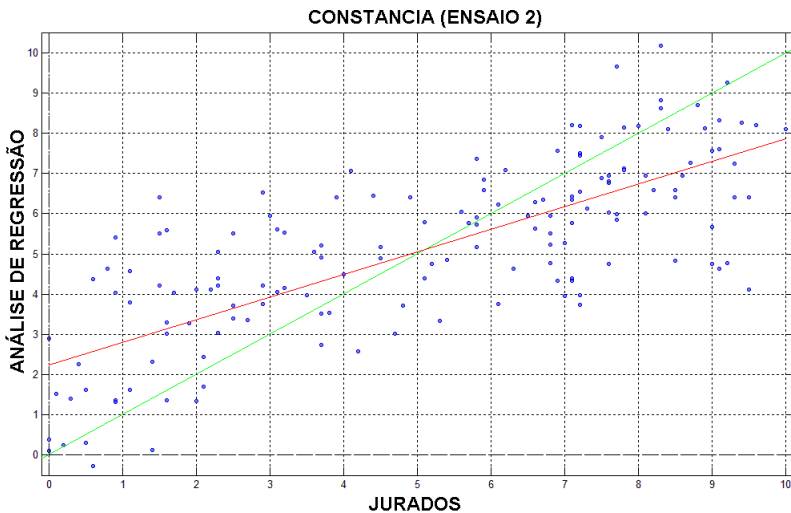


Figura 49: Resultado de análise de regressão para o adjetivo constância para o segundo ensaio.

Para os comentários do segundo ensaio do adjetivo constância, servem os mesmos comentários da primeira bateria de ensaio para o



mesmo adjetivo, com a diferença de que os jurados utilizaram toda a escala para votar, ocasionando também uma maior dispersão dos dados como pode ser visto na Figura 49. No modelo para este adjetivo, vale observar que foi o único modelo que a reta média cruzou a reta ideal em um ponto maior que cinco, como pode ser visto na Tabela 11.

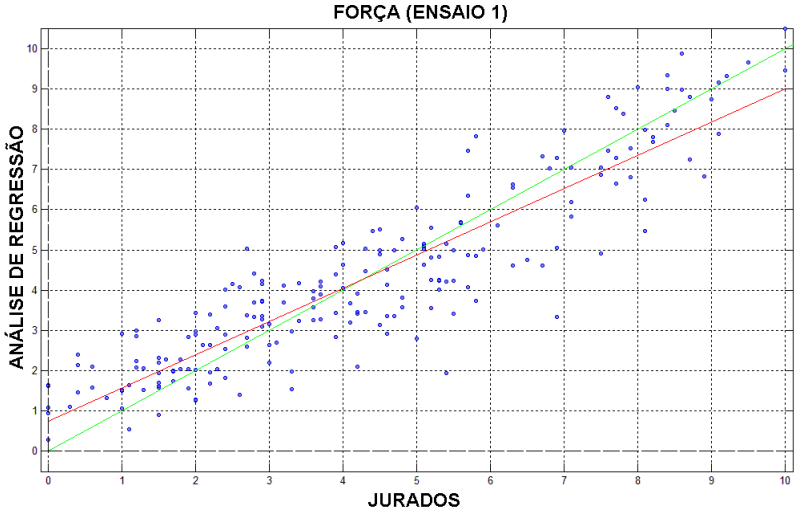


Figura 50: Resultado de análise de regressão para o adjetivo força para o primeiro ensaio.

No primeiro ensaio, para o adjetivo força, apesar dos jurados utilizarem toda a escala de votos, eles se concentraram na maioria entre os valores 1 e 6 como pode ser visto na figura 50. Isso leva a crer que os sinais foram fracos, no ponto de vista dos jurados. Com uma maior concentração de votos neste ponto, o valor em que a reta cruza o ponto zero do eixo horizontal (aqui chamado de  $x_0$ ), para a reta média também foi menor (0,7). Já o ponto onde a reta média cruza a reta ideal (4,1) foi relativamente distante do ponto ideal (5) comparado com os outros adjetivos. O ângulo entre as retas ( $5,3^\circ$ ) foi o menor ângulo entre os adjetivos votados com a primeira bateria de sinais.

