

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO - ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS – GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

CURVAS DE PERCEPÇÃO E CONFORTO HUMANO PARA VIBRAÇÕES VERTICAIS

CRISTIANO CÁRIA GUIMARÃES PEREIRA

ORIENTADOR: Prof. Dr. Francisco de Assis das Neves

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração: Estruturas Metálicas.

Ouro Preto, setembro de 2005.

P429c

Pereira, Cristiano Cária Guimarães.

Curvas de percepção e conforto humano para vibrações verticais
[manuscrito]. / Cristiano Caria Guimarães Pereira. - 2005.
xviii, 149f. : il., color., graf., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Francisco de Assis das Neves .

Área de concentração: Construção Metálica.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto. Escola
de Minas. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós Graduação
em Engenharia Civil.

1. Estruturas metálicas - Teses. 2. Engenharia de estruturas - Teses. 3.
Amortecimento (mecânica) - Teses. 4. Percepção – Teses. I. 5. Conforto
humano. Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento
de Engenharia Civil. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil.
II. Título.

CDU: 624.014

Catálogo: sisbin@sisbin.ufop.br

Dedico esta dissertação aos meus pais,
Zizi e Maria José, e a meus irmãos
Juninho e Marco Túlio.

AGRADECIMENTOS

Aos meus colegas e professores do curso de Mestrado em Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto.

Aos voluntários que tornaram possível a realização deste trabalho.

Ao meu orientador, o Professor Francisco de Assis das Neves, que sempre esteve a disposição para me auxiliar na elaboração desta dissertação.

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre os níveis de vibração relacionados à percepção e ao conforto humano, com um enfoque na adequabilidade de edificações quanto às vibrações. Com isso, o objetivo principal deste trabalho é gerar curvas relacionadas à percepção e ao conforto humano quanto à vibração através de experimentos de laboratório, comparando-se os resultados encontrados para os limites de vibração com outros trabalhos da literatura técnico-científica e com a própria norma ISO 2631/2: 1989. Ao todo, 30 voluntários participam dos experimentos, sendo 15 homens e 15 mulheres. Estes são expostos à vibração vertical senoidal, sendo estudado a faixa de frequência de 12 a 80 Hz. Para todos os experimentos, os limites de percepção e conforto são determinados para os voluntários na postura sentada e em pé, realizando-se uma comparação entre os resultados para as duas posturas. Um experimento sobre a transmissibilidade da montagem experimental é realizado com o objetivo de se analisar a interface ideal para a instalação dos acelerômetros de modo a se evitar equívocos nas medições, registrando-se níveis de vibrações que não atingem efetivamente os voluntários. Realiza-se também uma análise sobre a incerteza dos resultados do limite de percepção, observando a existência de um intervalo de vibração em que os indivíduos não têm certeza se podem ou não detectar o movimento vibratório.

Finalmente, é proposta uma metodologia para a determinação de uma curva para o limite de percepção, comparando-se os resultados com a curva básica da ISO 2631/2: 1989. Através dos resultados, observa-se que os valores encontrados para o limite de percepção do atual trabalho para vibração vertical na postura sentada estão em conformidade com os resultados da ISO 2631/2: 1989. Verifica-se também a existência de diferenças significativas entre os resultados para a postura em pé e sentada. O limite de conforto se encontra entre 2 a 4 vezes superior ao limite de percepção, apresentando-se de acordo com a ISO 2631/2: 1989. Não foram verificadas diferenças significativas entre os resultados de homens e mulheres.

ABSTRACT

This work presents a study on vibration levels related to human comfort and perception, emphasizing the building serviceability with respect to the vibrations. The main objective here is to generate human comfort and perception curves for applied vertical vibrations by means of several laboratory experiments. The results obtained have been compared with the base curves from ISO 2631/2: 1989 and also with different works found in the technical literature. The experiments have been conducted by 30 volunteers selected from the university environment, consisting of 15 men and 15 women. They have been subjected to vertical sinusoidal vibrations keeping the frequency in the range of 12 to 80 Hz. For all experiments, comfort and perception limit values have been evaluated and compared using both sitting and standing up positions.

An experiment about the experimental assembly transmissibility is accomplished with the aim at analyzing the ideal interface for the installation of accelerometers, in order to avoid misunderstandings in the measurements, by measuring vibration levels that actually do not reach the volunteers. The uncertainty in the results of the perception limits has also been investigated by observing the existence of a vibration interval in which the volunteers are not sure if they can detect the vibratory movement.

Finally, a methodology for the determination of a perception limit curve is proposed. The results obtained here for the perception limits for vertical vibrations in the seating position are in accordance with the results from ISO 2631/2: 1989. Moreover, significant differences among the results for sitting and standing up positions are also observed. The human comfort limit is found to be 2 to 4 times greater than the perception limit, which is also in agreement with ISO 2631/2: 1989. Significant differences between the results for men and women have not been observed herein.

ÍNDICE

RESUMO.....	II
LISTA DE FIGURAS.....	V
LISTA DE TABELAS.....	XIV
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	1
1.2. JUSTIFICATIVA DO TRABALHO.....	3
1.3. OBJETIVOS.....	4
1.4. ESCOPO DO TRABALHO.....	5
CAPÍTULO 2 – CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA A SER ESTUDADO.....	7
CAPÍTULO 3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
2.1. FONTES DE VIBRAÇÕES EM EDIFICAÇÕES.....	12
2.2. EFEITOS DA VIBRAÇÃO SOBRE A SAÚDE.....	23
2.3. EFEITO DA VIBRAÇÃO SOBRE O CONFORTO HUMANO.....	33
2.4. TRABALHOS SOBRE VIBRAÇÕES NO CORPO HUMANO.....	37
2.5. CRITÉRIOS DE CONFORTO DE ACORDO COM ESPECIFICAÇÕES DE NORMAS.....	50
CAPÍTULO 4 - METODOLOGIA.....	62
4.1. CONSIDERAÇÕES SOBRE A AMOSTRA.....	62
4.2. MONTAGEM EXPERIMENTAL.....	67
4.3. EXPERIMENTOS.....	73
CAPÍTULO 5 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	76
5.1. VERIFICAÇÃO DO TAMANHO DA AMOSTRA.....	76
5.2. EXPERIMENTO 1: TRANSMISSIBILIDADE.....	78
5.3. EXPERIMENTO 2: LIMITE DE PERCEPÇÃO.....	80

5.4. EXPERIMENTO 3: INCERTEZA NAS RESPOSTAS PARA O LIMITE DE PERCEPÇÃO.....	93
5.5. EXPERIMENTO 4: LIMITE DE CONFORTO.....	101
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	112
6.1. CONCLUSÕES.....	112
6.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	115
CAPÍTULO 7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	116
ANEXO A.....	122
ANEXO B.....	126
ANEXO C.....	136
ANEXO D.....	138
ANEXO E.....	143
ANEXO F.....	146

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1.1: Fontes de excitação em edificações. Fonte Sales [2001].....2

CAPÍTULO 2

Figura 2.1: Fluxograma ilustrativo da avaliação da vibração em edificações. Fonte Campos [2003].....7

Figura 2.2: Esquema do problema a ser estudado.....8

Figura 2.3: Montagem experimental.....9

CAPÍTULO 3

Figura 3.1: Tipos de carregamentos dinâmicos – (a) harmônico simples; (b) periódico não harmônico; (c) não periódico de curta duração; (d) não periódico de longa duração. Fonte Tedesco et al [1998].....12

Figura 3.2: Tipos de ações dinâmicas – funções determinísticas. Fonte: Neves [2000].....13

Figura 3.3: Tipos de ações dinâmicas – função não determinística. Fonte: Neves [2000].....13

Figura 3.4: Registro típico de velocidade do vento. Fonte Tedesco et al [1998].....14

Figura 3.5: Registro típico de movimento de terreno produzido por uma explosão no subsolo. Fonte Tedesco et al [1998].....15

Figura 3.6: Geometria simplificada de uma passada. Fonte: Ohlsson [1982].....16

Figura 3.7: Excitação típica de uma caminhada. Fonte: Ohlsson [1982].....17

Figura 3.8: Amplitudes das componentes de Fourier para uma caminhada regular. Fonte: Rainer et al [1988].....19

Figura 3.9: Comparação entre a função matemática proposta e os resultados obtidos por Ohlsson [1982]. Fonte: Varela [2004].	20
Figura 3.10: Sinal característico, no domínio do tempo, da força de excitação gerada por uma pessoa pulando na frequência de 2,0 Hz. Fonte: Vasconcelos [1998].	22
Figura 3.11: Sinal característico, no domínio da frequência, da força de excitação gerada por uma pessoa pulando na frequência de 2,0 Hz. Fonte: Vasconcelos [1998].	23
Figura 3.12: Sistema mecânico representando o corpo humano sujeito a vibração vertical. Fonte: Brüel & Kjaer [2000] <i>apud</i> Balbinot [2001].	25
Figura 3.13: Curvas de transmissibilidade para diversas partes do corpo humano (postura em pé). Fonte: Chaffin et al [1999] <i>apud</i> Balbinot [2001].	26
Figura 3.14: Curvas de transmissibilidade para diversas partes do corpo humano (postura sentada). Fonte: Chaffin et al [1999] <i>apud</i> Balbinot [2001].	26
Figura 3.15: Direções do sistema de coordenadas para vibrações mecânicas em seres humanos. Fonte ISO 2631/1 [1997].	29
Figura 3.16: Esboço do experimento desenvolvido para medir a resposta da coluna à vibração. Fonte: Panjabi et al [1986].	30
Figura 3.17: Transmissibilidade entre a coluna e o assento. Fonte: Panjabi et al [1986].	30
Figura 3.18: Descrição qualitativa da reação humana à oscilação contínua uniforme. Fonte Ohlsson [1982].	36
Figura 3.19: Posturas do corpo na posição em pé. Fonte: Harazin & Grezesik [1998].	38
Figura 3.20: Transmissibilidade média entre a superfície vibrante e a cabeça para indivíduos na postura em pé. Fonte: Harazin & Grezesik [1998].	38
Figura 3.21: Limiar de percepção à vibração para indivíduos na postura em pé e sentada. Fonte: Parsons & Griffin [1988].	40

Figura 3.22: Limiar de percepção médio dos indivíduos para os eixos x e y nas posições em pé e sentado. Fonte: Parsons & Griffin [1988].	41
Figura 3.23: Curvas de conforto à vibração adotando-se três diferentes posturas. Fonte: Osborne & Boarer [1982].	42
Figura 3.24: Curvas de conforto à vibração baseadas em diferentes instruções. Fonte: Osborne & Boarer [1982].	43
Figura 3.25: Contorno de conforto médio e o primeiro e terceiro quartis julgados equivalentes aos movimentos de referência senoidal vertical de 0,5 e 1,25 m/s^2 r.m.s. com frequência de 10 Hz. Fonte: Griffin et al [1982].	44
Figura 3.26: Contorno de conforto médio e o primeiro e terceiro quartis para o eixo x equivalente ao movimento de referência senoidal vertical de 0,8 m/s^2 r.m.s. com frequência de 10 Hz. Fonte: Griffin et al [1982].	45
Figura 3.27: Contorno de conforto médio e o primeiro e terceiro quartis para o eixo y equivalente ao movimento de referência senoidal vertical de 0,8 m/s^2 r.m.s. com frequência de 10 Hz. Fonte: Griffin et al [1982].	45
Figura 3.28: Contorno de conforto médio e o primeiro e terceiro quartis para o eixo z (vertical) equivalente ao movimento de referência senoidal vertical de 0,8 m/s^2 r.m.s. com frequência de 10 Hz. Fonte: Griffin et al [1982].	46
Figura 3.29: Comparação entre as curvas de transmissibilidade média cadeira-cabeça para o grupo de homens e mulheres. Fonte: Griffin et al [1982].	47
Figura 3.30: Critério de desconforto para vibrações em pisos (ocupações: residencial, escolar e em escritórios). Fonte CAN3-S16-M84 [1984].	51
Figura 3.31: Curvas relacionando conforto com aceleração e frequência. Fonte: BS 6841 [1987].	53

Figura 3.32: Limites de aceleração para vibração em diversas normas. Fonte Griffin [1996].....	54
Figura 3.33: Curvas de acelerações efetivas para o limite de queda de eficiência, segundo a ISO 2631/1 [1997].....	57
Figura 3.34: Curva básica para acelerações verticais (eixo z), segundo a ISO 2631/2 [1989].....	58
Figura 3.35: Curva básica para acelerações transversais (eixos x e y), segundo a ISO 2631/2 [1989].....	59
Figura 3.36: Curva básica para acelerações combinadas (eixos x , y e z), segundo a ISO 2631/2 [1989].....	59

CAPÍTULO 4

Figura 4.1: Vista geral da montagem experimental.....	67
Figura 4.2: Fluxograma do processo de aquisição de dados.....	68
Figura 4.3: Excitador mecânico.....	69
Figura 4.4: Localização dos acelerômetros para medida da transmissibilidade placa – cadeira. Fonte Balbinot, A. & Tamagna, A. [2002].....	70
Figura 4.5: Gerador de funções.....	71
Figura 4.6: Amplificador de sinais.....	71
Figura 4.7: Sistema de aquisição de dados.....	72
Figura 4.8: Ilustração esquemática do funcionamento da montagem experimental.....	72

CAPÍTULO 5

Figura 5.1: Transmissibilidade da montagem experimental cadeira/placa.....	80
Figura 5.2: Limite de percepção – Postura sentada – Acelerômetro placa.....	81

Figura 5.3: Limite de percepção – Postura sentada – Acelerômetro cadeira.....	81
Figura 5.4: Limite de percepção – Postura em pé – Acelerômetro placa.	82
Figura 5.5: Comparação entre o sinal captado pelo acelerômetro 1 e 2 para a postura sentada.....	82
Figura 5.6: Distribuição das respostas para o limite de percepção na frequência de 12 Hz – Postura sentada – Acelerômetro 2.....	83
Figura 5.7: Distribuição das respostas para o limite de percepção na frequência de 40 Hz – Postura sentada – Acelerômetro 2.	84
Figura 5.8: Distribuição das respostas para o limite de percepção na frequência de 80 Hz – Postura sentada – Acelerômetro 2.....	84
Figura 5.9: Distribuição das respostas para o limite de percepção na frequência de 16 Hz – Postura em pé – Acelerômetro 1.....	85
Figura 5.10: Distribuição das respostas para o limite de percepção na frequência de 32 Hz – Postura em pé – Acelerômetro 1.	85
Figura 5.11: Distribuição das respostas para o limite de percepção na frequência de 63 Hz – Postura em pé – Acelerômetro 1.....	86
Figura 5.12: Variabilidade das respostas do limite de percepção – Postura sentada – Acelerômetro placa.....	86
Figura 5.13: Variabilidade das respostas do limite de percepção – Postura sentada – Acelerômetro cadeira.....	87
Figura 5.14: Variabilidade das respostas do limite de percepção – Postura em pé – Acelerômetro placa.....	87
Figura 5.15: Comparação entre os resultados do presente trabalho para o limite de percepção com a curva básica da ISO 2631/2 [1989]	88

Figura 5.16: Comparação entre os resultados para homens e mulheres – Limite de percepção – Postura sentada – Acelerômetro placa.....	89
Figura 5.17: Comparação entre os resultados para homens e mulheres – Limite de percepção – Postura sentada – Acelerômetro cadeira.....	90
Figura 5.18: Comparação entre os resultados para homens e mulheres – Limite de percepção.....	90
Figura 5.19: Efeito da postura na sensibilidade à vibração das pessoas para o limite de percepção.....	91
Figura 5.20: Comparação entre o Caso 1 e o Caso 2 – Postura sentada – Acelerômetro placa.....	94
Figura 5.21: Comparação entre o Caso 1 e o Caso 2 – Postura sentada – Acelerômetro cadeira.....	94
Figura 5.22: Comparação entre o Caso 1 e o Caso 2 – Postura em pé – Acelerômetro placa.....	95
Figura 5.23: Razão entre as respostas do Caso 1 e o Caso 2 – Postura sentada – Acelerômetro 1.....	95
Figura 5.24: Razão entre as respostas do Caso 1 e o Caso 2 – Postura sentada – Acelerômetro 2.....	96
Figura 5.25: Razão entre as respostas do Caso 1 e o Caso 2 – Postura em pé – Acelerômetro 1.....	96
Figura 5.26: Caso 1 x Caso 2 – Postura sentada – Acelerômetro placa.....	97
Figura 5.27: Caso 1 x Caso 2 – Postura sentada – Acelerômetro cadeira.....	97
Figura 5.28: Caso 1 x Caso 2 – Postura em pé – Acelerômetro placa.....	98
Figura 5.29: Comparação do limite de percepção encontrado para o atual trabalho com a curva básica da ISO 2631/2 [1989] – Postura sentada.....	99

Figura 5.30: Comparação do limite de percepção encontrado para o atual trabalho com a curva básica da ISO 2631/2 [1989] – Postura em pé.....	99
Figura 5.31: Limite de percepção para o trabalho atual em comparação versus Curva básica da ISO 2631/2 [1989] – direção vertical (eixo z).....	100
Figura 5.32: Limite de conforto – Acelerômetro placa – Postura sentada.....	102
Figura 5.33: Limite de conforto – Acelerômetro cadeira – Postura sentada.....	102
Figura 5.34: Limite de conforto – Acelerômetro placa – Postura em pé.....	103
Figura 5.35: Variabilidade das respostas do limite de conforto – Postura sentada – Acelerômetro placa.....	103
Figura 5.36: Variabilidade das respostas do limite de conforto – Postura sentada – Acelerômetro cadeira.....	104
Figura 5.37: Variabilidade das respostas do limite de conforto – Postura em pé – Acelerômetro placa.....	104
Figura 5.38: Comparação entre o limite de percepção e o limite de conforto – Postura sentada – Acelerômetro placa.....	105
Figura 5.39: Comparação entre o limite de percepção e o limite de conforto – Postura sentada – Acelerômetro cadeira.....	105
Figura 5.40: Comparação entre o limite de percepção e o limite de conforto – Postura em pé – Acelerômetro placa.....	106
Figura 5.41: Razão entre o limite de conforto e percepção – Posição sentada – Acelerômetro placa.....	107
Figura 5.42: Razão entre o limite de conforto e percepção – Posição sentada – Acelerômetro cadeira.....	107
Figura 5.43: Razão entre o limite de conforto e percepção – Posição em pé – Acelerômetro placa.....	108

Figura 5.44: Comparação entre os resultados de homens e mulheres para o limite de conforto – Posição sentada – Acelerômetro placa.....	109
Figura 5.45: Comparação entre os resultados de homens e mulheres para o limite de conforto – Posição sentada – Acelerômetro cadeira.....	109
Figura 5.46: Comparação entre os resultados de homens e mulheres para o limite de conforto – Posição em pé – Acelerômetro placa.....	110
Figura 5.47: Efeito da postura na sensibilidade à vibração das pessoas para o limite de conforto.....	111

ANEXO A

Figura A.1: Sinal de resposta típico. Fonte Dally et al [1993].....	122
Figura A.2: Correspondência entre acelerações em r.m.s. e VDV's para períodos de exposição à vibração. Fonte: BS 6841 [1987].....	125

ANEXO B

Figura B.1: Aquisição de dados de um processo biofísico. Fonte: AqDados 7.0 [2003].....	127
Figura B.2: Conversão A/D de um sinal de força. Fonte: AqDados 7.0 [2003].....	129
Figura B.3: Exemplo de condicionamento do sinal. Fonte: AqDados 7.0 [2003].....	130
Figura B.4: Sinal lido por conversores com resolução de 4 e 5 bits. Fonte: AqDados 7.0 [2003].....	131
Figura B.5: Representação taxas ou frequências de amostragem. Fonte: AqDados 7.0 [2003].....	132
Figura B.6: Sinal senoidal de 100 Hz amostrado em diferentes taxas de amostragem. Fonte: AqDados 7.0 [2003].....	134

ANEXO D

Figura D.1: Esquema de um instrumento sísmico típico. Fonte: Holman [2001].....	138
Figura D.2: Sistema mecânico de um instrumento sísmico. Fonte: Holman [2001].....	138
Figura D.3: Resposta de um instrumento sísmico em termos do deslocamento dado pela Equação D.7. Fonte: Holman [2001].....	141
Figura D.4: Resposta em termos da aceleração de um instrumento sísmico para uma entrada harmônica de frequência ω_I como dado pela Equação D.11. Fonte: Holman [2001].....	142

ANEXO F

Figura F.1: Efeito da temperatura sobre a resposta em frequência do acelerômetro. Fonte: Kyowa.....	147
---	-----

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2

Tabela 2.1: Resumo dos experimentos.....	11
--	----

CAPÍTULO 3

Tabela 3.1: Coeficientes dinâmicos para diversas atividades.....	18
Tabela 3.2: Frequências de carregamento induzido por pessoas.....	21
Tabela 3.3: Frequências naturais de órgãos do corpo humano.....	31
Tabela 3.4: Efeitos da vibração sobre as pessoas.....	33
Tabela 3.5: Resumo dos trabalhos relacionados a vibrações no corpo humano.....	49
Tabela 3.6: Fatores de multiplicação da curva básica da ISO 2631/2 [1989].....	60

CAPÍTULO 4

Tabela 4.1: Distribuição do Índice de Massa Corporal para a população brasileira (%).....	64
Tabela 4.2: Distribuição do peso para a amostra utilizada.....	65
Tabela 4.3: Distribuição da estatura para a amostra utilizada.....	65
Tabela 4.4: Distribuição do Índice de Massa Corporal para a amostra utilizada.....	65
Tabela 4.5: Distribuição por faixa etária para a amostra utilizada.....	66
Tabela 4.6: Distribuição por faixa etária para a população brasileira.....	66
Tabela 4.7: Características das molas utilizadas na montagem experimental.....	68

CAPÍTULO 5

Tabela 5.1: Experimento 2 – Limite de percepção – Postura sentada – Acelerômetro 2.....	77
Tabela 5.2: Experimento 2 – Limite de percepção – Postura em pé – Acelerômetro 1.....	77

Tabela 5.3: Experimento 4 – Limite de conforto – Postura sentada – Acelerômetro 2.....	77
Tabela 5.4: Experimento 4 – Limite de conforto – Postura em pé – Acelerômetro 1.....	77
Tabela 5.5: Nível de confiança para a amostra estudada.....	78
Tabela 5.6: Limite de percepção – Valores médios e desvio-padrão referente às respostas nas posturas em pé e sentado.....	93

ANEXO E

Tabela E.1: Tipos de erros de um teste de hipótese.....	144
---	-----

ANEXO F

Tabela F.1: Características do excitador eletromagnético.....	146
Tabela F.2: Características do amplificador de sinais.....	146
Tabela F.3: Características dos acelerômetros.....	147
Tabela F.4: Características do sistema de aquisição de dados - Controladores de aquisição.....	148
Tabela F.5: Características do sistema de aquisição de dados – Condicionadores de sinais.....	148

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresenta-se alguns comentários iniciais sobre o problema da vibração em edificações e a necessidade de se conhecer os níveis de vibrações aceitáveis quanto ao conforto humano de modo que se possa projetar estruturas que estejam adequadas à utilização humana quanto a vibrações. Desta forma este capítulo está dividido da seguinte forma: algumas considerações iniciais do assunto conforto humano aos níveis de vibração; uma justificativa para a realização do estudo; os principais objetivos do trabalho e o escopo do trabalho.

1.1 - Considerações iniciais

Através da grande evolução tecnológica no campo da engenharia estrutural nos últimos anos, o emprego de novos materiais e o desenvolvimento de avançadas técnicas construtivas tem se tornado cada vez mais freqüente na construção civil. O significativo crescimento da utilização da estrutura metálica nas edificações é um exemplo típico desta tendência. Isso ocorre devido à necessidade de se obter um processo construtivo mais rápido, com grandes áreas ininterruptas, com capacidade de acomodação de aparelhos sofisticados e outros sistemas de serviços.

Portanto, as edificações concebidas em estrutura metálica apresentam vantagens tais como a fabricação de estruturas em escala industrial, que possibilita um alto controle de qualidade, com garantia das dimensões e propriedades dos materiais; rapidez de execução e limpeza das obras; alta resistência dos materiais; facilidade de construção, dentre outros. No entanto, apresentam desvantagens no que diz respeito ao seu comportamento dinâmico, devido à alta transmissibilidade destes materiais. Isto ocorre pelo fato destas estruturas estarem se tornando cada vez mais leves e esbeltas, normalmente com baixo fator de amortecimento estrutural, provocando redução nas freqüências naturais das estruturas e deixando-as mais suscetíveis a uma série de carregamentos dinâmicos, já que suas freqüências naturais passam a ficar cada vez mais próximas das freqüências de excitação. Com isso, as cargas dinâmicas podem produzir elevados níveis de vibração, os quais podem tanto comprometer a segurança estrutural como causar alteração na sensação de conforto dos ocupantes destas edificações.

A vibração em edificações pode ter sua origem em fontes externas como o vento, tráfego rodoviário ou ferroviário, ilustrado na Figura 1.1 (a); e por fontes internas como equipamentos domésticos ou industriais, tráfego de pedestres e/ou atividades rítmicas de grupos, ilustrado na Figura 1.1 (b), além de várias outras fontes. Portanto, é quase impossível que exista uma construção livre da presença de vibração. Cada uma destas fontes produz uma excitação característica, podendo ser periódica, apresentando diferentes amplitudes, frequências e direções; ou impulsivas. Desta forma, o conforto dos ocupantes de uma estrutura irá depender das vibrações, que por sua vez dependem das características da estrutura, como suas condições de contorno, massa, frequência natural, rigidez e capacidade de amortecimento; características das cargas de excitação, como sua variabilidade com o tempo, sua frequência de excitação e sua magnitude; e do nível de aceitabilidade e percepção humana, em termos de fatores de resposta levantados estatisticamente.

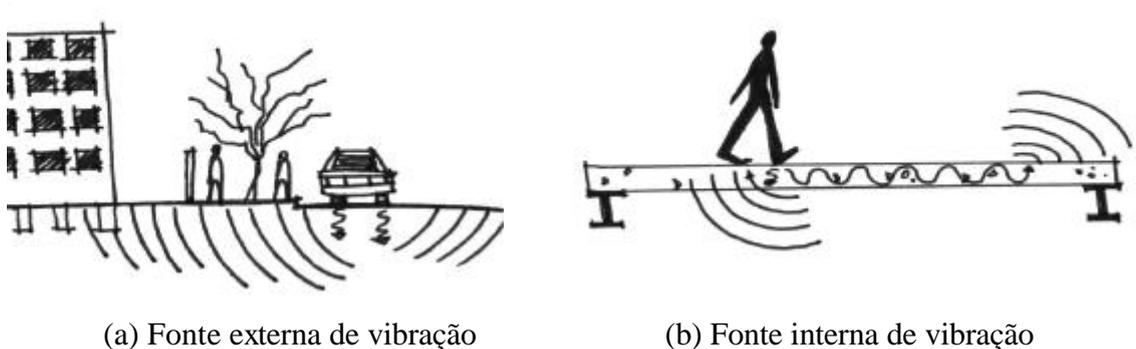


Figura 1.1: Fontes de excitação em edificações. Fonte: Sales, 2001.

Embora a vibração produzida em edificações possa induzir algumas pessoas a uma sensação de insegurança, na maior parte dos casos, isso não significa que exista algum risco de colapso estrutural. Os níveis de vibração apresentados nas diversas normas técnicas existentes são quantificados, geralmente, através de experimentos em laboratórios. Estes níveis de vibração aceitáveis em edificações dependem do tipo de utilização da construção (lazer, hospitalar, residencial, comercial, industrial, etc) e o horário de utilização (diurno ou noturno).

Deste modo, os experimentos relacionados à percepção e conforto à vibração possuem algumas limitações, principalmente devido ao fato de que outras variáveis, que algumas vezes não podem ser simuladas, influenciam na sensação de conforto à vibração, como por

exemplo o ruído. No entanto, outras variáveis importantes como direção, amplitude, frequência, postura e tipo de movimento são facilmente controladas. Neste trabalho, analisa-se apenas a vibração senoidal na direção vertical, buscando-se os níveis de vibração em termos de aceleração *r.m.s.* (*root mean square*) para uma determinada faixa de frequência nas posturas em pé e sentado.

Tradicionalmente, as estruturas são analisadas considerando-se as cargas atuantes aplicadas muito lentamente. Esta é a base da análise estática, sendo apropriada para o tratamento, por exemplo, de ações como o peso próprio. No entanto, nos casos em que as ações são variáveis no tempo, tais como a incidência de vento sobre edifícios altos, sismos, frenagens e acelerações de veículos em pontes e movimentos de pessoas sobre uma laje, os efeitos dinâmicos são importantes, podendo produzir níveis de vibração elevados. Portanto, com o já exposto até o momento, pode-se afirmar que os níveis de aceitabilidade à vibração devem ser estabelecidos em um estágio conceitual antecipado, levando-se em consideração a utilização da edificação. Com isso, a sensação de conforto em relação aos níveis de vibração dos ocupantes de uma edificação deve ser levada em consideração como um parâmetro de projeto para edificações construídas em estruturas metálicas.

1.2. Justificativa do trabalho

Com o crescimento da utilização da estrutura metálica, os problemas relacionados ao conforto humano quanto à vibração em ambientes construídos tem ganhado importância nos meios acadêmicos.

Diversos estudos relacionados à dinâmica estrutural têm sido realizados no Brasil, destacando-se principalmente os pesquisadores da COPPE/UFRJ (Varela, 2004; Vasconcelos, 1998). Em muitos destes trabalhos, buscam-se procedimentos para atenuação dos níveis de vibrações em edificações, tomando como base, em geral, as normas internacionais ISO 2631/1: 1997 e ISO 2631/2: 1989. Outras pesquisas têm sido realizadas para descrição de carregamentos devido a atividades humanas, principal fonte de vibrações que causam desconforto em edificações.

Contudo, não existem muitos estudos no Brasil relacionados à obtenção dos níveis de vibração em termos de percepção e conforto humano, podendo-se citar o trabalho de Misael (2001), que apresentou uma metodologia experimental para obtenção e análise dos níveis de vibrações relacionadas ao conforto em edificações.

Não há uma norma brasileira relacionada ao assunto. Portanto, os estudos utilizam as normas internacionais, não se conhecendo a concordância destas normas às particularidades da população brasileira. Suspeita-se que fatores subjetivos aplicáveis a cada população específica possam influenciar na aceitabilidade à vibração. Com isso, o estudo do conforto humano à vibração requer um desenvolvimento mais detalhado para uma aplicação adequada no Brasil, verificando-se a concordância dos resultados com aqueles apresentados em normas internacionais.

O assunto deste trabalho faz parte do tema “Conforto Humano”, tendo já sido desenvolvidos três trabalhos nesta instituição: duas dissertações de mestrado, a primeira na qual foram avaliados os parâmetros de resposta dinâmica estrutural quanto ao critério de conforto de vedações horizontais industrializadas segundo o guia do *SCI - Design Guide on the Vibration of Floors* (Sales, 2001); e a segunda onde se estudou o procedimento simplificado de projeto de pisos quanto às vibrações e indicações de parâmetros de resposta para quantificar o nível de conforto humano de um dado piso e outra no estudo numérico computacional das características dinâmicas do problema de vibrações de pisos induzidos por atividades humanas (Campos, 2003). O outro trabalho sobre o tema foi um projeto de iniciação científica, no qual foi utilizado o método dos elementos finitos através do programa *ANSYS*, que consistiu em se avaliar algumas situações de arranjos de pisos que haviam sido estudados na primeira dissertação de mestrado (Pereira et al, 2003). Este trabalho visa, portanto, alargar e ampliar os estudos anteriores, atuando na parte relativa à quantificação dos níveis de vibração perceptíveis e aceitáveis quanto ao conforto para edificações.

1.3. Objetivos

Este trabalho tem como principal objetivo estudar a influência da vibração sobre a percepção e conforto humano. Deste modo, os limites de percepção à vibração e os níveis que causam desconforto às pessoas são medidos. Com isso, deve-se gerar curvas de conforto humano baseado nos critérios de vibração, semelhantes àsquelas encontradas na norma internacional ISO 2631/2: 1989.

Os resultados encontrados para os limites de vibração são comparados com os valores encontrados em outros trabalhos (Parsons & Griffin, 1988; Osborne & Boarer, 1982, Misael, 2001; Harazin & Grzesik, 1998) e com a própria norma ISO 2631/2: 1989. Como esta norma vem sendo aplicada no Brasil, pretende-se verificar sua concordância para uma amostra da

população brasileira. Contudo, obteve-se a maioria dos componentes da amostra dentro do ambiente universitário. Caso os níveis de vibração encontrados neste trabalho para uma amostra da população nacional não estejam em conformidade com as normas internacionais, principalmente a ISO 2631/2: 1989, espera-se que tais resultados possam contribuir para a criação de uma norma brasileira que trate dos níveis de vibração aceitáveis quanto ao conforto humano em edificações.

1.4. Escopo do trabalho

No Capítulo 1 é feita uma breve introdução sobre o problema da vibração em edificações relacionado ao conforto humano. Apresenta-se uma justificativa para a realização do estudo bem como os objetivos da dissertação.

No Capítulo 2 apresenta-se uma caracterização do problema a ser estudado de modo que o leitor possa ter uma noção prévia das peculiaridades do trabalho.

Já no Capítulo 3 faz-se uma revisão bibliográfica onde são apresentados os principais trabalhos encontrados na literatura técnico-científica sobre o tema conforto humano á vibração. Neste capítulo apresentam-se informações sobre fonte de vibrações em edificações, bem como os efeitos da vibração sobre o conforto e a saúde. Alguns trabalhos importantes sobre o assunto conforto humano quanto a vibrações são apresentados, realizando-se também considerações de algumas normas internacionais relacionado ao tema.

No Capítulo 4, a metodologia para a realização dos experimentos é apresentada. Neste capítulo realizam-se considerações sobre as características da amostra a ser utilizada, como também sobre a montagem a ser utilizada, como também sobre a montagem experimental e os procedimentos para cada experimento.

No Capítulo 5 apresentam-se os resultados encontrados nos experimentos. Neste capítulo, realiza-se uma análise crítica dos resultados, apresentando-se um estudo sobre o limiar de percepção bem como uma verificação das incertezas nas respostas para este estudo, o efeito da postura, considerações sobre a superfície de suporte ideal para a realização das medições conforme a postura das pessoas. Realiza-se também uma avaliação dos critérios de conforto para ambientes residenciais, comparando-os com as recomendações da ISO 2631/2: 1989.

No Capítulo 6 apresentam-se as conclusões do trabalho, onde também são fornecidas sugestões para trabalhos futuros.

No Capítulo 7 apresentam-se as referências bibliográficas utilizadas neste trabalho.

No Anexo A fornecem-se informações sobre análises estatísticas de sinais de resposta no domínio do tempo. Apresentam-se também os principais parâmetros estatísticos que podem ser extraídos de um registro no tempo e são utilizados em diversas normas técnicas e trabalhos.

No Anexo B trata-se dos conceitos básicos necessários para a utilização de um sistema de aquisição de dados.

No Anexo C apresenta-se o formulário respondido pelos voluntários para a participação nos experimentos.

Já no Anexo D descreve-se o princípio de funcionamento de instrumentos sísmicos, comentado sobre a faixa de frequência útil e uma metodologia para calibração de acelerômetros.

No Anexo E apresenta-se sobre o teste de hipótese do tipo U Mann-Whitney conforme descrito em Fonseca & Martins (1996).

Finalmente, no Anexo F descreve-se as principais características dos equipamentos utilizados na montagem experimental.

CAPÍTULO 2 – CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA A SER ESTUDADO

A aceitabilidade de determinados níveis de vibrações em edificações depende de três fatores: características da estrutura da edificação, tipo de ação de excitação e limites aceitáveis de vibração sob o ponto de vista do conforto. Na Figura 2.1 pode ser visto um fluxograma ilustrativo do problema de vibração em edificações.

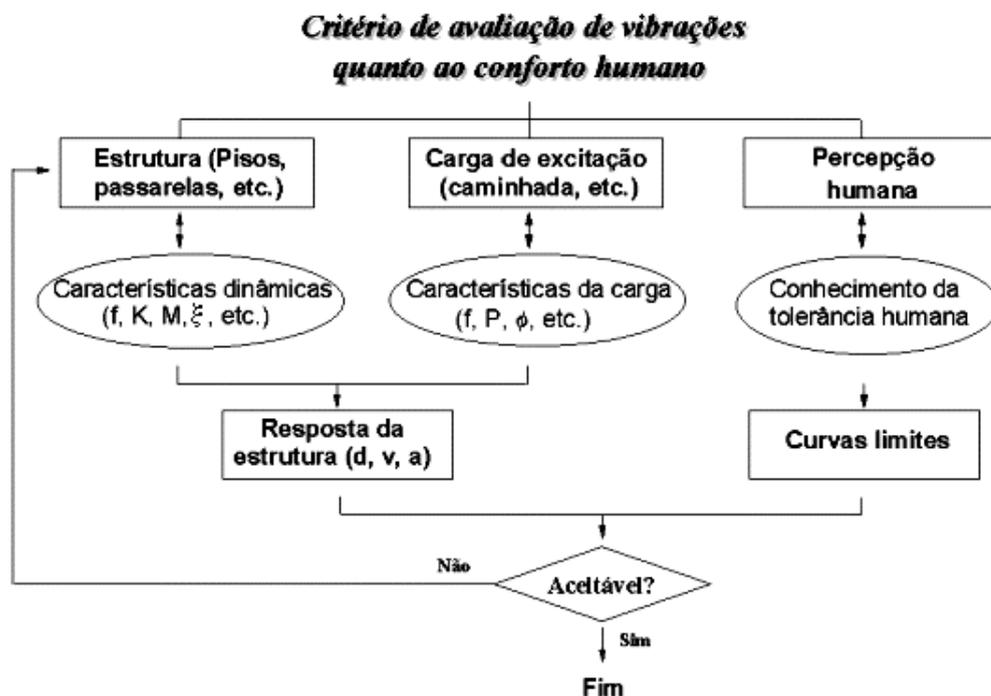


Figura 2.1: Fluxograma ilustrativo da avaliação da vibração em edificações. Fonte Campos, 2003.

Para a avaliação de uma edificação quanto ao critério de conforto humano, deve-se seguir, de alguma forma, os passos citados na Figura 2.1. À medida que os parâmetros acima são conhecidos de forma detalhada, maior a probabilidade de sucesso no processo de análise de edificações quanto à vibração.

Portanto, neste capítulo tem-se como objetivo apresentar as peculiaridades do problema a ser estudado. O principal objetivo deste trabalho está relacionado com uma etapa do fluxograma apresentado na Figura 2.1, ou seja, gerar curvas de conforto humano

relacionadas à vibração. Deste modo, o que se deseja medir são os níveis de vibração aceitáveis, em termos de acelerações, para determinadas situações. Estas situações correspondem a experimentos diferentes, cada qual com um objetivo distinto. Na Figura 2.2 mostra-se, de forma esquemática, as etapas do procedimento experimental, ilustrando os resultados pretendidos com as medidas experimentais.

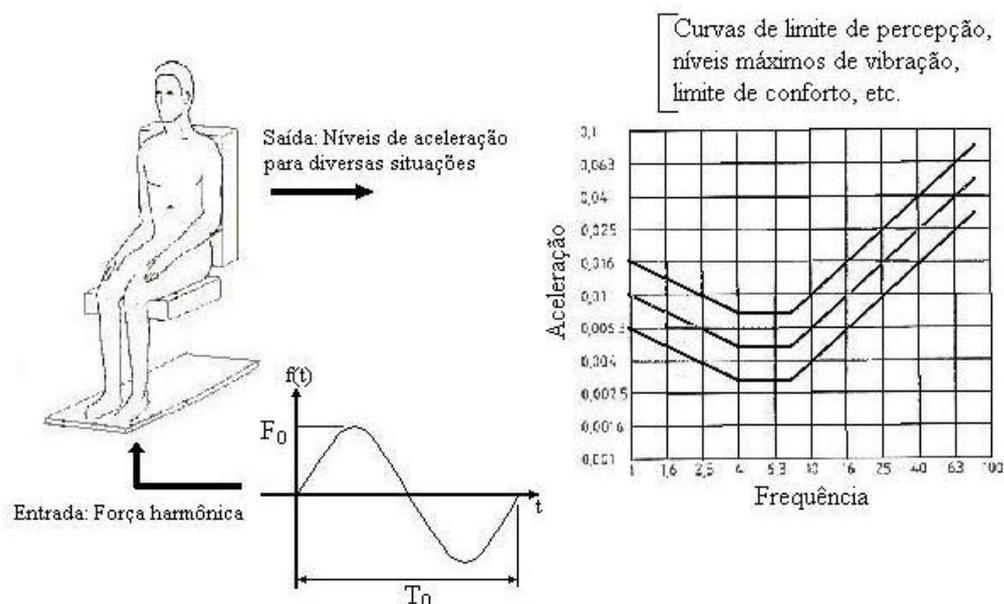


Figura 2.2: Esquema do problema a ser estudado

A montagem experimental consiste em uma chapa metálica apoiada sobre quatro molas, onde uma vibração senoidal é transmitida a esta por um excitador eletromagnético acoplado no centro geométrico da placa, em sua superfície inferior. O sinal de vibração é transmitido ao excitador eletromagnético através de um gerador de funções, onde se pode determinar o tipo de vibração, que neste caso escolhe-se um sinal senoidal, e a frequência. Já a amplitude de vibração é ajustada através de um amplificador de sinais pelo próprio voluntário, que determina os níveis de aceleração conforme o objetivo do experimento. O movimento é captado por dois acelerômetros localizados na superfície superior da placa e na superfície inferior do assento da cadeira. Estes acelerômetros estão ligados a um sistema de aquisição de dados. Com isso, os dados são transmitidos a um microcomputador para serem analisados através de um programa específico de aquisição e análise de dados (*AqDados*). Na Figura 2.3 apresenta-se uma imagem da montagem experimental. Maiores detalhes sobre esta montagem estão apresentados no Capítulo 4, onde se apresenta também a metodologia para a



Figura 2.3: Montagem experimental.

realização dos experimentos. Dentre estes experimentos, pode-se citar os seguintes: determinação do limite de percepção; estudo da incerteza da resposta do limite de percepção; limite de conforto para ambientes residenciais e transmissibilidade da montagem. Os tipos de experimentos realizados estão resumidos na Tabela 2.1. Para todos os experimentos, um estudo sobre a influência da postura é realizado. Portanto, os voluntários são requeridos a participarem dos experimentos de duas formas: em pé sobre a placa metálica e sentado sobre uma cadeira.

Para todos os experimentos realizados, a direção do movimento vibratório é vertical. As frequências estudadas são: 12, 16, 20, 25, 32, 40, 50, 63 e 80 Hz. Procura-se utilizar as frequências de banda 1/3 oitava, no entanto, devido à precisão do gerador de funções, não é possível produzir sinais nas frequências de 12,5 e 31,5 Hz. Devido a limitações do excitador eletromagnético, não é possível aplicar movimentos com frequência inferior a 10 Hz. A duração média dos experimentos é de 10 minutos, não gerando risco à saúde dos voluntários para este tempo de exposição e nível de intensidade da vibração.

Um fato importante verificado neste trabalho diz respeito à transmissibilidade da montagem experimental. Realiza-se uma discussão sobre a superfície de contato adequada à instalação do acelerômetro para cada experimento, de modo que a aceleração em que a pessoa está submetida possa ser captada de forma adequada pelo acelerômetro. A transmissibilidade é calculada dividindo-se o valor de aceleração *r.m.s.* captado pelo acelerômetro localizado na cadeira pelo respectivo valor captado pelo acelerômetro da placa.

Definindo-se o que se deseja medir e a montagem experimental para realização destas medições, passa-se à obtenção da amostra. Os voluntários foram escolhidos em sua maioria dentro do próprio ambiente universitário. O tamanho da amostra é verificado conforme procedimento apresentado por Fonseca & Martins (1996). Deste modo, pode-se confirmar a variabilidade das respostas individuais, com valores altos para o tamanho da amostra. Maiores detalhes sobre as características da amostra podem ser encontrados no Item 4.1 do Capítulo 4.

Na análise dos resultados, as respostas encontradas são apresentadas sob a forma de gráficos relacionando os níveis de vibrações em termos de acelerações *r.m.s.* com as frequências. Estes níveis encontrados para o limite de percepção e conforto são confrontados com alguns trabalhos encontrados na literatura técnico-científica e com a norma internacional ISO 2631/2: 1989.

Finalmente, um resumo das principais conclusões obtidas nos experimentos é realizado, apresentando-se recomendações para trabalhos futuros.

Tabela 2.1: Resumo dos experimentos

Experimento	Tipo de vibração	Postura	Amostra	Método	Objetivos
1	Senoidal vertical (eixo z) – Freq: 12, 16, 20, 25, 32, 40, 50, 63 e 80 Hz.	Em pé e sentado	15 homens e 15 mulheres	Ajuste	Determinar a transmissibilidade da montagem experimental.
2	Senoidal vertical (eixo z) – Freq: 12, 16, 20, 25, 32, 40, 50, 63 e 80 Hz.	Em pé e sentado	15 homens e 15 mulheres	Ajuste	Determinar o limite de percepção à vibração.
3	Senoidal vertical (eixo z) – Freq: 12, 16, 20, 25, 32, 40, 50, 63 e 80 Hz.	Em pé e sentado	15 homens e 15 mulheres	Ajuste	Determinar o intervalo de incerteza das respostas para o limite de percepção à vibração.
4	Senoidal vertical (eixo z) – Freq: 12, 16, 20, 25, 32, 40, 50, 63 e 80 Hz.	Em pé e sentado	15 homens e 15 mulheres	Ajuste	Determinar os níveis de vibração que as pessoas consideram como desconfortável em um ambiente residencial e sua relação com o limite de percepção.

CAPÍTULO 3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 - Fontes de vibrações em edificações

Em análise dinâmica de estruturas, é conveniente classificar os carregamentos dinâmicos em periódicos ou não-periódicos. Os carregamentos periódicos são carregamentos repetitivos, exibindo a mesma variação em ciclos de duração T_0 . A forma mais simples de carregamento periódico pode ser representada por uma função senoidal, como mostrado na Figura 3.1 (a). Este tipo de carregamento periódico é conhecido como harmônico simples. Tais carregamentos são característicos do efeito de desbalanceamento em máquinas rotativas. Uma outra forma de carregamento periódico está ilustrada na Figura 3.1 (b). Este carregamento é conhecido como periódico não-harmônico. Pela análise de Fourier, um carregamento periódico pode ser representado por uma soma de um suficiente número de componentes harmônicas simples, conhecida como série de Fourier, como será demonstrado posteriormente. Os carregamentos que não podem ser classificados como periódicos são ditos não-periódicos. Estes carregamentos podem ser de curta duração ou impulsivos, tais como uma rajada de vento ou uma explosão (Figura 3.1 (c)), ou de longa duração, como terremotos (Figura 3.1 (d)).

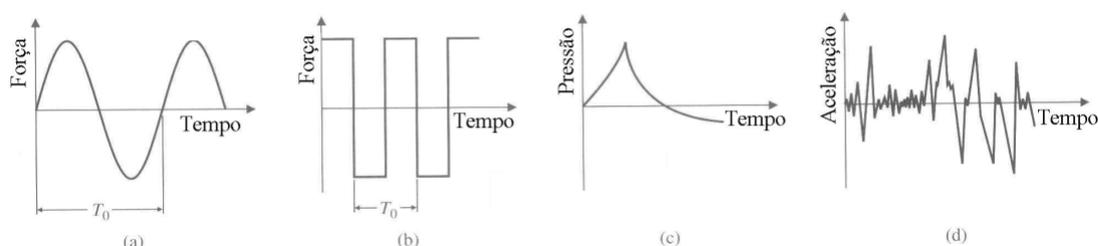


Figura 3.1: Tipos de carregamentos dinâmicos – (a) harmônico simples; (b) periódico não harmônico; (c) não periódico de curta duração; (d) não periódico de longa duração. Fonte: Tedesco et al, 1998.

As ações dinâmicas também podem ser caracterizadas como: determinística, na qual as características do sistema e da excitação são previamente conhecidas; e não determinística, randômica ou estocástica, quando não se pode prever o seu valor instantâneo em qualquer tempo futuro. Neste caso, as características pertinentes ao sistema e à excitação são determinadas em termos de probabilidade de ocorrência, ou seja, definidos a partir de um

conjunto amostral com certa definição probabilística. Exemplos de ações determinísticas e não determinísticas estão mostradas nas Figuras 3.2 e 3.3.

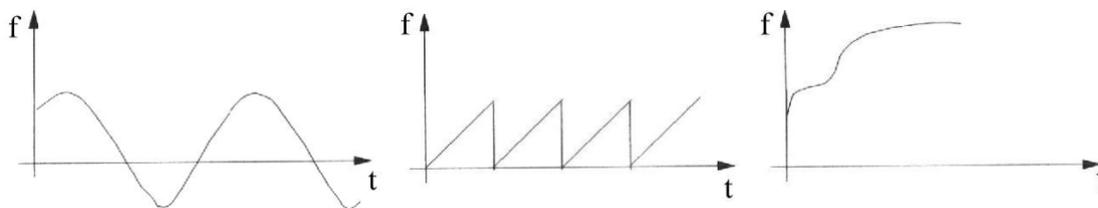


Figura 3.2: Tipos de ações dinâmicas – funções determinísticas.



Figura 3.3: Tipos de ações dinâmicas – função não determinística.

Na prática, a grande maioria das estruturas pode estar sujeita a algum tipo de carregamento dinâmico durante sua vida útil, sendo que os mais significantes podem ser atribuídos a uma das seguintes fontes: (1) ambiental, (2) equipamentos ou máquinas, (3) tráfego de pedestres e/ou veículos, (4) atividades humanas e (5) explosões. De uma fonte para outra, ocorrem variações das características importantes das excitações, de forma que processos distintos de avaliação podem ser válidos de acordo com a causa potencial mais importante.

Por exemplo, a carregamento provocado pelo vento em uma edificação é uma função da velocidade do vento, altura e forma da edificação. Forças aerodinâmicas na forma de força de arrasto podem ser computadas como uma média do registro da velocidade do vento de forma similar à mostrada na Figura 3.4 (Tedesco et al, 1998).

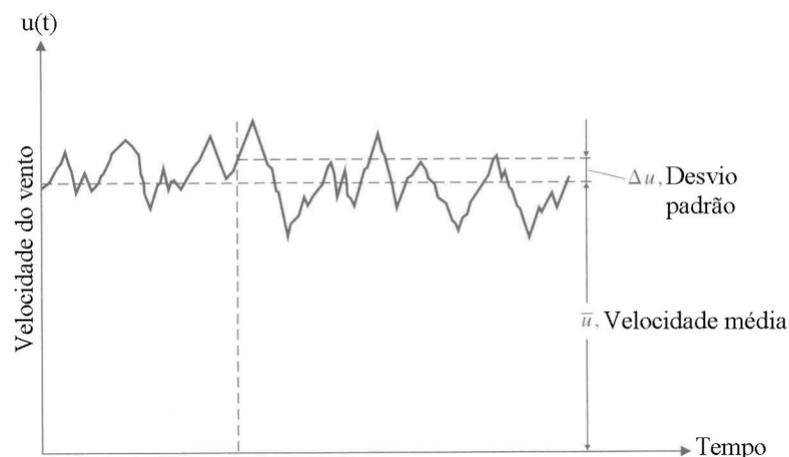


Figura 3.4: Registro típico de velocidade do vento. Fonte: Tedesco et al, 1998.

Uma fonte significativa de vibração em estruturas, comum em instalações industriais, é a gerada por equipamentos e máquinas. A natureza destas cargas é tipicamente periódica. As vibrações induzidas por tráfego de veículos também representa uma fonte de carregamento dinâmico, podendo ser classificada como fonte externa ou interna, dependendo da situação. Tal problema é geralmente tratado através do isolamento entre a fonte e a edificação, já que o objetivo é barrar a transmissão da onda vibratória.

Outra fonte de carregamento dinâmico é atribuída a explosões. A carga dinâmica que atinge uma estrutura devido a uma explosão manifesta primeiramente uma elevada sobrepressão, como ilustrado na Figura 3.1 (c), seguido de movimentos do solo conforme ilustrado na a Figura 3.5. A sobrepressão devido à explosão é mais devastadora para estruturas próximas ao evento. Contudo, a agitação no terreno resultante de uma grande detonação subterrânea pode afetar estruturas a quilômetros de distância (Tedesco et al, 1998).

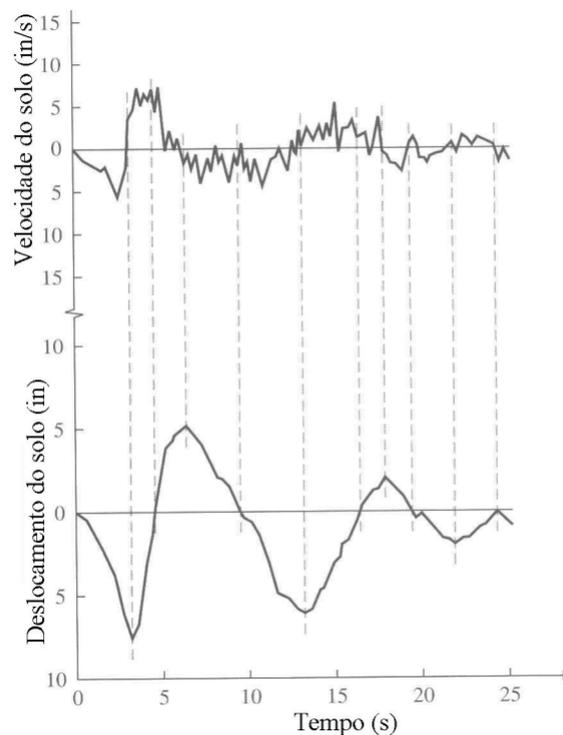


Figura 3.5: Registro típico de movimento de terreno produzido por uma explosão no subsolo.

Fonte: Tedesco et al, 1998.

Segundo a ISO 2631/2: 1989, a vibração estrutural das edificações, em função de seu comportamento ao longo do tempo, pode ser definida como:

- Transitória ou impulsiva - definida como a rápida formação de um pico, seguido de um decremento, envolvendo ou não vários ciclos de vibração, dependendo da frequência e do amortecimento. Pode consistir também de vários ciclos de mesma amplitude, desde que a duração seja curta (menos que 2s);
- Intermitente - é uma seqüência de vibrações incidentes, cada qual de curta duração, separada por intervalos de vibrações de níveis muito menores. Vibrações intermitentes podem ser geradas por fontes de impulsos (como bate-estacas ou prensas de forja) ou fontes repetitivas (como quebradores de pavimentos) ou fontes que operam intermitentemente, mas que produziriam vibrações contínuas se operassem continuamente (como máquinas intermitentes, aparelhos de elevação, trens ferroviários e tráfego rodoviário);
- Contínua - é aquela que se mantém ininterrupta durante o período em consideração.

Em relação às fontes internas de vibração, as mais freqüentes, e também a mais importante, são aquelas provocadas por atividades humanas, como por exemplo, o tráfego de pedestres, pessoas dançando ou praticando ginástica rítmica em academias, etc. Estas fontes de excitação são comuns em muitas estruturas como estádios, discotecas, teatros, escritórios e residências (Sales, 2001).

A caminhada é a forma de excitação mais comum. Um pedestre caminhando regularmente aplica uma força repetida periodicamente ao piso, podendo provocar um pico em sua resposta estrutural. De uma forma aproximada, a geometria do corpo humano caminhando é um movimento organizado de pernas que provoca uma subida e uma descida da massa efetiva do corpo para cada passada, ilustrado na Figura 3.6. Esse movimento de subida e descida é de aproximadamente 50 mm, de pico a pico, mas depende do ângulo entre uma perna e outra completamente esticada, ou seja, ao comprimento das passadas que o pedestre está realizando em sua caminhada (Sales, 2001).

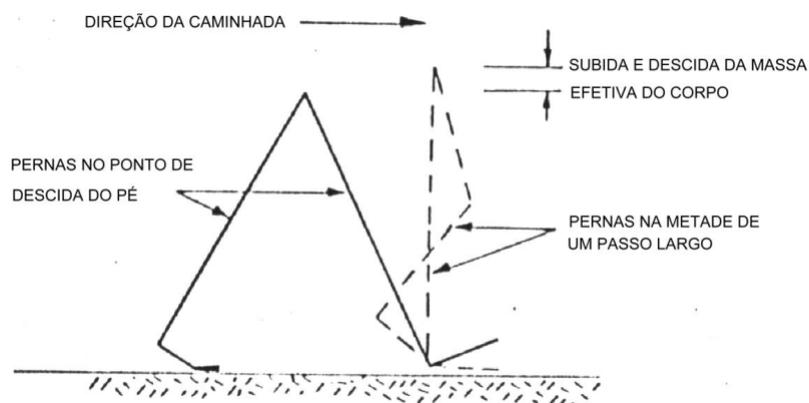


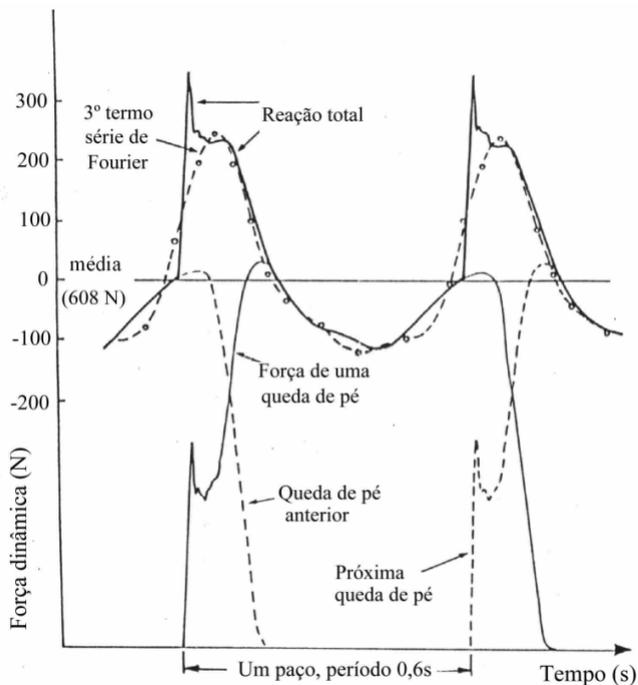
Figura 3.6: Geometria simplificada de uma passada.

Fonte: Ohlsson, 1982.

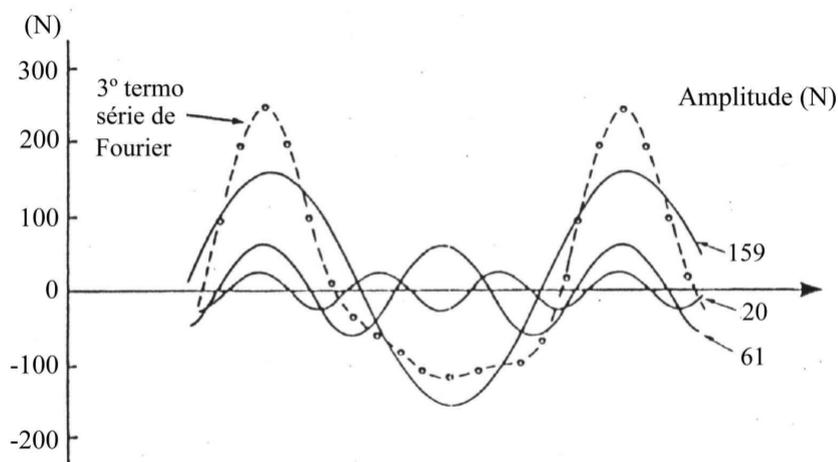
Conforme Varela (2004), o caminhar humano varia de pessoa para pessoa de acordo com a idade, tipo físico, cultura, personalidade, etc. Um jovem apresenta um balanço vertical mais proeminente, com impactos de calcanhar mais intensos, possivelmente solicitando a estrutura mais severamente. O idoso por sua vez apresenta um caminhar suave, pendular.

As acelerações da massa do corpo estão associadas com reações no piso, sendo estas aproximadamente periódicas, na freqüência do passo. A variação da força aplicada ao piso pode ser resolvida como uma série de componentes senoidais (série de Fourier), com o termo

fundamental correspondendo bem à simplificação visual mostrada na Figura 3.6. A Figura 3.7 (a) apresenta-se um registro experimental típico da força dinâmica do caminhar humano sobre uma superfície rígida, gerando uma amplitude de força entre 100 N e 300 N. A função matemática da reação do piso, aproximada por uma série de Fourier com três termos, é definida pela Equação 3.1 e está representada graficamente na Figura 3.7 (b).



a)



b)

Figura 3.7: Excitação típica de uma caminhada.

a) força de descida da passada e reação no piso.

b) componentes de Fourier da reação no piso.

Fonte: Ohlsson, 1982.

$$p(t) = P \cdot \left[1 + \sum a_i \cdot \cos(2 \cdot p \cdot i \cdot f_{step} \cdot t + \phi_i) \right] \quad (3.1)$$

onde,

P - peso de uma pessoa.

α_i - coeficiente dinâmico do i -ésimo harmônico da frequência fundamental da força.

i - número do i -ésimo harmônico da frequência fundamental da força.

f_{step} - frequência fundamental do passo do caminhar humano.

t - instante de tempo.

ϕ_i - ângulo de fase entre o i -ésimo e o primeiro harmônico.

Os coeficientes de Fourier α_i para a função da Equação 3.1 são determinados a partir de medições experimentais considerando um caso específico de atividade desenvolvida. Apresenta-se na Tabela 3.1 as faixas de frequências fundamentais de algumas atividades humanas, associadas aos seus respectivos harmônicos, bem como os primeiros coeficientes desta série (Wyatt, 1989 apud Campos, 2003).

Tabela 3.1: Coeficientes dinâmicos para diversas atividades

Harmônico i	Pessoa caminhando		Exercícios aeróbicos		Grupo de dança	
	f_{step}, Hz	a_i	f_{step}, Hz	a_i	f_{step}, Hz	a_i
1	1,6 – 2,2	0,5	2 – 2,75	1,5	1,5 – 3	0,5
2	3,2 – 4,4	0,2	4 – 5,5	0,6	-	-
3	4,8 – 6,6	0,1	6,8 – 25	0,1	-	-
4	6,4 – 8,8	0,05	-	-	-	-

Fonte: Wyatt, 1989 apud Campos, 2003.

Os valores médios dos coeficientes de Fourier relatados por Rainer et al (1988) em um estudo canadense para carregamentos em passarelas de pedestres estão mostrados na Figura 3.8. Os efeitos das frequências mais altas, especialmente o impulso devido ao contato dos pés com o piso, variam consideravelmente de pessoa para pessoa.

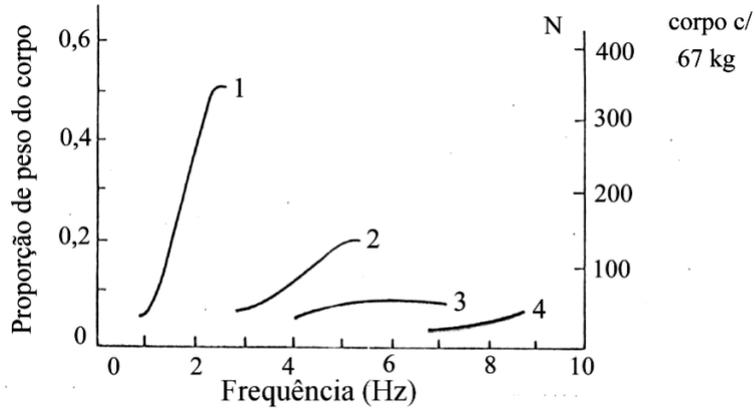


Figura 3.8: Amplitudes das componentes de Fourier para uma caminhada regular. Fonte: Rainer et al, 1988.

Varela (2004) apresenta uma aproximação matemática da reação do piso mostrada na Figura 3.7 (a). Com isso, a função matemática proposta não se trata simplesmente de uma série de Fourier. Essa função também inclui em sua formulação o pico representativo do impacto do calcanhar no piso. Deste modo, apresenta-se a Equação 3.2, que está representada na Figura 3.9.

$$\begin{aligned}
 F(t) &= \left(\frac{fmiF_m - P}{0,04T_p} \right) t + P && \text{se } 0 \leq t < 0,04T_p \\
 F(t) &= fmiF_m \left[\frac{C_1(t - 0,04T_p)}{0,02T_p} + 1,0 \right] && \text{se } 0,04T_p \leq t < 0,06T_p \\
 F(t) &= F_m && \text{se } 0,06T_p \leq t < 0,15T_p \quad (3.2) \\
 F(t) &= P + \sum_{i=1}^{nh} Pa_i \text{sen}[2\pi f_c(t + 0,1T_p) - f_i] && \text{se } 0,15T_p \leq t < 0,90T_p \\
 F(t) &= 10(p - C_2) \left(\frac{t}{T_p} - 1 \right) + P && \text{se } 0,90T_p \leq t < T_p
 \end{aligned}$$

onde,

F_m – valor máximo da série de Fourier e é dado pela Equação 3.3;

fmi – fator de majoração do impacto do calcanhar, ou seja, é a relação entre o valor do pico referente ao impacto do calcanhar e o valor máximo da série de Fourier (F_m);

C_1 e C_2 – coeficientes dados pelas Equações 3.4 e 3.5.

$$F_m = P \left(1 + \sum_{i=1}^{nh} a_i \right) \quad (3.3)$$

$$C_1 = \left(\frac{1}{fmi} - 1 \right) \quad (3.4)$$

$$C_2 = \begin{cases} P(1 - a_2) & \text{se } nh = 3 \\ P(1 - a_2 + a_4) & \text{se } nh = 4 \end{cases} \quad (3.5)$$

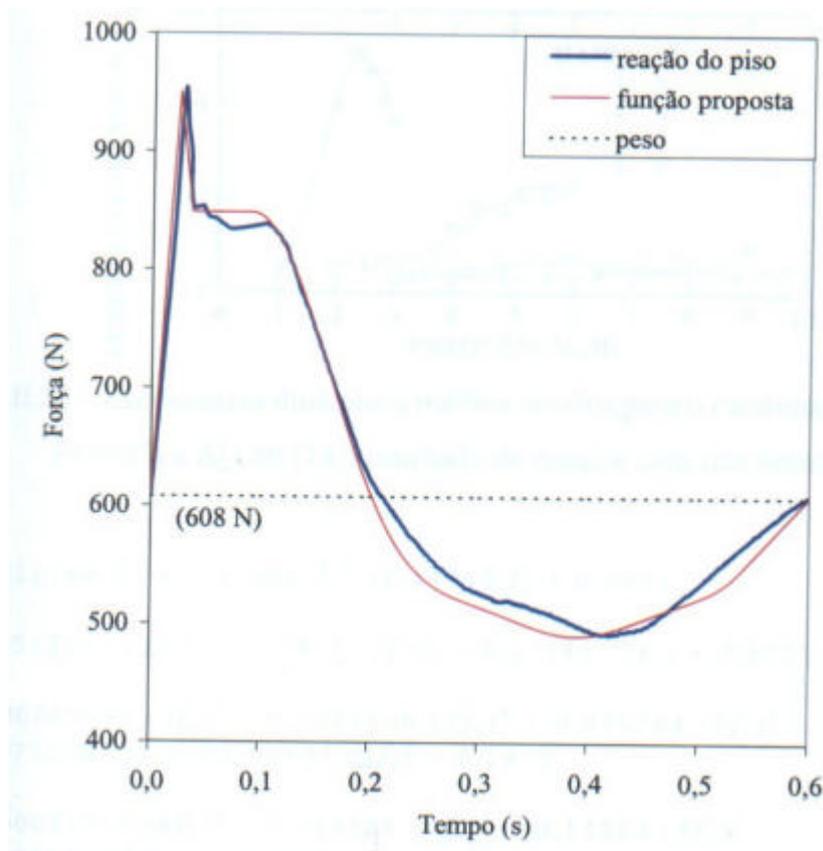


Figura 3.9: Comparação entre a função matemática proposta e os resultados obtidos por Ohlsson (1982). Fonte: Varela, 2004.

Varela (2004) também afirma que nem sempre os três primeiros coeficientes da série de Fourier são suficientes para representar adequadamente as atividades humanas. Este autor afirma que pode ocorrer que o valor da frequência de harmônica superior, o quarto harmônico, por exemplo, seja próximo o suficiente de uma das frequências fundamentais da estrutura, fazendo com que a resposta da mesma seja amplificada consideravelmente.

Segundo Wyatt (1989) apud Campos (2003), a frequência de passos em uma caminhada pode variar de 1,4 a 2,5 Hz, com a amplitude da força tendendo a aumentar consideravelmente com o aumento da frequência. Entretanto, a frequência dos passos de uma caminhada que ocorre no interior de uma edificação comumente apresenta-se por volta de 1,6 Hz.

Bachmann & Ammann (1987) apud Campos (2003) afirmam que um passo importante a ser realizado durante uma análise dinâmica consiste na identificação e distinção das várias frequências dos carregamentos induzidos pelas pessoas. Investigações prévias demonstraram a interdependência de parâmetros como: velocidade da caminhada, distância de um passo e sua frequência. Na Tabela 3.2 apresentam-se alguns desses valores.

Tabela 3.2: Frequências de carregamento induzido por pessoas

Tipo de carregamento	Velocidade (m/s)	Distância do passo (m)	Frequência do passo (Hz)
Caminhada lenta	1,1	0,6	1,7
Caminhada normal	1,5	0,75	2,0
Caminhada rápida	2,2	1,0	2,3
Corrida normal	3,3	1,3	2,5
Corrida rápida	5,5	1,75	3,2

Fonte: Bachmann & Ammann (1987) apud Campos (2003).

Conforme Bachmann & Ammann (1987) apud Campos (2003), a corrida é um movimento em que o contato com a superfície da estrutura é descontínuo. Essa força descontínua é representada pela metade de uma função senoidal durante o contato, apresentando valor zero quando o contato é perdido. A Equação 3.6 representa esse carregamento, onde t_a representa a duração de aplicação da força quando uma pessoa corre, T_p é o período do passo e a variável k_p é definida pela relação $p(t)_{\text{máx}}/P$. Nessa expressão, $p(t)_{\text{máx}}$ é a maior amplitude da função senoidal e P é o peso do indivíduo.

$$\begin{aligned}
 p(t) &= k_p \cdot P \cdot \text{sen}(\mathbf{p} \cdot f_{step} \cdot t) \rightarrow t < t_a \\
 p(t) &= 0 \rightarrow t_a < t < T_p
 \end{aligned}
 \tag{3.6}$$

O carregamento em função do tempo para este tipo de atividade pode ser simulado por uma seqüência de forças impulsivas com um certo intervalo de duração t_c (tempo de contato) seguido por intervalo t_p em que a força é zero, quando os pés deixam de estar em contato com o piso. Propõe-se que a função para este tipo de carregamento possa ser expressa por uma seqüência de pulsos semi-senoidais, conforme mostrado nas Figuras 3.10 e 3.11. A faixa de freqüência entre 1,8 a 3,4 Hz é geralmente considerada para esse tipo de excitação.

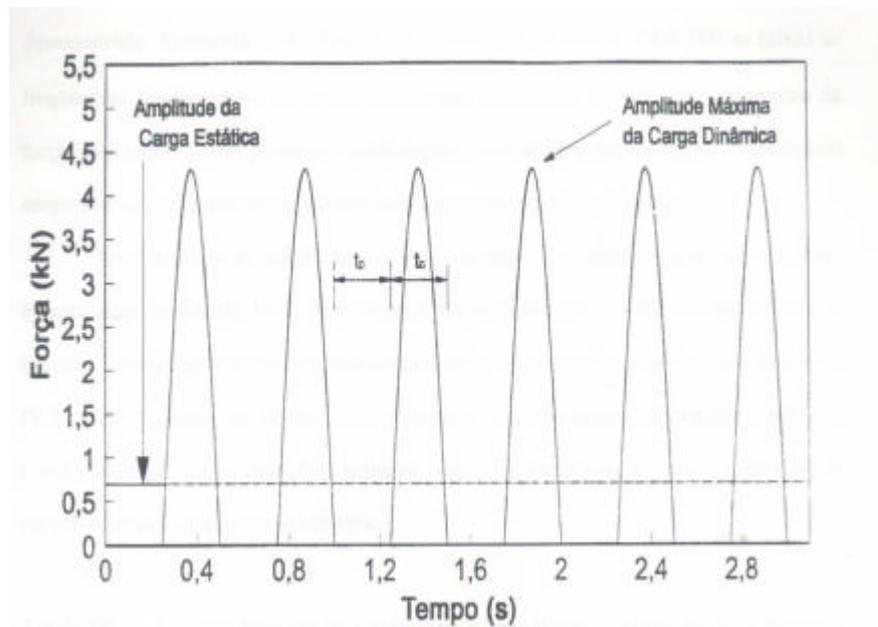


Figura 3.10: Sinal característico, no domínio do tempo, da força de excitação gerada por uma pessoa pulando na freqüência de 2,0 Hz. Fonte: Vasconcelos, 1998.

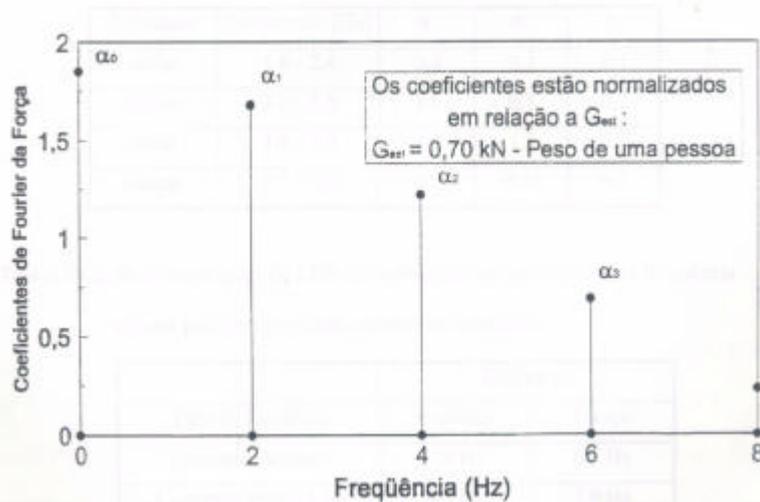


Figura 3.11: Sinal característico, no domínio da frequência, da força de excitação gerada por uma pessoa pulando na frequência de 2,0 Hz. Fonte: Vasconcelos, 1998.

Um caso de excitação dinâmica provocada por atividade humana que também pode ser considerada é a dança. A faixa de frequência de 1,6 a 3,0 Hz é geralmente considerada para essa excitação, a qual também é frequentemente governada pelo ritmo da música. O mesmo modelo matemático adotado para carregamento contínuo (caminhada, por exemplo) é recomendado para esse caso.

3.2 - Efeitos da Vibração Sobre a Saúde

A vibração no corpo humano pode ser definida como todo movimento transmitido ao corpo por um evento externo, como por exemplo, quando o corpo está sobre uma superfície que está vibrando. Existem diversas ambientes em que as pessoas podem ficar expostas a vibrações nocivas ao organismo, destacando-se:

- Vibrações em edificações (residenciais, comerciais, etc) provocadas por diversas fontes descritas no Item 3.1;
- No ambiente de trabalho, como por exemplo, na operação de máquinas e ferramentas (motosserras, britadeiras, etc) e transporte de carga e passageiros;
- Em veículos rodoviários e/ou ferroviários.

Nas últimas três décadas, diversos pesquisadores têm se empenhado na avaliação dos efeitos patológicos e psicológicos da vibração sobre o corpo humano. Segundo Chaffin et al

(1999) apud Balbinot (2001), os efeitos biológicos da exposição à vibração são evidentes e esforços grandiosos devem ser realizados com o intuito de reduzir tais exposições.

A vibração freqüentemente é considerada apenas um problema de engenharia, porém deve ser considerado também um problema médico quando está relacionado ao ser humano. A aviação naval e a força aérea dos Estados Unidos, desde 1971, têm desenvolvido estudos com a preocupação em relação a exposição à vibração a que estão sujeitos seus pilotos, e o conseqüente efeito desta exposição na saúde física e mental (Smith, 2000 apud Balbinot, 2001).

O corpo humano é uma estrutura biomecânica extremamente complexa, sendo sua sensibilidade à vibração dependente de diversos fatores, tais como, postura, tensão muscular, freqüência, amplitude, duração e direção da vibração. Segundo Gerges [1992], o corpo humano pode ser considerado como um sistema não-linear com vários graus de liberdade, com propriedades mecânicas diferentes de pessoa para pessoa. Griffin (1996), afirma que, para a faixa de freqüência de 2 a 30 Hz, o corpo humano pode ser modelado como um sistema linear, podendo ser aproximado ao simples sistema massa-mola-amortecedor.

Cada parte do corpo pode tanto amortecer, como amplificar as vibrações, dependendo da faixa de freqüência da excitação. As amplificações ocorrem quando partes do corpo passam a vibrar em freqüências próximas às suas freqüências fundamentais. Este fenômeno é conhecido como ressonância. Os efeitos de vibração direta sobre o corpo humano por períodos prolongados podem ser extremamente graves, provocando danos permanentes em alguns órgãos do corpo humano. Na Figura 3.12 apresenta-se um modelo popular utilizado para demonstrar as ressonâncias do corpo humano. Como indicado neste modelo, a ressonância ocorre em diferentes freqüências para diferentes pontos do sistema. Exposições à vibração vertical, na faixa de 5 a 10Hz geralmente causam ressonância no sistema tórax-abdômen, na faixa de 20 a 30Hz no sistema cabeça-pescoço-ombros e de 30 a 60Hz no sistema ocular (Chaffin et al, 1999 apud Balbinot, 2001).

Para a realização de um estudo sobre os efeitos da vibração no corpo humano, deve-se considerar não apenas a resposta do sistema biomecânico, mas também os efeitos patológicos, fisiológicos e psicológicos provocados pela vibração. Segundo Griffin (1995) apud Misael (2001), um indivíduo pode sofrer tanto de efeitos diretos, como indiretos, quando exposto a vibrações. Os efeitos diretos da vibração estão diretamente relacionados com a saúde da pessoa. Estes efeitos são provocados por vibrações que atingem os órgãos internos do organismo, sendo dependentes das freqüências naturais dos mesmos. Por outro lado, os efeitos

indiretos dizem respeito à dificuldade na execução de tarefas e desconforto provocados pela vibração.

Nas Figuras 3.13 e 3.14 apresentam-se alguns dados obtidos sobre a transmissibilidade, em estudos anteriores, em pessoas expostas à vibração vertical, onde pode ser observada a ressonância de várias partes do corpo para as posturas em pé e sentada. Observa-se que para as pessoas em pé, a primeira ressonância no quadril, ombros e cabeça ocorre em frequências em torno de 5Hz.

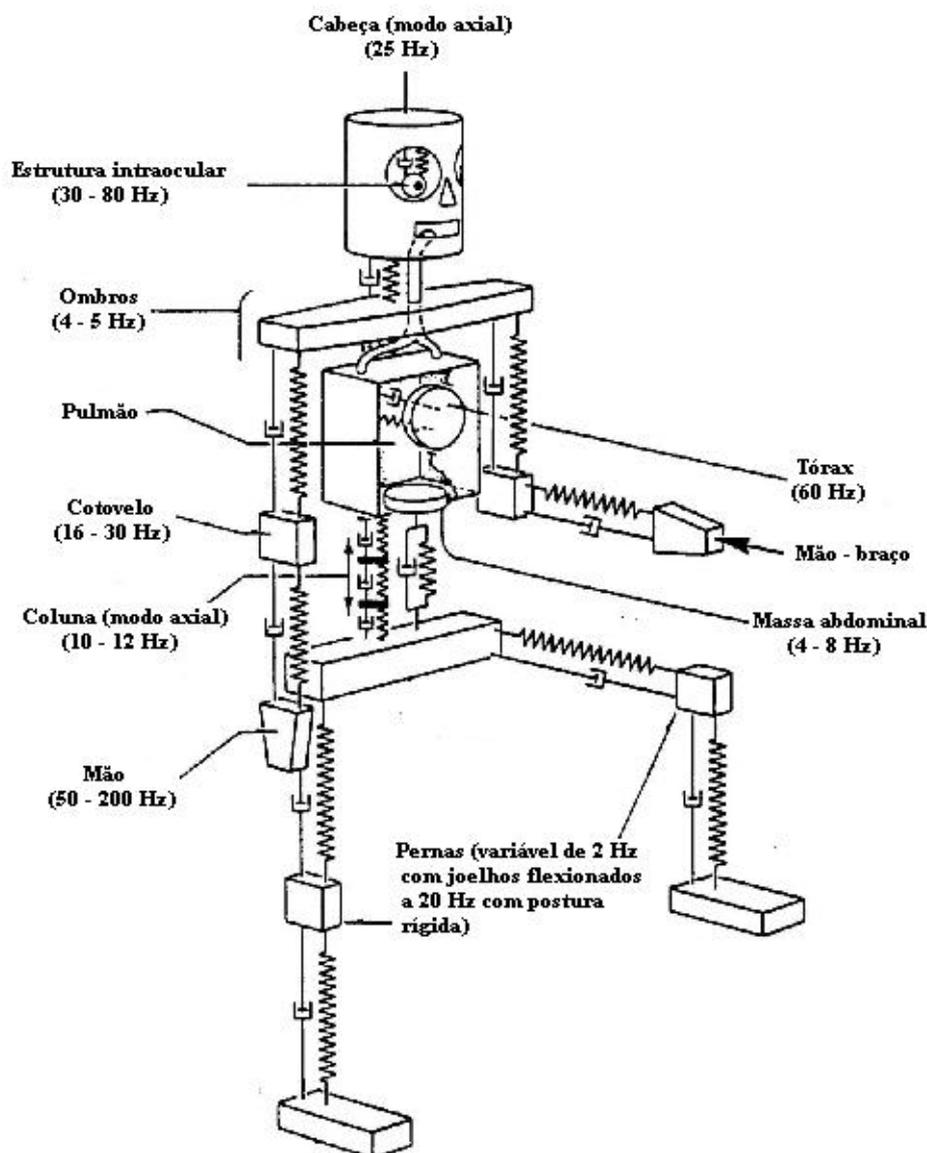


Figura 3.12: Sistema mecânico representando o corpo humano sujeito a vibração vertical.

Fonte: Brüel & Kjaer, 2000 apud Balbinot, 2001.

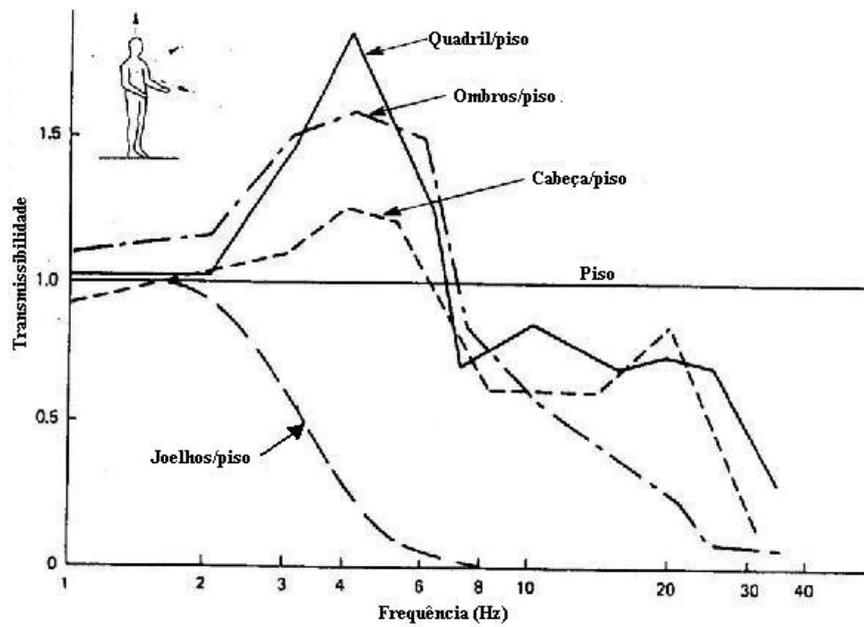


Figura 3.13: Curvas de transmissibilidade para diversas partes do corpo humano (postura em pé). Fonte: Chaffin et al, 1999 apud Balbinot, 2001.

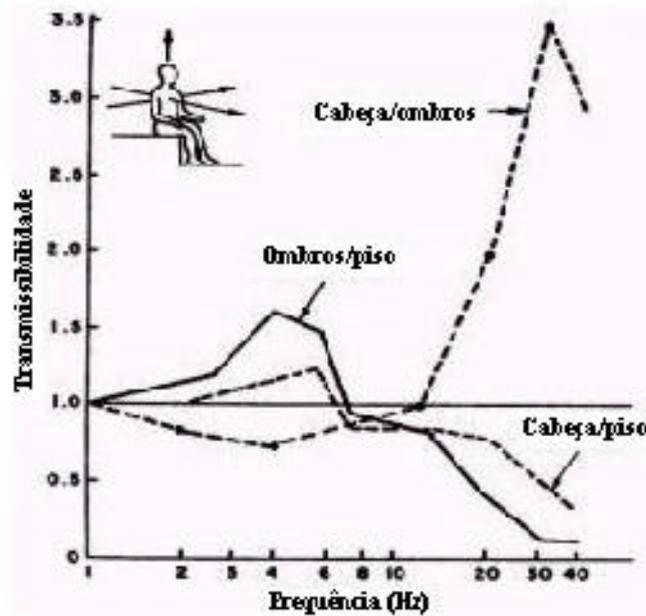


Figura 3.14: Curvas de transmissibilidade para diversas partes do corpo humano (postura sentada). Fonte: Chaffin et al, 1999 apud Balbinot, 2001.

Conforme Balbinot (2001), diversos fatores modificam os efeitos da vibração nas pessoas, incluindo a ressonância das diversas partes do corpo humano, duração da exposição, variabilidade individual de cada pessoa e outras variáveis ambientais. Além disso, os efeitos

da vibração no corpo humano, são determinados pela faixa de frequência envolvida e, segundo Griffin (1996) os prováveis efeitos da exposição às vibrações são:

- na atividade muscular/postural, na faixa de 1 a 30Hz, as pessoas apresentam dificuldades para manter a postura e reflexos lentos;
- no sistema cardiovascular, em frequências inferiores a 20Hz, apresentam um aumento da frequência cardíaca;
- aparentemente existem alterações nas condições de ventilação pulmonar e taxa respiratória com vibrações na ordem de $4,9 \text{ m/s}^2$ na faixa de 1 a 10Hz;
- na faixa de frequência de 0,1 a 0,7Hz diversas pessoas apresentam enjoos, náuseas, perda de peso, redução da acuidade visual e insônia.

Compreender como a vibração é transmitida ao corpo humano é um pré-requisito para entender completamente como esta influencia no conforto humano, no desempenho das atividades ocupacionais e na saúde. A transmissibilidade pode ser definida como a razão entre a magnitude de um ponto qualquer com a do ponto de entrada para determinado componente de frequência. Caso a razão seja maior do que 1, indica que ocorreu amplificação da vibração na estrutura, caso seja menor do que 1, indica que ocorreu atenuação da vibração original e se for igual a 1, indica que a vibração de entrada é igual a de saída.

A transmissibilidade depende de muitas variáveis, como a fonte de vibração e características do próprio organismo, tais como a massa corpórea e o tamanho dos órgãos e membros. A posição, postura e orientação do corpo são variáveis importantes. Estas influenciam a superfície de contato do indivíduo com o plano em vibração, a posição da coluna vertebral, o grau de tensão em diferentes grupos de músculos do tronco e extremidades. Variações na postura do corpo alteram propriedades elásticas e de amortecimento do organismo. Isto conduz a mudança nas frequências de ressonância de segmentos do corpo, como também resulta em substancial mudança na transmissão de vibrações em faixas de frequência particulares.

Conforme Gerges [1992], para indivíduos na posição em pé e vibrações na direção vertical (eixo z), o corpo humano apresenta maior sensibilidade na faixa de frequência de 4 a 8 Hz, que corresponde às frequências de ressonância de elementos do corpo (massa abdominal, ombros e pulmões). Nas direções laterais (eixos x e y), as ressonâncias ocorrem a frequências mais baixas, de 1 a 2 Hz. Nesta faixa de frequência o corpo apresenta alta

sensibilidade, resultando em limites toleráveis de vibração mais baixos. Este comportamento está apresentado nas curvas da ISO 2631/1: 1997, apresentadas no Item 3.5. Os eixos coordenados em seres humanos indicando a direção da vibração considerada pela ISO 2631/1: 1997 estão mostrados na Figura 3.15.

Os pontos de entrada da energia vibratória se modificam para pessoas na posição sentada. Para uma pessoa na posição em pé, os pontos de entrada da vibração são os pés, enquanto que em uma pessoa sentada, as costas (quando a cadeira apresentar encosto), a região pélvica e os pés passam a ser os pontos de entrada. As frequências fundamentais do corpo para a posição sentada estarão dentro do intervalo de 4 a 6 Hz, para vibração longitudinal (eixo z), e 1 a 3 Hz, para vibração transversal (eixos x e y) (von Gierke & Brammer, 1998 apud Misael, 2001).

Muitas dificuldades têm sido encontradas no estudo do comportamento dinâmico de órgãos do corpo humano quando estes são avaliados separadamente. Devido à dificuldade em se realizar ensaios experimentais com seres humanos, do tempo consumido e por problemas éticos, muitos conhecimentos sobre efeitos danosos das vibrações são obtidos através de estudos realizados em animais, modelos (bonecos) e cadáveres no lugar de indivíduos vivos. Com isso, as frequências de ressonância encontradas nestes estudos podem diferir um pouco da realidade, porém são úteis como uma importante fonte de consulta (Misael, 2001). Na Tabela 3.3 mostra-se as frequências de ressonância de alguns órgãos do corpo humano considerando o corpo como uma massa unitária.

Para exemplificar a dificuldade em se realizar estudos em seres humanos, cita-se o trabalho de Panjabi et al. (1986), onde um processo invasivo para medir a resposta da coluna vertebral às vibrações senoidais nos eixos z e x (ISO 2631/1: 1997) foi usado em 5 pessoas sentadas. Neste trabalho, duas amplitudes de aceleração foram usadas, 1 m/s^2 e 3 m/s^2 , com frequências na faixa de 2 a 15 Hz. Três acelerômetros uni-axiais foram fixados no transdutor inserido na coluna, conforme mostrado na Figura 3.16, que apresenta um esboço do ensaio. Um resultado típico de um dos ensaios realizados está representado na Figura 3.17, relacionando a amplitude r.m.s. da coluna vertebral e do assento, ou seja, a transmissibilidade entre a coluna e o assento para a direção vertical e horizontal.