Para o segundo ensaio do adjetivo força, os resultados foram bem parecidos com o primeiro ensaio como pode ser visto na figura 51. Porém, neste caso, os votos dos jurados foram mais distribuídos dentro da escala, o que levou com que o ponto de cruzamento entre a reta média do modelo e a reta ideal (4,4) fosse mais próximo de 5 e também

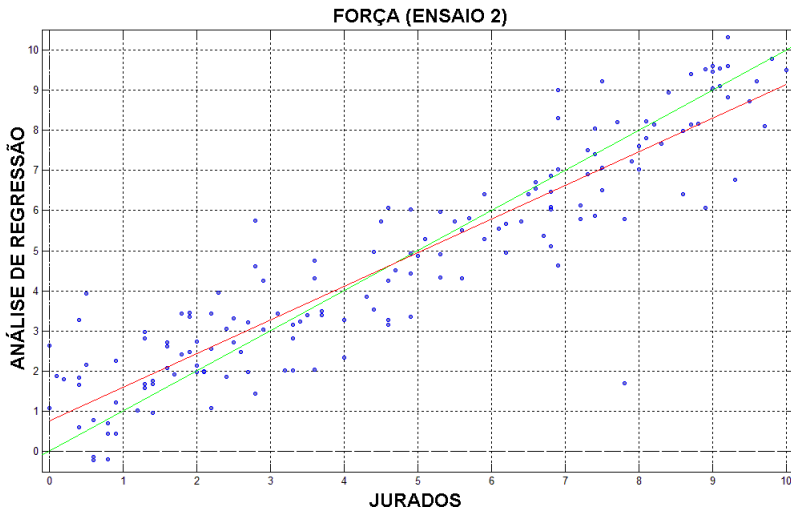


Figura 51: Resultado de análise de regressão para o adjetivo força para o segundo ensaio.

o ângulo entre as duas retas ( $5,0^\circ$ ) fosse menor do que para o adjetivo força para os primeiros adjetivos.

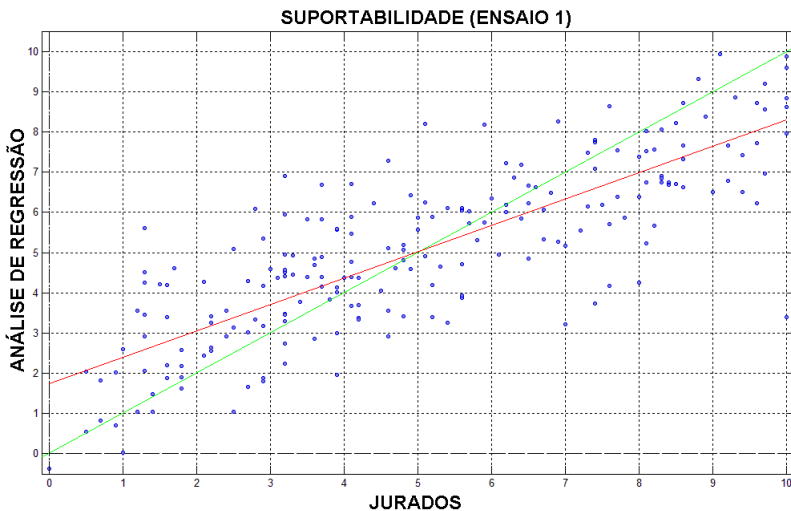


Figura 52: Resultado de análise de regressão para o adjetivo suportabilidade para o primeiro ensaio.

A reta média gerada pelo modelo dos votos dos jurados para o adjetivo suportabilidade, cruzou a reta ideal exatamente no ponto 5, como pode ser visto na figura 52. Isso sugere que a reta média do modelo separou o ponto neutro (entre suportável e não-suportável) com muita exatidão. Já o ângulo entre as retas ficou em torno de  $11,6^\circ$ , que acarreta em uma grande diferença entre as retas nos pontos extremos.



Figura 53: Resultado de análise de regressão para o adjetivo suportabilidade para o segundo ensaio.

Para a segunda bateria de sinais do adjetivo suportabilidade, os resultados foram parecidos com a primeira bateria de sinais, como pode ser visto na figura 53. A reta média cruzou a reta ideal no ponto 4,8 (resultado inferior da primeira bateria) e o ângulo entre as duas retas foi de  $9,6^\circ$ , que é um resultado melhor que na primeira bateria de ensaios.

Na Tabela 10,  $x_0$  refere-se ao valor do eixo vertical ( $y$ ) que cruza o eixo horizontal ( $x$ ) no ponto zero, e da mesma forma para a variável  $x_{10}$ .

Na Tabela 11, a variável ponto comum refer-se ao ponto que em a reta ideal cruza com a reta formada pelo modelo, e a variável ângulo refere-se ao ângulo entre essas duas restas.

Tabela 10: Valores das retas encontradas para cada adjetivo.

Adjetivo	$x_0$	$x_{10}$
Primeira Etapa		
Conforto1	1,8	7,8
Constância1	1,8	8,0
Força1	0,7	9,0
Suportabilidade1	1,7	8,3
Segunda Etapa		
Conforto2	1,1	8,7
Constância2	2,2	7,9
Força2	0,7	9,1
Suportabilidade2	1,4	8,5

Tabela 11: Ponto de encontro e ângulo entre retas médias dos adjetivos e reta ideal.

Adjetivo	Ponto comum	Ângulo
Primeira Etapa		
Conforto1	4,5	14,0
Constância1	4,7	13,2
Força1	4,1	5,3
Suportabilidade1	5,0	11,6
Segunda Etapa		
Conforto2	4,6	7,8
Constância2	5,1	15,3
Força2	4,4	5,0
Suportabilidade2	4,8	9,6

### 7.3 CONCLUSÃO

Os resultados dos ensaios de conforto vibratório foram muito semelhantes entre as duas etapas. Como os sinais eram bastante distintos entre uma etapa e outra, isso leva a crer que os parâmetros utilizados no modelo conseguem descrever com muita eficácia a opinião dos jurados. Isso vale também para os adjetivos, método de avaliação subjetivo, pontos de medição, tabulação dos dados, enfim todo o processo de ensaio e análise.

Sendo assim o ensaio de conforto é válido e os modelos criados, demonstraram que é possível prever a resposta subjetiva relacionada à vibração, através dos parâmetros físicos do sinal de excitação, dentro de uma tolerância.

Para diminuição desta tolerância, novos procedimentos podem ser adotados, melhorando ainda mais a eficiência dos modelos que podem ser criados, como a pesquisa e utilização de novos parâmetros físicos de vibração, que descrevem melhor o conforto relacionado à vibração.

Vale lembrar que para cada estrutura física de ensaio e método de obtenção de respostas subjetivas, novos ensaios devem ser feitos, ou seja, os resultados não devem ser generalizados, pois é muito difícil controlar e compensar todas as variáveis envolvidas na percepção de vibração.



## 8 CONCLUSÕES FINAIS

Através dos diversos ensaios e análises realizadas para os ensaios, em suma, podemos concluir que:

- cada sinal vibratório é percebido de maneira diferente por cada jurado. Essa diferença fica explícita na utilização de toda a escala nos ensaios de conforto;
- os adjetivos usados para descrever a percepção de vibração são eficientes, ou seja, são capazes de caracterizar a opinião das pessoas em relação a sinais totalmente distintos, tornando possível modelar estas respostas a fim de prever a opinião de jurados;
- a diferença de limiar de percepção foi determinada como 1 dB em média, porém para que aproximadamente todos dos jurados sentissem diferença entre os sinais, foi necessária uma diferença de 3 dB em média. Através desta afirmação, nos ensaios de conforto foi utilizado essa mesma diferença de 3 dB, para garantir que todos os sinais seriam diferenciados pelos jurados;
- a presença de ruído realmente muda a percepção de vibração, pois o som gerado pelos elementos vibrantes estimula uma resposta mais apurada do jurado;
- as predições de conforto encontraram relações entre frequência e resposta subjetiva em frequências maiores que 400 Hz, o que sugere percepção da vibração significativa em frequências maiores que 400Hz, diferente do que afirma a norma;
- não foram encontradas relações das respostas subjetivas com os parâmetros físicos de ensaio em bandas centradas em frequências maiores que 8 kHz;
- o método de ensaio de conforto foi eficiente, assim como o método de análise dos dados, pois foi possível relacionar as respostas dos jurados com os parâmetros físicos dos sinais;
- foi possível quantificar relações entre os parâmetros subjetivos e parâmetros físicos dos sinais de excitação de vibração;

- os vetores de ponderação da Norma ISO (2631-1, 1997) (que podem ser utilizados para quantificar o conforto, a percepção e os níveis prejudiciais à saúde) se mostraram eficientes, apesar dela não tratar de frequências superiores a 400 Hz.
- o método de análise regressão utilizado de mostrou mais eficiente que o método de redes neurais.



## 9 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com as análises realizadas durante todo o trabalho, sugere-se a confecção de novos modelos de regressão de conforto, utilizando dados ponderados através da Norma ISO 2631-1 (1997).

Os modelos criados neste trabalho não variaram parâmetros das redes neurais, e isso poderia acarretar em uma melhoria nos resultados do modelo, alterando o número de neurônios, etc.

Também podem ser aplicados novos métodos de confecção de modelos como lógica *fuzzy*, por exemplo.

A confecção de novos modelos utilizando outros sinais de excitação, com mais avaliações, aumentando o número de jurados.



## REFERÊNCIAS

- 2631-1, I. *Evaluation of human exposure to whole-body vibration - part 1: general requirements*. 1997.
- ALLEN, G. R. Progress on a specification for human tolerance of repeated shocks. *Proceedings of the United Kingdom Informal Group Meeting on Human Response to Vibration*, 1976.
- ALLEN, G. R. Human tolerance of repeated shocks. *Proceedings of the European Symposium on Life Sciences Research in Space*, p. 343–349, 1977.
- ALLEN, G. R. Part i: The use of a spinal analogue to compare human tolerance of repeated shocks with tolerance of vibration. part ii: A critical look at biodynamic modeling in relation to specifications for human tolerance of vibration and shock. *AGARD Conference Proceedings CP-253. Models and Analogues for the evaluation of Human Biodynamic Response, Performance and Protection, Paris, 6-10 November 1978 (H.E. von Gierke, ed.), paper A25. Advisory Group for Aerospace Research and Development, Neuilly-sur-Seine.*, 1979.
- ASHLEY, C.; RAO, B. K. N. An equal sensation study of differential vibration between feet and seat. *Ergonomics*, v. 17, p. 331–342, 1974.
- BARBOZA, C. F. G. Transmissibilidade vibracional em diferentes tipos de poltronas de aeronaves. *Semana de Ensino, Pesquisa e Extensão. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis*, 2009.
- BARTLETT, G. et al. Normal distributions of thermal and vibration sensory thresholds. *Muscle Nerve*, v. 21, p. 367–374, 1998.
- BELLMAN, M. A. *Perception of whole-body vibrations: From basic experiment to effects of seat and steering-wheel vibrations on the passenger's comfort inside vehicles*. Tese (Doutorado) — Fachbereich Physik der Universität Oldenburg, 1972.
- BELLMAN, M. A. et al. Influence of frequency and magnitude on the perception. *Journal of Acoustical Society of America*, v. 107, 2000.