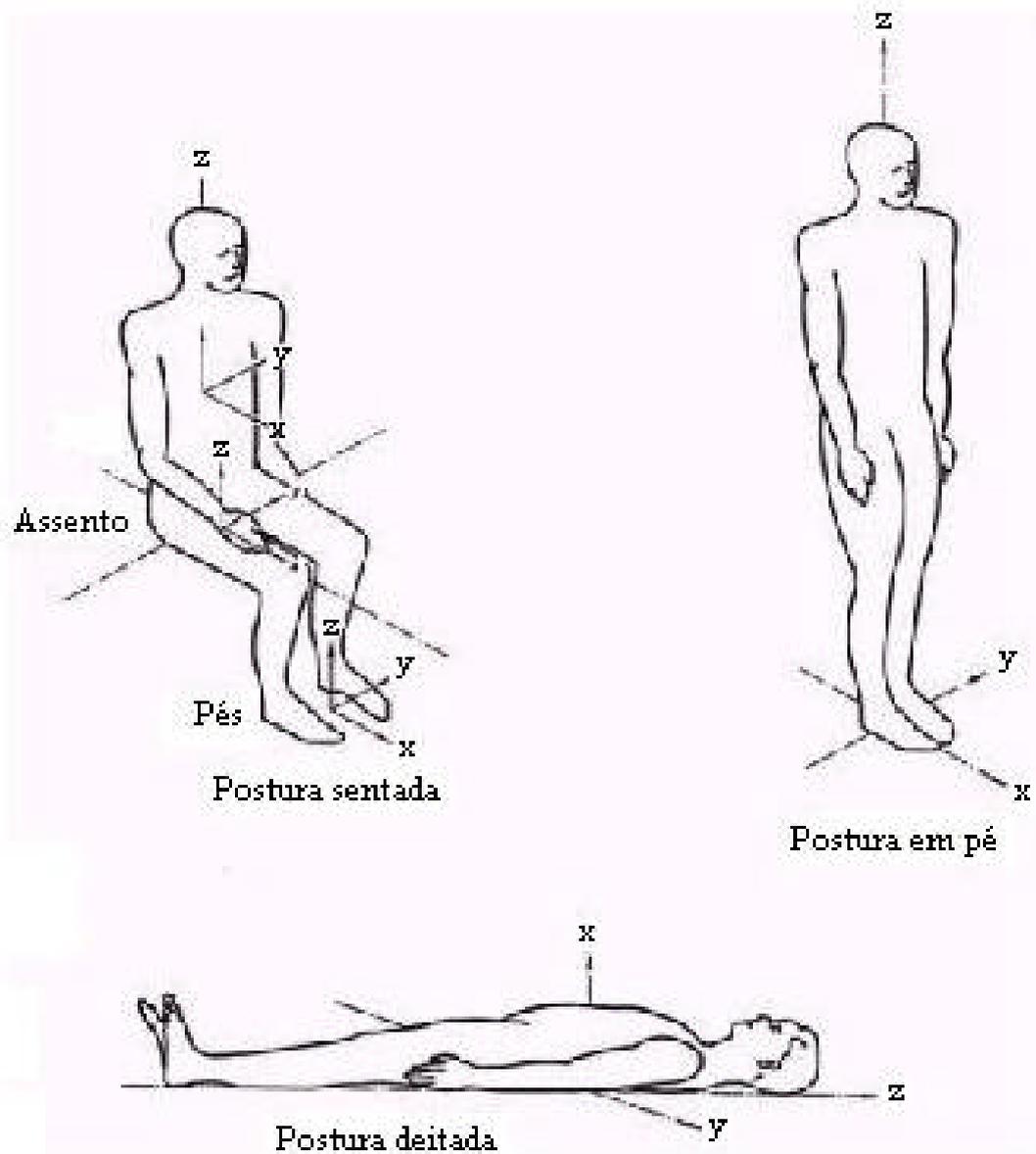


Figura 3.15: Direções do sistema de coordenadas para vibrações mecânicas em seres humanos. Fonte: ISO 2631/1: 1997.

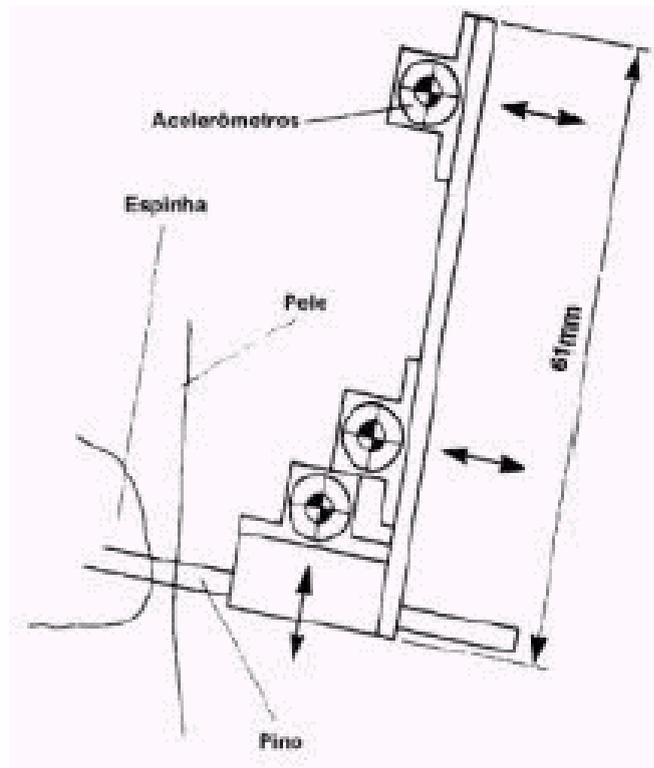


Figura 3.16: Esboço do experimento desenvolvido para medir a resposta da coluna à vibração.

Fonte: Panjabi et al, 1986.

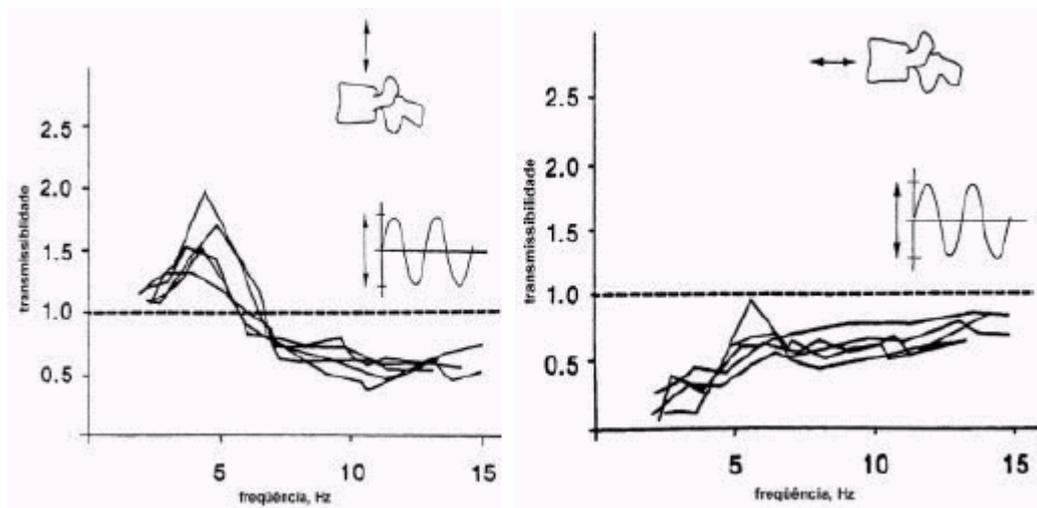


Figura 3.17: Transmissibilidade entre a coluna e o assento. Fonte: Panjabi et al, 1986.

Tabela 3.3: Freqüências naturais de órgãos do corpo humano

Órgãos	Freqüências naturais (Hz)
Cabeça	20 a 40
Espinha dorsal	8 ¹
Parede do tórax	60 ¹
Massa abdominal	4 a 8
Ombros	4 a 8
Garganta	12 a 19
Pulmões	4 a 8
Mãos e braços	20 a 70
Globo ocular	60 a 90
Maxilar ²	100 a 200

Fonte: von Gierke & Brammer (1998) apud Misael (2001).

1. Estes valores são fixos, pois foram obtidos através de modelo biodinâmico proposto por von Gierke.
2. Freqüências de ressonância relativa entre o maxilar e o crânio.

Vibrações no corpo inteiro podem causar fadiga, insônia e dor de cabeça após ou durante as exposições. Os sintomas são similares àqueles que muitas pessoas experimentam após uma longa viagem de carro. Estudos em motoristas de ônibus e caminhões mostraram que a exposição à vibração pode ter contribuído para o aparecimento de um número de distúrbios circulatórios, no intestino, respiratórios, musculares e na coluna, sendo os efeitos combinados da postura, hábitos alimentares e vibração são as possíveis causas destes distúrbios.

Conforme von Gierke & Brammer (1998) apud Misael (2001), quando submetido a vibrações em baixas freqüências e na direção vertical, o corpo humano pode sofrer com fraturas de vértebras do pescoço provocadas pelo movimento da cabeça, diminuição da acuidade visual causada pela ressonância do globo ocular, problemas na respiração e na fala devido ao fluxo de ar para os pulmões, dentre outros efeitos. Devido à vibração atuante estar agindo na mesma direção da força de gravidade, os danos à saúde são acentuados. Para vibrações nas direções laterais do corpo em baixas freqüências, a distribuição da massa do corpo é de extrema importância, podendo reduzir ou ampliar os efeitos danosos da vibração

sobre a saúde. No entanto, os problemas com a coluna devido a movimentos bruscos da cabeça ainda podem aparecer.

Vibrações em bandas de frequência inferiores a 1 Hz, constituem um problema especial, sendo associadas a indisposições causadas por movimentos lentos (vômito, tontura), que têm caráter distinto dos efeitos de vibrações em frequência mais altas. O aparecimento de tais sintomas depende de fatores individuais complexos, diretamente relacionados à intensidade, frequência ou duração do movimento provocador.

De acordo com a ISO 2631/1: 1997, as vibrações danosas ao organismo estão nas frequências de 1 a 80 Hz, podendo provocar lesões nos ossos, juntas e tendões. Acima de 80 Hz as sensações e efeitos são muito dependentes do ponto de aplicação, da direção e da posição em que a vibração é transmitida. Esses fatores externos influenciam grandemente a resposta da pele e dos tecidos superficiais afetados por frequências acima de 80 Hz.

Oscilações com frequência entre 2Hz a 20Hz, com grandes amplitudes, podem causar deformações consideráveis no corpo humano, com a ocorrência de ressonância de certos órgãos, aumento da sensação de desconforto, dificultando o desenvolvimento de tarefas mecânicas (Sales, 2001). As frequências intermediárias, de 30 a 200Hz, podem provocar doenças cardiovasculares, mesmo com baixas amplitudes.

Kelsey et al. (1975) desenvolveram um estudo, no período de dois anos, com 223 pacientes que apresentaram problemas relacionados com as costas. Encontraram que motoristas de veículos apresentam um grande risco de apresentar problemas de hérnia de disco quando comparados a um grupo que não apresenta nenhum problema relacionado com as costas. Determinaram que a maior carga no tronco humano e provavelmente na espinha, ocorre quando a vibração está na frequência natural, ou seja, a carga é maior quando o corpo está na postura sentada vibrando na direção vertical na faixa de 4 a 8Hz. É importante destacar que, em caminhões, a vibração vertical é dominante e ocorre na faixa de 2 a 15Hz.

Os primeiros estudos quantitativos relacionados aos efeitos da vibração no ambiente de trabalho foram realizados na década de 60. Estes efeitos sobre o corpo humano podem ser extremamente graves, podendo-se citar alguns exemplos:

- *visão turva*: O efeito das vibrações sobre a visão é de grande importância uma vez que o desempenho do trabalhador diminui, aumentando, assim, o risco de acidentes. As vibrações reduzem a acuidade visual e torna a visão turva, ocorrendo a partir de 4 Hz.

- *perda de equilíbrio:* Os indivíduos que trabalham com equipamentos vibratórios de operação manual, tais como martelo pneumático e moto serra, apresentam degeneração gradativa do tecido muscular e nervoso.
- *falta de concentração.*
- *danificação permanente de determinados órgãos do corpo:* Os efeitos aparecem na forma de perda da capacidade manipuladora e do controle do tato nas mãos, conhecido, popularmente, por *dedo branco*. Essas doenças são observadas, principalmente, em trabalhadores de minas e florestais (moto-serras à 50-200 Hz), surgindo no máximo após 6 meses de trabalho com uma ferramenta vibratória.

Misael (2001) selecionou informações sobre danos provocados pela vibração em uma série de trabalhos. Estas informações apresentam-se na Tabela 3.4. Devido às diferenças fisiológicas, os valores de frequência não podem ser assumidos como rígidos devendo ser tomados como referência.

Tabela 3.4: Efeitos da vibração sobre as pessoas

Faixa de Frequência (Hz)	Efeitos
0,1 a 0,7	<ul style="list-style-type: none"> • Náuseas.
1 a 2	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento da pressão sanguínea; • Aumento da taxa de respiração; • Sudorese.
2 a 12	<ul style="list-style-type: none"> • Dor de cabeça; • Dores abdominais e nos testículos; • Aumento da frequência cardíaca; • Dificuldade de respiração.
Acima de 12	<ul style="list-style-type: none"> • Problemas relacionados ao desempenho de tarefas; • Influência na fala.
25 a 90	<ul style="list-style-type: none"> • Diminuição da acuidade visual.
Ultra-sônicas	<ul style="list-style-type: none"> • Alterações químicas e térmicas no corpo.

Fonte: Misael (2001);

3.3 - Efeito da vibração sobre o conforto humano

Conforme Vasconcelos (1998), estabelecer a noção de desconforto humano a vibrações pode ser uma tarefa difícil. Existem diversos fatores subjetivos que podem

influenciar a sensação de desconforto, tais como a condição sócio-cultural das pessoas, o tipo de atividade desenvolvida e seu estado psicológico no momento do evento, fatores ambientais, ruído, etc. É grande a dificuldade de simular estas condições em laboratório de modo a reduzir a variabilidade das respostas individuais. Deste modo, o limiar de conforto de pessoas submetidas à vibração pode ser considerado como uma medida bastante subjetiva, gerando algumas controvérsias quanto aos valores aceitáveis das acelerações impostas.

Para ilustrar esta subjetividade das respostas, pode-se exemplificar o trabalho de Osborne & Boarer (1982 b) sobre o efeito das instruções na variabilidade das respostas de pessoas submetidas à vibração. Os voluntários foram orientados a responder ao estímulo de vibração em termos das seguintes instruções: conforto, desconforto, parte do corpo vibrando, sensações. Nenhuma atenção foi dada na definição destes termos. Apesar das curvas não apresentarem diferenças significativas, os intervalos de frequência de maior sensibilidade à vibração diferem significativamente.

Portanto, com toda essa ampla variedade de influências e efeitos, torna-se bastante difícil quantificar de modo objetivo para que níveis de vibração uma pessoa experimenta a sensação de desconforto. Logo, a noção de desconforto de pessoas submetidas a acelerações em certas direções passa a ser uma questão muito mais subjetiva, gerando uma série de controvérsias quanto aos valores aceitáveis das acelerações impostas. Há apenas um ponto de indiscutível concordância: o limite em que o ser humano passa a perceber as acelerações induzidas na estrutura sobre a qual ele se encontra, já que os estudos sobre o limite de percepção à vibração apresentam menores diferenças entre os resultados individuais que os estudos relacionados ao conforto. Isto porque esta é uma medida muito mais objetiva, onde os indivíduos avaliam uma questão direta: “Eu posso ou não posso sentir as vibrações”. A percepção humana à vibração é sensível quando se trata em notar a presença de movimentos dinâmicos. No entanto, quando ocorre uma mudança quantitativa na amplitude da vibração, esta sensibilidade diminui drasticamente. Se uma pessoa é solicitada a expressar uma opinião sobre sua percepção à vibração em dois ambientes diferentes em ocasiões separadas, ela não fará distinção a menos que a diferença quantitativa de um movimento em relação seja considerável. Existem também diferenças substanciais entre as pessoas e pode haver diferenças entre nacionalidades. Reações humanas nesse nível são substancialmente psicológicas, dependendo da sutileza da atividade que está sendo desempenhada.

Deste modo, antes de se obter os níveis de vibração que prejudicam no desempenho de tarefas, ou até mesmo níveis que são uma causa potencial de distúrbios no corpo humano, é

necessário o conhecimento do limiar de percepção humana à vibração, ou seja, os valores mínimos de vibração que uma pessoa pode sentir (Misael, 2001).

A postura, a orientação e posição do corpo, o período de oscilação e a expectativa do movimento influenciam no limite de percepção dos indivíduos, de acordo com estudos realizados por Parsons & Griffin (1988). O grau de vibração que é transmitida para o corpo humano pode ser afetado pela postura adotada pelos indivíduos. Para pessoas em pé, por exemplo, uma postura rígida provavelmente resultará em um maior nível de vibração sendo transmitida através do corpo que o corpo em uma postura relaxada e os joelhos flexionados.

Para o presente trabalho, observa-se que para o intervalo de frequência estudado (12 a 80 Hz), indivíduos em pé são significativamente menos afetados que indivíduos sentados. Osborne & Boarer (1982 a) demonstraram que este efeito ocorre principalmente acima de 30 Hz. Quando os dados são analisados dentro de uma postura particular, por exemplo, variações da postura sentada, estes pesquisadores não encontraram diferenças significativas nas respostas. Tais pesquisadores concluem sobre a necessidade de se produzir diferentes critérios para diferentes posturas, o que será discutido no Capítulo 5.

A maioria das investigações sobre o limite de percepção tem envolvido pessoas expostas a uma vibração em estado estacionário, de frequência e eixos simples. A vibração em edificações é freqüentemente mais complexa, normalmente com frequências múltiplas ou randômicas e variando em amplitude e duração. A vibração pode entrar no corpo humano em diversas posições e em várias direções. O corpo pode estar em diferentes posturas (sentado, em pé, ou deitado). Com isso, os efeitos individuais destas variáveis devem ser combinados de modo a produzir um procedimento geral para prever a perceptibilidade de vibrações complexas em edificações.

A ISO 2631/2: 1989 estabelece critérios de tolerância à vibração através de fatores multiplicativos aplicados a cada ambiente e horário distinto. No entanto, conforme apresentado por Misael (2001) e confirmando neste trabalho, a razão entre o limite de conforto e o de percepção cresce com o aumento da frequência, tornando-se difícil a utilização de um fator multiplicativo médio. Contudo, em certas situações, conforme a atividade realizada pela pessoa e as características do movimento, os valores de vibração relacionados ao conforto podem não estar muito acima do limite de percepção.

Devido às diversas combinações de variáveis e métodos utilizados nos vários estudos referentes a critérios de percepção e conforto a vibração, deve-se estar atento ao se comparar resultados de pesquisas distintas, pois estes podem ter objetivos distintos.

Conforme Vasconcelos (1998), para ambientes residenciais e escritórios, os critérios apropriados estão associados a níveis de vibração para os quais os efeitos fisiológicos ficam em segundo plano em relação aos fatores psicológicos. A importância dos fatores psicológicos faz com que seja difícil quantificar a reação humana para estes níveis de vibração. Nestes casos, as reações podem ser influenciadas por vários fatores. Para baixas frequências, ou mais precisamente, no limite inferior da faixa de frequência intermediária, dentro do intervalo de 2 a 20 Hz apresentado na Figura 3.18, a reação é fortemente ligada a um sentimento de insegurança, baseada na associação instintiva dos movimentos perceptíveis em uma estrutura sólida com uma expectativa de inadequação estrutural ou falha. Para o limite superior da faixa de frequência, a reação está fortemente ligada aos níveis de ruído associados.

Pessoas em escritórios ou residências não aceitam vibrações com picos superiores a aceleração de 0,5% da aceleração da gravidade, enquanto que pessoas tomando parte de uma atividade rítmica irão aceitar vibrações aproximadamente 10 vezes maiores (Vasconcelos, 1998).

Como a faixa de frequência a ser verificada é grande, é comum definir contornos mostrando a reação humana em escalas logarítmicas de frequência e amplitude de resposta, como mostrado na Figura 3.18.

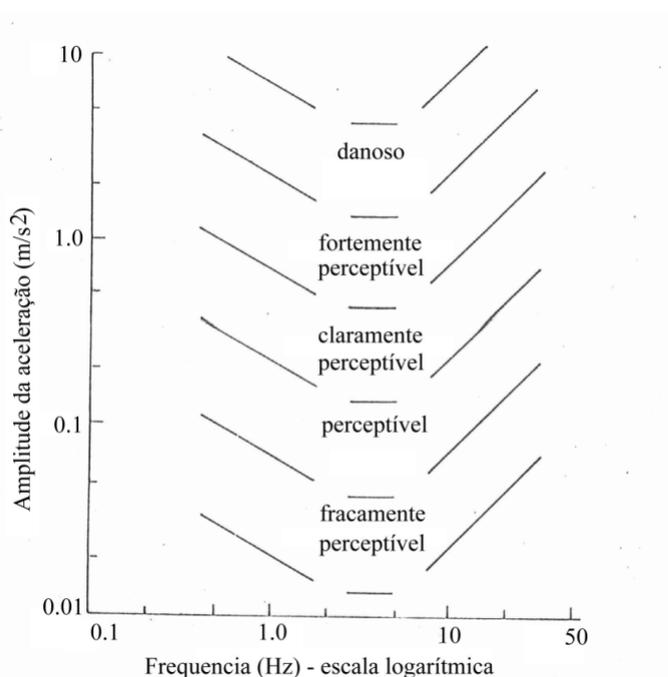


Figura 3.18: Descrição qualitativa da reação humana à oscilação contínua uniforme.

Fonte: Ohlsson, 1982.

A sensibilidade humana aos níveis de vibração varia conforme as características do movimento vibratório (Griffin, 1996). Existem alguns fatores físicos de importância primordial para a determinação da resposta humana à vibração, a saber:

- Tempo de exposição: a tolerância humana decai com o aumento do tempo de exposição;
- Nível de expectativa: ansiedade e desconforto podem ser reduzidos se os ocupantes forem alertados da natureza da vibração e assegurados que nada ameaçará sua segurança;
- Características da vibração: amplitude, frequência e duração;
- Tipo de atividade realizada: o nível de percepção varia com a natureza da atividade que está sendo realizada pelo ocupante. Pessoas fazendo ginástica aceitam maiores vibrações que outras trabalhando em escritórios.
- Posição do corpo humano: dependendo da posição da pessoa, diferentes valores de acelerações limites são estabelecidos.

3.4 - Trabalhos sobre vibrações no corpo humano

Harazin & Grezesik (1998) realizaram experimentos em indivíduos para várias posturas na posição em pé, ilustradas na Figura 3.19. Foram medidos os níveis de vibração transmitidos a diversas partes do corpo, como os ombros, cabeça, quadril, etc. Estes pesquisadores observaram que acima de 20 Hz, a magnitude de vibração transmitida à cabeça dos indivíduos posicionados na postura em pé decresceu rapidamente com o aumento da frequência. Para a frequência de 50 Hz, a transmissibilidade encontrada para a cabeça dos indivíduos ficou em torno de 2% da vibração produzida sobre a superfície vibrante. O resultado da transmissibilidade média entre a superfície vibrante e a cabeça para dez indivíduos em dez posturas em pé está apresentado na Figura 3.20.

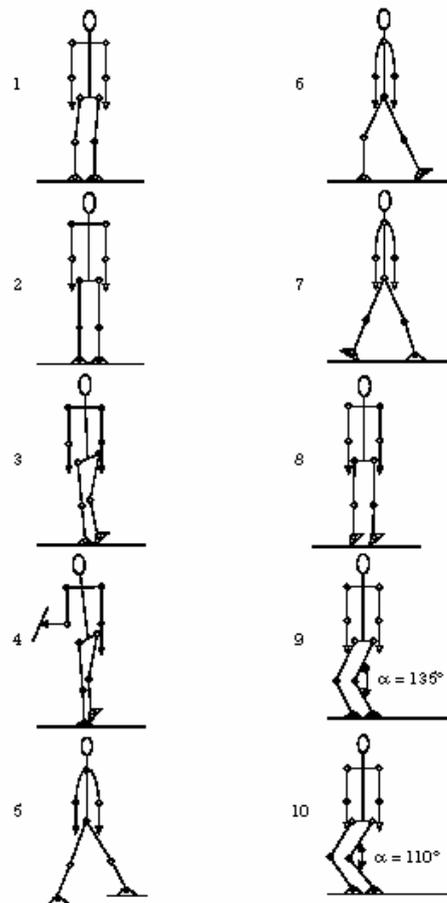


Figura 3.19: Posturas do corpo na posição em pé. Fonte: Harazin & Grezesik, 1998.

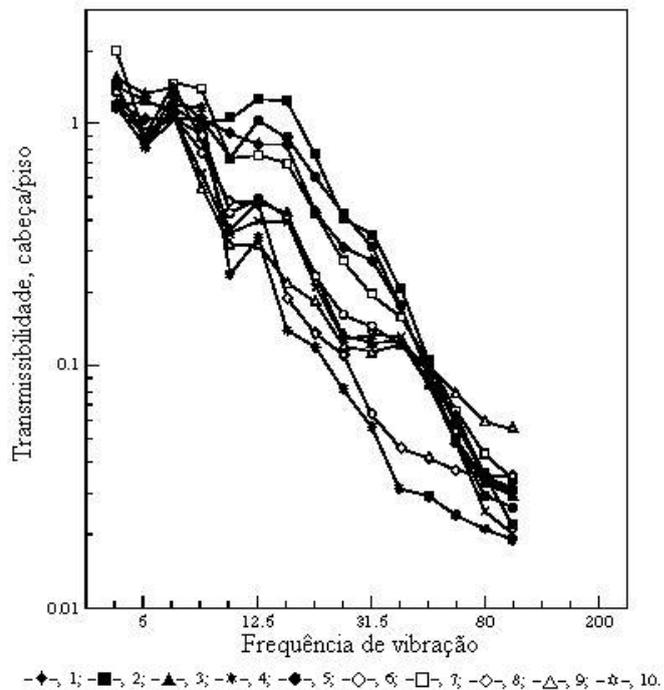


Figura 3.20: Transmissibilidade média entre a superfície vibrante e a cabeça para indivíduos na postura em pé. Fonte: Harazin & Grezesik, 1998.

Corbridge & Griffin (1986), realizaram alguns ensaios com o objetivo de determinar os efeitos da vibração no corpo humano. Quarenta pessoas (20 do sexo feminino e 20 do masculino) foram expostas à vibração vertical na faixa de frequência de 0,5 a 5,0Hz. Estas pessoas foram posicionadas sobre uma mesa vibratória na postura sentada. Os pesquisadores estimaram a severidade da vibração no corpo humano com relação ao conforto e chegaram à conclusão que a vibração aleatória produz maior desconforto que a vibração senoidal, porém, com a mesma dependência da frequência.

Balbinot & Tamagna (2002) realizaram um estudo sobre os níveis de vibrações a que estão sujeitos os motoristas de ônibus urbanos com relação ao conforto e saúde. Também foram realizadas medições para caracterizar a transmissibilidade dos assentos dos motoristas. Segundo os resultados deste trabalho os níveis de vibrações com relação ao conforto ultrapassaram os recomendados pela norma ISO 2631/1: 1997. Na faixa de frequência de 4 a 8 Hz, considerando-se uma exposição de 8 horas por dia, os pesquisadores concluíram que os motoristas estão expostos a níveis potencialmente danosos a saúde. Os resultados da transmissibilidade dos assentos, na faixa de frequência da ressonância da coluna vertebral, demonstraram que os assentos apresentaram comportamento dinâmico inadequado deixando os motoristas expostos aos problemas derivados da exposição à vibração.

Parsons & Griffin (1988) realizaram uma série de experimentos em laboratório relacionados ao limiar de percepção à vibração no corpo inteiro. Os indivíduos foram expostos a vibração senoidal nas direções x , y e z para a posição sentada e em pé em frequências de 2 a 100 Hz. O limiar de percepção também foi determinado para indivíduos deitados expostos a vibração senoidal vertical em frequências de 10 a 63 Hz. Os pesquisadores investigaram também o efeito das vibrações randômicas e da duração da vibração sobre o limiar de percepção. Para indivíduos submetidos a vibração vertical na posição sentada, nenhuma diferença significativa foi encontrada entre as respostas de homens e mulheres. Os indivíduos foram mais sensíveis a vibrações em baixa frequência quando sentados e mais sensíveis a vibrações em frequências altas quando de pé. Os pesquisadores atribuíram este resultado às diferenças na transmissão da vibração para o corpo nas duas posições. As diferenças entre os resultados de indivíduos sentados e em pé foram pequenas se comparadas com as diferenças entre as respostas individuais das pessoas. Com isso, no contexto da percepção humana de vibrações em edificações, os pesquisadores concluíram que é razoável usar os mesmos procedimentos de análise para pessoas em pé e sentadas e para

homens e mulheres. Estas conclusões estão em concordância com a norma ISO 2631/2: 1989, sendo discutidas no Capítulo 5 do atual trabalho. Na Figura 3.21 apresenta-se o primeiro, segundo e terceiro quartis, bem como as respostas máximas e mínimas dos indivíduos para o limiar de percepção na postura em pé e sentada para o trabalho de Parsons & Griffin (1988).

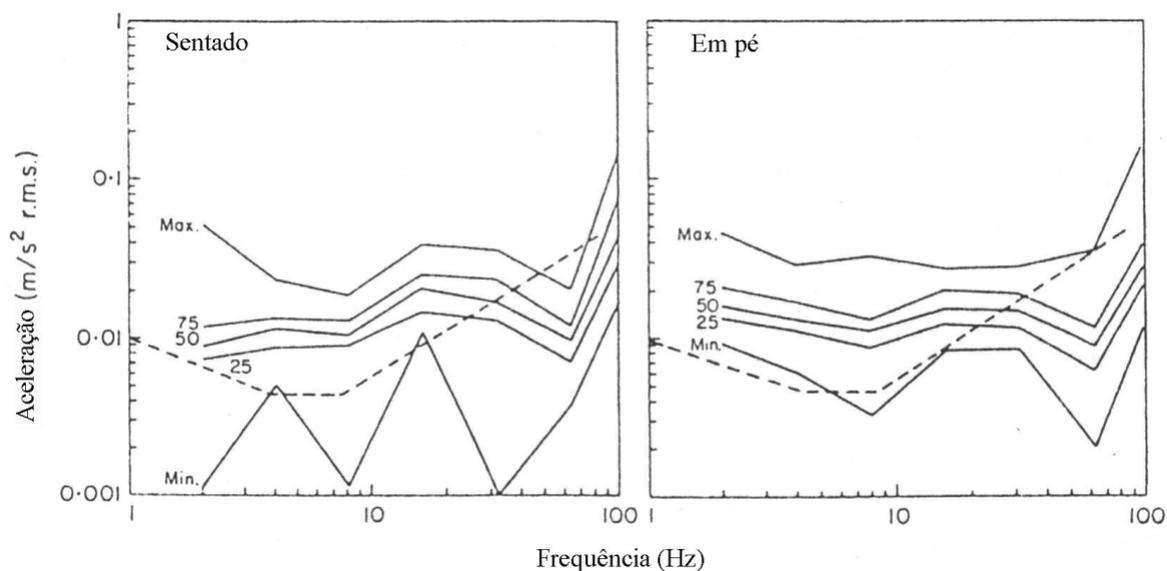


Figura 3.21: Limiar de percepção à vibração para indivíduos na postura em pé e sentada.

Fonte: Parsons & Griffin, 1988.

Em indivíduos sujeitos a vibração senoidal lateral (eixos x e y), os pesquisadores não encontraram diferenças significantes entre os resultados para as posturas em pé e sentados, exceto em 16 Hz para indivíduos na postura sentada e 31,5 Hz para indivíduos na postura em pé. Na Figura 3.22 apresenta-se o limiar de percepção médio dos indivíduos para os eixos x e y nas posições em pé e sentado.

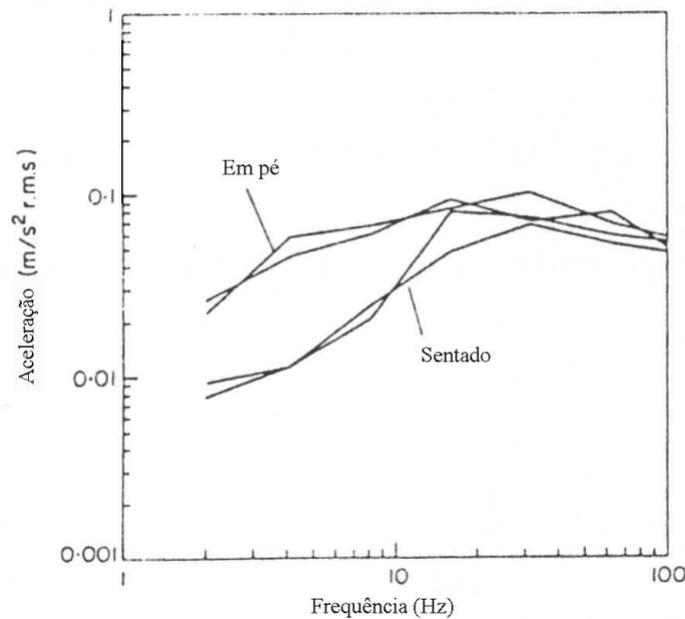


Figura 3.22: Limiar de percepção médio dos indivíduos para os eixos x e y nas posições em pé e sentado. Fonte: Parsons & Griffin, 1988.

Wang et al (2004) estudaram as características das respostas biodinâmicas de 27 pessoas sentadas expostas à vibração vertical. As medidas são realizadas para um total de 36 diferentes configurações de posturas. Portanto, neste estudo são determinados os efeitos da postura sentada sobre a resposta biodinâmica. Como resultados, tem-se que a frequência de ressonância da resposta biodinâmica foi fortemente influenciada pelo efeito combinado da posição das mãos e condições de suporte das costas, enquanto que a magnitude do pico era mais afetada pelo peso suportado pelo assento.

Osborne & Boarer (1982 a) também estudaram os efeitos da postura nas respostas de indivíduos submetidos a vibração no corpo inteiro. As posturas estudadas foram: em pé naturalmente, mas de forma ereta; sentado numa postura rígida, com as costas apoiando no encosto; e sentado de forma relaxada com os braços sobre os joelhos. A Figura 3.23 mostra os resultados destas três posturas.

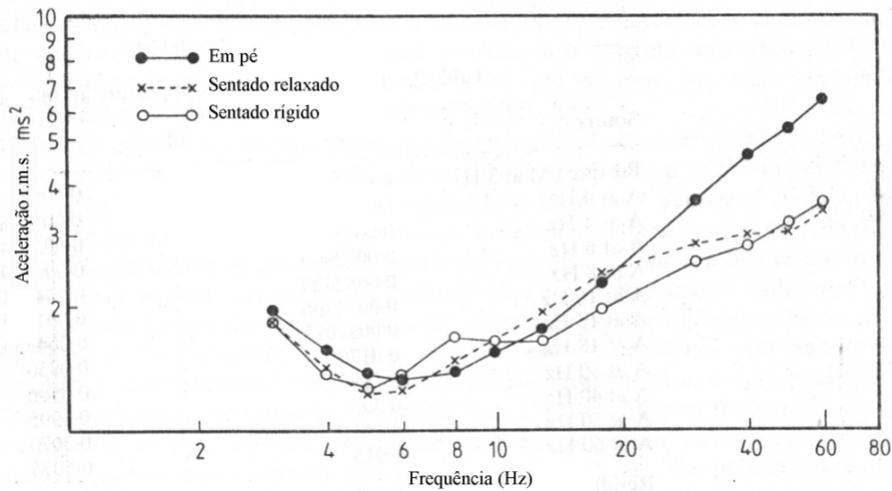


Figura 3.23: Curvas de conforto à vibração adotando-se três diferentes posturas. Fonte: Osborne & Boarer, 1982.

Osborne & Boarer (1982 b) avaliaram os efeitos das instruções na variabilidade das respostas dos indivíduos em estudos de vibração no corpo inteiro. Dois estudos foram realizados neste trabalho. No primeiro estudo, os indivíduos eram requeridos a responder sobre em que eles se basearam para julgar um determinado estímulo de vibração. Os resultados demonstraram que os indivíduos diferem nos conceitos que usam para avaliar a vibração, embora a maioria usa o grau em que partes do corpo sofrem vibração.

No segundo estudo, os indivíduos respondiam aos estímulos de vibração baseados nos seus conceitos em relação aos seguintes termos: conforto, desconforto, vibração em partes do corpo e sensação. Os resultados mostraram que não houve diferenças significativas nas respostas, embora os intervalos de frequência de máxima sensibilidade à vibração apresentarem diferenças consideráveis, como mostrado na Figura 3.24.

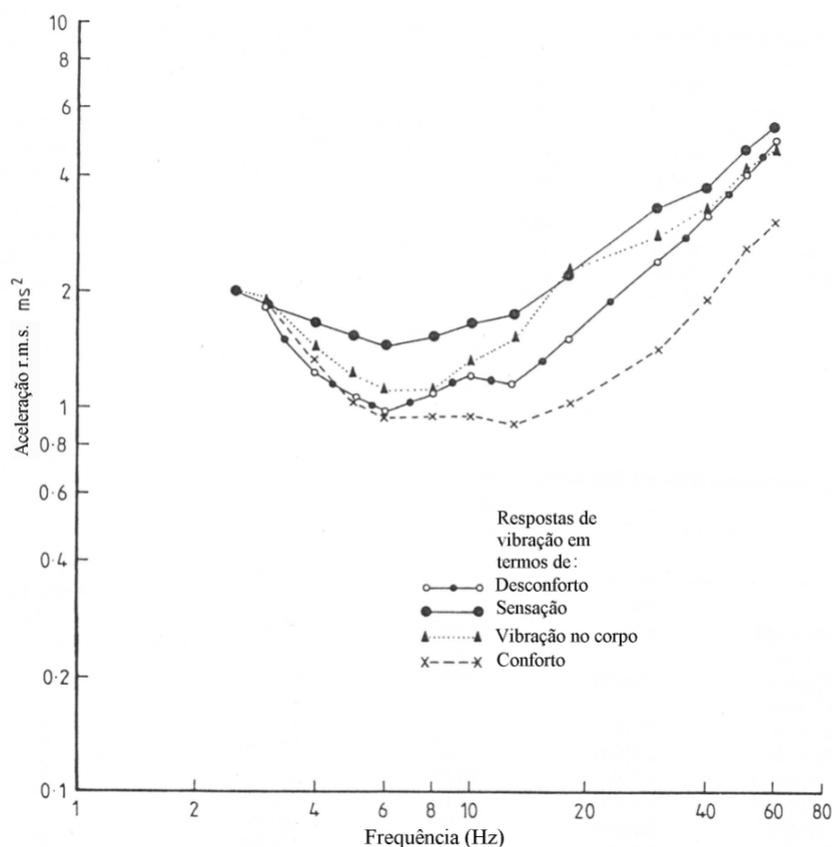


Figura 3.24: Curvas de conforto à vibração baseadas em diferentes instruções. Fonte: Osborne & Boarer, 1982.

Griffin & Whitham (1980) estudaram o efeito da variação do desconforto com relação à duração da vibração. Foram investigadas frequências de 4, 8, 16 e 32 Hz. Estes pesquisadores afirmaram que o grau de desconforto produzido por vibração no corpo inteiro é altamente dependente do tempo de exposição à vibração.

Griffin et al (1982) realizaram um estudo relacionado à vibração translacional em indivíduos na posição sentada utilizando o método do estímulo equivalente. Neste método, os voluntários comparam uma variedade de movimentos de teste com um movimento simples de referência. Nem o nível, nem a duração do estímulo estão sob controle dos voluntários. Estes podem apenas julgar os movimentos para serem mais ou menos desconfortáveis que o movimento de referência ou, se em dúvida, repetir o estímulo antes de decidir. Dois experimentos com respeito aos efeitos do nível, frequência e direção da vibração são registrados. O primeiro experimento determinou os níveis de vibração nas direções x , y e z que causavam desconforto equivalente a uma excitação de referência senoidal vertical de magnitude 0,5 e 1,25 m/s^2 r.m.s. com frequência de 10 Hz. Este experimento teve como

objetivo verificar a dependência do nível da vibração em relação à forma da curva de conforto equivalente. Com isso, avaliou-se a existência de diferenças significativas entre os níveis equivalentes para o movimento de referência de $1,25 \text{ m/s}^2$ r.m.s. e 2,5 vezes os níveis equivalentes para o movimento de referência de $0,5 \text{ m/s}^2$ r.m.s.. Diferenças significativas foram encontradas somente para a vibração no eixo x na frequência de 4 Hz. Na Figura 3.25 apresenta-se o contorno de conforto médio e o primeiro e terceiro quartis julgados equivalentes aos movimentos de referência descritos acima.

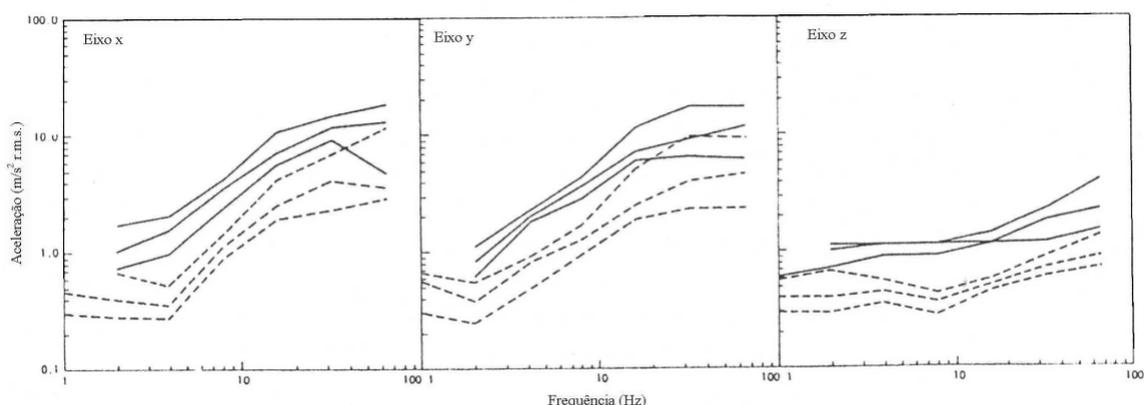


Figura 3.25: Contorno de conforto médio e o primeiro e terceiro quartis julgados equivalentes aos movimentos de referência senoidal vertical de $0,5$ e $1,25 \text{ m/s}^2$ r.m.s. com frequência de 10 Hz. Fonte: Griffin et al, 1982.

No segundo experimento, determina-se o desconforto relativo causado pela vibração nos três eixos translacionais, sob um intervalo de frequência de 1 a 100 Hz para o movimento de referência de $0,8 \text{ m/s}^2$ r.m.s. na direção vertical. A transmissibilidade entre a cadeira e a cabeça dos indivíduos para vibração vertical também foi investigada neste experimento. Nas Figuras 3.26 a 3.28 mostram-se os resultados dos contornos de conforto equivalente ao movimento de referência especificado para as três direções translacionais.

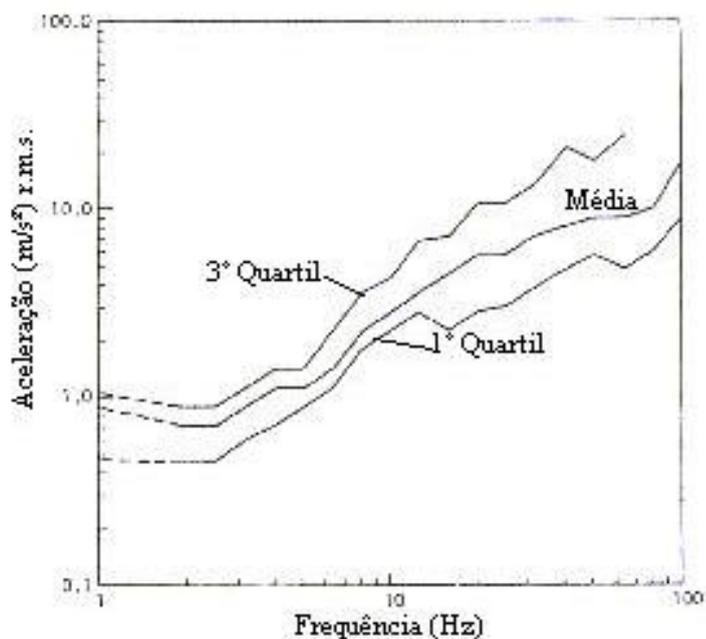


Figura 3.26: Contorno de conforto médio e o primeiro e terceiro quartis para o eixo x equivalente ao movimento de referência senoidal vertical de $0,8 \text{ m/s}^2$ r.m.s. com frequência de 10 Hz. Fonte: Griffin et al, 1982.

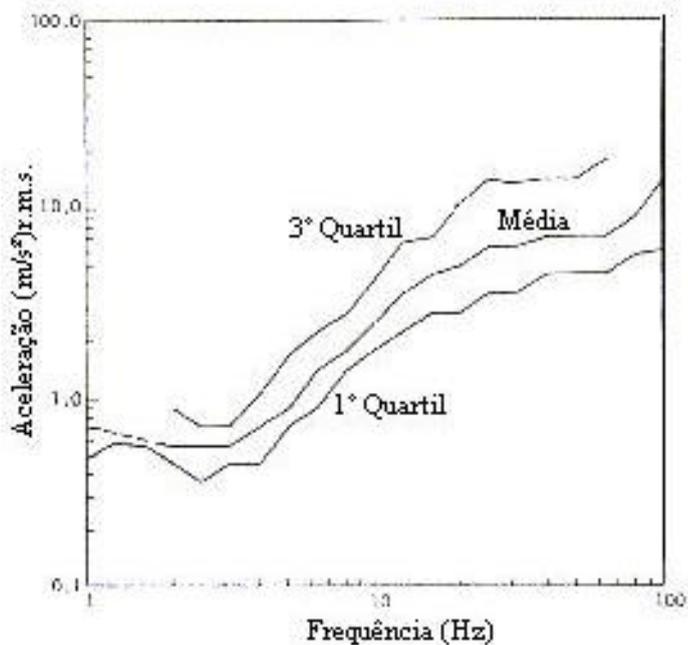


Figura 3.27: Contorno de conforto médio e o primeiro e terceiro quartis para o eixo y equivalente ao movimento de referência senoidal vertical de $0,8 \text{ m/s}^2$ r.m.s. com frequência de 10 Hz. Fonte: Griffin et al, 1982.

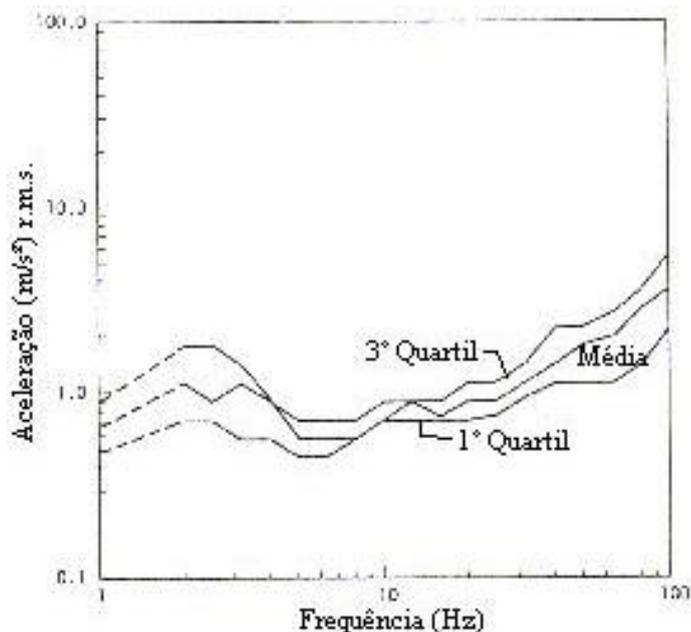


Figura 3.28: Contorno de conforto médio e o primeiro e terceiro quartis para o eixo z (vertical) equivalente ao movimento de referência senoidal vertical de $0,8 \text{ m/s}^2$ r.m.s. com frequência de 10 Hz. Fonte: Griffin et al, 1982.

Estes pesquisadores também realizaram testes de correlação (Kendall's τ) entre características físicas dos indivíduos, transmissibilidade e os resultados individuais do desconforto relativo. As correlações entre as características físicas dos indivíduos e a transmissibilidade mostraram uma redução bem definida na transmissibilidade com o aumento da altura dos indivíduos para o grupo masculino. Este comportamento também ocorreu no grupo feminino, porém com menos consistência.

Com relação aos níveis de conforto e as características físicas dos indivíduos para vibração vertical, os autores confirmaram uma nítida tendência de correlações positivas entre os níveis de conforto e o tamanho do corpo dos indivíduos em frequências baixas, mas uma correlação negativa em frequências mais altas. Resumindo, indivíduos maiores são relativamente menos sensíveis a vibrações verticais em baixa frequência e mais sensíveis em altas frequências que indivíduos menores.

A análise entre a transmissibilidade e o conforto equivalente apresentou correlações negativas abaixo de 6,3 Hz, positivas entre 6,3 e 25 Hz e novamente negativas acima de 25 Hz. Com isso, os pesquisadores concluíram que em baixas e altas frequências, o aumento da transmissibilidade está correlacionado com o aumento do desconforto das pessoas. Na Figura

3.29 apresentam-se as curvas de transmissibilidade média entre a cadeira e a cabeça das pessoas para o grupo de homens e mulheres.

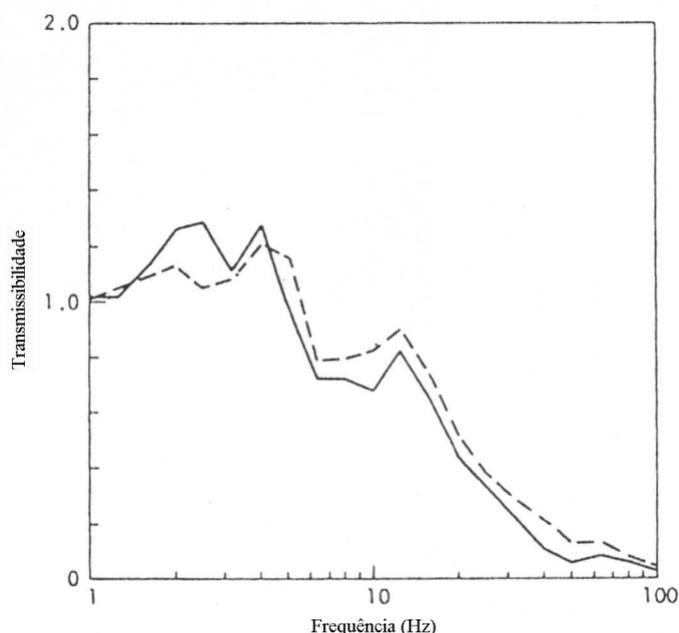


Figura 3.29: Comparação entre as curvas de transmissibilidade média cadeira-cabeça para o grupo de homens (_____) e mulheres (- - - -). Fonte: Griffin et al, 1982.

Parsons et al (1982) investigaram a contribuição relativa da vibração nos pés e costas em relação ao desconforto das pessoas. Encontrou-se que em baixas frequências de excitação, a vibração nos pés causa um desconforto muito menor que a excitação da cadeira para o mesmo eixo e nível. Esta peculiaridade também pôde ser constatada no atual trabalho, onde muitos voluntários registram desconforto devido à vibração das costas e massa abdominal nas frequências de 12 e 16 Hz. Porém, em altas frequências, as pessoas tornam-se relativamente mais sensíveis para vibrações nos pés. Em relação à vibração nas costas, os resultados destes pesquisadores mostraram que os indivíduos são consideravelmente mais sensíveis à vibração na direção x (ISO 2631: 1997) que nas outras direções.

Wilder et al. (1982) apud Balbinot (2001) utilizaram uma mesa vibratória para simular em laboratório uma condição semelhante a um ambiente industrial. A montagem foi desenvolvida para gerar uma vibração senoidal de até 30Hz, em qualquer um dos três eixos de vibração especificados na ISO 2631/1: 1997 (eixos z , x e y), com o objetivo de estudar a transmissibilidade das pessoas. A aceleração foi medida na base da plataforma e na cabeça dos indivíduos usando um acelerômetro rigidamente montado em um capacete.

Misael (2001) estabeleceu uma metodologia experimental para a obtenção e análise de vibrações relacionadas ao conforto das pessoas em edificações. Este trabalho foi um dos primeiros no Brasil relacionado à obtenção de curvas de conforto humano quanto à vibração. Os experimentos executados neste trabalho objetivaram a determinação dos limites de percepção das pessoas à vibração e sua faixa de incerteza, a relação entre estes limites de percepção e o conforto em ambientes residenciais e a classificação dos níveis de vibração em escalas semânticas de conforto para pessoas sentadas em uma cadeira sobre uma placa vibratória. Os valores de vibração foram obtidos através de ajustes de amplitude de aceleração realizados pelos próprios voluntários, conforme os objetivos de cada experimento.

Varela (2004) realizou uma análise dinâmica em uma estrutura protótipo composto por uma estrutura treliçada espacial metálica, dividida em módulos piramidais, e uma laje de piso em concreto. Com o objetivo de realizar correlações teórico-experimentais de respostas dinâmicas geradas por atividades humanas, este pesquisador aplicou várias normas e guias de projeto na avaliação dos níveis de vibrações da estrutura. Além de comparações com normas e guias de projeto, o autor avalia a estrutura segundo critérios da sensibilidade humana às vibrações de acordo com a ISO 2631/2: 1989. Posteriormente, com resultados desfavoráveis quanto à vibração da estrutura, o autor faz proposições para redução das vibrações através de dispositivos mecânicos projetados especialmente para este fim.

Na Tabela 3.5 apresenta-se um resumo dos trabalhos relacionados a vibrações no corpo humano comentados neste item.

Tabela 3.5: Resumo dos trabalhos relacionados a vibrações no corpo humano.

Referência	Tipo de vibração	Faixa de frequência (Hz)	Postura	Tamanho da amostra	Objetivos
Harazin & Grezsis (1998)	Randômica vertical	4 a 250	Em pé	10	Medir a transmissibilidade do corpo humano.
Cobridge & Griffin (1986)	Senoidal vertical	0,5 a 5,0	Sentado	40	Avaliar o efeito da vibração sobre o conforto humano.
Balbinot & Tamagna (2002)	Randômica vertical	4 a 80	Sentado	4 veículos	Estudar os níveis de vibrações a que estão sujeitos os motoristas de ônibus urbanos com relação ao conforto e saúde.
Parsons & Griffin (1988)	Senoidal e randômica. Eixos x, y e z.	2 a 100	Sentado, deitado e em pé	36	Determinar o limiar de percepção para pessoas em pé, sentadas e deitadas, o efeito da postura e do tipo de vibração (senoidal e randômica) e a relação entre percepção e conforto.
Oborne & Boarer (1982 a)	Senoidal vertical	2,5 a 60	Sentado e em pé	20	Estudar o efeito da postura quanto ao conforto à vibração.
Oborne & Boarer (1982 b)	Senoidal vertical	2,5 a 60	Em pé	100	Avaliar o efeito das instruções dadas aos voluntários em relação às suas respostas quanto ao conforto à vibração.
Griffin & Whitham (1980)	Senoidal vertical	4 a 32	Sentado	20	Estudar o efeito da variação do desconforto com relação à duração da vibração.
Griffin et al (1982)	Senoidal. Eixos x, y e z.	1 a 100	Sentado	36	Avaliação da vibração translacional sobre o conforto
Parsons et al (1982)	Senoidal. Eixos x, y e z.	2,5 a 63	Sentado	12	Investigar a contribuição relativa da vibração nos pés e costas em relação ao desconforto das pessoas.
Misael (2001)	Senoidal vertical	16 a 80	Sentado	20	Estabelecer uma metodologia experimental para a obtenção e análise de vibrações relacionadas ao conforto das pessoas em edificações.
Varela (2004)	-	-	-	-	Realizar correlações teórico-experimentais de respostas dinâmicas geradas por atividades humanas.
Wang et al (2004)	Senoidal vertical	0 a 40	Sentado	27	Determinar os efeitos da postura sobre a resposta biodinâmica.

3.5 - Critérios de Conforto de Acordo com Especificações de Normas

Conforme Vasconcelos (1998), quando se analisa uma estrutura, duas condições devem ser sempre levadas em consideração. A primeira diz respeito ao estado limite último, no qual a segurança da estrutura e de seus componentes é verificada para os esforços solicitantes resultantes das combinações mais desfavoráveis dos carregamentos que lhe são impostos. A segunda diz respeito ao estado limite de utilização, no qual os aspectos relativos, por exemplo, às deformações, à fissuração, a vibrações excessivas, dentre outros, são verificados segundo certos valores prescritos nas normas de projeto. Este segundo critério torna-se extremamente importante na análise quando estão envolvidos carregamentos dinâmicos com faixas de frequências próximas às frequências naturais de vibração da estrutura, uma vez que estes podem causar acelerações acima de certos valores que induzem sensações de desconforto nas pessoas (Vasconcelos, 1998).

Griffin et al. (1990) apud Balbinot (2001) apresentam algumas razões para medir a exposição humana à vibração, destacando-se as seguintes:

- Desenvolvimento de documentação padronizada sobre as vibrações no corpo humano;
- Determinação dos níveis de vibração e sua redução em faixas de frequência que podem prejudicar o corpo humano;
- Fornecimento de dados que podem ser utilizados para comparação entre dois ou mais ambientes ocupacionais.

Deste modo, apresentam-se a seguir alguns comentários sobre as principais normas e guias na avaliação de níveis de vibrações em estrutura, bem como critérios quanto à sensibilidade humana à vibração.

Os critérios para as vibrações em pisos na especificação canadense CAN3-S16-M84: 1984 são definidos em função dos picos de aceleração fornecida como uma parcela da aceleração da gravidade (g). Esta norma recomenda a realização de medições experimentais no centro do vão do piso com uma pessoa de peso médio, que deve ficar apoiado na ponta dos pés e se deixar cair sobre os calcanhares num ponto próximo ao local de medição. Deste modo, a frequência natural, a taxa de amortecimento e aceleração de piso são medidas, e comparados com os limites que estão apresentados na Figura 3.30. Pode-se medir também as vibrações provocadas por pessoas caminhando no piso. As faixas indicadas como vibração de

caminhada são usadas para avaliar a resposta do impulso provocado pela queda do calcanhar sobre o piso. Enquanto que as faixas indicadas como vibração contínua são usadas para avaliar o efeito provocado por pessoas caminhando pelo piso. Quando estas medições não puderem ser realizadas, faz-se uma estimativa da aceleração de pico em função do impulso causado pelo impacto da queda do calcanhar conforme a Equação 3.7.

$$a_0 = 0,9 \frac{2pf \cdot \text{impulso}}{\text{massaequivalente} \cdot g} \frac{100}{wBL} = \frac{60f}{wBL} \quad (3.7)$$

onde,

f – freqüência fundamental da estrutura (Hz);

impulso – 70 N.s;

g - aceleração da gravidade (m/s²);

ω - peso do piso mais mobília (kPa);

L – comprimento do vão (m);

B – largura da viga equivalente (m).

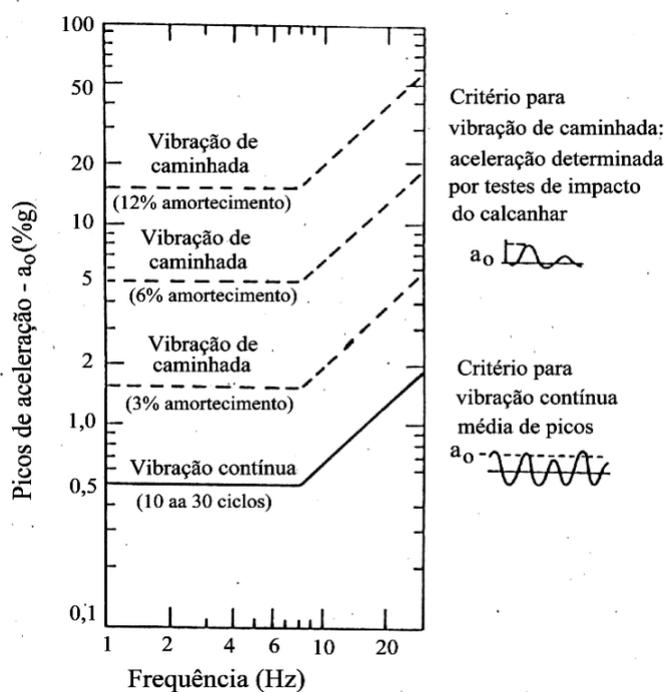


Figura 3.30: Critério de desconforto para vibrações em pisos (ocupações: residencial, escolar e em escritórios). Fonte: CAN3-S16-M84: 1984.

Não existe uma norma brasileira específica que trate do nível de amplitude de vibração aceitável para edificações. Para a avaliação de vibrações em pisos, tem-se como guia a NBR 8800: 1986 (anexo N), a qual segue os conceitos da norma canadense.

A NBR 6118: 2003 recomenda simplesmente o afastamento da frequência fundamental da estrutura de frequências críticas para alguns casos especiais de estrutura, como ginásios de esporte, salas de dança, escritórios, passarelas etc. Conforme Varela (2004), este método baseado em frequências mínimas não é aconselhável porque a estrutura pode apresentar vibrações incômodas mesmo que não haja ressonância com a excitação .

A especificação inglesa mais importante é a BS 6472: 1984 que avalia a exposição humana à vibração em edifícios (1 Hz a 80 Hz), que está fortemente ligada à Norma Internacional ISO 2631: *Guia de Avaliação da Exposição Humana à Vibrações de Corpo Inteiro*, sendo que esta é originária, em parte, das normas alemãs elaboradas para condições industriais de trabalho. A BS 6472 define uma curva base de aceleração em função da frequência, com multiplicadores para definir os níveis aceitáveis em relação à função do edifício e a natureza da excitação. A curva base é idêntica em forma às curvas mostradas na Figura 3.30, sendo seus valores numéricos correspondendo a um décimo das curvas canadenses. Entretanto, a medida usada nesta norma é o valor quadrático médio (r.m.s.) da aceleração, e não o pico médio.

A norma BS 6841: 1987 apresenta curvas que relacionam a aceleração e frequência com escalas subjetivas: extremamente desconfortável, muito desconfortável, desconfortável, médio desconfortável, pouco desconfortável e não desconfortável. Na Figura 3.31 mostram-se estas curvas de conforto.

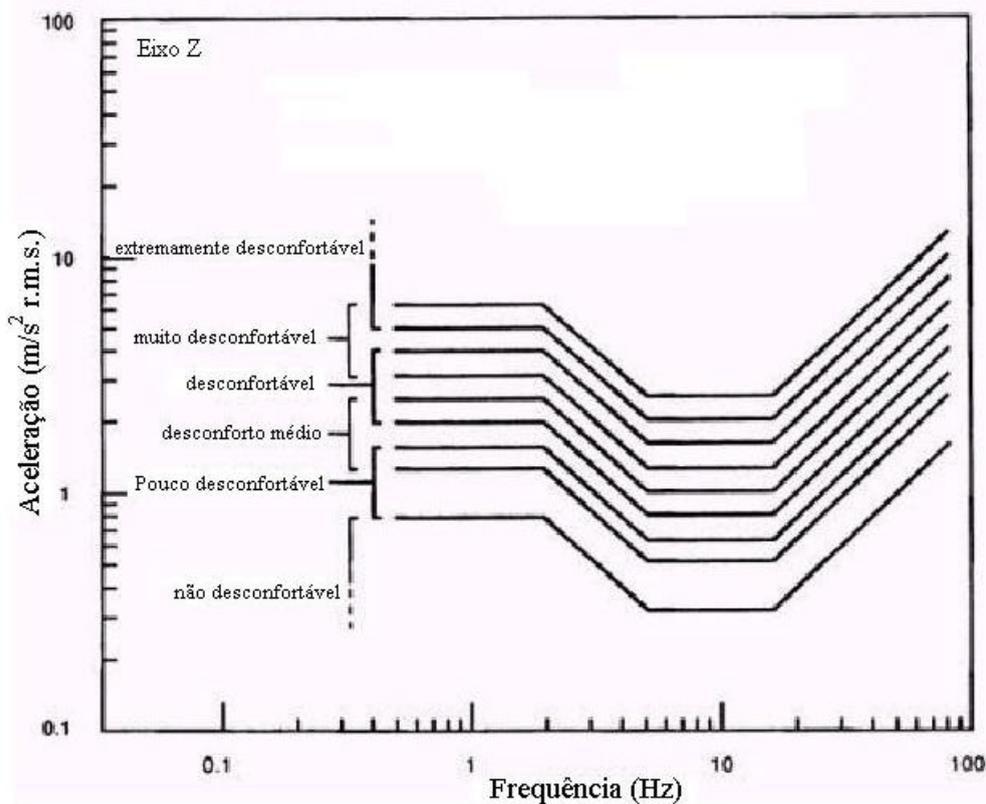


Figura 3.31: Curvas relacionando conforto com aceleração e frequência. Fonte: BS 6841: 1987.

Griffin (1996) fornece uma ampla lista de trabalhos e normas técnicas relacionadas aos níveis máximos de acelerações em edificações. Observa-se que os resultados obtidos para os estudos diferem significativamente uns dos outros, o que pode ser justificado pelas diferentes características das amostras utilizadas nos diversos ensaios e pela dificuldade em se repetir um ensaio realizado, sem uma significativa mudança em suas condições e características, devido à dificuldade em se obter informações suficientes sobre os ensaios já realizados.

Na Figura 3.32 apresentam-se alguns dos principais trabalhos e normas relacionados aos limites de aceleração, como: (1) Reiher e Meister (1931); (2) DIN 4150: 1939; (3) DIN 4025: 1958; (4) VDI 2057: 1963; (5) DIN 4150: 1975; (6) ISO 2631: 1974; (7) Japanese: 1976; (8) Greater London Council; (9) ISO 2631/2: 1989., como apresentado em Griffin (1996).

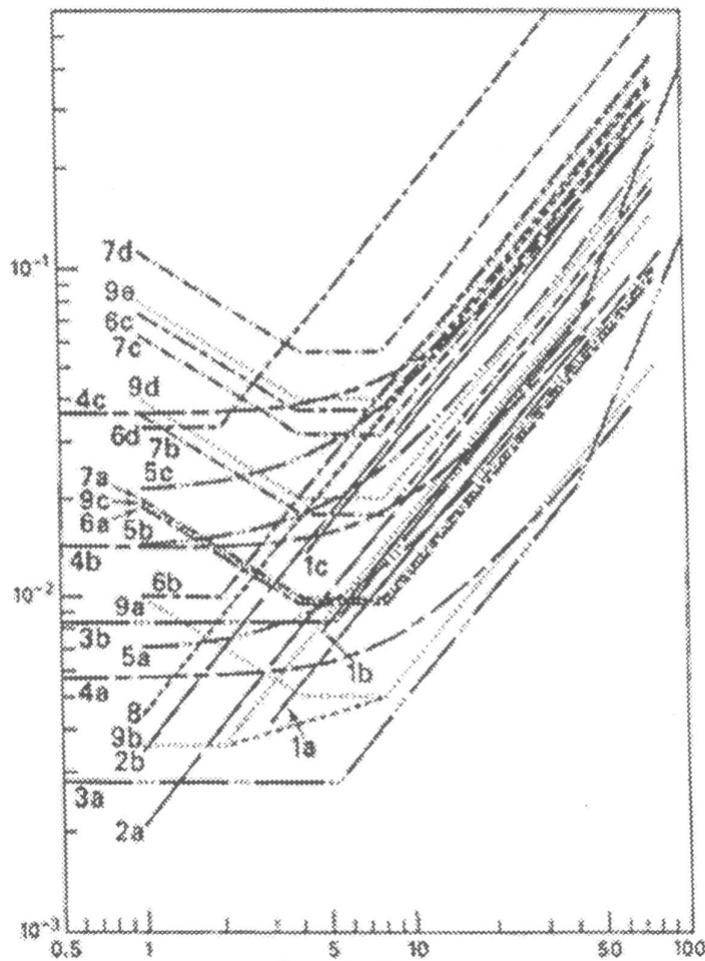


Figura 3.32: Limites de aceleração para vibração em diversas normas. Fonte: Griffin, 1996.

Apesar das diferenças entre as diversas normas, observa-se uma característica comum a todas, que é uma maior tolerância à vibração com o aumento da frequência. Com a redução da amplitude de vibração para frequências elevadas, torna-se mais difícil a percepção humana.

As principais normas que tratam dos níveis de vibração aceitáveis quanto à sensibilidade humana são a ISO 2631/1 [1997] e ISO 2631/2 [1989], que se divide em duas partes indissociáveis. Esta norma pode ser aplicada na faixa frequência de 1 a 80 Hz.

A ISO 2631/1: 1997 refere-se aos efeitos da vibração sobre a saúde e o conforto, relacionando frequências de vibração, amplitudes de aceleração e tempo de exposição, para vibrações nas direções ortogonais. Já a ISO 2631/2: 1989 refere-se ao estudo dos limites de vibrações aceitáveis em construções.

A norma ISO 2631/1: 1997 classifica três tipos de exposição humana à vibração:

1. *Vibrações transmitidas simultaneamente à superfície total do corpo e/ou a partes substanciais dele.* Isto acontece quando o corpo está imerso em um meio vibratório. Há circunstâncias em que isto é de interesse prático, por exemplo, quando ruídos de alta intensidade no ar ou na água excitam vibrações no corpo.
2. *Vibrações transmitidas ao corpo como um todo através de superfícies de sustentação,* como os pés em uma pessoa em pé, região pélvica em uma pessoa sentada, ou a área de sustentação de uma pessoa recostada. Este tipo de vibração é comum em veículos, em edificações e nas proximidades de maquinário de trabalho.
3. *Vibrações aplicadas a partes específicas do corpo, como cabeça e membros.* Exemplos destas vibrações ocorrem por meio de cabos, pedais ou suportes de cabeça, ou por grande variedade de ferramentas e instrumentos manuais.

No entanto, esta norma aplica-se somente à circunstância 2, particularmente onde a vibração é aplicada através da principal superfície de sustentação do corpo na postura sentada ou em pé. No caso de vibrações aplicadas diretamente a indivíduo recostado ou em repouso, há dados insuficientes para se fazer recomendações seguras. Isto é particularmente verdadeiro em relação à vibração transmitida diretamente à cabeça, onde a tolerância em geral é reduzida. A tolerância pode também ser reduzida quando coexistem as condições 2 e 3. Eventualmente, os limites para uma pessoa sentada ou em pé podem também ser usados para um indivíduo recostado ou em repouso. Deve-se ponderar que surgirão circunstâncias em que a aplicação rigorosa desses limites será inapropriada.

A ISO 2631/1: 1997 é aplicável apenas a situações onde os indivíduos gozam de condições normais de saúde, ou seja, considerados capazes de executarem os afazeres do cotidiano, incluindo viagens, e suportarem a tensão de um típico dia de trabalho.

A norma ISO 2631/1: 1997 apresenta métodos para a quantificação da vibração no corpo humano em relação a saúde e conforto humano. Pode ser utilizada para avaliar vibrações geradas por veículos (ar, terra e água) e máquinas (da indústria e da agricultura), onde pessoas estão expostas às vibrações mecânicas que podem interferir no conforto, nas

atividades ocupacionais e na saúde humana. As principais definições desta norma estão relacionadas aos seguintes requerimentos gerais:

- A vibração é medida de acordo com um sistema coordenado originado em um ponto em que a vibração está entrando no corpo, dentre as seguintes possibilidades fornecidas pela Figura 3.17;
- Existem limites de exposição distintos para cada um dos eixos (z , x e y);
- Os transdutores devem estar localizados para indicar a vibração na interface entre o corpo humano e a fonte de vibração, ou o mais próximo possível de tal ponto ou área;
- O parâmetro para avaliação da magnitude da vibração é a aceleração, dada em termos da raiz da média quadrática – r.m.s. (“root mean square”). O cálculo da raiz da média quadrática para um sinal de resposta no tempo qualquer se encontra no Anexo A de forma detalhada;

Para procurar caracterizar faixas de conforto humano, os limites de exposição são fornecidos para uso de acordo com três critérios, geralmente reconhecíveis como a preservação do conforto, eficiência de trabalho e segurança ou saúde. Os limites estabelecidos segundo tais critérios são denominados:

- *Limite do conforto reduzido* - está relacionado com o nível de aceleração vertical a partir do qual as pessoas sentem-se incomodadas pela vibração, tendo mais dificuldades para executar tarefas que exigem certa concentração, tais como comer, ler e escrever;
- *Limite de queda de eficiência* - define o limite além do qual a exposição prolongada à vibração pode trazer um significativo risco de queda de eficiência na atividade desenvolvida pela pessoa exposta, particularmente fadiga, quando tal exposição é demasiadamente prolongada. Esse limite é três vezes maior que o limite associado ao conforto reduzido;
- *Limite de tolerância* - é o limite em termos de valores de máximos de aceleração que uma pessoa pode ficar exposta de modo seguro, para qualquer condição de frequência, duração e direção, estimado em duas vezes superior ao limite de queda de eficiência.

Na Figura 3.33 apresentam-se os limites de exposição recomendados pela ISO 2631/1: 1997 para o limite de queda de eficiência, especificado em termos de frequência vibratória, magnitude de aceleração (r.m.s.), tempo de exposição e direção da vibração.

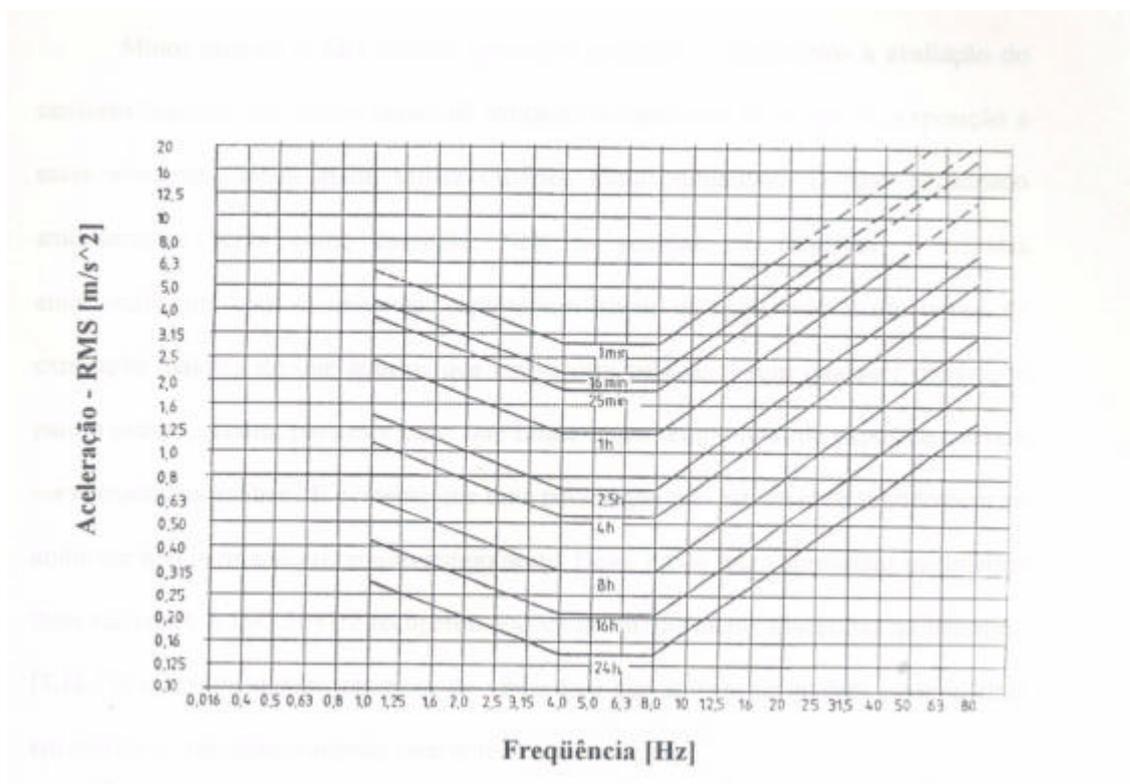


Figura 3.33: Curvas de acelerações efetivas para o limite de queda de eficiência, segundo a ISO 2631/1: 1997.

Vasconcelos (1998) afirma que onde a preocupação primordial é manter a eficiência de trabalho, como por exemplo, um motorista de veículo ou um operador de máquina trabalhando em vibração, o "limite de queda de eficiência (fadiga)" deve ser usado como ponto de referência para especificar a vibração ou efetuar medidas de controle vibratório, enquanto que, num projeto de banco para passageiros, deveria ser levado em consideração o "limite de conforto reduzido".

Deve ser observado que, valores mais elevados de vibração são aceitáveis quando a saúde ou a segurança constitui o critério de análise em comparação com os limites apropriados à eficiência de trabalho; e, inversamente, limites mais baixos são estabelecidos quando o critério é a preservação do conforto. Isto está de acordo com a observação experimental e a prática, mas não se deve subentender que exista, em todas as circunstâncias,

uma simples relação hierárquica entre as intensidades vibratórias com probabilidade de prejudicar a saúde, a eficiência de trabalho ou o conforto.

Griffin (1998) fornece uma lista de falhas encontradas na norma ISO 2631/1: 1997, que podem dificultar os estudos quando se aplicam algumas metodologias sugeridas em seu texto. Dentre as várias falhas encontradas, a mais importante é o fato da norma não fornecer nenhuma informação sobre a população analisada e a instrumentação utilizada na medição da vibração.

Misael (2001) também comentou este fato em seu trabalho, pois se torna difícil a repetição do procedimento experimental para posterior comparação dos resultados. Ainda assim, a ISO 2631/1: 1997 apresenta-se como uma das principais referências na avaliação da sensibilidade humana à vibração.

A segunda parte da norma, a ISO 2631/2: 1989 estabelece procedimentos de medição e critérios de aceitabilidade para vibrações visando o conforto humano em edificações. Os limites de vibração são apresentados em gráficos que relacionam a aceleração ou velocidade com frequências, para cada direção do movimento, medidos num período representativo em relação ao comportamento da fonte de excitação. Estas curvas básicas representam o limite para o qual as acelerações passam a serem perceptíveis ao ser humano. Algumas destas curvas estão apresentadas nas Figuras 3.34 a 3.36.

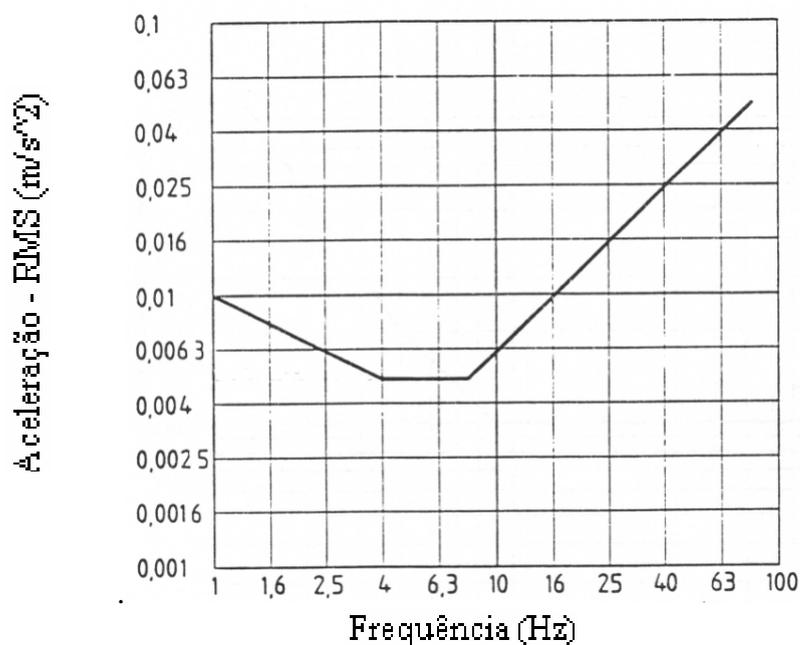


Figura 3.34: Curva básica para acelerações verticais (eixo z). Fonte: ISO 2631/2: 1989.

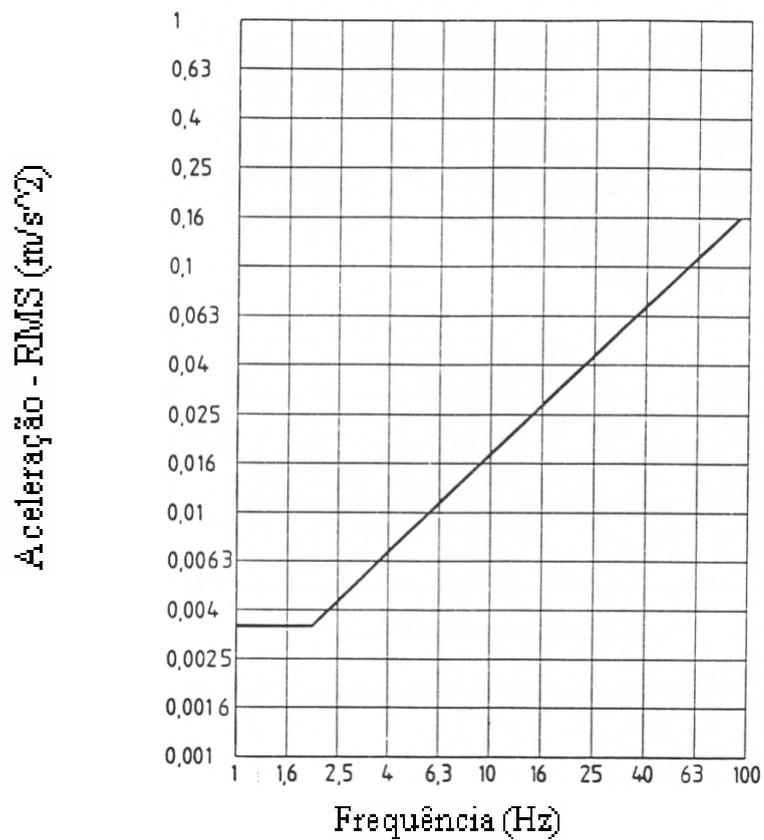


Figura 3.35: Curva básica para acelerações transversais (eixos x e y). Fonte: ISO 2631/2: 1989.

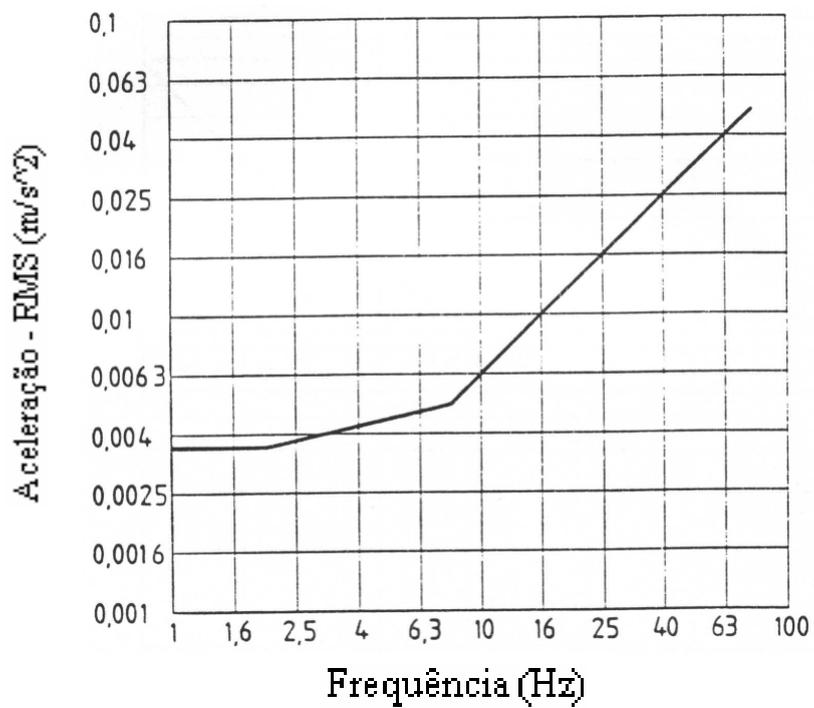


Figura 3.36: Curva básica para acelerações combinadas (eixos x , y e z). Fonte: ISO 2631/2: 1989.

As curvas mostradas nas Figuras 3.34 a 3.36 não fornecem muitas informações quando utilizadas sozinhas para a obtenção de níveis de vibrações aceitáveis para um certo ambiente ou tipo de construção. Para evitar estes problemas, desenvolveu-se uma tabela de fatores de multiplicação da curva básica da ISO 2631/2: 1989 para a obtenção de limites aceitáveis de vibrações com relação ao conforto humano para diversos tipos de ambientes. Esta tabela consta no Anexo A - “Informações sobre critérios de avaliação utilizados atualmente” - da ISO 2631/2: 1989. Os fatores de multiplicação são dependentes do horário e do tipo de excitação em que a edificação está sujeita. Estes fatores estão apresentados na Tabela 3.6.

Tabela 3.6: Fatores de multiplicação da curva básica da ISO 2631/2: 1989.

Local	Horário de utilização	Vibração contínua ou intermitente	Vibração transiente com diversas ocorrências por dia
Hospitais e áreas críticas ¹	Diurno ou Noturno	1	1
Residências ²	Diurno	2 a 4	3 a 90
	Noturno	1,4	1,4 a 20
Escritórios	Diurno ou Noturno	4	60 – 128
Oficinas	Diurno ou Noturno	8	90 – 128

Fonte ISO 2631/2: 1989.

1. Teatros, laboratórios de precisão, dentre outros, são definidos como áreas críticas.
2. O horário diurno corresponde ao intervalo de 7h até 21h e o horário noturno de 21h até 7h.

Os experimentos realizados no atual trabalho apresentam uma discussão sobre o critério utilizado pela ISO 2631/2: 1989 para vibrações em ambientes residenciais.

De acordo com von Gierke & Brammer (1998) apud Misael (2001), a aceitabilidade ou tolerância para as vibrações contínuas ou intermitentes em edificações está um pouco acima ou sobre o limiar da percepção para a maioria dos casos. Apesar disso, as reclamações irão depender das circunstâncias específicas que envolvem a vibração. Existe uma considerável variação nos limites de tolerância à vibração em residências principalmente devido a fatores sócio-culturais dos indivíduos. Em certas condições, os limites de aceleração

podem ultrapassar os valores determinados pela norma ISO 2631/2: 1989 para o conforto humano, principalmente em situações de ocorrências temporárias ou não frequentes. Também em situações onde a vibração ocorre em um período de tempo mais prolongado ou exista uma familiarização da mesma, pode acontecer uma alteração quanto à sensação de vibração declarada. Assim, mesmo a ISO 2631/2: 1989 definindo parâmetros mais rígidos, ainda deixa margem para aplicação de critérios subjetivos quando sugere os valores mostrados na Tabela 3.6, o que evidencia o quão difícil é quantificar a sensação de desconforto do ser humano submetido a vibrações e estabelecer limites em termos de aceleração de forma a possibilitar a utilização da estrutura, sujeita à vibração, sem desconforto para os usuários.

CAPÍTULO 4 - METODOLOGIA

A definição da metodologia para a realização dos experimentos deve-se a consultas em diversos trabalhos nacionais e internacionais comentados no Capítulo 3, porém com algumas adaptações à nossa realidade, principalmente no que diz respeito a recursos financeiros e infra-estrutura. Desta forma, este capítulo é composto pelos seguintes itens: considerações sobre a amostra, montagem experimental e um item referente aos procedimentos experimentais, apresentando-se os objetivos de cada experimento.

4.1. Considerações sobre a amostra

Dentre os trabalhos experimentais relacionados ao conforto humano quanto à vibração encontrados na literatura técnico-científica, a maior parte utiliza voluntários para seus experimentos dentro da própria comunidade universitária. Isto também ocorre neste trabalho devido à dificuldade de contratação de indivíduos para participarem dos testes.

No entanto, deve-se cuidar para que a amostra seja o mais representativa possível da população de interesse. É necessário, portanto, que a amostra seja casuística, de modo a se evitar que as respostas sejam viciadas.

Conforme a ISO 2631/1: 1997, vibrações podem causar danos apenas quando as pessoas ficam expostas por um longo período de tempo, com oscilações em altas amplitudes e/ou frequências. Isto não ocorre em nenhum experimento proposto neste trabalho.

A duração média total de cada experimento encontrou-se em torno de 10 minutos, sendo que os voluntários ficaram expostos à vibração de intensidade um pouco mais elevada somente para o experimento relacionado ao conforto humano, assim somente por alguns segundos.

Griffin (1996) recomenda a não participação nos experimentos das pessoas que apresentaram doenças graves ou algum tipo de doença que possa influenciar na sensação de conforto dos voluntários. Deste modo, cada voluntário preenche um questionário que tem por objetivo eliminar pessoas não aptas a participarem dos testes. Este questionário está apresentado no Anexo C.

Sabe-se que devido à subjetividade dos critérios de sensibilidade à vibração, a variabilidade das respostas é elevada. Deste modo, necessita-se de uma amostra muito grande para que os experimentos possam ser estatisticamente representativos. No entanto, devido à

disponibilidade de tempo, e mesmo da dificuldade em se encontrar um número elevado de voluntários disponíveis para a realização dos experimentos, utiliza-se um total de trinta voluntários nos experimentos, sendo quinze homens e quinze mulheres. Contudo, a grande maioria dos trabalhos encontrados na literatura técnico – científico não utiliza muitos voluntários em seus experimentos, nem mesmo verificando o tamanho necessário para a amostra.

Portanto, neste item, apresenta-se uma metodologia para o cálculo do tamanho da amostra, apresentando-se também as suas características mais importantes e relacionando-as com a população brasileira.

Obteve-se o procedimento para o cálculo do tamanho da amostra de Fonseca & Martins (1996). Para a utilização deste método, necessita-se, primeiramente, conhecer o desvio padrão e o intervalo de confiança que se deseja para os testes. Porém, no início de um trabalho, é difícil se encontrar tais informações. Portanto, deve-se realizar alguns testes em uma amostra piloto, determinando o desvio padrão e estipulando o intervalo de confiança desejado. Após este procedimento, pode-se realizar o cálculo do tamanho da amostra que seja representativa para o estudo em questão. O cálculo do tamanho da amostra pode ser feito pela Equação 4.1. Apresenta-se no Anexo E um exemplo prático para o cálculo do tamanho da amostra.

$$n = \left[\frac{z_{\alpha/2} * \sigma}{E} \right]^2 \quad (4.1)$$

Onde:

- n é o tamanho da amostra;
- $z_{\alpha/2}$ é a abscissa da curva normal padrão, fixado no nível de confiança do ensaio;
- σ é o desvio padrão da amostra piloto;
- E é o erro amostral, expresso na unidade da variável. O erro amostral é a máxima diferença aceita entre a média populacional desconhecida e a média amostral ($E = |\mu - \bar{x}|$);
- μ é a média populacional;
- \bar{x} é a média amostra.

Para este trabalho, utiliza-se os 30 indivíduos para a verificação do tamanho necessário para a amostra. Alguns resultados do cálculo do tamanho da amostra estão apresentados no Capítulo 5.

Sabe-se que a massa corporal do indivíduo é um dos fatores fisiológicos em que há a suspeita de que podem influenciar na sensação de conforto à vibração. O indicador utilizado para avaliar a massa corporal de indivíduos neste trabalho será o Índice de Massa Corporal (IMC). Este índice relaciona o peso e a estatura conforme a Equação 4.2.

$$IMC = \frac{P}{E^2} \quad (4.2)$$

Onde:

P – Peso da pessoa (kgf);

E – Estatura da pessoa (m).

Um estudo intitulado “*Condições Nutricionais da População Brasileira: Adultos e Idosos*”, realizado pelo INAM – Instituto Nacional de Alimentação e Nutrição (Coitinho et al, 1990), levantou dados sobre a distribuição do *IMC* para a população brasileira. Este estudo foi realizado para a população maior de 18 anos. Os resultados estão apresentados na Tabela 4.1 abaixo.