- BELLMAN, M. A.; REMMERS, H. Evolution of vibration perception in passenger vehicles. *Euro Noise*, 2003.
- BITENCOURT, R. F. *Desempenho de métodos na avaliação do conforto acústico no interior de aeronaves*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.
- BITENCOURT, R. F. et al. Relevância dos aspectos vibro-acústicos no conforto no interior de aeronaves. *Anais do I Simpósio de Acústica de Salas e Escolas SIBRASE e XXI Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica SOBRAC*, 2006.
- CATTERSON, A. D.; HOOVER, G. N.; ASHE, W. F. Human psychomotor performance during prolonged vertical vibrations. *Aero*, v. 33, p. 598–602, 1962.
- CLARKE, N. P. et al. Evaluation of peak vs. rms acceleration in periodic low frequency vibration exposures. *Aerospace Medicine*, v. 36, p. 1083–1089, 1965.
- CORBRIDGE, C. Predicting the discomfort of simulated vehicle rides. *Proceedings of the United Kingdom Informal Group Meeting on Human Response to Vibration*, p. 14–16, 1983.
- D´ISCHIA, M. Vibro-acoustic comfort identification in aircraft cabin environment: a proposal for modeling. *EURONOISE*, 2003.
- D´ISCHIA, M.; PAONESSA, A.; BRIDISI, A. Noise annoyance in civil aircraft cabins: analysis of an ann-based evaluation model. *Noise at Work*, p. 95–104, 2007.
- DUPUIS, H.; HARTUNG, E. Zur beeinflussung der schwingungs - wahrnehmung beim kranken - und verletzten-transport (the influence on the vibration perception of using vacuum mattresses in patient transport). *Notfall Medizin*, v. 7, p. 81–90, 1981.
- EZEKIEL, M.; FOX, K. A. *Methods of correlation and regression analysis: linear and curvilinear*. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 1959.
- FAIRLEY, T. E.; GRIFFIN, M. J. Predicting the discomfort caused by simultaneous vertical and fore-and-aft whole-body vibration. *Journal of Sound and Vibration*, v. 124, p. 141–156, 1988.

- FECHNER, G. T. *Element der Psychophysik*. [S.l.]: Breitkopf & Harterl, 1860.
- FLEMING, D. B.; GRIFFIN, M. J. A study of the subjective equivalence of noise and whole-body vibration. *Journal of Sound and Vibration*, v. 42, p. 453–461, 1975.
- FOTHERGILL, L. C. *A study of the subjective response to whole-body vibration*. Dissertação (Mestrado) — University of Southampton, 1972.
- FOTHERGILL, L. C.; GRIFFIN, M. J. The evaluation of discomfort produced by multiple frequency whole-body vibration. *Ergonomics*, v. 20, p. 263–276, 1977.
- FOTHERGILL, L. C.; GRIFFIN, M. J. The subjective magnitude of whole-body vibration. *Ergonomics*, v. 20, p. 521–533, 1977.
- GELFAND, S. *Hearing An Introduction to Psychophysical and Physiological Acoustics*. [S.l.]: Marcel Dekker, Inc., 1998.
- GERGES, S. N. Y. *Ruído: fundamentos e controle*. [S.l.]: Editora NR, 2000.
- GRIFFIN, M. J. Vertical vibration of seated subjects: effects of posture, vibration level and frequency. *Aviation, Space and Environmental Medicine*, v. 46, p. 269–276, 1975.
- GRIFFIN, M. J. Subjective equivalence of sinusoidal and random whole-body vibration. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 60, p. 1140–1145, 1976.
- GRIFFIN, M. J. The effects of vibration on health. *Memorandum N. 632. Institute of Sound and Vibration Research. University of Southampton*, 1982.
- GRIFFIN, M. J. *Handbook of human vibration*. [S.l.]: Academic Press - University of Southampton, UK, 1996.
- GRIFFIN, M. J. et al. The biodynamic response of the human body and its application to standards. *Models and analogues for the evaluation of human biodynamic response, performance and protection*, 1979.