Tabela 4.1: Distribuição do Índice de Massa Corporal para a população brasileira (%).

IMC	Homens (%)	Mulheres (%)	Total (%)
<20,0	15,6	16,5	15,9
20,0 – 24,9	57,2	45,4	51,1
25,0 – 29,9	22,6	26,5	24,6
30,0 – 40,0	4,7	11,2	8,0
>40	0,1	0,5	0,3

Fonte: Coitinho et al (1990).

Quanto às características físicas como peso, altura e IMC da amostra utilizada, sua distribuição está apresentada na tabelas 4.2 a 4.4.

Tabela 4.2: Distribuição do peso para a amostra utilizada.

Peso (kgf)	Homens (%)	Mulheres (%)	Total (%)
< 50,0	0	13,33	6,67
50,0 – 54,9	6,67	33,33	20,00
55,0 – 59,9	6,67	20,00	13,33
60,0 – 64,9	0	13,33	6,67
65,0 – 69,9	20,00	13,33	16,67
70,0 – 74,9	33,33	0	16,67
75,0 – 79,9	26,67	0	13,33
80,0 – 84,9	6,67	0	3,33
85,0 – 89,9	0	0	0
> 89,9	0	6,67	3,33

Tabela 4.3: Distribuição da estatura para a amostra utilizada.

Estatura (m)	Homens (%)	Mulheres (%)	Total (%)
< 1,60	0	20,00	10,00
1,60 – 1,64	6,67	53,33	30,00
1,65 – 1,69	0	13,33	6,67
1,70 – 1,74	33,33	6,67	20,00
1,75 – 1,79	26,67	6,67	16,67
1,80 – 1,84	13,33	0	6,67
1,85 – 1,89	13,33	0	6,67
> 1,89	6,67	0	3,33

Tabela 4.4: Distribuição do Índice de Massa Corporal para a amostra utilizada.

IMC	Homens (%)	Mulheres (%)	Total (%)
<20,0	13,33	40,00	26,67
20,0 – 24,9	80,00	40,00	60,00
25,0 – 29,9	6,67	20,00	13,33
30,0 – 40,0	0	0	0
>40	0	0	0

Um outro fator relevante é a faixa etária dos indivíduos. As distribuições etárias da amostra utilizada e da população brasileira se apresentam conforme as Tabelas 4.5 e 4.6 abaixo:

Tabela 4.5: Distribuição por faixa etária para a amostra utilizada.

Grupos de Idade (anos)	Total	Homens	Mulheres
< 20	3,33	0	6,67
20 – 24	23,33	33,33	13,33
25 – 29	53,33	53,33	53,33
30 – 34	0	0	0
35 – 39	3,33	6,67	0
40 – 44	6,67	6,67	6,67
45 – 49	6,67	0	13,33
> 49	3,33	0	6,67

Tabela 4.6: Distribuição por faixa etária para a população brasileira.

Grupos de Idade	População Total		
	Total (%)	Homens (%)	Mulheres (%)
0 a 4 anos	9,64	9,96	9,66
5 a 9 anos	9,74	10,05	9,74
10 a 14 anos	10,22	10,50	10,18
15 a 19 anos	10,57	10,79	10,46
20 a 24 anos	9,51	9,63	9,33
25 a 29 anos	8,16	8,15	7,90
30 a 34 anos	7,67	7,61	7,38
35 a 39 anos	7,22	7,13	6,91
40 a 44 anos	6,21	6,12	5,93
45 a 49 anos	5,13	5,05	4,89
50 a 54 anos	4,16	4,09	3,96
55 a 59 anos	3,21	3,09	3,00
60 a 64 anos	2,71	2,58	2,50
65 a 69 anos	2,11	1,96	1,90
70 a 74 anos	1,62	1,47	1,43
75 a 79 anos	1,05	0,93	0,91
80 anos ou mais	1,08	0,88	0,85

Fonte: IBGE (2000).

Outros fatores, como condição sócio-cultural, não são caracterizados na amostra estudada. Isto devido ao espaço amostral ser o ambiente universitário, que não é representativo da população brasileira para esta característica. Como pode ser observado, as características da amostra não se encontram em conformidade com a distribuição da população brasileira, principalmente quanto a faixa etária onde a população universitária é

muito homogênea. Poucos estudos anteriores fazem menção a este assunto. Portanto, apresenta-se este relato para que uma análise crítica possa ser realizada, servindo de base para outras pesquisas.

4.2. Montagem experimental

A montagem experimental descrita a seguir foi definida através de consultas a diversos trabalhos encontrados na literatura nacional e internacional, principalmente o trabalho de Misael (2001). Todos os ensaios foram realizados na sala 78 da Escola de Minas, Campus Universitário da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). Na Figura 4.1 mostra-se uma vista geral da montagem experimental.



Figura 4.1: Vista geral da montagem experimental

A montagem experimental consiste de uma placa de aço, apoiada sobre quatro molas. Os voluntários se posicionam de duas formas nos experimentos: sentados em uma cadeira de encosto com assento de madeira não alcochoada, estruturada em barras metálicas; e em pé sobre a placa. A cadeira fica posicionada sobre a placa metálica de tal modo que o centro de

gravidade do conjunto cadeira – pessoa coincida com o centro de gravidade da placa, de forma a se evitar movimentos rotacionais. As dimensões da placa metálica são: 700 x 1000 x 6,3 mm. As molas apresentam as seguintes características:

Tabela 4.7: Características das molas utilizadas na montagem experimental

Definição	Material	Diâmetro do Fio (mm)	Diâmetro externo (cm)	Altura (cm)	Passo (cm)
Mola Compressão	Aço INOX	6,3	8,0	32,0	2,4

Os equipamentos necessários à realização das medidas dinâmicas nos experimentos são: acelerômetro, excitador eletromagnético, amplificador de sinais, gerador de funções, sistema de aquisição de dados e um microcomputador com software para análise dos dados. A descrição das características destes equipamentos está apresentada no Anexo F.

No fluxograma apresentado na Figura 4.2 representa-se o procedimento utilizado neste trabalho para aquisição dos dados.

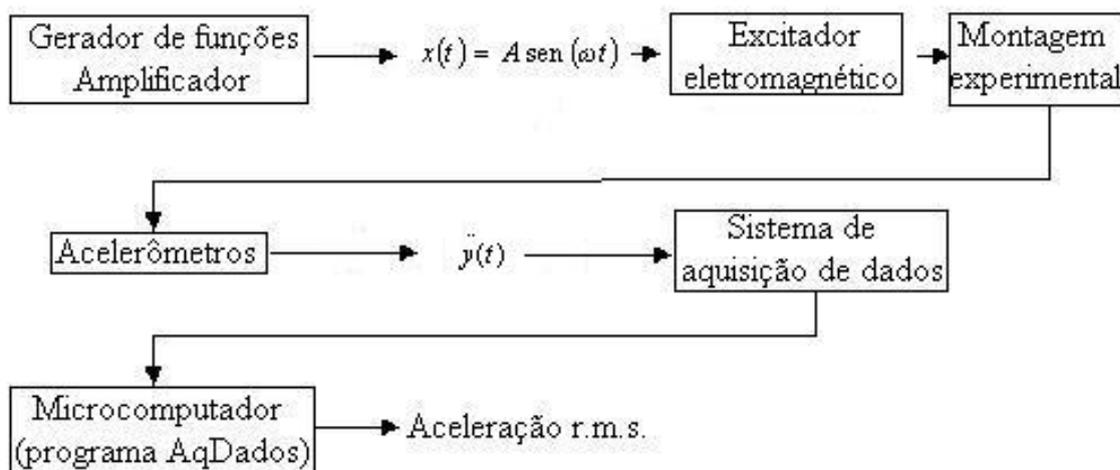


Figura 4.2: Fluxograma do processo de aquisição de dados.

Onde,

$x(t)$ – sinal de entrada, com origem no gerador de funções;

$f = \omega/2\pi$ - frequência ajustada no gerador de funções pelo pesquisador;

A – amplitude do sinal ajustada no amplificador pelos voluntários;

$\ddot{y}(t)$ - sinal de saída (aceleração) captado pelos acelerômetros e transmitidos ao sistema de aquisição de dados;

A_{rms} – aceleração r.m.s. processada no sistema de aquisição de dados.

O excitador eletromagnético (Figura 4.3) é acoplado no centro geométrico da placa, na região inferior da mesma, de modo a se produzir movimentos na direção vertical. A transferência do movimento gerado pelo excitador para a placa se faz através de um cabo de aço. A faixa de frequência de trabalho deste equipamento está entre 10Hz e 20kHz. Com isso, utiliza-se a faixa de frequência entre 12 e 80 Hz para realização dos experimentos devido à própria limitação do equipamento.



Figura 4.3: Excitador eletromagnético.

Já os acelerômetros 1 e 2 são posicionados no centro geométrico da placa, porém na região superior da mesma, e na região inferior do assento da cadeira respectivamente. Na Figura 4.4 apresenta-se de forma esquemática a localização dos acelerômetros.

A calibração é um processo de grande importância para a utilização de um acelerômetro. Consiste em gerar um valor de entrada conhecido e registrar a resposta do instrumento, tal que a razão saída-entrada possa ser estabelecida sobre o intervalo de interesse (frequência e magnitude). O método de calibração usado neste trabalho requer somente o simples ato de rotacionar o eixo de sensibilidade do acelerômetro no campo gravitacional da

Terra. Isto produz uma mudança nominal na aceleração de $2g$ (de $-1g$ a $+1g$). Deste modo, atribui-se ao sinal de tensão o valor de aceleração da gravidade conhecido. Maiores detalhes sobre o funcionamento de instrumentos sísmicos podem ser encontrados no Anexo D.

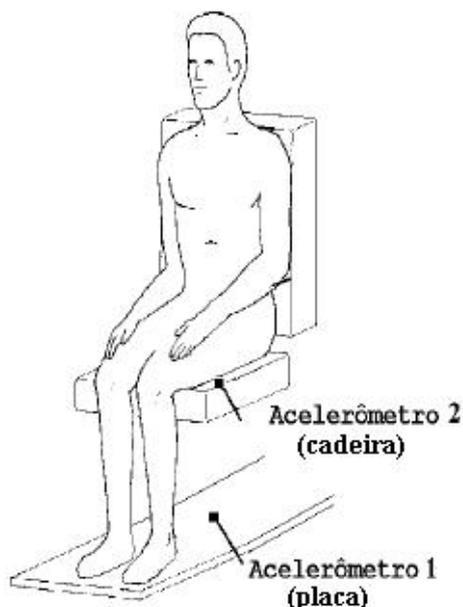


Figura 4.4: Localização dos acelerômetros para medida da transmissibilidade placa – cadeira.

Fonte Balbinot & Tamagna, 2002.

O tipo de vibração utilizado neste trabalho é senoidal, sendo produzida por um gerador de funções e transmitida a um amplificador de sinais, onde a amplitude de vibração pode ser ajustada. Nas Figuras 4.5 e 4.6 mostram-se o gerador de funções e o amplificador de sinais, respectivamente.



Figura 4.5: Gerador de funções.



Figura 4.6: Amplificador de sinais.

O sinal de oscilação senoidal produzido pelo gerador de funções, após ser amplificado, é transmitido ao excitador eletromagnético. Este transmite o movimento à placa, que é captado pelos acelerômetros. Os acelerômetros, por sua vez, transmitem os dados a um sistema de aquisição de dados que está conectado a um microcomputador onde estes dados são analisados através do programa AqDados, específico para aquisição e análise de dados. Na Figura 4.7 apresenta-se o sistema de aquisição de dados. Maiores detalhes sobre as características do sistema de aquisição de dados podem ser encontrados no Anexo F. No

Anexo B apresenta-se alguns conceitos sobre aquisição de dados. Já a montagem experimental está apresentada de forma esquemática na Figura 4.8.



Figura 4.7: Sistema de aquisição de dados.

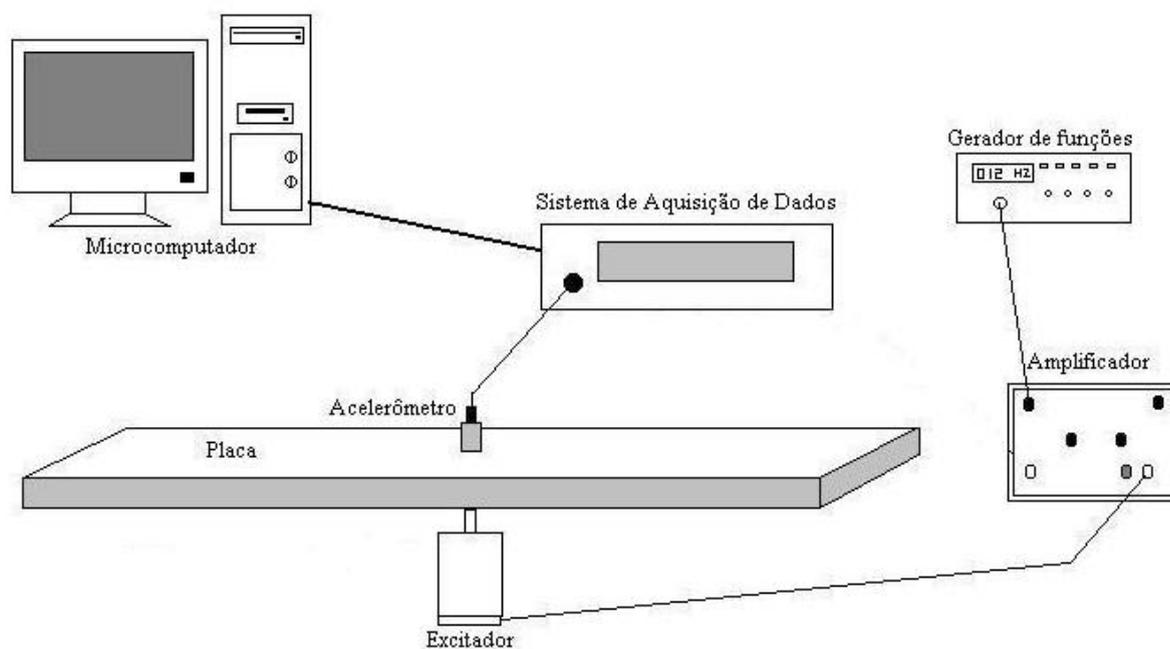


Figura 4.8: Ilustração esquemática do funcionamento da montagem experimental.

4.3. Experimentos

Os experimentos aqui apresentados têm como referência alguns trabalhos citados no Capítulo 3, principalmente os trabalhos de Parsons & Griffin (1988) e Misael (2001). O primeiro experimento diz respeito à definição da transmissibilidade da montagem, que é definida com a razão entre as respostas do acelerômetro 2 e 1. O segundo e terceiro testes têm como objetivo a aquisição de dados sobre o limite de percepção das pessoas quanto à vibração. O quarto visa a obtenção dos níveis de conforto quanto à vibração para o ambiente residencial. Para todos os experimentos, os voluntários realizaram as medidas em duas posições: em pé sobre a placa metálica, e sentados em posição confortável sobre uma cadeira rígida estruturada em barras metálicas com assento e encosto de madeira. Inicialmente os voluntários eram requeridos a retirarem os sapatos, no entanto, com o decorrer dos ensaios, devido ao incômodo de tal procedimento e a constatação de sua pouca influência frente à variabilidade individual das respostas, este procedimento foi abandonado. As vibrações utilizadas nos experimentos foram senoidais, com direção vertical (eixo z), sendo estudado nove frequências (12; 16; 20; 25; 32; 40; 50; 63 e 80 Hz).

Não foram considerados os efeitos das condições ambientais no momento dos experimentos. No entanto, nenhuma anormalidade ocorreu quanto a valores de temperatura e ruído que pudesse interferir nos resultados. A temperatura oscilou entre 20 e 25 C° durante a realização dos ensaios. O tempo de duração médio para cada experimento apresenta-se em torno de 15 minutos, sendo dado um intervalo de 10 minutos entre os experimentos.

Com exceção do primeiro experimento, os próprios voluntários ajustam os níveis de vibração conforme o objetivo do experimento, considerando uma frequência determinada pelo pesquisador. Apresenta-se a seguir os experimentos realizados.

4.3.1. Experimento 1: Determinação da transmissibilidade da montagem

As respostas obtidas nos experimentos podem ser afetadas pela função de transferência dos componentes da montagem. A função de transferência ou transmissibilidade pode ser definida como a capacidade de um sistema em transmitir um movimento ou força de um ponto a outro. Portanto, um nível de aceleração medido em determinada posição da montagem pode não corresponder à mesma aceleração em que a pessoa está submetida. Com isso, respostas imprecisas podem ser medidas.

Em Misael (2001), ocorreram problemas relacionados à transmissibilidade. Uma atenuação da amplitude da aceleração entre a placa e a cadeira para frequências entre 44 a 73 Hz fez com que os voluntários ajustassem altas amplitudes de movimento para começarem a sentir a vibração.

A transmissibilidade da montagem é definida neste trabalho como a razão entre os sinais registrados em termos de aceleração r.m.s. nos acelerômetros 1 e 2. São realizadas medidas de transmissibilidade para cada voluntário.

4.3.2. Experimento 2: Determinação do limite de percepção à vibração

Este experimento tem como finalidade obter os níveis de aceleração perceptíveis às pessoas, ou seja, o limiar de percepção quanto à vibração. Realiza-se uma comparação entre os resultados encontrados para os homens e mulheres, através de testes de hipótese do tipo U Mann-Whitney, de modo a se saber se existem diferenças significativas nas respostas dos dois grupos.

4.3.3. Experimento 3: Determinação da incerteza das respostas do Experimento 2

O objetivo deste experimento é determinar o intervalo de incerteza dos resultados encontrados no experimento anterior. Conforme Parsons & Griffin (1988), o limite de percepção absoluta para a vibração pode ser definido como a magnitude de vibração acima da qual o indivíduo detectará a vibração e abaixo da qual ele não detectará. Investigações práticas realizadas pelos mesmos pesquisadores revelaram que para uma vibração próxima do limite, os indivíduos algumas vezes registrarão que podem sentir o movimento e algumas vezes registrarão que não podem. Portanto, existe um intervalo de incerteza nas respostas. Este intervalo corresponde às magnitudes de vibração onde os indivíduos nem estão certos que podem sentir a vibração, nem estão certos que não podem. A afirmação de um indivíduo que ele pode sentir a vibração que está dentro do intervalo de incerteza depende de sua atitude. Por exemplo, considere dois indivíduos com sensibilidades à vibração idênticas. O primeiro indivíduo tende a registrar que a vibração está presente mesmo se ele não tem certeza que pode ou não sentir a vibração. O segundo, contudo, tende a indicar que pode sentir a vibração somente quando ele está certo de que ela está presente.

Com isso, não existe uma magnitude de vibração simples acima da qual os indivíduos sempre detectarão a vibração e abaixo da qual eles não detectarão. Existe um intervalo de incerteza tal que a probabilidade que um indivíduo detectará um estímulo aumenta com o aumento da intensidade do estímulo.

Portanto, este experimento visa a identificação do intervalo de incerteza de percepção à vibração. Os voluntários são orientados a ajustarem uma magnitude de vibração vertical senoidal para:

Caso 1 - O menor nível de vibração que os voluntários estão certos que podem sentir;

Caso 2 - O maior nível de vibração que os voluntários estão certos que não podem sentir.

4.3.4. Experimento 4: Determinação da relação entre percepção e conforto

O objetivo principal deste experimento é a determinação das vibrações que os voluntários consideram inaceitáveis em suas residências. Conforme Parsons & Griffin (1988), os valores de amplitude considerados como inaceitáveis para residências são duas vezes maiores que o limite de percepção para a frequência de 16 Hz. Misael (2001) encontrou uma tendência de crescimento desta relação com o aumento da frequência de vibração. Portanto, uma comparação entre os resultados obtidos neste experimento com os encontrados nos dois estudos descritos acima é realizada. Com isso, cada voluntário responde aos estímulos referentes ao menor nível de vibração que considera como desconfortável em seu ambiente residencial. Como no Experimento 2, uma comparação entre os resultados encontrados para os homens e mulheres é realizada através de testes de hipótese do tipo U Mann-Whitney.

Tanto para o experimento relacionado ao limite de conforto quanto o limite de percepção, realiza-se uma investigação sobre os efeitos da postura nas respostas das pessoas, comparando-se os resultados para as posturas em pé e sentada. Deste modo, faz-se uma análise deste efeito em comparação com resultados de outros trabalhos encontrados na literatura técnico-científica e com a própria ISO 2631/2: 1989.

CAPÍTULO 5 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este capítulo tem como objetivo fornecer os resultados dos experimentos apresentados na metodologia proposta no Capítulo 4. Com isso, uma análise dos resultados é realizada, apresentando-se os limites de percepção e conforto à vibração, uma comparação entre os resultados de homens e mulheres, a relação entre percepção e conforto, o efeito da postura na percepção e conforto humano e comparações com resultados de outros trabalhos encontrados na literatura técnico-científica e com a norma internacional ISO 2631/2: 1989. O presente capítulo está dividido da seguinte forma: verificação do tamanho da amostra para os experimentos, transmissibilidade da montagem, limite de percepção, determinação da incerteza do limite de percepção e limite de conforto.

5.1. Verificação do tamanho da amostra

Através dos resultados encontrados para uma amostra de 30 voluntários, verifica-se o tamanho da amostra necessária para alguns experimentos com o objetivo de demonstrar a subjetividade das respostas de níveis de vibração quanto à percepção e conforto conforme procedimento descrito no Capítulo 4. Os parâmetros adotados são os seguintes:

- Nível de confiança dos experimentos igual a 95% - $Z_{\alpha/2} = 1,96$.
- Desvio padrão para amostra de 30 voluntários
- O erro amostral considerado igual a 20%, ou seja, o valor da média populacional é adotado como 80% do valor da média amostral.

$$E = \left| \bar{x} - \mu \right| = \left| \bar{x} - 0,8\bar{x} \right| \quad (5.1)$$

sendo,

μ - média populacional;

\bar{x} - média amostral.

Deste modo, conforme a Equação 4.1, apresenta-se nas Tabelas 5.1 a 5.4 o tamanho da amostra necessária para alguns experimentos. Não são apresentadas tabelas contendo informações sobre o tamanho da amostra para todos os experimentos porque o objetivo é

apenas demonstrar a elevada variabilidade das respostas dos voluntários, sendo possível constatar esta característica com as informações apresentadas.

Tabela 5.1: Experimento 2 – Limite de percepção – Postura sentada – Acelerômetro 2

Frequência (Hz)	12	16	20	25	32	40	50	63	80
Média Geral (m/s²) RM.S.	0,028	0,027	0,039	0,050	0,055	0,077	0,073	0,080	0,097
Desvio Padrão (m/s²) RM.S.	0,025	0,021	0,039	0,053	0,060	0,065	0,061	0,077	0,090
Tamanho da Amostra	76,6	58,1	96,0	107,9	114,3	68,4	67,1	89,0	82,7

Tabela 5.2: Experimento 2 – Limite de percepção – Postura em pé – Acelerômetro 1

Frequência (Hz)	12	16	20	25	32	40	50	63	80
Média Geral (m/s²) RM.S.	0,067	0,113	0,118	0,176	0,184	0,181	0,241	0,253	0,244
Desvio Padrão (m/s²) RM.S.	0,045	0,163	0,100	0,160	0,165	0,139	0,223	0,318	0,357
Tamanho da Amostra	43,3	199,8	69,0	79,4	77,2	56,6	82,2	151,7	205,6

Tabela 5.3: Experimento 4 – Limite de conforto – Postura sentada – Acelerômetro 2

Frequência (Hz)	12	16	20	25	32	40	50	63	80
Média Geral (m/s²) RM.S.	0,063	0,064	0,111	0,132	0,138	0,220	0,250	0,263	0,323
Desvio Padrão (m/s²) RM.S.	0,036	0,050	0,098	0,137	0,120	0,217	0,207	0,223	0,264
Tamanho da Amostra	31,4	58,6	74,9	103,5	72,6	93,4	65,8	69,1	64,2

Tabela 5.4: Experimento 4 – Limite de conforto – Postura em pé – Acelerômetro 1

Frequência (Hz)	12	16	20	25	32	40	50	63	80
Média Geral (m/s²) RM.S.	0,161	0,188	0,263	0,432	0,475	0,646	0,853	0,950	0,905
Desvio Padrão (m/s²) RM.S.	0,119	0,143	0,232	0,308	0,394	0,574	0,675	0,772	1,094
Tamanho da Amostra	52,5	55,6	74,7	48,8	66,1	75,8	60,1	63,4	140,3

Realiza-se também um procedimento inverso ao apresentado, fixando-se o tamanho da amostra em 30 indivíduos e o erro amostral em 20%. Deste modo, calcula-se o nível de confiança para a amostra. A Tabela 5.5 apresenta este nível de confiança para os experimentos acima.

Tabela 5.5: Nível de confiança para a amostra estudada.

Frequência (Hz)	12	16	20	25	32	40	50	63	80
Experimento 2 – Limite de percepção – Postura sentada – Acelerômetro 2									
Nível de Confiança (%)	78,14	84,14	72,86	69,70	68,26	80,64	80,98	74,58	76,20
Experimento 2 – Limite de percepção – Postura em pé – Acelerômetro 1									
Nível de Confiança (%)	89,68	55,28	80,30	76,98	77,76	84,72	76,20	61,56	54,68
Experimento 4 – Limite de conforto – Postura sentada – Acelerômetro 2									
Nível de Confiança (%)	94,52	83,84	78,50	71,08	79,24	73,30	81,32	80,30	81,98
Experimento 4 – Limite de conforto – Postura em pé – Acelerômetro 1									
Nível de Confiança (%)	86,12	85,02	78,50	87,64	81,32	78,14	83,24	82,30	63,72

Pode ser observado nas Tabelas 5.1 a 5.4 que o tamanho da amostra utilizado é insuficiente para os parâmetros adotados, demonstrando grande variabilidade individual para critérios de percepção e conforto à vibração. Dentre os trabalhos pesquisados, somente Misael (2001) fez considerações sobre o tamanho da amostra necessária à realização do ensaio.

Com isso, devido aos elevados valores encontrados em algumas frequências para o tamanho da amostra, torna-se difícil de se obter na prática uma amostra adequada dentro de um intervalo de tempo razoável. No entanto, com a metodologia disponível neste trabalho e a estrutura montada torna-se possível a continuidade dos experimentos de modo a enriquecer o banco de dados dos níveis de vibração, podendo-se assim alcançar um número adequado para o tamanho da amostra. O nível de confiança médio para a amostra utilizada considerando-se um erro amostral de 20% está em torno de 77%.

5.2. Experimento 1: Transmissibilidade

Conforme apresentado no Capítulo 4, as respostas obtidas nos experimentos podem ser afetadas pela transmissibilidade dos componentes da montagem. Portanto, um nível de

aceleração medido em determinada posição da montagem pode não corresponder à mesma aceleração em que a pessoa está submetida. A ISO 2631/1: 1997, em seu capítulo de introdução, faz menção sobre como a vibração é transmitida ao corpo conforme a postura das pessoas.

Considerando a montagem experimental apresentada no Capítulo 4, entende-se que a vibração é transmitida ao corpo através das superfícies de suporte, tais como os pés, para pessoas em pé, e o assento da cadeira, para pessoas sentadas. Com isso, o objetivo deste experimento é estudar a transmissibilidade da montagem experimental, escolhendo-se o ponto mais adequado para as medidas de vibração nos experimentos seguintes. Conforme Brownjohn, 1999, a participação de pessoas como integrante de um sistema dinâmico é mais que simplesmente uma carga adicional. A presença de uma pessoa afeta o comportamento dinâmico do sistema mola-placa-cadeira devido às diferenças de propriedades elásticas, massa e amortecimento de cada organismo. Portanto, o conhecimento da transmissibilidade somente do sistema mola-placa-cadeira não pode ser aplicado quando as pessoas estão envolvidas, o que produziria resultados incorretos. Deste modo, para cada voluntário, encontra-se um valor de transmissibilidade. Com isso, adota-se o valor médio para apresentação dos resultados.

Neste trabalho, a transmissibilidade entre a cadeira e a placa é calculada simplesmente dividindo-se a resposta em termos de aceleração *r.m.s.* do acelerômetro 2, localizado na cadeira, pela resposta do acelerômetro 1, localizado na placa, conforme a Equação 5.2.

$$T = \frac{A_{rms_2}}{A_{rms_1}} \quad (5.2)$$

Apresenta-se na Figura 5.1 o resultado da transmissibilidade média entre a cadeira e a placa.

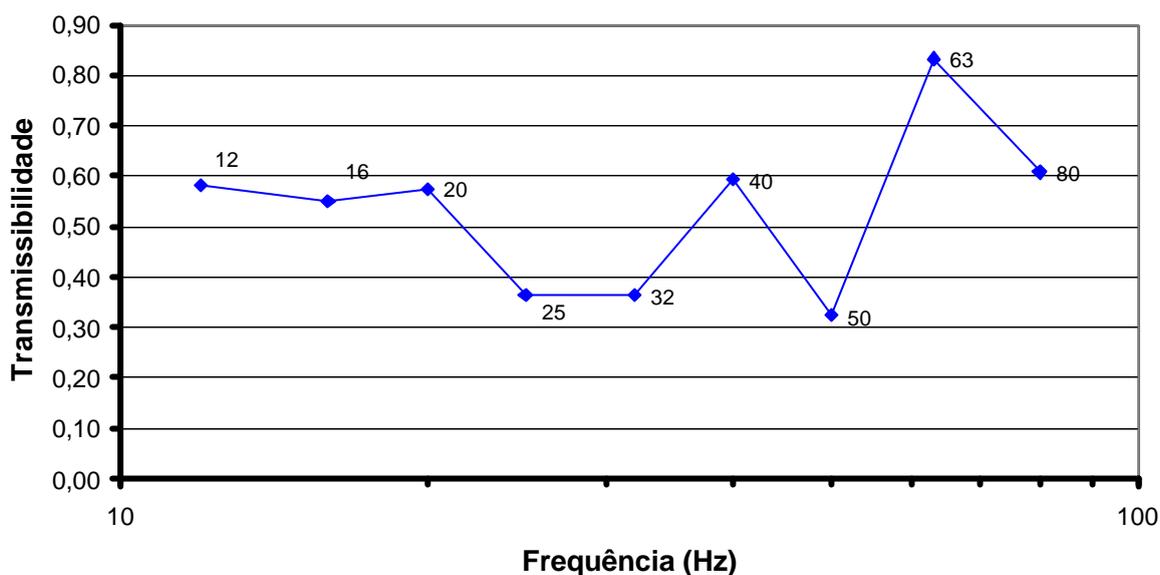
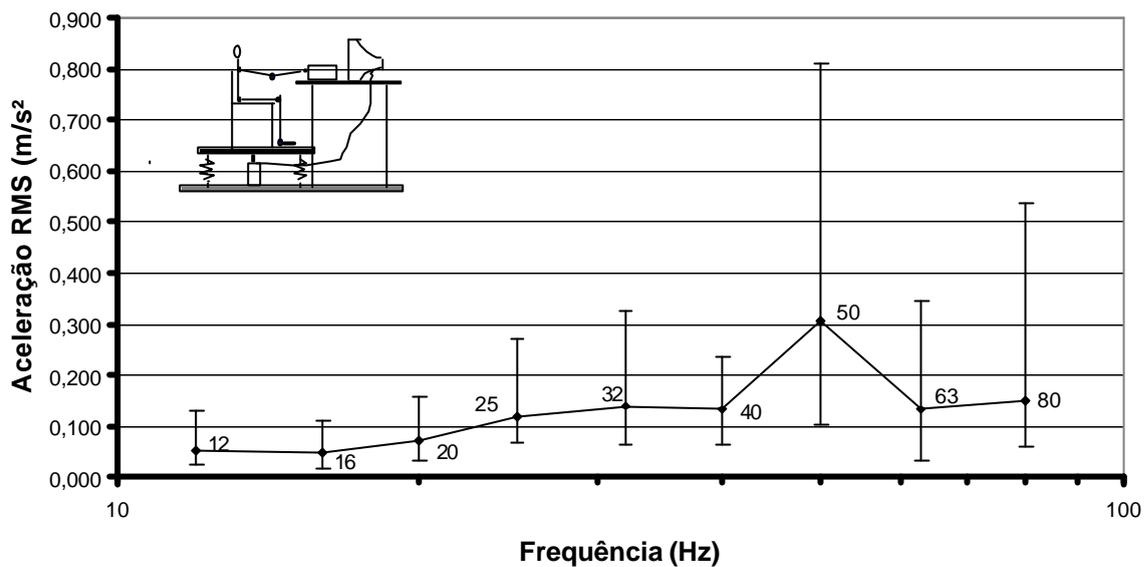


Figura 5.1: Transmissibilidade da montagem experimental cadeira/placa.

Observa-se que os valores de transmissibilidade apresentam-se entre 0,55 e 0,60, com uma atenuação para 0,35 nas frequências 25, 32 e 50 Hz, e um acréscimo para um valor em torno de 0,83 para a frequência de 63 Hz. Com isso, conclui-se que para todas as frequências ocorre uma atenuação do movimento da placa para a cadeira. Deste modo, para os experimentos com pessoas na postura sentada, deve-se tomar como referência o valor de aceleração captado pelo acelerômetro 2, localizado na cadeira, já que o acelerômetro 1, localizado na placa, produzirá respostas ampliadas, ou seja, as acelerações captadas pelo acelerômetro 1 são mais elevadas que as acelerações em que os voluntários estão expostos. Este comportamento poderá ser observado nas respostas dos experimentos a seguir.

5.3. Experimento 2: Limite de percepção

O objetivo deste experimento é determinar o limite de percepção absoluta à vibração senoidal de pessoas nas posturas sentada e em pé sob vibração senoidal vertical. Deste modo, os voluntários são solicitados a responderem qual o nível de vibração mínimo que podem detectar. Nas Figuras 5.2 a 5.4 apresentam-se os resultados do limite de percepção médio com o respectivo desvio padrão encontrado para o grupo de pessoas estudadas.



Figuras 5.2: Limite de percepção – Postura sentada – Acelerômetro placa.

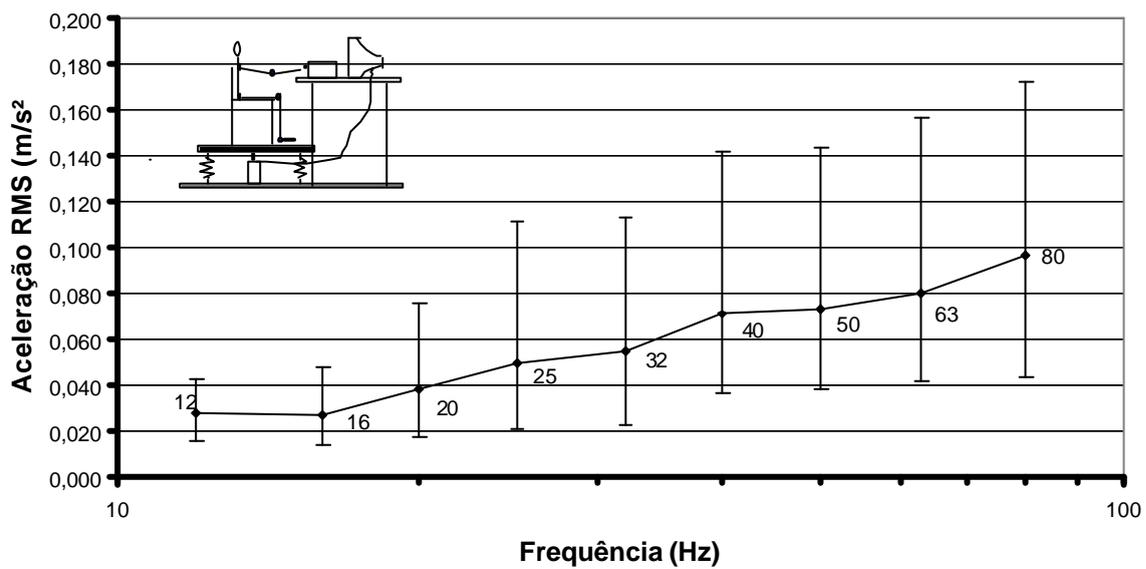


Figura 5.3: Limite de percepção – Postura sentada – Acelerômetro cadeira.

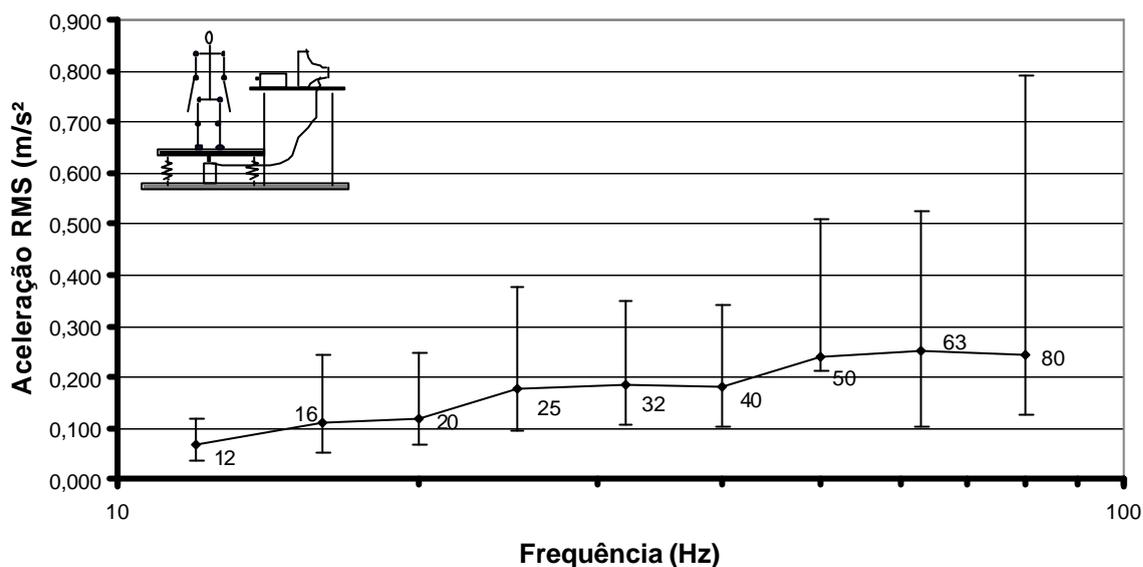


Figura 5.4: Limite de percepção – Postura em pé – Acelerômetro placa.

Nos resultados obtidos, fica nítida a redução da sensibilidade das pessoas para frequências mais elevadas. Este comportamento está em conformidade com diversos outros trabalhos encontrados na literatura técnica, inclusive a norma ISO 2631/1: 1997 e ISO 2631/2: 1989. A diminuição das amplitudes do movimento para frequências mais elevadas torna a vibração mais difícil de ser detectada. Na Figura 5.5 compara-se os sinais de vibração captados pelo acelerômetro 1, localizado na placa, e o acelerômetro 2, localizado na cadeira, para pessoas na postura sentada com relação ao limite de percepção.

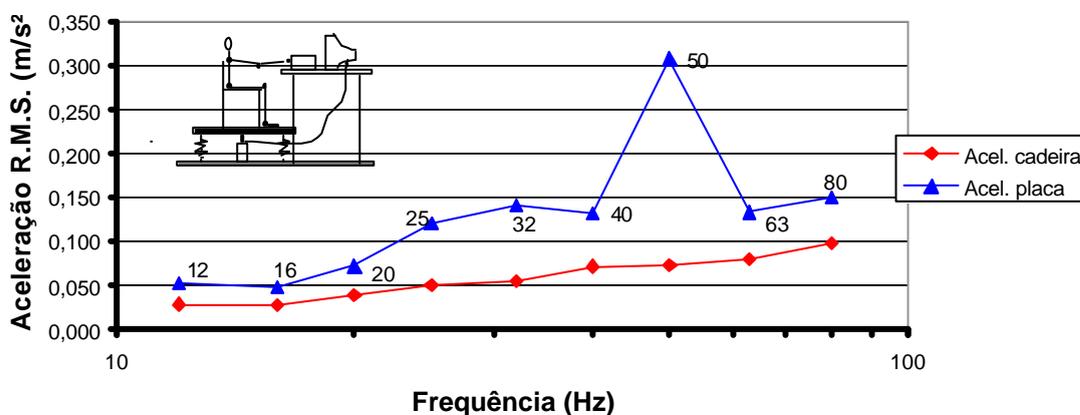


Figura 5.5: Comparação entre o sinal captado pelo acelerômetro 1 e 2 para a postura sentada.

Observa-se pelos resultados mostrados que o acelerômetro 1 registrou valores mais elevados. Este comportamento pode ser explicado pelo resultado do Experimento 1, onde todos os valores para a transmissibilidade média ficaram abaixo de 1. Com isso, ocorre uma atenuação das vibrações que atingem os voluntários para a postura sentada. Isto faz com que valores elevados de vibração sejam registrados no acelerômetro 1, não correspondendo à vibração que as pessoas estão submetidas. Para a frequência de 50 Hz, um valor significativamente mais elevado é registrado, justamente onde a transmissibilidade é mais baixa (Figura 5.1), ou seja, uma atenuação das vibrações para a frequência de 50 Hz provocou uma medida de aceleração muito elevada no acelerômetro 1.

Desta forma, conforme comentado na ISO 2631/: 1997 e discutido no Item 5.2, para pessoas na postura sentada, a superfície de suporte é o assento da cadeira, onde a vibração é transmitida ao corpo inteiro.

De modo a se verificar a variabilidade nas respostas à vibração das pessoas, nas Figuras 5.6 a 5.14 apresenta-se a distribuição das respostas para algumas frequências, bem como os valores médios, o primeiro e terceiro quartis e os valores mínimo e máximo do limite de percepção registrado no experimento para cada frequência. Os quartis dividem um conjunto de dados em quatro partes iguais. Assim, o primeiro quartil corresponde ao valor em que 25% dos elementos são inferiores a este valor. Já o terceiro quartil deixa 75% dos elementos.

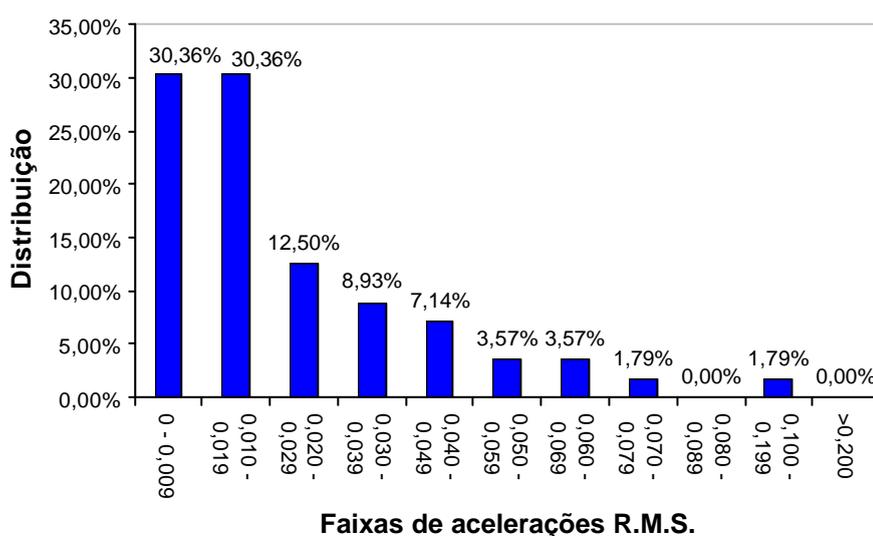


Figura 5.6: Distribuição das respostas para o limite de percepção na frequência de 12 Hz – Postura sentada – Acelerômetro 2.

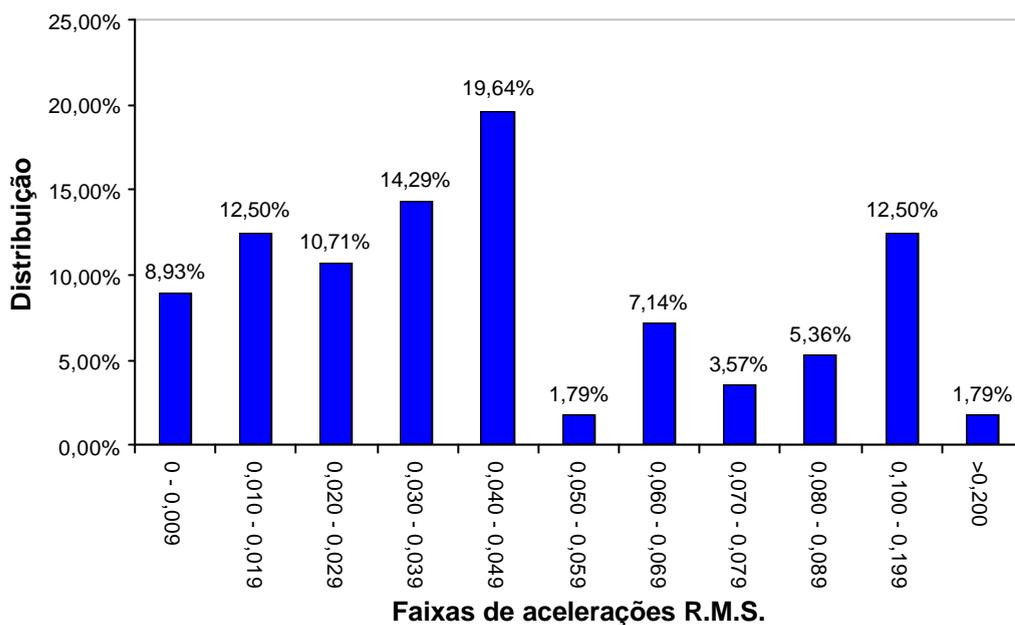


Figura 5.7: Distribuição das respostas para o limite de percepção na frequência de 40 Hz – Postura sentada – Acelerômetro 2.

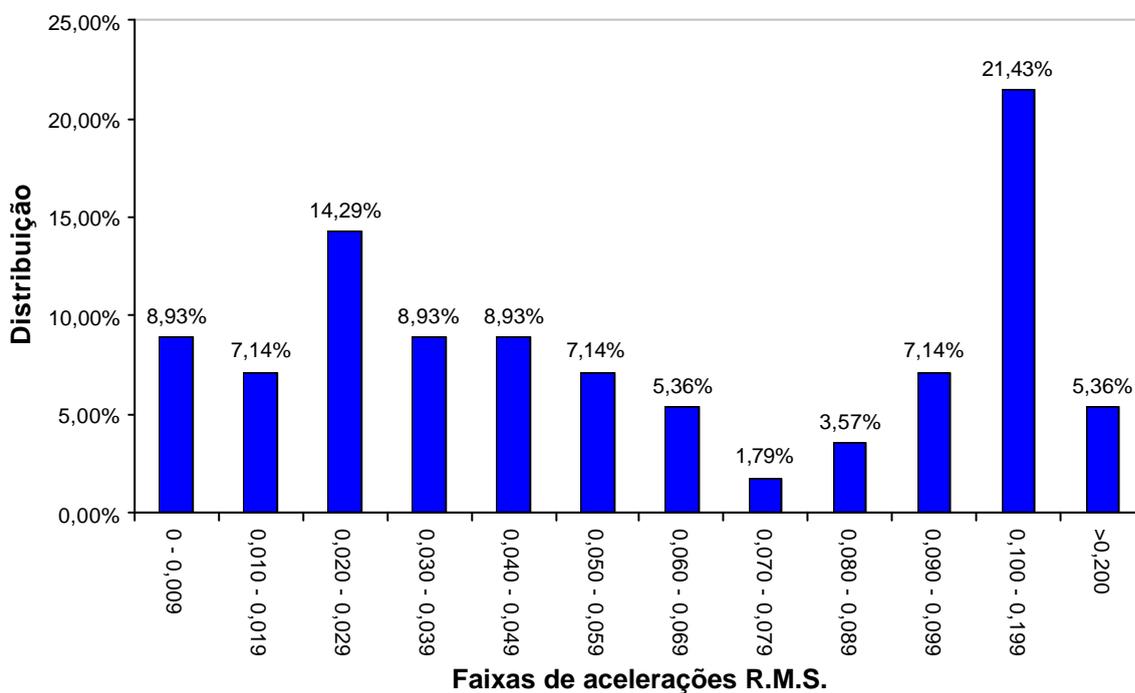


Figura 5.8: Distribuição das respostas para o limite de percepção na frequência de 80 Hz – Postura sentada – Acelerômetro 2.

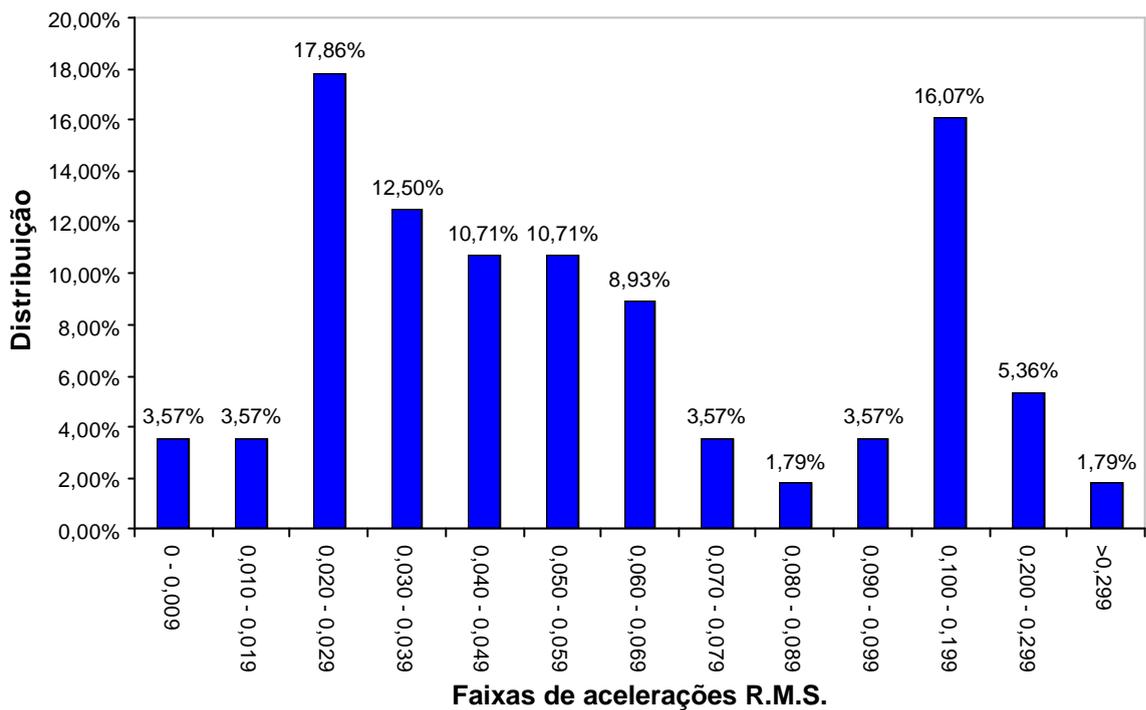


Figura 5.9: Distribuição das respostas para o limite de percepção na frequência de 16 Hz – Postura em pé – Acelerômetro 1.

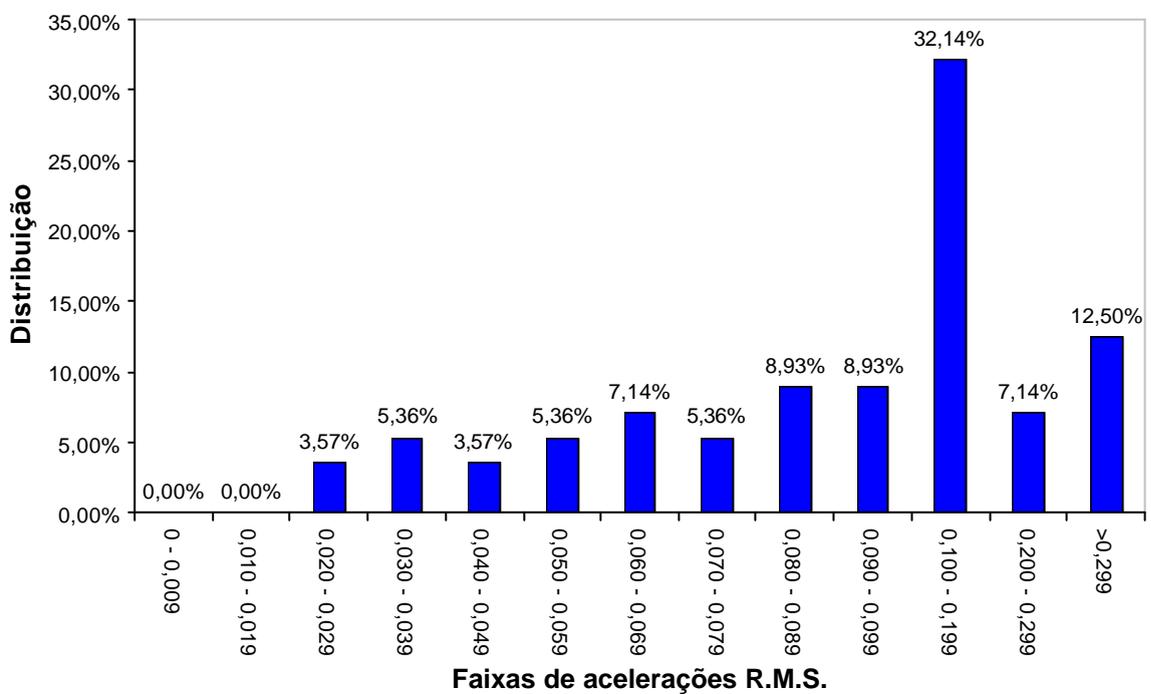


Figura 5.10: Distribuição das respostas para o limite de percepção na frequência de 32 Hz – Postura em pé – Acelerômetro 1.

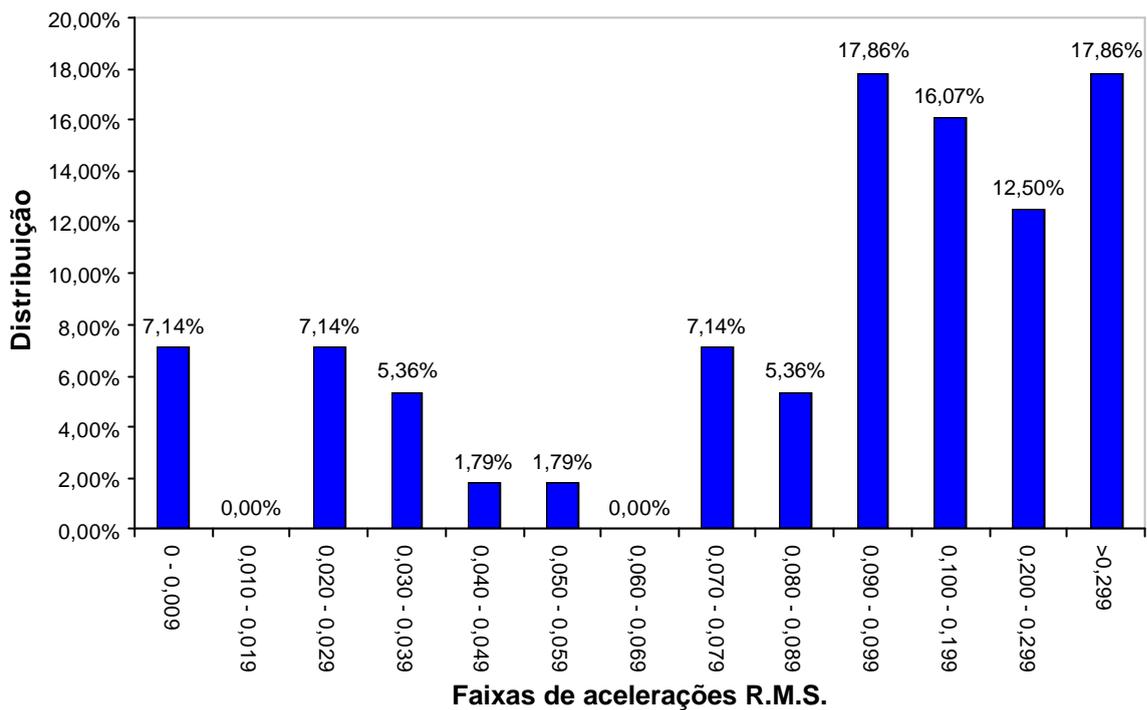


Figura 5.11: Distribuição das respostas para o limite de percepção na frequência de 63 Hz – Postura em pé – Acelerômetro 1.

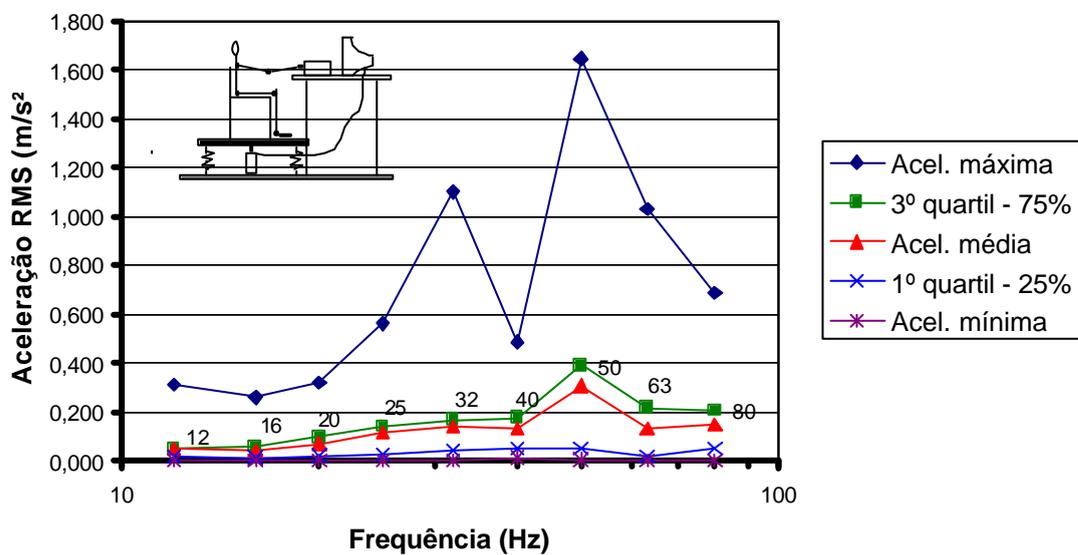


Figura 5.12: Variabilidade das respostas do limite de percepção – Postura sentada – Acelerômetro placa.

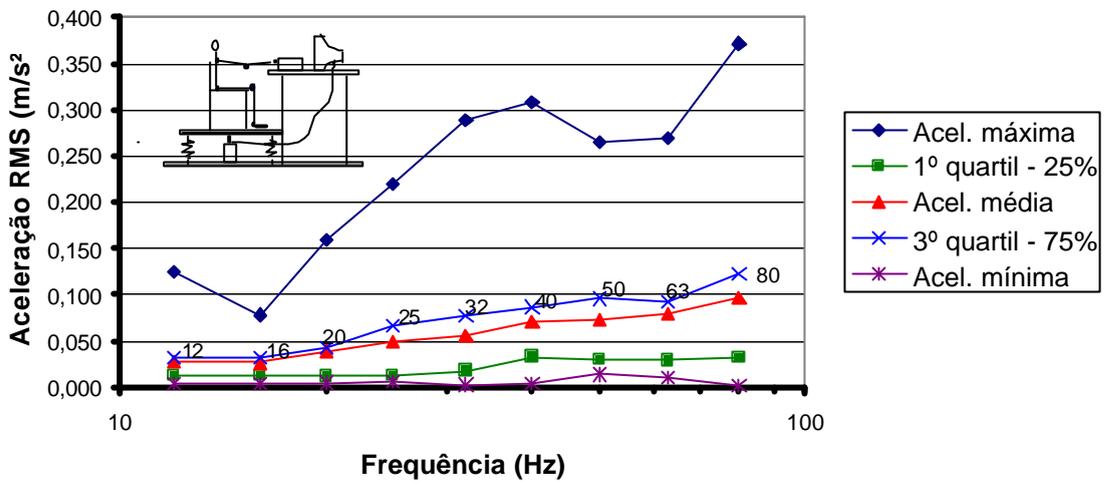


Figura 5.13: Variabilidade das respostas do limite de percepção – Postura sentada – Acelerômetro cadeira.

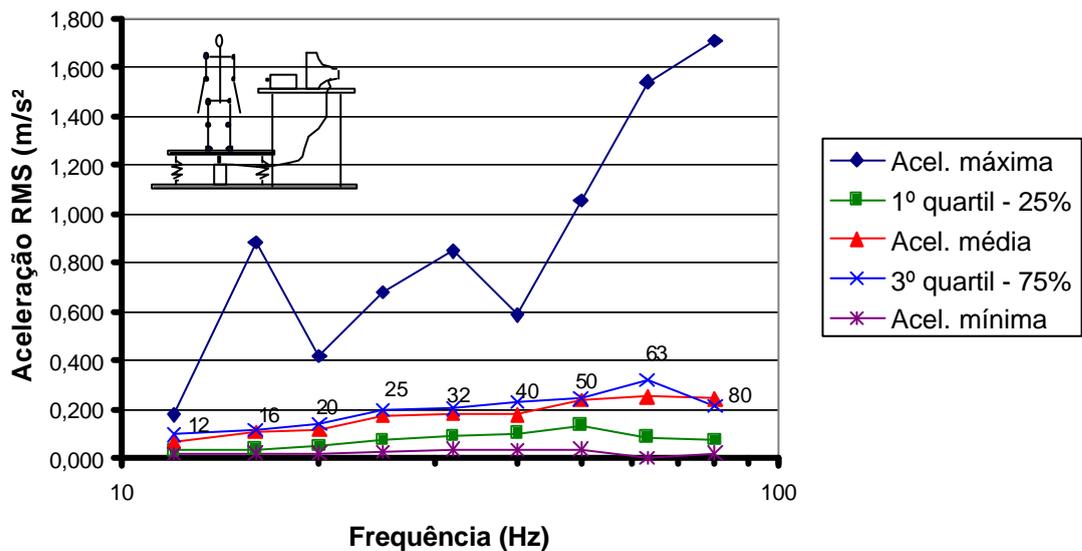


Figura 5.14: Variabilidade das respostas do limite de percepção – Postura em pé – Acelerômetro placa.

Analisando os resultados, pode-se observar a elevada variabilidade das respostas com diferenças consideráveis entre os valores mínimos e máximos para o limite de percepção, com tendência de elevação da variabilidade com o aumento da frequência. Este comportamento está coerente com o apresentado nas Figuras 5.2 a 5.4 onde se observam uma redução na

sensibilidade com o aumento da frequência, o que pode tornar as respostas menos precisas, com valores de desvio-padrão mais elevados.

Considerando-se o desenvolvimento de uma norma brasileira que trate da sensibilidade humana à vibração, de modo que esta possa ser utilizada na avaliação dos níveis de vibração em edificações, não faz sentido em se utilizar valores médios de respostas em experimentos. Analisando de forma lógica, com a utilização de valores médios de resposta à percepção na confecção de uma norma, ter-se-ia uma grande parcela da população com valores de sensibilidade à vibração abaixo da curva média da percepção. Portanto, estas pessoas estarão susceptíveis a movimentos vibratórios em edificações. Por outro lado, pensando-se no limite de percepção com os valores mínimos encontrados para cada frequência, tem-se um resultado extremamente conservador. Com isso, conclui-se que é necessária a utilização de uma margem de segurança para a definição dos valores de percepção em normas técnicas, propondo-se a utilização de valores entre o primeiro quartil e a média dos resultados para o limite de percepção à vibração. Na Figura 5.15 apresenta-se os valores da média, primeiro e terceiro quartis, juntamente com a curva básica da ISO 2631/2: 1989 para vibração vertical.

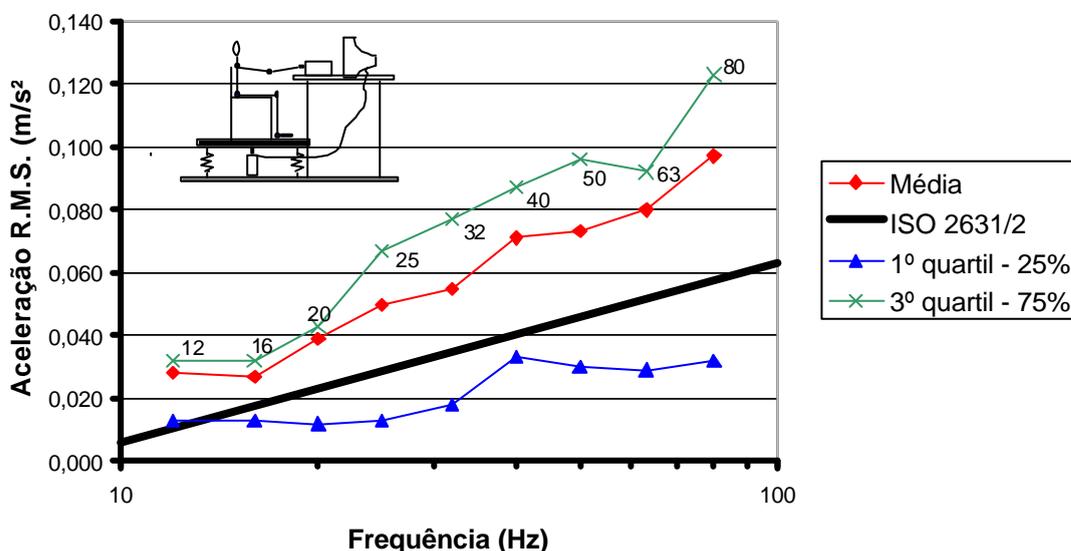


Figura 5.15: Comparação entre os resultados do presente trabalho para o limite de percepção com a curva básica da ISO 2631/2: 1989.

Observa-se que a curva básica da ISO 2631/2: 1989 encontra-se entre o primeiro quartil e a média dos resultados para o limite de percepção. Deste modo, este resultado

confirma o exposto anteriormente, onde se apresenta a necessidade de se utilizar valores mais conservadores que os resultados médios das respostas dos voluntários para o limite de percepção, como por exemplo o primeiro quartil, onde 25% dos resultados individuais estão abaixo da curva. No item seguinte, onde se apresentam as incertezas nas respostas do limite de percepção, discute-se com maiores detalhes a utilização dos resultados encontrados para o limite de percepção.

Nas Figuras 5.16 a 5.18 apresentam-se os resultados do limite de percepção encontrados para os grupos de homens e mulheres participantes do experimento.

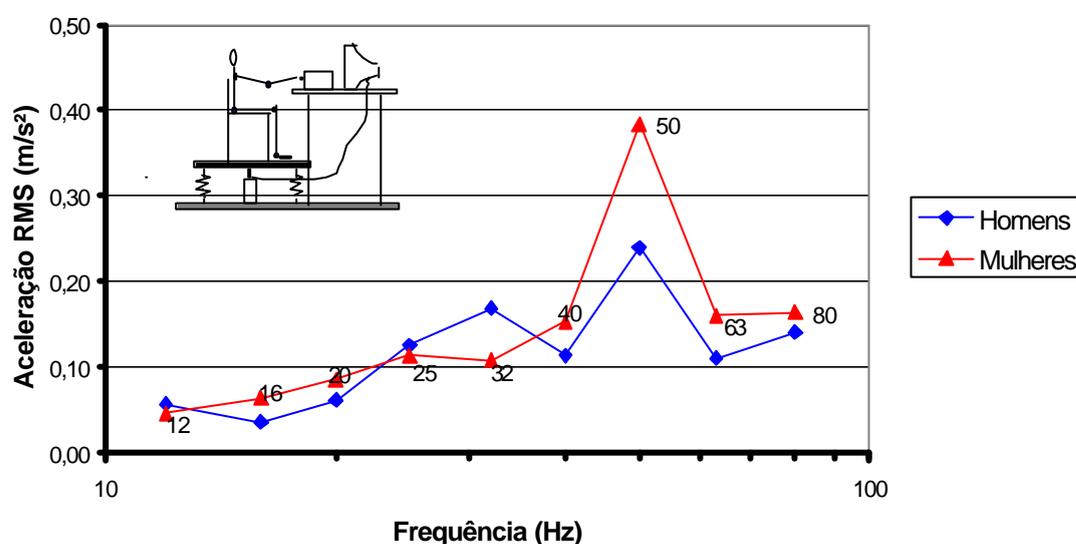


Figura 5.16: Comparação entre os resultados para homens e mulheres – Limite de percepção – Postura sentada – Acelerômetro placa.

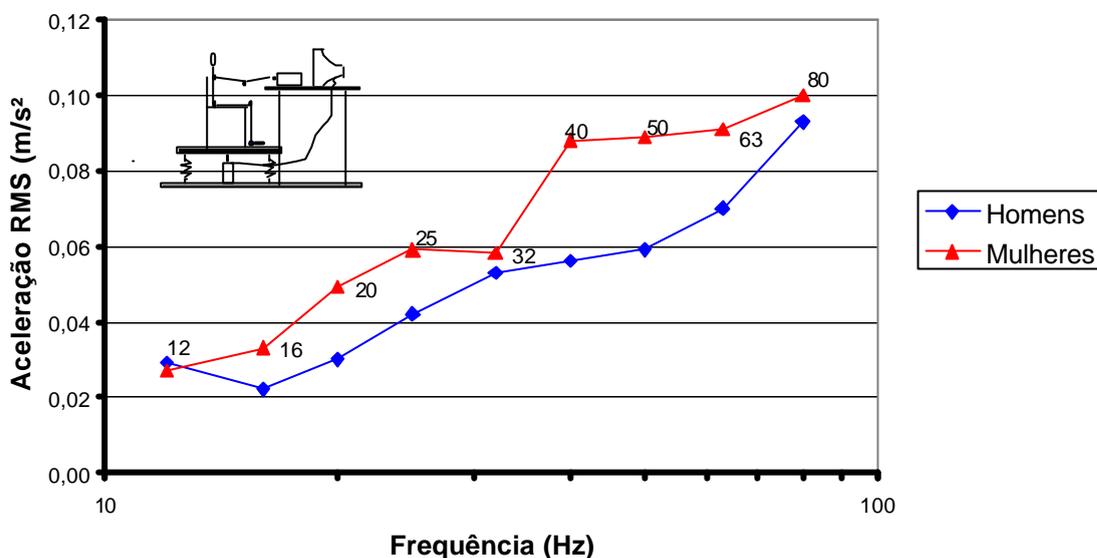


Figura 5.17: Comparação entre os resultados para homens e mulheres – Limite de percepção – Postura sentada – Acelerômetro cadeira.

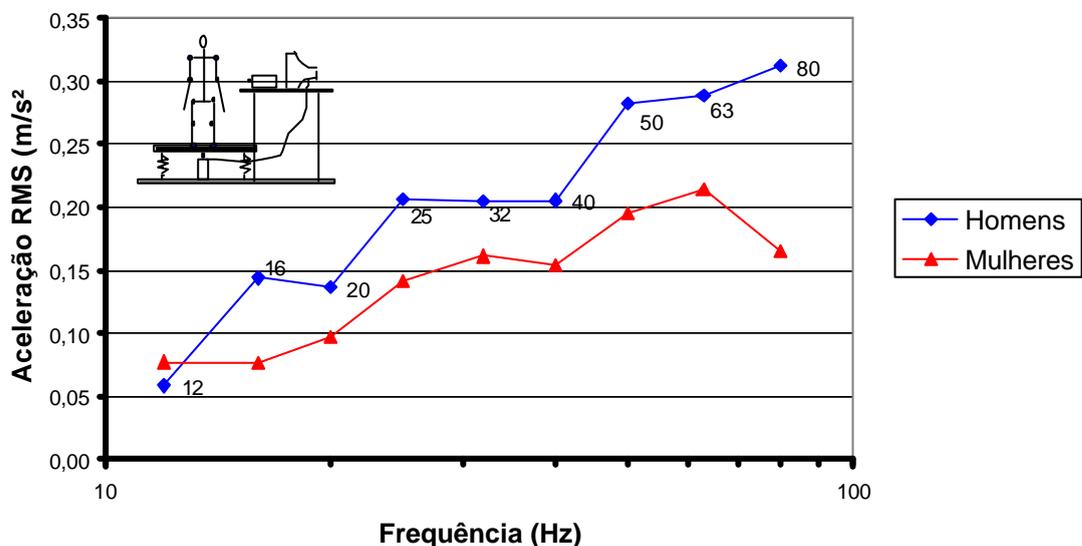


Figura 5.18: Comparação entre os resultados para homens e mulheres – Limite de percepção.

Observa-se nos resultados mostrados que as mulheres são um pouco menos sensíveis que os homens para a postura sentada e mais sensíveis para a postura em pé. No entanto, ao se realizar uma análise estatística através de teste de hipótese do tipo U Mann-Whitney com um

nível de confiança de 95%, verifica-se que não há diferenças significativas entre as respostas dos dois grupos, em concordância com diversos trabalhos anteriores tais como Misael (2001), Griffin et al (1982), etc.

A seguir, realiza-se uma análise sobre o efeito da postura na sensibilidade à vibração das pessoas. Um dos problemas ocorridos nos ensaios para a postura em pé foi a dificuldade das pessoas em manter o equilíbrio na placa, necessitando algumas vezes de se apoiarem na mesa ao lado da placa. Na Figura 5.19 apresentam-se os resultados do limite de percepção para a postura em pé e sentado.

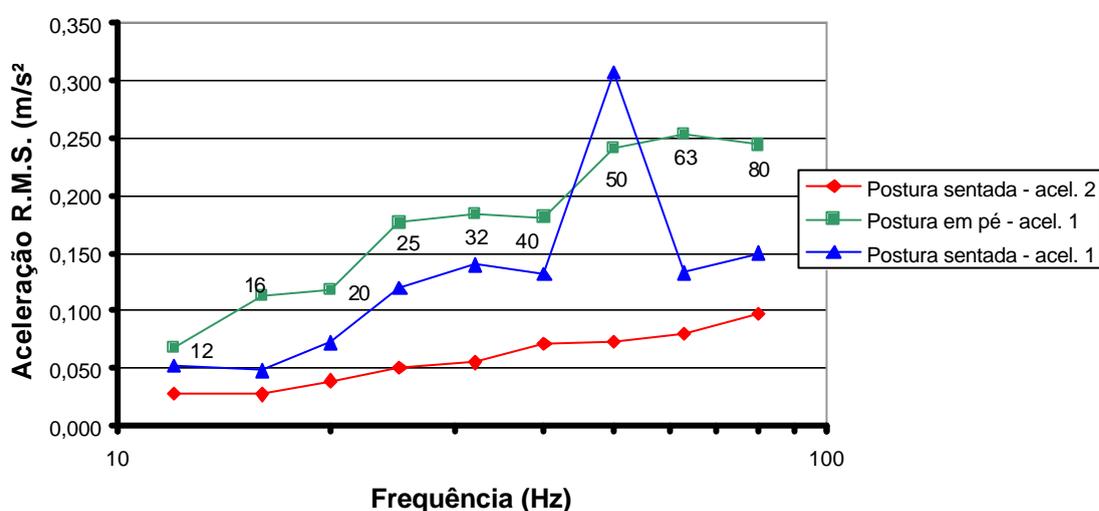


Figura 5.19: Efeito da postura na sensibilidade à vibração das pessoas para o limite de percepção.

Os resultados apresentados na Figura 5.19 indicam diferenças significativas para o limite de percepção entre as duas posturas, sendo a sensibilidade à vibração para pessoas na postura sentada consideravelmente mais elevada que para pessoas em pé. Este comportamento pode ser atribuído a diferenças na transmissão da vibração pelo corpo nas duas posturas. Pode-se observar também uma redução mais acentuada da sensibilidade para frequências mais elevadas para pessoas em pé que sentadas. Esta constatação está em conformidade com o trabalho de Harazin & Grzesik (1998) apresentado no Capítulo 3, relacionado com a transmissão da vibração vertical através do corpo humano. Estes pesquisadores demonstraram a redução da transmissão da vibração para diversas partes do corpo com o aumento da frequência para a postura em pé, reduzindo-se portanto a sensibilidade à vibração. Este efeito

pode ser demonstrado na Figura 3.20, onde se apresenta a transmissibilidade da vibração entre a superfície vibrante e a cabeça dos voluntários.

A norma internacional ISO 2631/2: 1989 utiliza o mesmo procedimento para pessoas na postura em pé e sentada, considerando apenas uma curva básica para vibração vertical (eixo z). Osborne & Boarer (1982 a) criticam esta norma pelo motivo de não considerar o efeito da postura. Estes pesquisadores encontraram diferenças consideráveis nas respostas de percepção à vibração para as posturas em pé e sentada, afirmando que seria necessário considerar este efeito nas normas técnicas. Parsons & Griffin (1988), apesar de também encontrarem diferenças significativas nas respostas para as duas posturas, consideraram razoável utilizar o mesmo procedimento de análise para pessoas em pé e sentada dentro do contexto da percepção humana à vibração em edificações. Isto porque as diferenças encontradas por estes pesquisadores são pequenas se comparadas com as diferenças entre as respostas individuais. Na Tabela 5.6 apresenta-se o valor médio e seu respectivo desvio-padrão para cada frequência referente ao limite de percepção nas duas posturas conforme mostrado na Figura 5.19.

Tabela 5.6: Limite de percepção – Valores médios e desvio-padrão referente às respostas nas posturas em pé e sentado.

Frequência (Hz)	12	16	20	25	32	40	50	63	80
Postura sentada – Acelerômetro 1									
Média Geral (m/s²) R.M.S.	0,052	0,048	0,072	0,120	0,140	0,132	0,307	0,133	0,150
Desvio Padrão (m/s²) R.M.S.	0,062	0,056	0,073	0,141	0,203	0,112	0,408	0,207	0,165
Postura sentada – Acelerômetro 2									
Média Geral (m/s²) R.M.S.	0,028	0,027	0,039	0,050	0,055	0,077	0,073	0,080	0,097
Desvio Padrão (m/s²) R.M.S.	0,025	0,021	0,039	0,053	0,060	0,065	0,061	0,077	0,090
Postura em pé – Acelerômetro 1									
Média Geral (m/s²) R.M.S.	0,067	0,113	0,118	0,176	0,184	0,181	0,241	0,253	0,244
Desvio Padrão (m/s²) R.M.S.	0,045	0,163	0,100	0,160	0,165	0,139	0,223	0,318	0,357

Analisando os valores, verifica-se que as diferenças nas respostas para as duas posturas são significativas, mesmo considerando a grande variabilidade individual. Os

resultados para a postura em pé apresentam-se em média três vezes maiores que a postura sentada. No entanto, considerando-se o atendimento em edificações a critérios de vibração, é razoável utilizar os menores valores encontrados para o limite de percepção, visto que em praticamente todos os ambientes encontram-se pessoas nas posturas em pé e sentada.

5.4. Experimento 3: Incerteza nas respostas para o limite de percepção

Conforme apresentado no Capítulo 4, o limite de percepção absoluta para a vibração pode ser definido como a magnitude de vibração acima da qual as pessoas detectarão a vibração e abaixo da qual elas não detectarão, existindo um intervalo de incerteza entre estes dois níveis.

Com isso, o objetivo deste experimento é determinar o intervalo de incerteza nas respostas para o limite de percepção e apresentar uma metodologia para a utilização dos resultados experimentais na prática, comparando estes com a curva básica da ISO 2631/2: 1989 para vibração vertical.

Seguindo procedimento semelhante ao de Parsons & Griffin (1998), os voluntários são orientados a ajustarem os níveis de vibração conforme as instruções a seguir, sendo os resultados apresentados nas Figuras 5.20 a 5.22.

Caso 1 - O menor nível de vibração que os voluntários estão certos que podem sentir;

Caso 2 - O maior nível de vibração que os voluntários estão certos que não podem sentir.

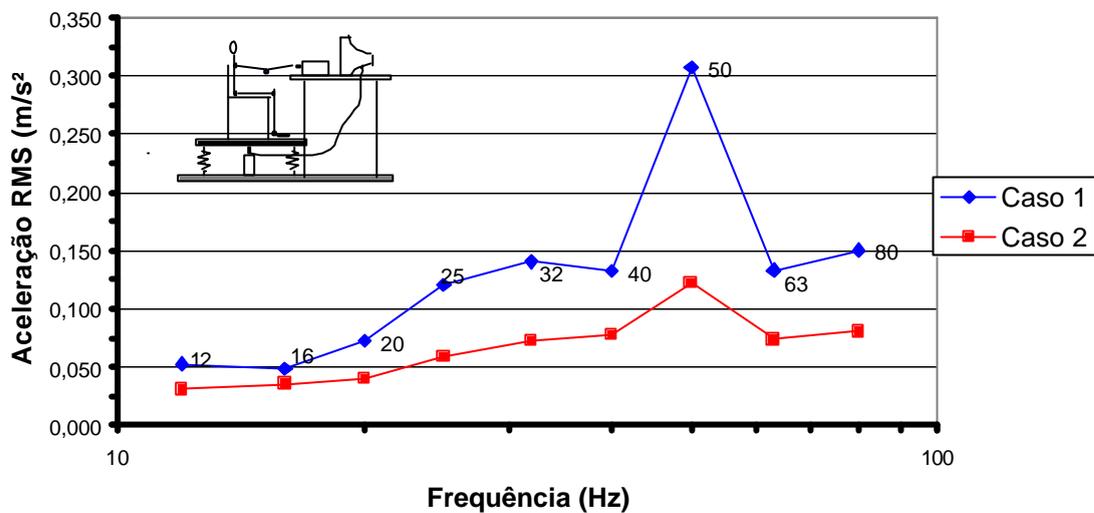


Figura 5.20: Comparação entre o Caso 1 e o Caso 2 – Postura sentada – Acelerômetro placa.

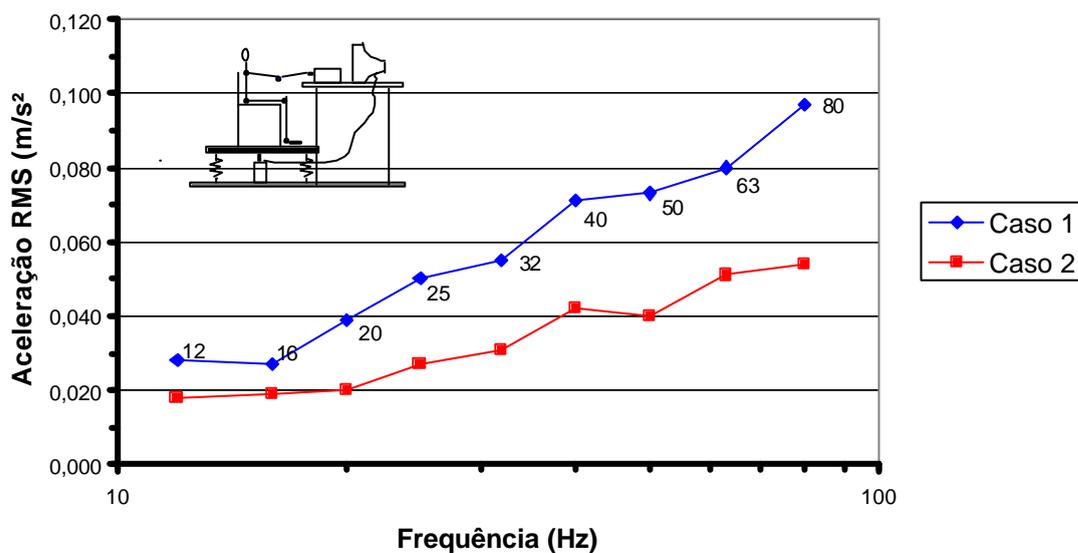


Figura 5.21: Comparação entre o Caso 1 e o Caso 2 – Postura sentada – Acelerômetro cadeira.

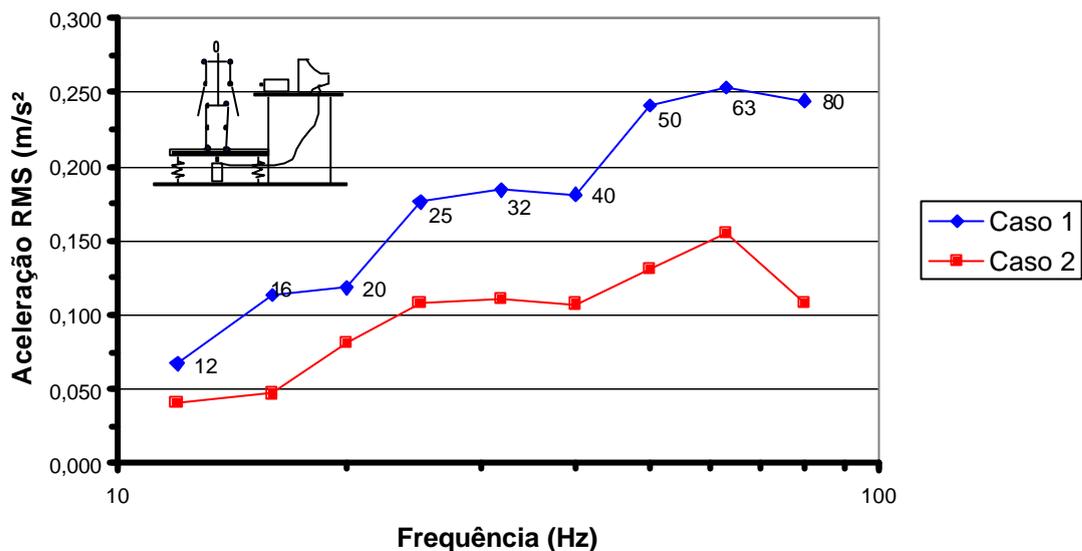


Figura 5.22: Comparação entre o Caso 1 e o Caso 2 – Postura em pé – Acelerômetro placa.

Com o objetivo de se verificar a magnitude da incerteza das respostas para o limite de percepção, apresenta-se nas Figuras 5.23 a 5.25 a razão entre as respostas do Caso 1 e o Caso 2.

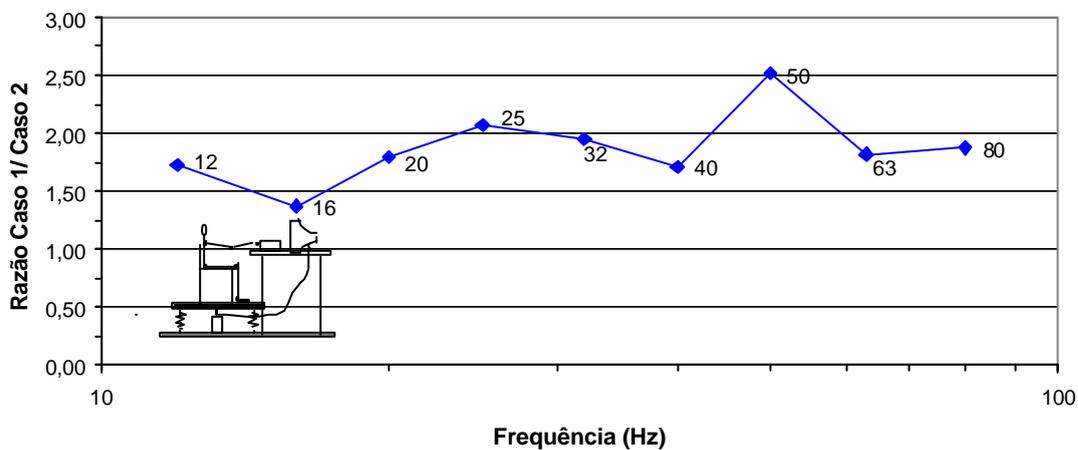


Figura 5.23: Razão entre as respostas do Caso 1 e o Caso 2 – Postura sentada – Acelerômetro 1.

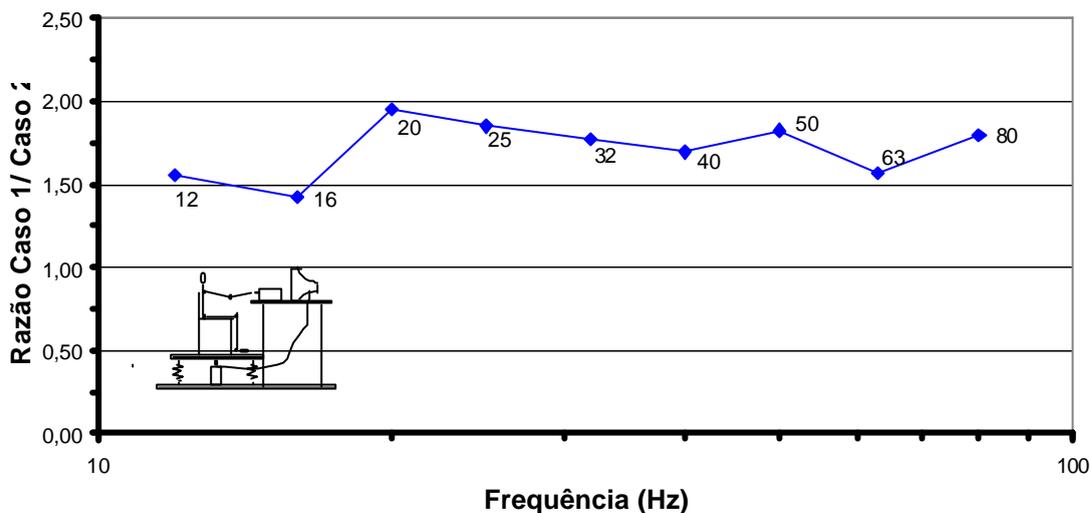


Figura 5.24: Razão entre as respostas do Caso 1 e o Caso 2 – Postura sentada – Acelerômetro 2.

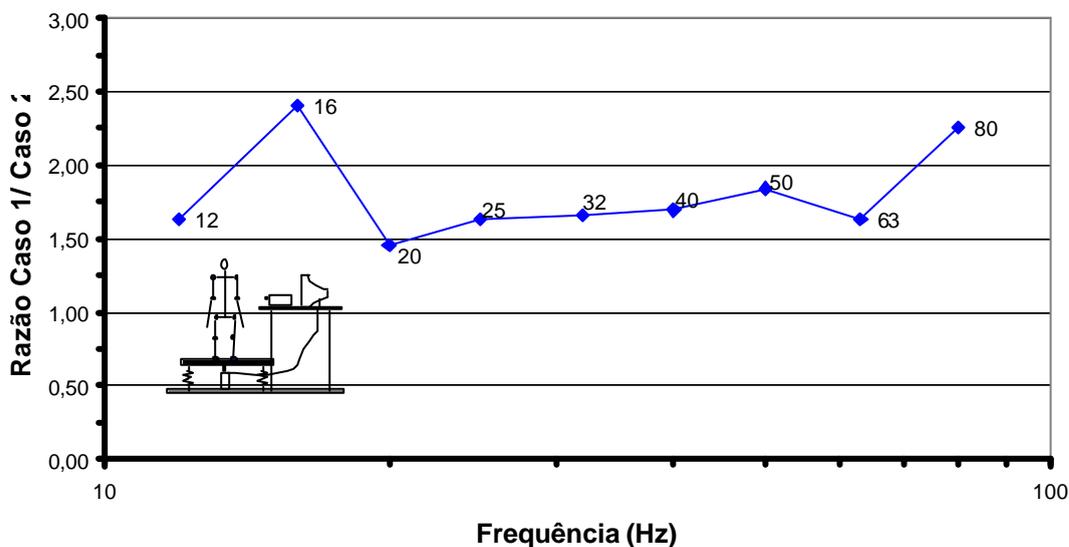


Figura 5.25: Razão entre as respostas do Caso 1 e o Caso 2 – Postura em pé – Acelerômetro 1.