- GRIFFIN, M. J.; WHITHAM, E. M. Individual variability and its effect on subjective and biodynamic response to whole-body vibration. *Journal of Sound and Vibration*, v. 58, p. 239–250, 1978.
- HIRAMATSU, K.; GRIFFIN, M. J. Predicting the subjective response to nonsteady vibration based on the summation of subjective magnitude. *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 76, p. 1080–1089, 1984.
- HORNICK, R. J. Effects of whole-body vibration in three directions upon human performance. *Journal of Engineering Psychology*, v. 1, p. 93–101, 1962.
- HOWARTH, H. V. C.; GRIFFIN, M. J. The relative importance of noise and vibration from railways. *Applied Ergonomics*, 1989.
- HUBBARD, M. C. et al. Quantitative vibration threshold testing in carpal tunnel syndrome: analysis strategies for optimizing reliability. *Journal of Hand Therapy*, v. 17, p. 24–30, 2004.
- INAMI, K.; CHIBA, K.; TOYAMA, Y. Determination of reference intervals for vibratory perception thresholds of the lower extremities in normal subjects. *Journal of Orthopaedic Science*, v. 10, p. 291297, 2005.
- ITURRIETA, C. A. N. *Confort vibroacústico en dos tipos de asiento en aeronaves*. Dissertação (Mestrado) — Universidad Austral de Chile. Valdivia. Chile, 2009.
- JOHNSTON, M. E. The effect of reclined seating on the transmission of linear vibration to the head. *Technical Memorandum FS 292*. Royal Aircraft Establishment, Farnborough, 1979.
- KATZ, B. *Nerve Muscle and Synapse*. [S.l.]: McGrawHill, 1966.
- KOLICH, M. Prediction automobile seat comfort using a neural network. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2004.
- KOLICH, M.; SEAL, N.; TABOUM, S. Automobile seat comfort prediction: statistical model vs. artificial neural network. *Applied Ergonomics*, p. 275–284, 2004.

- LEITE, R. P. *Estudo do ruído do sistema de ventilação automobilística*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.
- LIMA, F. R. Ruídos e vibrações veiculares. In: \_\_\_\_\_. [S.l.]: Editora NR, 2005. cap. Qualidade sonora - conceitos básicos.
- MANSFIELD, N. J.; GRIFFIN, M. J. Difference threshold for automobile seat vibration. *Applied Ergonomics*, v. 31, p. 255–261, 2000.
- MANSFIELD, N. J.; GRIFFIN, M. J. Effect of posture and vibration magnitude on apparent mass and pelvis rotation during exposure to whole-body vertical vibration. In: *2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON WHOLE-BODY VIBRATION INJURIES*. [S.l.: s.n.], 2000.
- MASSAD, E. et al. *Métodos quantitativos em medicina*. [S.l.]: Editora Manole, 2004.
- MATSUMOTO, Y.; MAEDA, S.; OJI, Y. Influence of frequency on difference thresholds for magnitude of vertical sinusoidal whole-body vibration. *Industrial Health*, v. 40, p. 313–319, 2002.
- MIWA, T. Evaluation methods for vibration effect. *Industrial Health*, v. 5, p. 183–205, 1967.
- MIWA, T. Evaluation methods for vibration effect. part 7. *Industrial Health*, v. 6, p. 143–164, 1968.
- MIWA, T. Evaluation of vertical vibration given to the human foot. *The Journal of Acoustical Society of America*, v. 83, p. 984–990, 1988.
- MONTGOMERY, D. C.; PECK, E. A. *Introduction to linear regression analysis*. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 1992.
- MOSELEY, M. J.; LEWIS, C. H.; GRIFFIN, M. J. The influence of seating conditions on head vibration and visual performance. 1981.
- OBORNE, D. J.; HEALTH, T. O.; BOARER, P. Variation in human response to whole-body vibration. *Ergonomics*, v. 24, p. 301–313, 1981.