Observa-se que a razão entre o Caso 1 e o Caso 2 encontra-se em sua maioria entre 1,5 e 2,0, indicando assim um alto grau de incerteza nas respostas para o limite de percepção. Conforme comentado no Capítulo 4, para vibrações próximas ao limite de percepção, as pessoas algumas vezes registrarão que podem sentir o movimento e algumas vezes elas não

registrarão. Deste modo, para o Caso 2 (o maior nível de vibração que os voluntários estão certos que não podem sentir), presume-se que uma parte dos voluntários pode sentir a vibração e, no entanto, registram que não podem. Deste modo, apresentam-se nas Figuras 5.26 a 5.28 os resultados de percepção à vibração para o Caso 1 e 2 em termos do primeiro e terceiro quartis, bem como os valores médios.

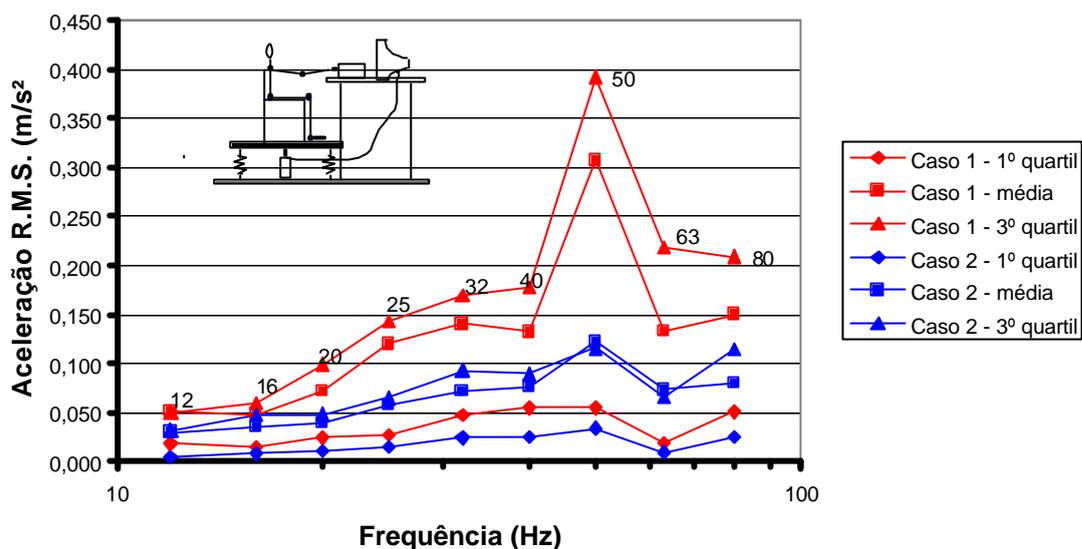


Figura 5.26: Caso 1 x Caso 2 – Postura sentada – Acelerômetro placa.

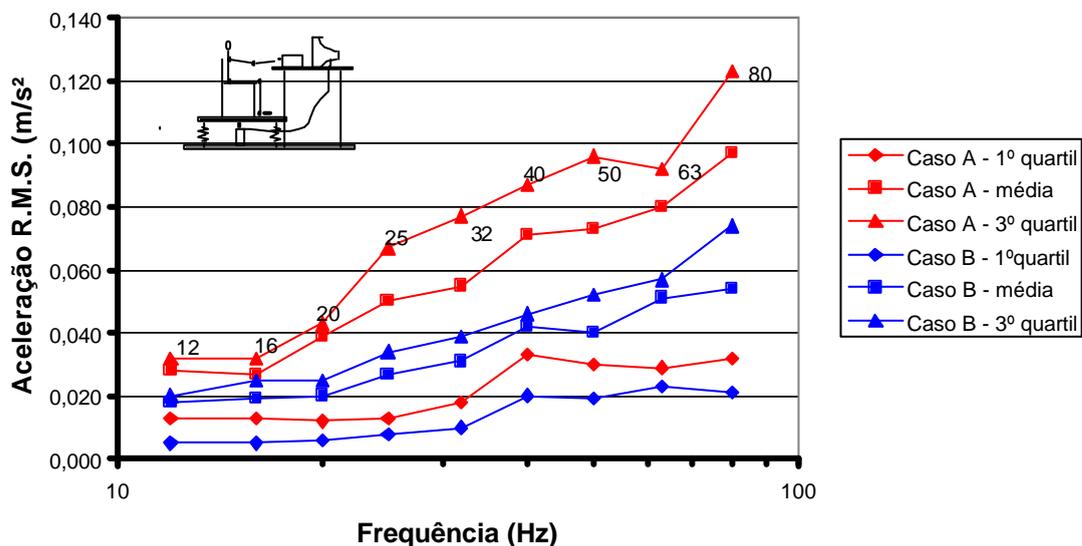


Figura 5.27: Caso 1 x Caso 2 – Postura sentada – Acelerômetro cadeira.

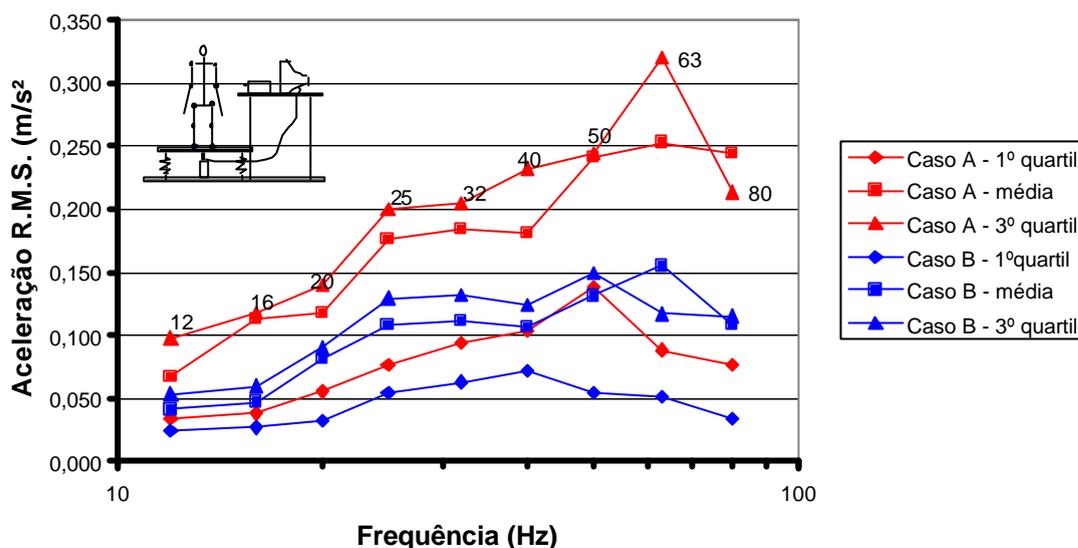


Figura 5.28: Caso 1 x Caso 2 – Postura em pé – Acelerômetro placa.

Em Parsons & Griffin (1988), os voluntários são orientados a responder a estímulos onde algumas vezes a vibração estava presente e algumas vezes não. Os voluntários deveriam responder se podiam ou não sentir a vibração. Estes pesquisadores verificaram que uma parcela das pessoas expostas à vibração registra que não podem detectar a vibração quando na verdade podem, sendo este fator dependente da atitude da pessoa, ou seja, de sua inclinação para registrar ou não o sinal quando não tem certeza se pode ou não sentir a vibração. Deste modo, em Parsons & Griffin (1988), o limite de percepção à vibração foi adotado como o valor em que 75% dos voluntários registram a vibração quando esta realmente está presente. Com isso, no trabalho atual, é razoável admitir que uma parcela dos voluntários pode detectar a vibração mesmo quando registram que não podem. Assim, a porcentagem de indivíduos nesta situação é assumida como 25% dos registros, culminando no terceiro quartil para o Caso 2, onde os voluntários ajustam os níveis máximos que não podem sentir.

No Item 5.3 apresenta-se uma comparação entre a curva relacionada ao primeiro quartil e a média para o limite de percepção e a curva básica da ISO 2631/2: 1989, observando-se valores próximos entre as duas curvas. Portanto, neste trabalho considera-se como intervalo de incerteza para o limite de percepção como sendo o valor de vibração entre o primeiro quartil do Caso 1 e o terceiro quartil do Caso 2.

Portanto, com o exposto acima, apresenta-se os resultados nas Figuras 5.29 e 5.30, onde se mostra a curva básica da ISO 2631/2: 1989 juntamente com o primeiro quartil do Caso 1 e o terceiro quartil do Caso 2 para a postura em pé e sentada.

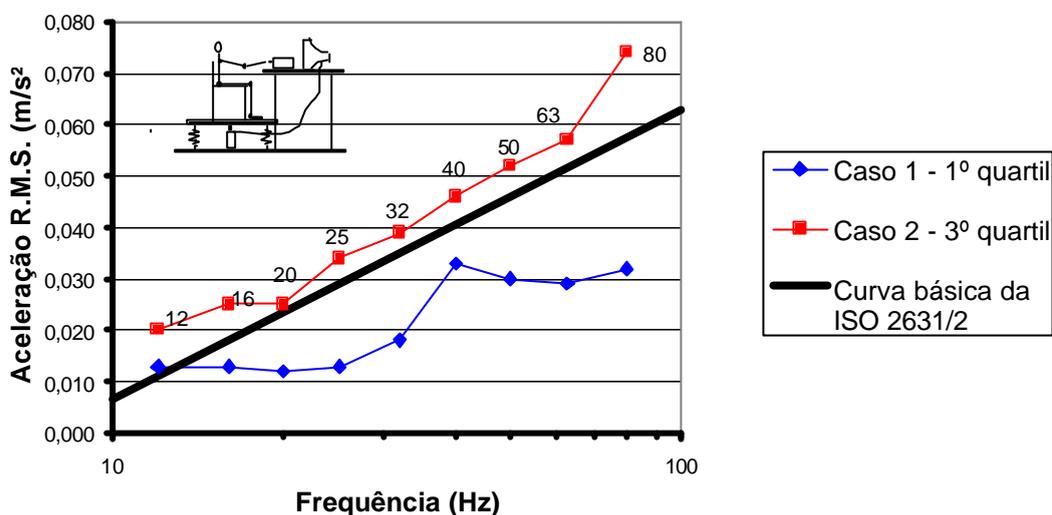


Figura 5.29: Comparação do limite de percepção encontrado para o atual trabalho com a curva básica da ISO 2631/2: 1989 – Postura sentada.

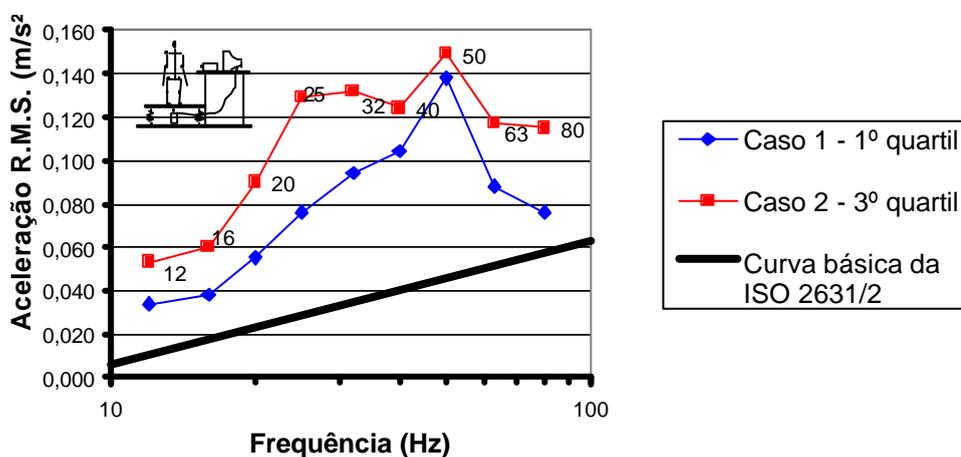


Figura 5.30: Comparação do limite de percepção encontrado para o atual trabalho com a curva básica da ISO 2631/2: 1989 – Postura em pé.

Para a postura sentada, observa-se que a curva básica da ISO 2631/2: 1989 encontra-se dentro do intervalo entre as duas curvas. No entanto, para a postura em pé, verifica-se que os níveis de vibração encontrados neste trabalho são maiores que os apresentados pela ISO

2631/2: 1989, confirmando o apresentado no Item 5.3 através do trabalho de Osborne & Boarer (1982 a), ou seja, pessoas na postura em pé são menos sensíveis à vibração que na postura sentada.

Assim, propõe-se a curva para o limite de percepção como sendo a média aritmética entre os resultados do primeiro quartil para o Caso 1 e o terceiro quartil para o Caso 2. Na Figura 5.31 apresenta-se esta curva em comparação com a curva básica da ISO 2631/2: 1989.

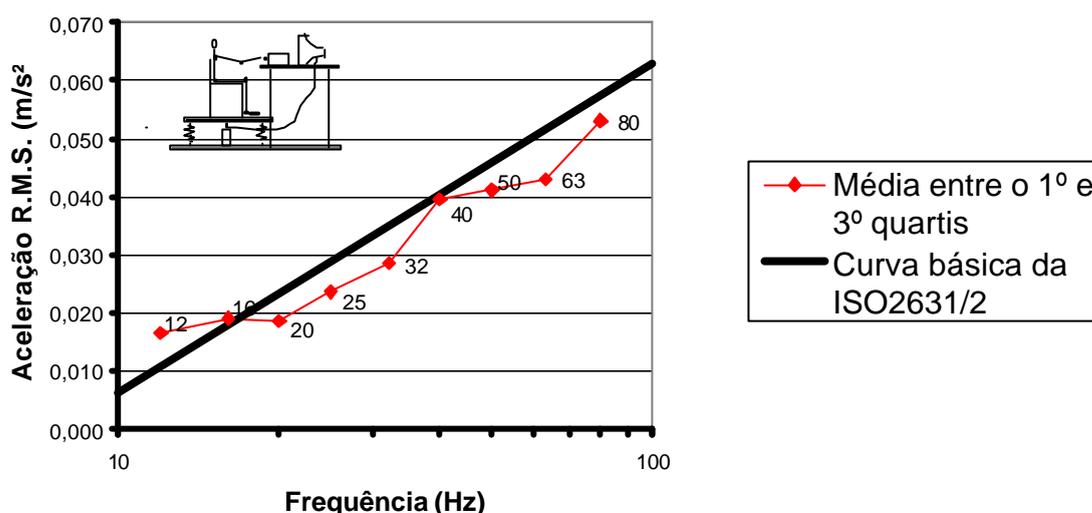


Figura 5.31: Limite de percepção para o presente trabalho e a curva básica da ISO 2631/2: 1989 – direção vertical (eixo z).

Pode-se verificar a concordância entre os resultados da ISO 2631/2: 1989 com os resultados encontrados neste trabalho para a postura sentada e vibração senoidal na direção vertical. No entanto, para a postura em pé os dados da ISO 2631/2: 1989 são superestimados. Conforme apresentado na Figura 3.17, a ISO 2631/1: 1997 e a ISO 2631/2: 1989 não distingue o efeito da postura. Estas normas consideram as mesmas curvas para a vibração na direção vertical (eixo z) tanto para a postura em pé como sentada. Como conclusão para os resultados do limite de percepção comentados nos Itens 5.3 e 5.4, pode-se afirmar o seguinte:

- Existem diferenças significativas entre os resultados para a postura em pé e sentada;
- Existe um intervalo de incerteza para as respostas de percepção à vibração;

- Para níveis de vibrações aceitáveis em edificações, deve-se utilizar o resultado em que as pessoas apresentam maior sensibilidade, ou seja, o resultado para a postura sentada;
- Os valores encontrados para o limite de percepção do atual trabalho para vibração vertical na postura sentada estão em conformidade com os resultados da ISO 2631/2: 1989.

5.5. Experimento 4: Limite de conforto

Para este experimento, busca-se conhecer os níveis de vibração vertical senoidal que as pessoas consideram desconfortáveis em seu ambiente residencial. Deste modo, os voluntários são solicitados a ajustarem os níveis de vibração conforme este objetivo. No entanto, sabe-se que as respostas obtidas neste experimento servem apenas como uma referência, pois os voluntários não estavam realmente em seu ambiente residencial. Estes deveriam imaginar como seriam as suas reações para uma situação em que a vibração os atingisse em suas residências. Isto aumenta ainda mais a subjetividade das respostas. Griffin (1995) apud Misael (2001) afirma que quando a vibração é inesperada, a tolerância das pessoas é reduzida. Esta é a grande dificuldade em se determinar a magnitude do limite de conforto humano à vibração. No entanto, é possível determinar de forma aproximada a razão entre o conforto e a percepção, de forma a se obter o limite de conforto a partir do limite de percepção. Nas Figuras 5.32 a 5.34 apresentam-se os resultados para o limite de conforto com o respectivo desvio padrão nas posturas em pé e sentado.

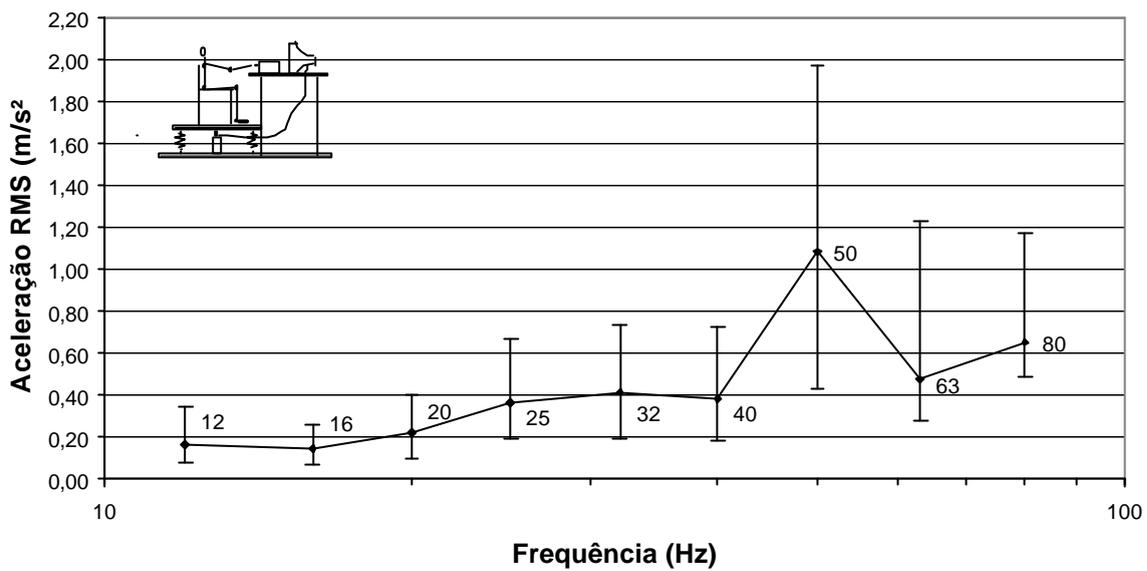


Figura 5.32: Limite de conforto – Acelerômetro placa – Postura sentada.

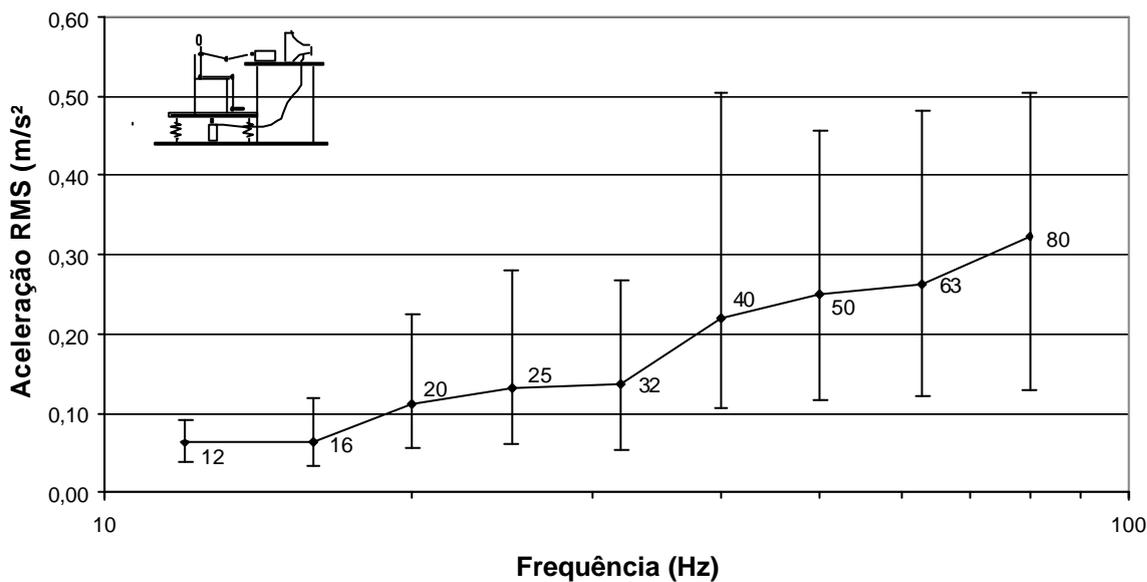


Figura 5.33: Limite de conforto – Acelerômetro cadeira – Postura sentada.

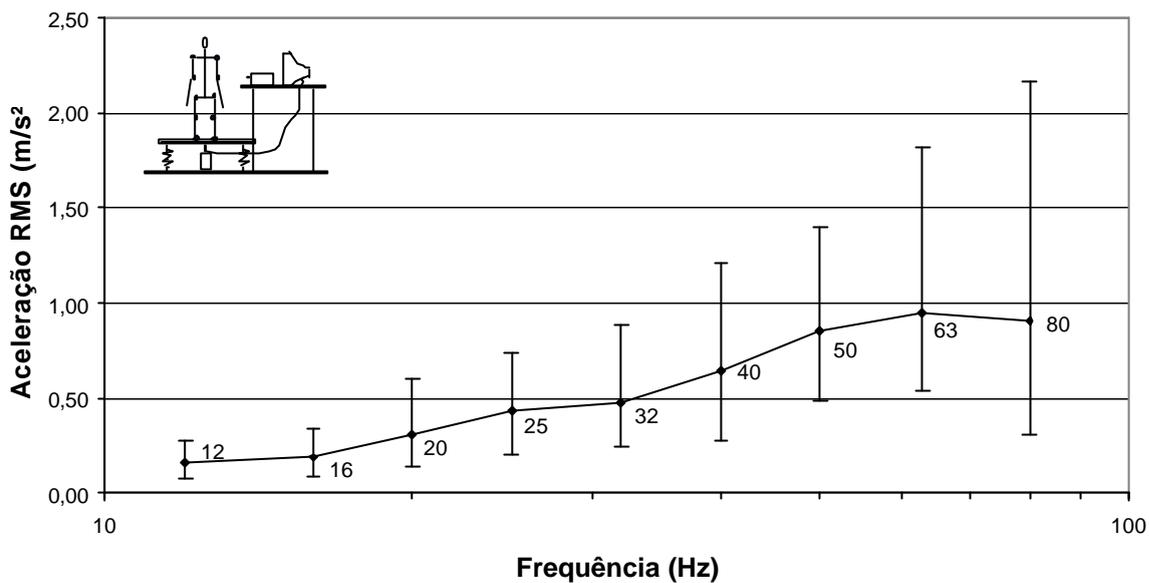


Figura 5.34: Limite de conforto – Acelerômetro placa – Postura em pé.

Para ilustrar a alto grau de subjetividade do experimento, com uma elevada variabilidade nas respostas para o limite de conforto em residências, apresentam-se nas Figuras 5.35 a 5.37 os resultados do limite de conforto em termos de valores mínimo, médio, máximo e o primeiro e terceiro quartis.

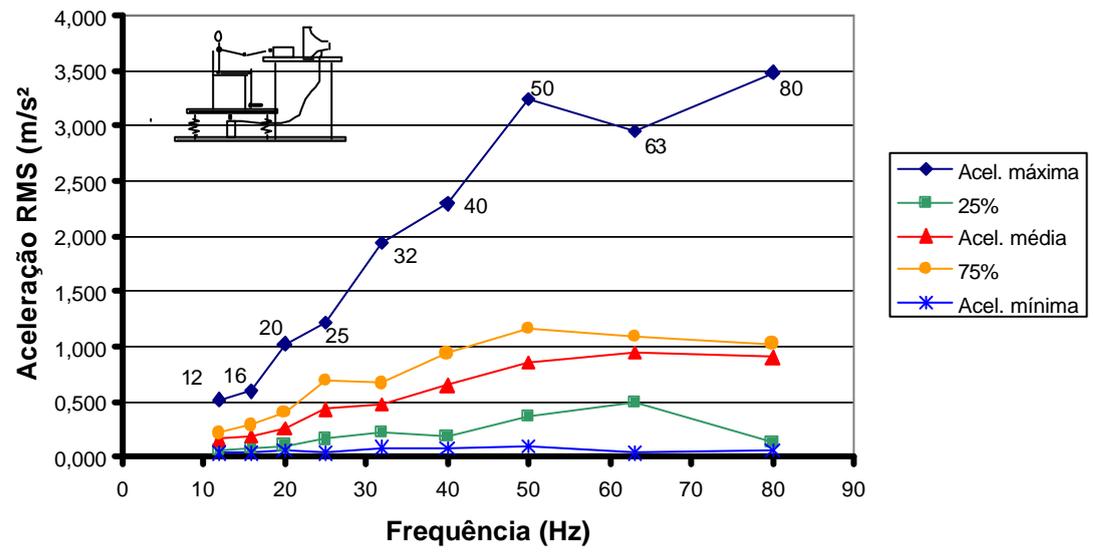


Figura 5.35: Variabilidade das respostas do limite de conforto – Postura sentada – Acelerômetro placa.

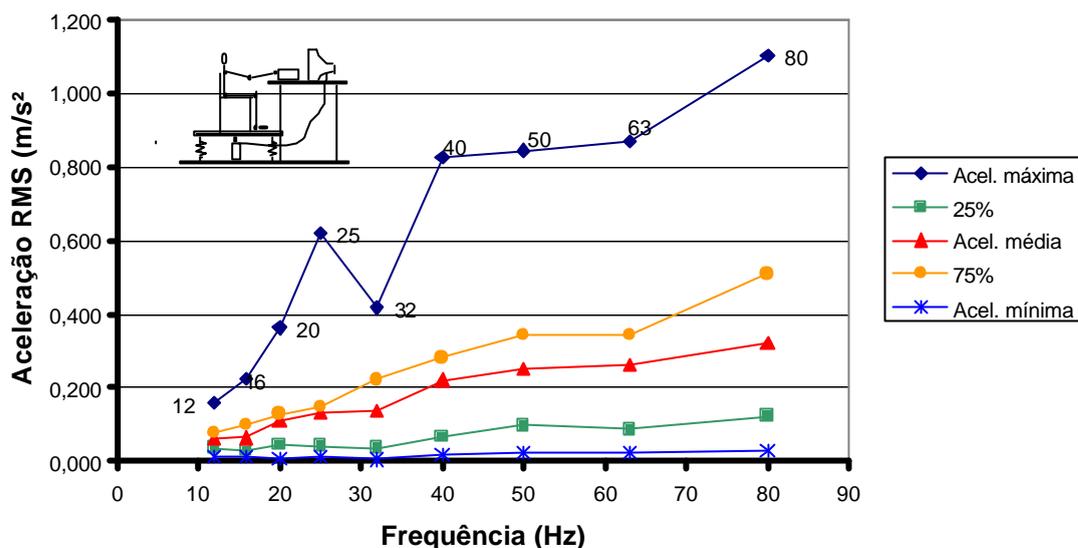


Figura 5.36: Variabilidade das respostas do limite de conforto – Postura sentada – Acelerômetro cadeira.

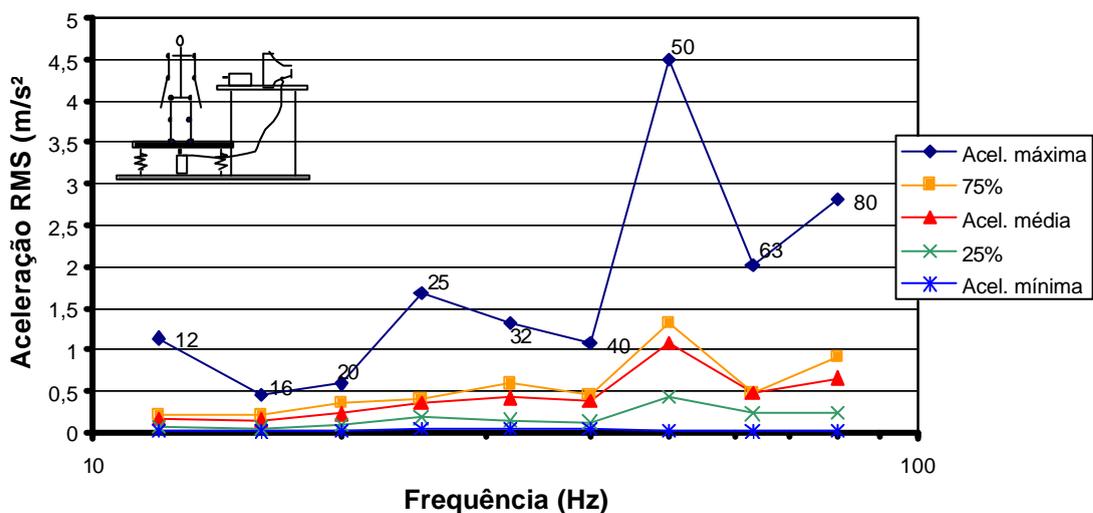


Figura 5.37: Variabilidade das respostas do limite de conforto – Postura em pé – Acelerômetro placa.

O objetivo principal deste experimento é determinar a relação existente entre os valores médios do limite de percepção e do limite de conforto. Deste modo, apresentam-se nas Figuras 5.38 a 5.40 as curvas para os limites de percepção e conforto para as posturas em pé e sentado.

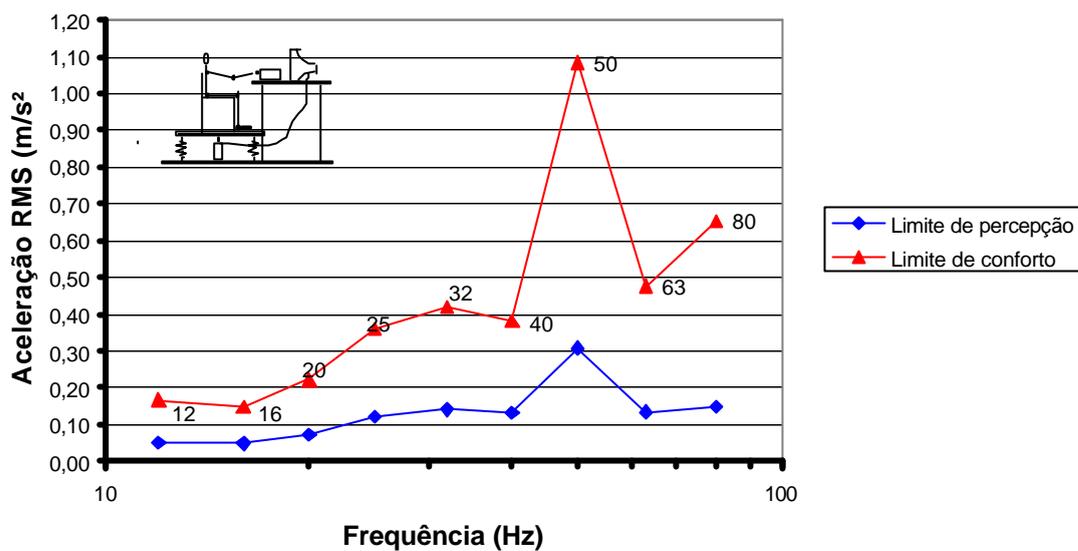


Figura 5.38: Comparação entre o limite de percepção e o limite de conforto – Postura sentada – Acelerômetro placa.

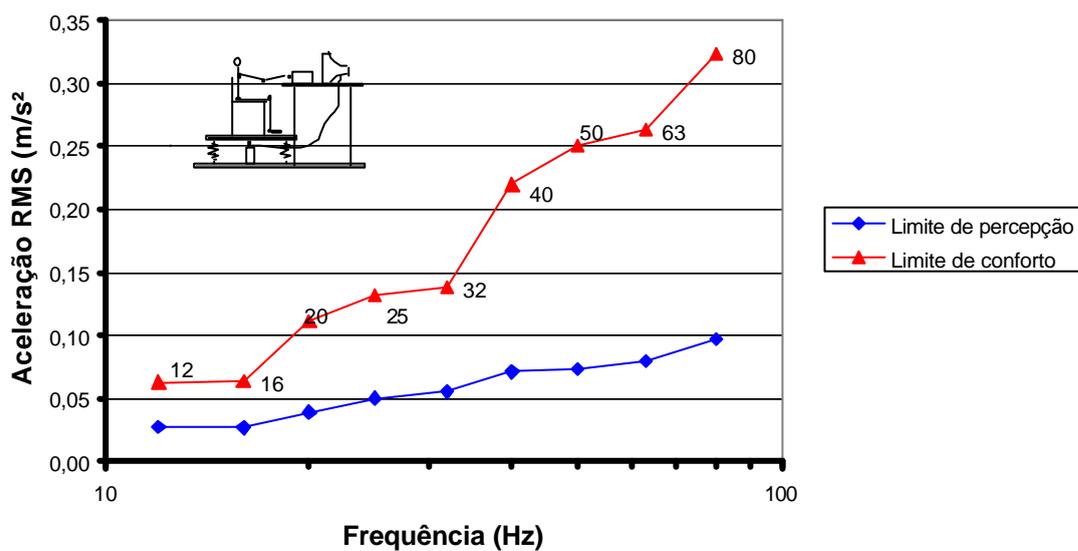


Figura 5.39: Comparação entre o limite de percepção e o limite de conforto – Postura sentada – Acelerômetro cadeira.

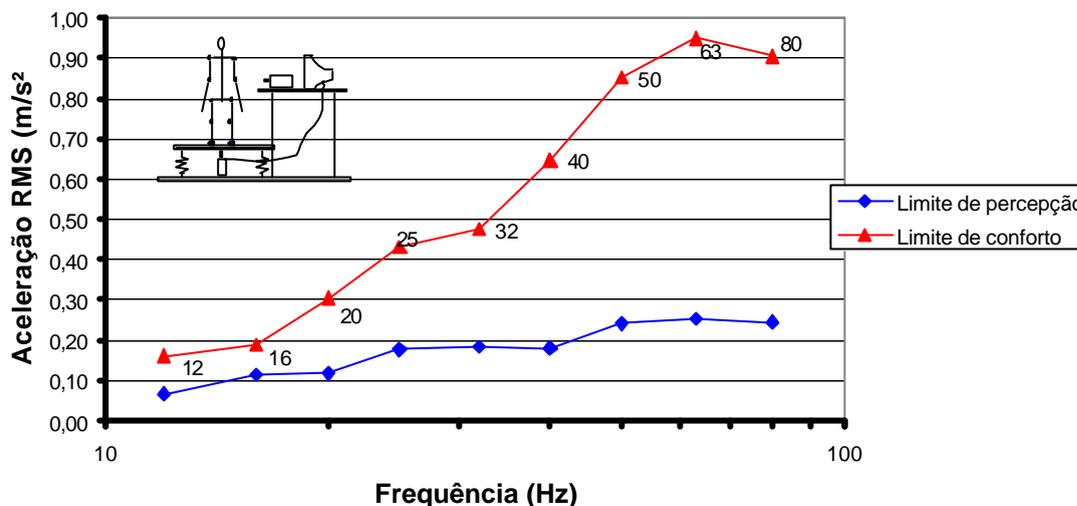


Figura 5.40: Comparação entre o limite de percepção e o limite de conforto – Postura em pé – Acelerômetro placa.

As características das curvas de conforto são semelhantes às curvas de percepção, apresentando o mesmo comportamento quanto à redução da sensibilidade para frequências de vibração mais elevadas. Um dos fatores significantes na definição da sensação de conforto é a maior amplitude de deslocamento para a vibração em frequências mais baixas, o que causa uma sensação de insegurança quanto ao possível colapso estrutural quanto da edificação. Para frequências mais elevadas, os voluntários têm de ajustar amplitudes de aceleração mais altas para começarem a sentir os deslocamentos. Constata-se através das respostas dos voluntários que para frequências mais baixas, o desconforto é causado por vibrações de órgãos internos do tronco (massa abdominal e pulmões). Nas faixas de frequências mais elevadas, os voluntários apenas registram vibrações nos pés. Esta constatação está em conformidade com o trabalho de Harazin & Grzesik (1998) comentado no Item 5.3 deste Capítulo e no Capítulo 3. Deste modo, pode-se concluir que a transmissão da vibração através do corpo diminui com o aumento da frequência, o que provoca a redução da sensibilidade à vibração. Não se realizam testes quanto à transmissão da vibração através do corpo devido às limitações de equipamentos.

Nas Figuras 5.41 a 5.43 apresenta-se a relação entre o limite de percepção e conforto.

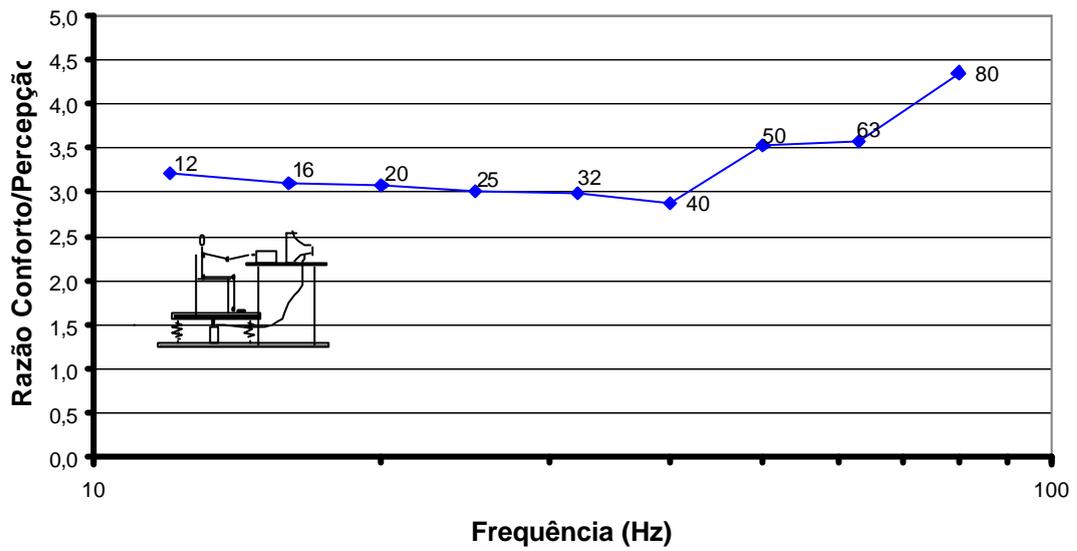


Figura 5.41: Razão entre o limite de conforto e percepção – Posição sentada – Acelerômetro placa.

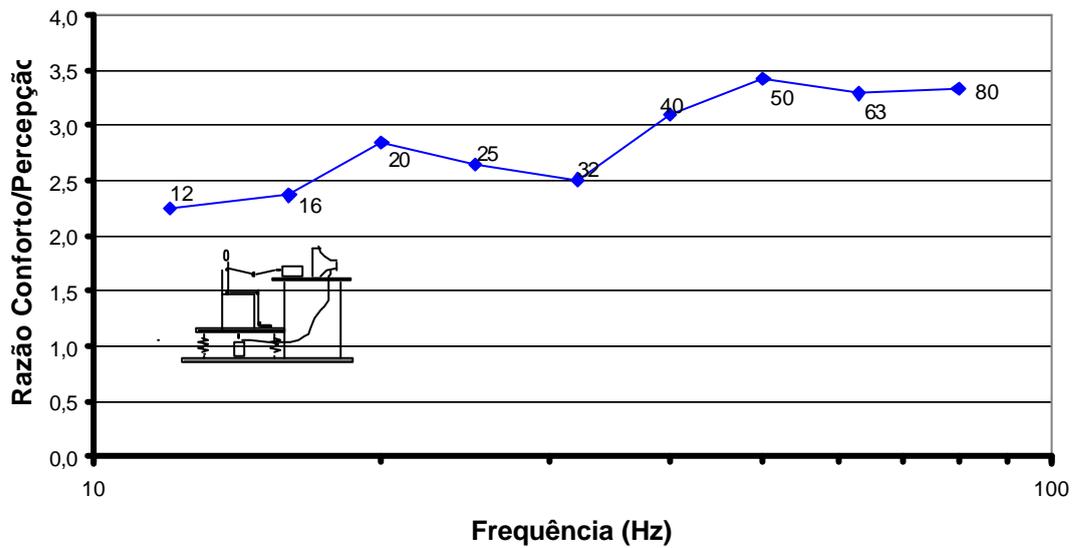


Figura 5.42: Razão entre o limite de conforto e percepção – Posição sentada – Acelerômetro cadeira.

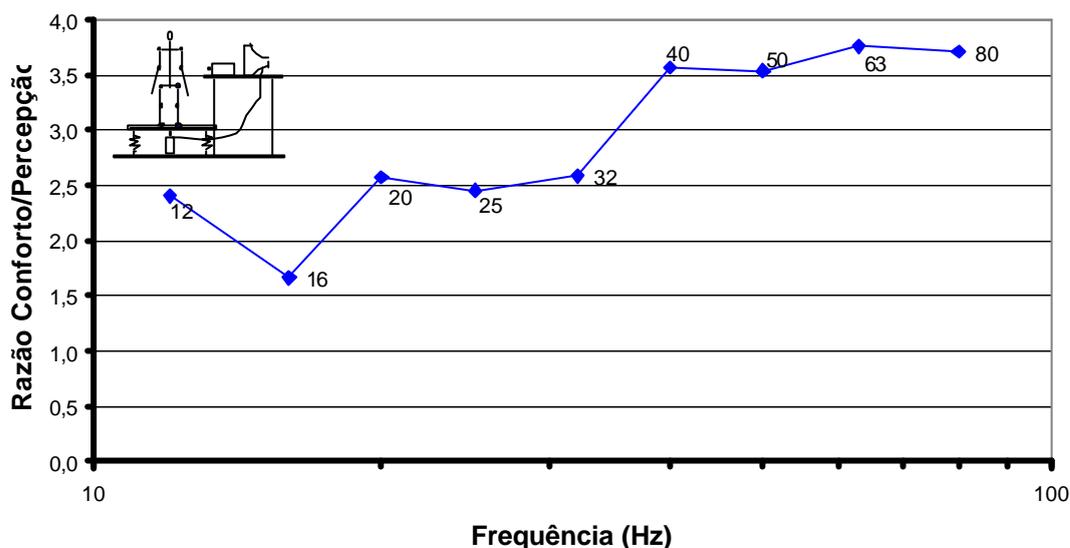


Figura 5.43: Razão entre o limite de conforto e percepção – Posição em pé – Acelerômetro placa.

Observa-se que a razão entre o limite de conforto para ambientes residenciais e o limite de percepção apresenta-se entre 2 e 4 para a postura em pé e sentada. Este resultado está em conformidade com os valores apresentados na Tabela 3.5, onde se apresentam os fatores de multiplicação da curva básica da ISO 2631/2: 1989, especificamente para ambientes residenciais em horário diurno. No entanto, a razão entre o limite de conforto sobre a percepção apresenta-se de forma crescente com o aumento da frequência devido à sensibilidade à vibração para frequências mais elevadas. Deste modo, não faz sentido em se utilizar um fator multiplicativo médio para a curva de percepção de modo a se obter curvas de conforto como ocorre na ISO 2631/2: 1989 e em alguns outros trabalhos. Este procedimento pode resultar em valores superestimados para frequências mais baixas de vibração, e subestimados para frequências mais elevadas.

Como no Experimento 2, também se realiza neste experimento uma comparação entre os resultados para o grupo de homens e mulheres para o limite de conforto em ambientes residenciais. Deste modo, nas Figuras 5.44 a 5.46 apresentam-se os resultados para o limite de conforto em ambientes residenciais para homens e mulheres nas posturas em pé e sentado.

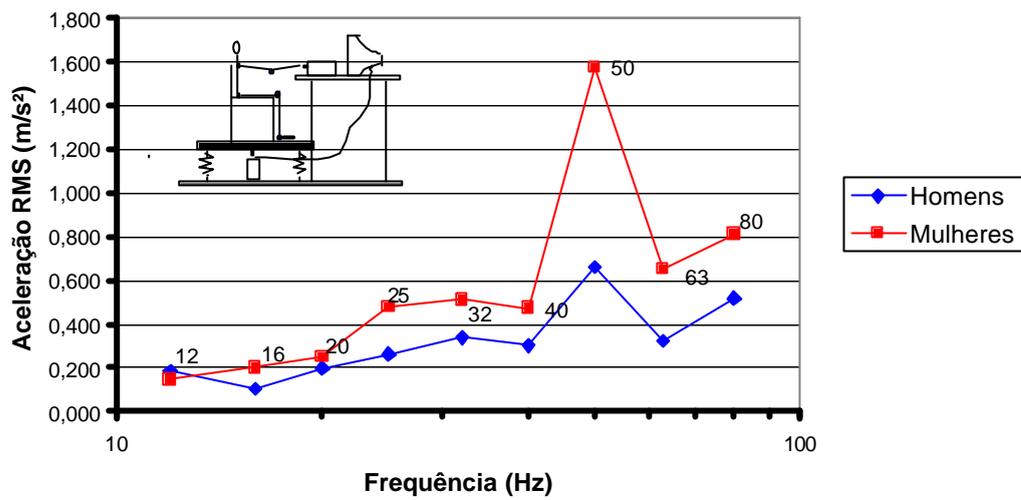


Figura 5.44: Comparação entre os resultados de homens e mulheres para o limite de conforto – Posição sentada – Acelerômetro placa.