- OSGOOD, C. E.; SUKI, G. J.; TANNENBAUM, P. H. *The measurement of meaning*. [S.l.]: The University of Illinois Press, Urbana, Chicago and London., 1975.
- PADDAN, G. S.; GRIFFIN, M. J. The transmission of translational seat vibration to the head i. *Journal of Biomechanics*, v. 21, p. 191–197, 1988.
- PADDAN, G. S.; GRIFFIN, M. J. The transmission of translational seat vibration to the head ii. *Journal of Biomechanics*, v. 21, p. 191–197, 1988.
- PARSONS, K. C.; GRIFFIN, M. J. The effect of rotational vibration in roll and pitch axes on the discomfort of seated subjects. *Ergonomics*, v. 21, p. 615–625, 1978.
- PARSONS, K. C.; GRIFFIN, M. J. Vibration and comfort ii. *Ergonomics*, v. 25, p. 631–644, 1982.
- PARSONS, K. C.; GRIFFIN, M. J. Method for predicting passenger vibration discomfort. *Society of Automotive Engineers Technical Paper Series 831029*, 1983.
- PARSONS, K. C.; GRIFFIN, M. J.; WHITHAM, E. M. Vibration and comfort iii. *Ergonomics*, v. 25, p. 705–719, 1982.
- PAUL, S. *Avaliação e modelagem de qualidade sonora em aeronaves comerciais*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.
- PAYNE, P. R. On quantizing ride comfort and allowable accelerations. *American Institute of Aeronautics e Astronautics and Society of Naval Architects and Marine Engineers, AIAA/SNAME Advanced Marine Vehicle Conference, Arlington, Virginia, 20-22 September 1976, Paper 76-873*, 1976.
- PAYNE, P. R. Method to quantify ride comfort and allowable accelerations. *Aviations, Space and Environmental Medicine*, v. 49, p. 262–269, 1978.
- POULTON, E. C. The new psychophysics: six models for magnitude estimation. *Psychological bulletin*, v. 69, p. 1–19, 1968.



- QUEHL, J. *Comfort studies on aircraft interior sound and vibration*. Tese (Doutorado) — Universität Oldenburg, 2001.
- RAKHEJA, S. et al. Seated occupant interactions with seat backrest and pan, and biodynamic responses under vertical vibration. *Journal of Sound and Vibration*, v. 298, p. 651–671, 2006.
- ROHRMANN, B. *Verbal qualifiers for rating scales: sociolinguistic considerations and psychometric data*. [S.l.], 2003.
- ROWLANDS, G. F. The transmission of vertical vibration to the heads and shoulders of seated men. *RAE Technical Report 77068*. Royal Aircraft Establishment, Farnborough., 1977.
- SAMANTA, B. Gear fault detection using artificial neural networks and support vector machines with genetic algorithms. *Mechanical Systems and Signal Processing*, p. 625–644, 2004.
- SCHAEFER, R. L. et al. Aircraft vibration perception in a laboratory situation. *Proceedings of COBEM, Gramado, Brasil*, 2009.
- SORRENTINO, A.; CONCILIO, A. Model of a generic aircraft passenger using artificial neural networks. *Seventh International Congress on Sound and Vibration*, 2000.
- SORRENTINO, A.; CONCILIO, A. Identification of a vibro-acoustic comfort index for aircraft the idea-paci project. *EURONOISE*, 2003.
- STEIDEL, R. F. *An introduction to mechanical vibrations*. 2. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 1979. 295 p.
- STEVENS, S. S. *Psychophysics*. [S.l.]: Wiley, 1975.
- SUGGS, C. W. et al. Differential vibration of the feet and trunk of humans in transport environments. *Project Report NGR-34-002-189*. National aeronautics and space administration, 1976.
- TEIXEIRA, J. A. M. S. *Desenvolvimento de sistema de reprodução vibracional para ensaios de conforto em aviões a jato*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.

WERKEMA, M. C. C.; AGUIAR, S. *Análise de regressão: como entender o relacionamento entre as variáveis de um processo.* [S.l.]: Fundação Christiano Ottoni and Escola de Engenharia da UFMG, 1996.