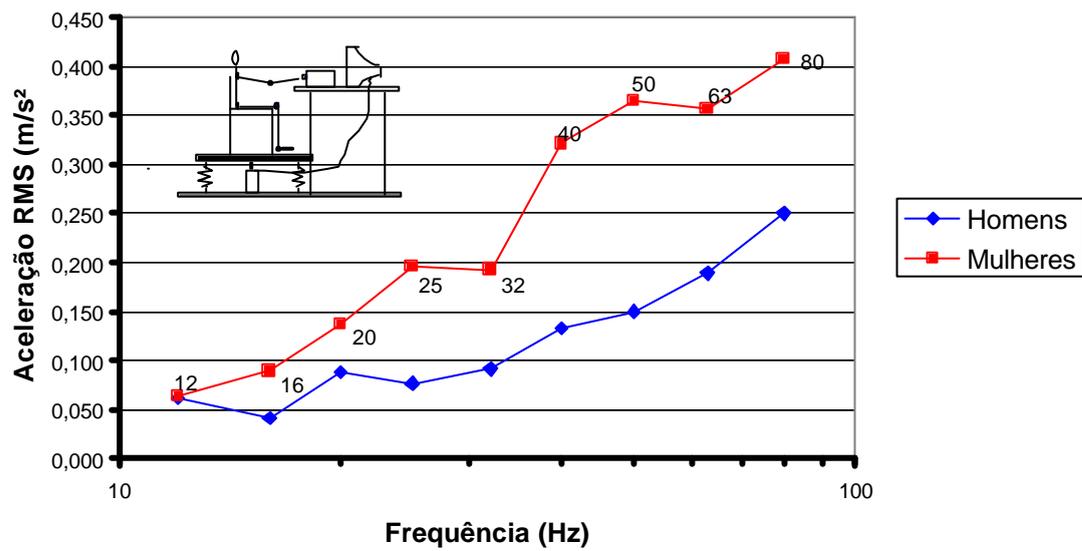


Figura 5.45: Comparação entre os resultados de homens e mulheres para o limite de conforto – Posição sentada – Acelerômetro cadeira.

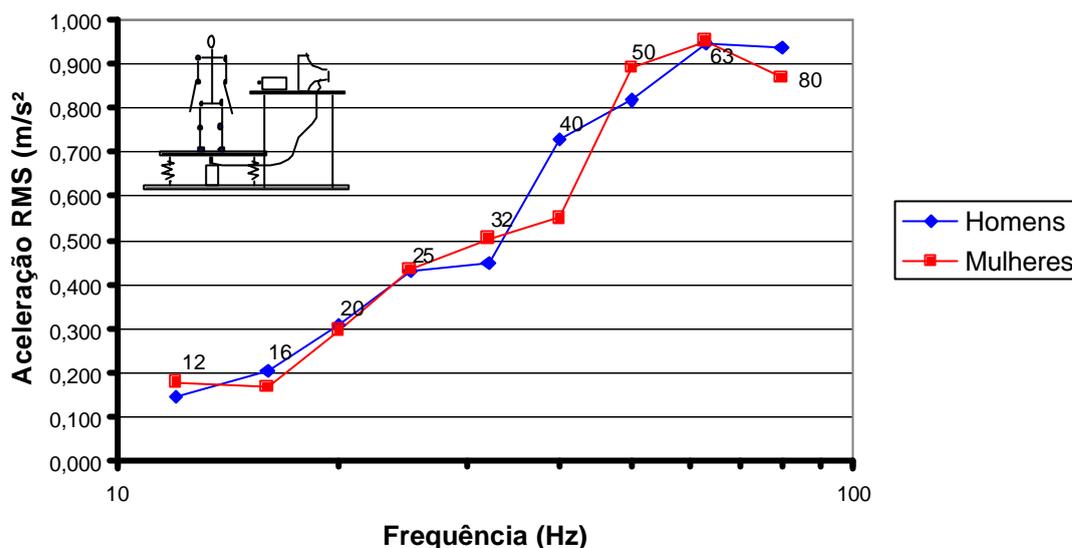


Figura 5.46: Comparação entre os resultados de homens e mulheres para o limite de conforto – Posição em pé – Acelerômetro placa.

Analisando os resultados mostrados, pode-se concluir que as mulheres são um pouco menos sensíveis que os homens para a postura sentada, ocorrendo uma equivalência para a postura em pé. Desta forma, neste experimento também se realiza uma análise estatística através do teste de hipótese tipo U Mann-Whitney para um nível de confiança de 95%, verificando-se a existência de diferenças significativas entre as respostas de homens e mulheres somente para as frequências de 40 e 50 Hz para a postura sentada.

Realiza-se também uma avaliação do efeito da postura sobre o conforto humano à vibração conforme realizado no Item 5.3 para o limite de percepção. Na Figura 5.47 apresentam-se os resultados para as posturas em pé e sentado.

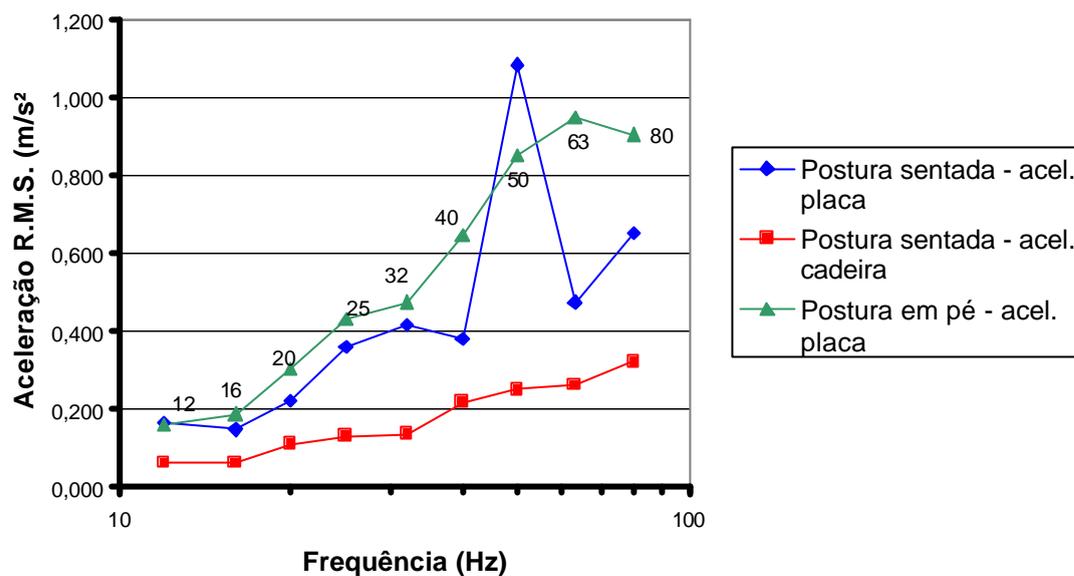


Figura 5.47: Efeito da postura na sensibilidade à vibração das pessoas para o limite de conforto.

O mesmo comportamento observado no Item 5.3 sobre a influência da postura no limite de percepção também pôde ser observado para o limite de conforto, obviamente com magnitudes de aceleração mais elevadas.

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este capítulo diz respeito às principais conclusões obtidas dos experimentos de laboratório referentes ao estudo da percepção e conforto à vibração, apresentando-se também algumas sugestões para futuros trabalhos de forma a se aprimorar os resultados obtidos.

6.1. Comentários finais

Este trabalho consiste de um estudo sobre os efeitos da vibração no conforto humano. Deste modo, o objetivo principal deste trabalho é gerar curvas de limiar de percepção e conforto humano a vibrações senoidais verticais, verificando-se a concordância dos resultados com outros trabalhos da literatura técnico-científica e principalmente com a norma ISO 2631/2: 1989 que trata dos níveis de vibração aceitáveis em edificações.

Para alcançar os objetivos, propõe-se a realização de quatro experimentos de laboratório. O primeiro trata da transmissibilidade da montagem experimental; o segundo sobre a determinação do limite de percepção à vibração; o terceiro apresenta um estudo sobre a incerteza das respostas para o limite de percepção à vibração; e o quarto está relacionado com o limite de conforto humano à vibração em ambientes residenciais. Com exceção do primeiro experimento, onde os níveis de vibração são determinados pelo pesquisador, os próprios voluntários ajustam os níveis de vibração conforme o objetivo de cada experimento.

O primeiro experimento relacionado à transmissibilidade da montagem experimental demonstrou uma atenuação da vibração da placa para a cadeira em todas as frequências estudadas. Para as frequências de 25, 32 e 50 Hz, esta atenuação é mais proeminente, com uma transmissão de vibração da placa para a cadeira entre 30% e 40%. Este experimento tem como objetivo a determinação da interface ideal para a instalação dos acelerômetros. Devido à atenuação da vibração da placa para a cadeira, as acelerações medidas na placa não correspondem às acelerações que os voluntários estão submetidos. Portanto, conclui-se que para a postura sentada, a melhor interface para a instalação do acelerômetro é o assento da cadeira.

Considerando a análise de pisos quanto aos níveis aceitáveis de vibração, tem-se a resposta dinâmica do piso medida em sua superfície. Esta resposta dinâmica deve ser comparada com os níveis de tolerância humana à vibração. Deste modo, há uma situação

controversa, já que os níveis de tolerância à vibração para pessoas na postura sentada são obtidos através de medidas no assento da cadeira. No entanto, a utilização das respostas captadas pelo acelerômetro acoplado na placa produz respostas contra a segurança, pois não corresponde às acelerações em que as pessoas estão submetidas. Assim, caso as pessoas estejam sentadas em uma cadeira com uma transmissibilidade mais elevada, estas estarão vulneráveis à vibração. A situação ideal seria a utilização de uma montagem experimental com uma transmissão de 100% da vibração da placa para a cadeira, porém esta situação é muito difícil de ser alcançada.

No segundo experimento, sobre o limite de percepção absoluta à vibração, observa-se uma redução da sensibilidade à vibração com o aumento da frequência para o intervalo estudado, em conformidade com a ISO 2631/2: 1989. Neste experimento, apresentam-se gráficos com o primeiro e terceiro quartis e a média obtida das respostas do limite de percepção do atual trabalho, juntamente com a curva básica da ISO 2631/2: 1989. Observa-se que os valores médios de aceleração para o atual trabalho são superestimados em relação à curva básica da ISO 2631/2: 1989. Assim, constata-se de que a utilização de valores médios de percepção à vibração apresenta-se de forma pouco conservadora, visto que uma parte considerável das pessoas estará vulnerável a movimentos vibratórios para este nível de vibração.

O terceiro experimento apresenta um estudo sobre a incerteza das respostas para o limite de percepção. Neste experimento, verifica-se a existência de um intervalo para a magnitude de acelerações em que as pessoas não podem afirmar com certeza se podem ou não detectar o estímulo vibratório. Deste modo, conforme procedimento apresentado por Parsons & Griffin (1988), os voluntários são requeridos a ajustarem os níveis de vibração da seguinte forma: o valor mínimo que têm certeza que podem detectar; e o valor máximo que têm certeza que não podem detectar a vibração. Para os valores médios das respostas destes dois níveis de vibração, observa-se uma faixa de incerteza muito ampla, com uma razão entre os dois casos de 1,5 a 2,0, conforme o intervalo de frequência. Com isso, faz-se uma proposta para a geração de uma curva que possa ser tomada como referência para o limite de percepção, consistindo da média aritmética entre os resultados para o primeiro quartil dos níveis mínimos de vibração que as pessoas podem detectar e o terceiro quartil dos níveis máximos de vibração que as pessoas não podem detectar. Desta forma, o resultado para o limite de percepção deste trabalho é comparado com a curva básica da ISO 2631/2: 1989, observando-se uma boa correlação entre as duas curvas para vibrações senoidais verticais na postura sentada.

Já para a postura em pé, observa-se uma menor sensibilidade das pessoas à vibração, com valores superiores aos da curva da ISO 2631/2: 1989 para vibrações senoidais verticais. Suspeita-se que este resultado ocorre devido à redução da transmissibilidade do corpo humano nesta postura para frequências elevadas, conforme demonstrado por Harazin & Grzesik (1998).

No entanto, conclui-se que não se deve utilizar curvas distintas quanto à postura das pessoas para a avaliação de níveis aceitáveis de vibração vertical em edificações, uma vez que para praticamente todos os tipos de edificações existirão pessoas nas posturas em pé e sentadas. Portanto, adota-se a curva da Figura 5.31 como o limite de percepção.

O quarto experimento tem por objetivo estabelecer uma relação entre o limite de conforto para ambientes residenciais com o limite de percepção. Através dos resultados, pode-se observar que a razão entre conforto e percepção tende a aumentar com a frequência. Para a faixa de frequência estudada, os valores variam entre 2 para frequências mais baixas e 4 para frequências mais altas tanto para as posturas em pé como sentado. Portanto, não é indicado a utilização de um fator multiplicativo médio para a curva do limite de percepção na predição do conforto à vibração como ocorre na ISO 2631/2: 1989, já que dependendo da faixa de frequência as respostas podem estar superestimadas ou subestimadas. É verificado também o motivo pelo qual os voluntários registram o desconforto. Na maioria dos casos, os voluntários indicam a vibração da massa abdominal e pulmões para frequências mais baixas (12 e 16 Hz) e vibrações nos pés para frequências mais elevadas, principalmente para a postura em pé, confirmando a baixa transmissibilidade do corpo humano para frequências elevadas, o que faz com que a sensibilidade a vibração diminua consideravelmente com o aumento da frequência, elevando-se assim a diferença entre o limite de conforto e o limite de percepção.

Uma comparação entre os resultados de homens e mulheres registra uma menor sensibilidade das mulheres para a postura sentada e uma maior sensibilidade para a postura em pé para o limite de percepção. No entanto, através de uma análise estatística com o teste de hipótese U Mann-Whitney para um nível de confiança de 95%, não se verificam diferenças significativas entre os dois grupos. Já para o limite de conforto na postura sentada, há diferenças significativas para as frequências de 40 e 50 Hz, verificando-se também uma menor sensibilidade das mulheres. Para a postura em pé, ocorre uma equivalência entre os resultados dos dois grupos.

6.2. Sugestões para trabalhos futuros

Para todos os experimentos, verifica-se uma alta variabilidade individual nas respostas. Deste modo, a aplicação de testes estatísticos para o tamanho da amostra necessário indica valores elevados, tornando-se impraticável a realização dos ensaios com o tamanho da amostra obtida. Como em geral a definição da amostra é obtida dentro do ambiente universitário, características como peso, altura, faixa etária e nível sócio-econômico e culturais não se apresentam de acordo com a distribuição verificada na população brasileira .

Desta forma, algumas recomendações são feitas para possíveis trabalhos futuros de modo a aprimorar os resultados obtidos:

- Realização de mais experimentos de forma a se enriquecer o banco de dados existente, com o objetivo de se confirmar as tendências encontradas neste trabalho;
- Utilização de uma amostra com características físicas (peso, altura e faixa etária) semelhantes à população brasileira e realização de correlações entre estas características com as respostas à vibração;
- Necessidade de se estudar a percepção e o conforto humano para frequências menores que 10 Hz, pois esta faixa de frequência é a mais crítica, onde se apresenta a maioria dos problemas relacionados à vibração em edificações. Infelizmente, isto não foi possível neste trabalho devido a limitações do excitador eletromagnético;
- Estudar a transmissibilidade do corpo humano, realizando-se correlações com as respostas à vibração e características físicas das pessoas;
- Estudo de vibrações em outras direções.

CAPÍTULO 7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto e Execução de Estruturas de Concreto**: NBR 6118. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cargas para Cálculo de Estruturas de Edificações**: NBR 6120. Rio de Janeiro, 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios - Anexo N**: NBR 8800. Rio de Janeiro, 1986.

AQDADOS 7.0. **Programa de Aquisição de Dados**. Lynx Tecnologia Eletrônica Ltda. Manual do Usuário, 2003.

BACHMANN, H., AMMANN, W., *Vibrations in Structural Induced by Man and Machines. Structural Engineering Document 3e, International Association for Bridges and Structural Engineering*, 1987 *apud* CAMPOS, B. M. **Avaliação Comparativa de Pisos de Edificações em Estrutura Metálica Quanto aos Critérios de Vibração**. 2003. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2003.

BALBINOT, A **Caracterização dos Níveis de Vibração em Motoristas de Ônibus**: Um Enfoque no Conforto e na Saúde. 2001. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

BALBINOT, A., TAMAGNA, A. *Avaliação da transmissibilidade da vibração em bancos de motoristas de ônibus urbanos: um enfoque no conforto e na saúde*. **Revista Brasileira de Engenharia Biomédica**, vol. 18, p. 31 – 38, 2002.

BROWNJOHN, J. M. W. Energy dissipation in one-way slabs with human participation. **Asia Pacific Vibration Conference**, Singapore, 1999.

BRÜEL & KJAER. **Le vibrazioni del corpo umano**. Folheto técnico, 2000 *apud* BALBINOT, A **Caracterização dos Níveis de Vibração em Motoristas de Ônibus: Um Enfoque no Conforto e na Saúde**. 2001. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

BRUEL & KJAER. **Technical Documentation**; Power Amplification Type 2706, 1985.

BRUEL & KJAER. **Technical Documentation**; *PM Vibration Exciter Type 4809*, 1985.

BRITISH STANDARD GUIDE. **Guide to evaluation of human exposure to vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz)**: BS 6472, 1987.

BRITISH STANDARD GUIDE. **Measurement and evaluation of human exposure to whole-body mechanical vibration and repeated shock**: BS 6841, 1987.

BRITISH STANDARD GUIDE. **Evaluation of Human Exposure to Vibration in Buildings**: BS 6472, 1984.

CAMPOS, B. M. **Avaliação Comparativa de Pisos de Edificações em Estrutura Metálica Quanto aos Critérios de Vibração**. 2003. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2003.

CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. **Steel Structures for Buildings – Limit States Design, appendix G: Guide on Floor Vibrations** : CAN3 – S16-M84. Canada, 1984.

CHAFFIN, D. B., ANDERSSON, G. B. J., MARTIN, B. J. **Occupational biomechanics**. U.S.A: Wiley-Interscience, 1999 *apud* BALBINOT, A. **Caracterização dos Níveis de Vibração em Motoristas de Ônibus: Um Enfoque no Conforto e na Saúde**. 2001. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

INAM – Instituto Nacional de Alimentação e Nutrição. **Condições Nutricionais da População Brasileira: Adultos e Idosos**. COITINHO, D. C. et al. Brasília, 1991. p. 10 – 15.

CORBRIDGE, C., GRIFFIN, M. J. Vibration and comfort: vertical and lateral motion in the range 0,5 to 5,0 Hz. **Ergonomics**, p. 249-272, 1986.

CYRANKA, L. F. M., SOUZA, V. P. **Orientação para Normalização de Trabalhos Acadêmicos**. Segunda Edição. Juiz de Fora: EDUFJF, 1997.

DALLY, J. W., RILEY, W. F., McCONNELL, K. G. **Instrumentation for Engineering Measurements**. Second Edition. New York: John Wiley & Sons, 1993.

FONSECA, J. S., MARTINS, G. A. **Curso de estatística**. 6^a Edição. São Paulo: Editora Atlas S.A. 1996, p. 177-181.

GERGES, S. N. Y. **Ruído: Fundamentos e Controle**. Primeira Edição. Biblioteca Universitária da Universidade Federal de Santa Catarina, 1992 *apud* MISAEL, M. R. **Conforto Humano aos Níveis de Vibração**. 2001. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001.

GRIFFIN, M. J. **Handbook of Human Vibration**. London: Academic Press, 1996.

GRIFFIN, M. J. Comparison of Standardized Methods for Predicting the Hazards of Whole-Body Vibration and Repeated Shocks. **Journal of Sound and Vibration** vol. 215(4), p. 883 – 914, 1998.

GRIFFIN, M. J., PARSONS, K. C., WHITHAM, E. M. Vibration and Comfort: IV. Application of Experimental Results. **Ergonomics**, vol. 25, p. 721-739, 1982.

GRIFFIN, M. J. The Ergonomics of Vehicle Comfort. THIRD INTERNATIONAL CONFERENCE. BOLOGNA: VEHICLE COMFORT AND ERGONOMICS, 1995 *apud* MISAEL, M. R. **Conforto Humano aos Níveis de Vibração**. 2001. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001.

GRIFFIN, M. J., WHITHAM, E. M. Discomfort Produced by Impulsive Whole-body Vibration. **Journal of Acoustical Society of America**, vol. 68, p. 1277-1284, 1980.

GRIFFIN, M. J., WHITHAM, E. M., PARSONS, K. C. Vibration and Confort: I. Translational Seat Vibration. **Ergonomics**, vol. 25, p. 721-739, 1982.

HARAZIN, B., GRZESIK, J. The Transmission of Vertical Whole-body Vibration to the Segments of Standing Subjects. **Journal of Sound and Vibration** vol 215(4), p. 775 – 787, 1998.

HOLMAN, J. P. **Experimental Methods for Engineers**. Seventh Edition. McGraw-Hill International Editions, 2001.

IBGE. Diretoria de Pesquisas. Departamento de População e Indicadores Sociais. **Censo Demográfico**, 2000.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Mechanical Vibration and Shock - Evaluation of Human Exposure to Whole Body Vibration – Part 1: General Requirements**: ISO 2631/1. Second Edition. Geneve, 1997.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Evaluation of Human Exposure to Whole Body Vibration – Part 2: Continuous and Shock-induced Vibration in Buildings (1 to 80 Hz)**: ISO 2631/1. First Edition. Geneve, 1989.

KELSEY, J. L., HARDY, R. J. Driving of motor vehicles as a risk factor for acute herniated lumbar intervertebral disc. **American Journal of Epidemiology**, pp. 63-73, 1975.

KYOWA. **Waterproof Acceleration Transducer ASW-A**. Operation Manual. Kyowa Eletronic Instruments CO.

MISAEEL, M. R. **Conforto Humano aos Níveis de Vibração**. 2001. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001.

OBORNE, D. J., BOARER, P. A. Subjective Response to Whole-body Vibration: The Effects of Posture. **Ergonomics**, vol. 25, p. 673-681, 1982.

OBORNE, D. J., BOARER, P. A. Subjective Response to Whole-body Vibration: The Effects of Instructions. **Ergonomics**, vol. 25, p. 759-769, 1982.

OHLSSON, S. U. **Floor Vibrations and Human Discomfort**. Göteborg, Sweden: Department of Structural Engineering, Chalmers University of Technology, 1982.

PANJABI, M. M., ANDERSSON, G. B. J., JORNEUS, L., HULT, E. MATTSSON, L. In vivo measurement of spinal column vibrations. **The Journal of Bone and Joint Surgery**, pp. 695-702, 1986.

PARSONS, K. C., GRIFFIN, M. J. Whole-body Vibration Perception Thresholds. **Journal of Sound and Vibration**, vol. 121, p. 237 – 258, 1988.

PARSONS, K. C., GRIFFIN, M. J., WHITHAM, E. M. Vibration and Confort: III. Translational Vibration of Feet and Back. **Ergonomics**, vol. 25, p. 705-719, 1982.

PEREIRA, C. C. G., NEVES, F. A., SOUZA, H. A. **Vibration in Pre-Manufactured Floor Used in Steel Structure Buildings**. 17th International Congress of Mechanical Engineering, São Paulo, 2003.

RAINER, J. H., PERNICA, G., ALLEN, D. E. Dynamic Loading and Response of Footbridges. **Canadian Journal of Civil Engineering**, Vol. 15, nº 1, pp. 6-71, 1988.

SALES, U. **Mapeamento dos Problemas Gerados na Associação entre Sistemas de vedação e Estrutura Metálica e Caracterização Acústica e Vibratória de Painéis de Vedação**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2001.

SMITH, S. D. Modeling differences in the vibration response characteristics of the human body. **Journal of Biomechanics**, p. 1513-1516, 2000 *apud* BALBINOT, A. **Caracterização dos Níveis de Vibração em Motoristas de Ônibus**: Um Enfoque no Conforto e na Saúde. 2001. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

TEDESCO, J. W., McDOUGAL, W. G., ROSS, C. A. **Structural Dynamics: Theory and Applications**. Menlo Park, California: Addison-Wesley, 1998.

VARELA, W. D. **Modelo Teórico-experimental para Análise de Vibrações Induzidas por Pessoas Caminhando sobre Lajes de Edifícios**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004..

VASCONCELOS, R. P. **Atenuações de Vibrações em Lajes Nervuradas de Piso em Concreto Armado**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1998.

VON GIERKE, H. E, BRAMMER, A. J. Chapter 44: Effects of Shock and Vibration on Humans. In:_____. **Shock and Vibration Handbook**. Fourth Edition. Cyril M. Harris, 1998 *apud* MISAEL, M. R. **Conforto Humano aos Níveis de Vibração**. 2001. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001.

WANG, W., RAKHEJA, S, BOILEAU, P. E. Effects of Sitting Postures on Biodynamic Response of Seated Occupants Under Vertical Vibration. **International Journal of Industrial Ergonomics**, vol. 34, p. 289-306, 2004.

WILDER, D. G., WOODWORTH, B. B., FRYMOYER, J. W., POPE, M. H. **Vibration and the human spine**. Spine, pp. 243-254, 1982 *apud* BALBINOT, A. **Caracterização dos Níveis de Vibração em Motoristas de Ônibus: Um Enfoque no Conforto e na Saúde**. 2001. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

WYATT, T. A. **Design Guide on the Vibration of Floors**. The Steel Construction Institute, Berkshire, England, 1989 *apud* CAMPOS, B. M. **Avaliação Comparativa de Pisos de Edificações em Estrutura Metálica Quanto aos Critérios de Vibração**. 2003. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2003.

ANEXO A – ANÁLISE ESTATÍSTICA DE UM SINAL DE RESPOSTA NO DOMÍNIO DO TEMPO

Um sinal de resposta típico está ilustrado na Figura A.1. Tais curvas são extremamente complexas, no entanto, após uma análise adequada, estes registros podem produzir muitas informações úteis sobre as características dinâmicas de um sistema em vibração.

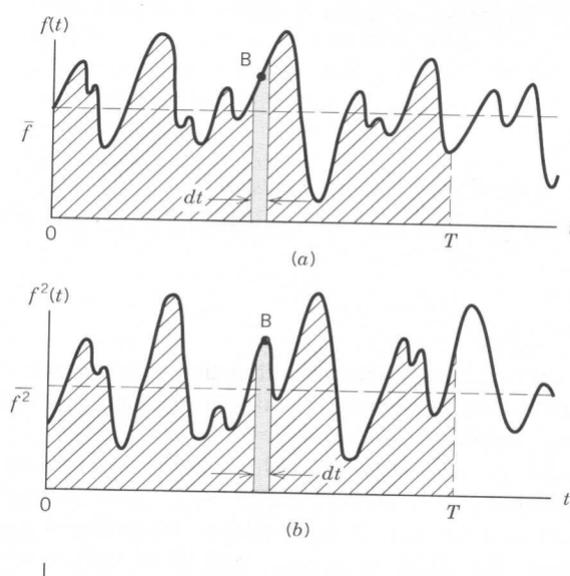


Figura A.1: Sinal de resposta típico. Fonte Dally et al, 1993.

A quantidade primária usada para descrever a intensidade de um ambiente vibratório, independente do tipo de transdutor usado nas medições, deverá ser a aceleração. Na área das vibrações no corpo humano, o método de análise mais comum é a determinação do parâmetro de aceleração r.m.s. Esta medida de vibração é importante porque indica a média da energia contida no movimento vibratório. Portanto, mostra o potencial destrutivo da vibração. A seguir são apresentados importantes parâmetros estatísticos que podem ser extraídos de um registro no tempo mostrado na Figura A.1 (a) para o estudo das vibrações. Estes parâmetros são utilizados em diversos trabalhos e normas sobre vibrações no corpo humano (Griffin, 1990; ISO 2631/1: 1997; BS 6841: 1987):

- média (\bar{a}): A média \bar{a} é definida a partir da Equação A1 abaixo:

$$\bar{a} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T a(t) dt \quad (\text{A.1})$$

onde T é o tempo de integração ou de registro, $a(t).dt$ representa a área diferencial sob a curva no ponto B da Figura A.1 (a). Claramente, a área retangular $\bar{a} T$ é igual à área sob a curva de 0 até T . Como as flutuações em \bar{a} se tornam menores com o aumento do tempo T , longas medidas de tempo são usadas para se atingir uma estimativa precisa de \bar{a} .

A média \bar{a} pode ser escrita numa forma discreta conforme a Equação A.2 abaixo:

$$\bar{a} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} a(i) \quad (\text{A.2})$$

onde $\sum a(i)$ representa a soma de todas as amostras da série de tempo $a(t)$ e N é a quantidade de amostras.

- desvio padrão (σ):

$$\sigma = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} (a(i) - \bar{a})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{A.3})$$

- valor r.m.s. (*RMS: root mean square*): para o cálculo da raiz da média quadrática do sinal ou valor em RMS (“root mean square”) necessita-se do valor da média quadrática definida conforme a Equação A.4.

$$\overline{a^2} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) dt \quad (\text{A.4})$$

Um registro de $a^2(t)$ está mostrado na Figura A.1 (b). Com isso, a raiz da média quadrática vale:

$$A_{\text{RMS}} = \sqrt{\overline{a^2}} \quad (\text{A.5})$$

Pode-se mostrar que para um histórico de acelerações aproximadamente senoidal, o valor da aceleração RMS é igual a $1/\sqrt{2}$ da amplitude de aceleração. Considere o histórico da aceleração descrito pela Equação A.6 abaixo:

$$a(t) = A_0 \text{sen}(\omega t) \quad (\text{A.6})$$

Aplicando-se a Equação A.5 em A.6, temos:

$$A_{\text{RMS}} = \left[\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} A_0^2 \sin^2(\omega t) dt \right]^{1/2} = \left[\frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{2} 2\pi - \frac{1}{4} \sin(4\pi) \right) \right]^{1/2} A_0 = \left[\frac{1}{2\pi} \pi \right]^{1/2} A_0 \quad (\text{A.7})$$

Portanto,

$$A_{\text{RMS}} = \frac{1}{\sqrt{2}} A_0 \quad (\text{A.8})$$

A aceleração RMS pode ser escrita numa forma discreta conforme a Equação A.9 abaixo:

$$A_{\text{RMS}} = \left(\frac{1}{N} \sum a^2(i) \right)^{1/2} \quad (\text{A.9})$$

- valor dose de vibração (*VDV: Vibration Dose Value*):

$$\text{VDV} = \left(\frac{T_s}{N} \sum x^4(i) \right)^{1/4} \quad (\text{A.10})$$

onde *VDV* ($\text{m/s}^{1,75}$) é uma medida cumulativa e é usualmente calculada com a aceleração ponderada $x(i)$ (m/s^2), T_s (s) é o período de duração do movimento, ou seja, o período total do dia durante o qual a vibração pode ocorrer e N a quantidade de amostras.

- dose de vibração estimada (*eVDV: Estimated vibration dose value*):

$$e\text{VDV} = \left[(1,4 \cdot A_{\text{RMS}})^4 \cdot T_s \right]^{1/4} \quad (\text{A.11})$$

onde *eVDV* ($\text{m/s}^{1,75}$) é utilizado como uma estimativa da medida cumulativa *VDV*, T_s é o tempo de ensaio (s) e A_{RMS} é o valor da aceleração r.m.s..

Na norma BS 6841: 1987, o parâmetro usado para relacionar tempo de exposição baseia-se no envolvimento do cálculo do *VDV* (Equação A.10). Em geral, se em um dia existe

um total de N períodos de várias durações com VDV 's medidos (ou estimados), então o VDV_{total} para o dia é definido por:

$$VDV = \left[\sum_{n=1}^{n=N} VDV_n^4 \right]^{\frac{1}{4}} \quad (A.12)$$

A Figura A.2 apresenta as acelerações r.m.s. correspondentes a vários VDV 's e durações da exposição à vibração.

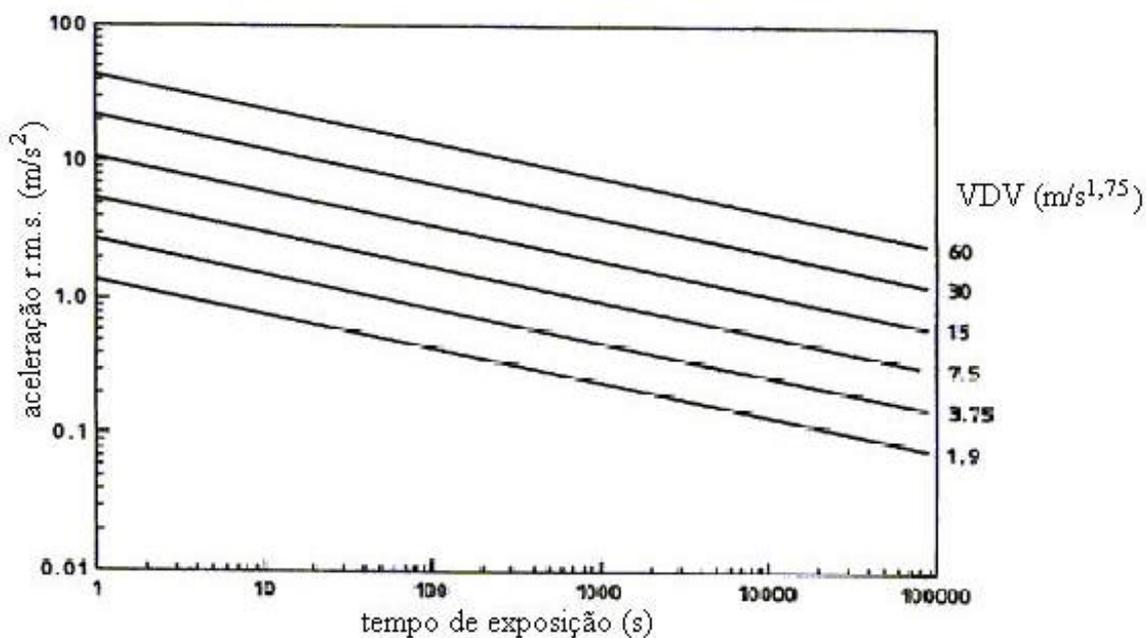


Figura A.2: Correspondência entre acelerações em r.m.s. e VDV 's para períodos de exposição à vibração. Fonte: BS 6841: 1987.

ANEXO B – AQUISIÇÃO DE DADOS

Este texto trata dos conceitos básicos necessários para a utilização de um sistema de aquisição de dados. O termo aquisição de dados é usado genericamente para designar a obtenção de informações a respeito de um processo. Um forno de recozimento, em que se deseja conhecer o comportamento da temperatura em várias zonas do forno e nas peças que estão sofrendo tratamento térmico, é um exemplo de processo. Outro exemplo poderia ser os esforços sofridos pelo semi-eixo de uma suspensão veicular em pistas de testes. As informações colhidas poderiam ser usadas posteriormente para simulação em laboratório.

Os processos podem ser de naturezas diversas, podendo-se citar, processos químicos, biofísicos, industriais, elétricos, mecânicos, dentre outros.

As informações a respeito de um processo interessam aos profissionais envolvidos no seu estudo, projeto, melhoria ou manutenção. Podem, quase sempre, ser transformadas em sinal elétrico e registradas de alguma forma.

A utilização de microcomputadores torna a aquisição de dados muito mais eficiente e confiável, se comparada a métodos tradicionais. Além disso, acrescenta uma grande vantagem, pois os dados já estão prontos para:

- Análise do sinal;
- Processamento do sinal;
- Elaboração de relatório (gráficos e tabelas);
- Exportação de dados para outros programas.

A Figura B.1 ilustra um exemplo de aquisição de dados (pressão arterial, batimento cardíaco, ondas cerebrais, etc.) de um processo biofísico com a utilização de microcomputador.

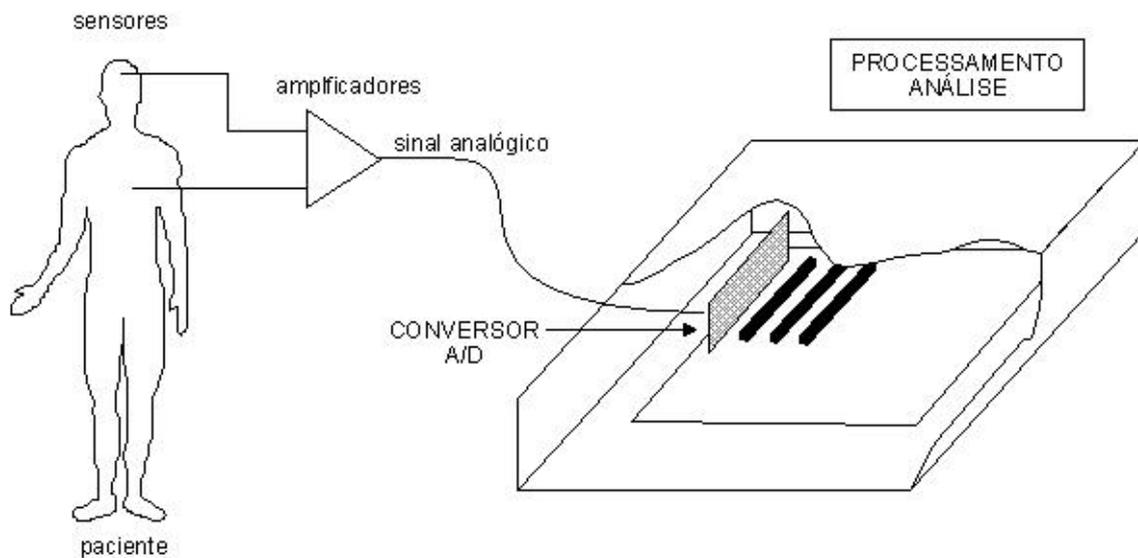


Figura B.1: Aquisição de dados de um processo biofísico. Fonte: AqDados 7.0, 2003.

- *Processo em Análise:*

É o objeto que se deseja estudar. O processo é analisado através do estudo de suas grandezas físicas que podem ser medidas por sensores. São exemplos: temperatura, pressão, aceleração, vazão, pressão arterial, etc.

- *Sensores:*

Sensores ou transdutores são dispositivos que convertem grandezas físicas em sinais elétricos (tensão ou corrente). São exemplos de sensores: acelerômetro (mede aceleração), termopar (mede temperatura), célula de carga (mede força), etc.

- *Condicionadores:*

Os condicionadores são equipamentos eletrônicos que modificam o sinal de entrada de alguma forma. São exemplos de condicionamento: amplificação ou atenuação, filtragem, conversão de corrente para tensão e isolamento galvânica.

- *Cabos:*

Os cabos interligam os sensores, condicionadores e placas de conversão A/D nos microcomputadores. Em geral os cabos não podem ser muito longos (principalmente se os sinais forem de tensão e de baixa amplitude). Em ambientes sujeitos a ruídos por indução

eletromagnética deve-se utilizar cabos tipo manga que são compostos por pares trançados envolvidos em blindagem.

- *Conversor A/D:*

O conversor A/D converte um sinal analógico em dado digital. O sinal digitalizado pode então ser manipulado pelo microcomputador.

- *Microcomputadores e Programas:*

O microcomputador realiza a aquisição de dados com o conversor A/D através de programas específicos como, por exemplo, o AqDados.

Conversor A/D

As grandezas analógicas são aquelas cujas medidas podem assumir uma infinidade de valores. O mundo físico apresenta diversos exemplos de grandezas analógicas:

- Posição de um carro na pista;
- Força de tração num cabo de aço;
- Corrente elétrica consumida por um equipamento;
- Força numa mola;
- Temperatura ambiente, etc.

No caso da força numa mola, o seu valor pode ser de 1000 kgf num determinado instante e logo em seguida 1012 kgf. Neste intervalo, a força assumiu uma infinidade de valores (1000.1, 1001.009, 1007.89763, etc.), ou seja, uma grandeza analógica possui infinitos valores ao longo do intervalo de variação.

Um computador digital opera, como o próprio nome indica, com dados digitais. Um dado ou informação digital caracteriza-se por assumir uma quantidade finita de valores discretos (múltiplos de uma unidade arbitrária).

Voltando ao exemplo da força, se fosse necessário armazenar em um computador os valores possíveis da força dentro do intervalo de 1000 a 1012 kgf, considerando que a unidade arbitrária fosse 5 kgf, obteríamos apenas três valores: 1000, 1005 e 1010.

O exemplo acima ilustra que a conversão analógica-digital permite representar numericamente o sinal, sendo que a precisão de representação digital depende de vários fatores, entre os quais destacam-se a faixa de entrada e resolução e a taxa de amostragem.

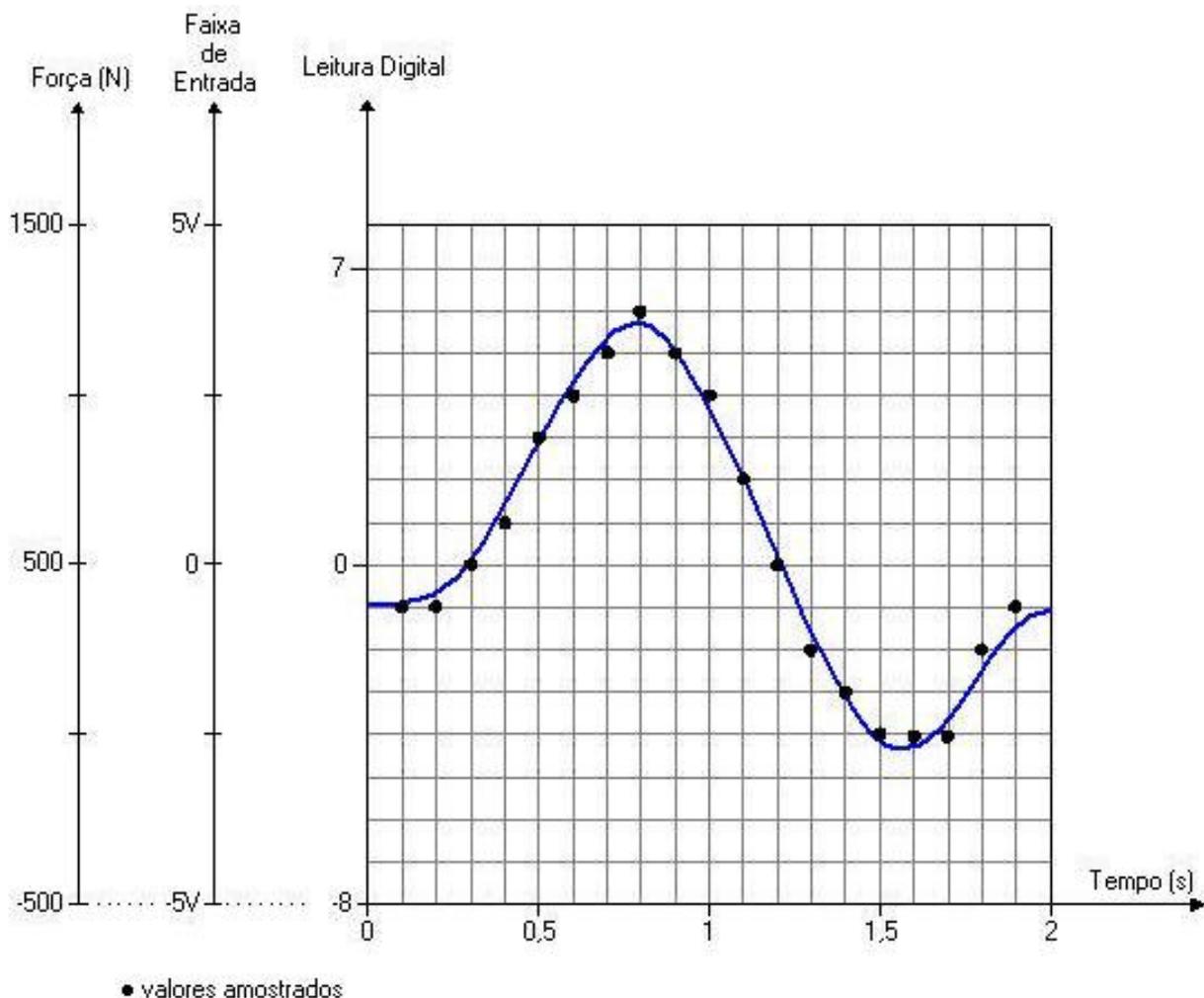


Figura B.2: Conversão A/D de um sinal de força. Fonte: AqDados 7.0, 2003.

Na Figura B.2 é exemplificada a conversão A/D de um sinal de força utilizando-se um conversor A/D de 4 bits (com $2^4 = 16$ níveis) e com faixa de entrada de ± 5 volts. A taxa de amostragem utilizada é de 10 amostras por segundo (10 Hz). Observe que os pontos de intersecção das retas da grade correspondem ao conjunto de valores discretos que podem ser obtidos para a dada taxa de amostragem e resolução do conversor A/D.

Faixa de Entrada e Resolução

A faixa de entrada é um parâmetro associado à resolução e informa a faixa de tensões e/ou correntes que a placa conversora A/D consegue representar numericamente. Esta faixa pode ser de ± 5 V, 0 a 5V, ± 10 V, 0 a 20 mA, etc. Para o equipamento utilizado neste trabalho, a faixa de entrada é de ± 10 V.

Quando os sinais de entrada não forem adequados para as faixas de entrada disponíveis na placa A/D será necessário condicioná-los (amplificar ou atenuar) antes de conectá-los na entrada da placa A/D. A Figura B.3 mostra exemplos onde o condicionamento do sinal faz-se necessário.

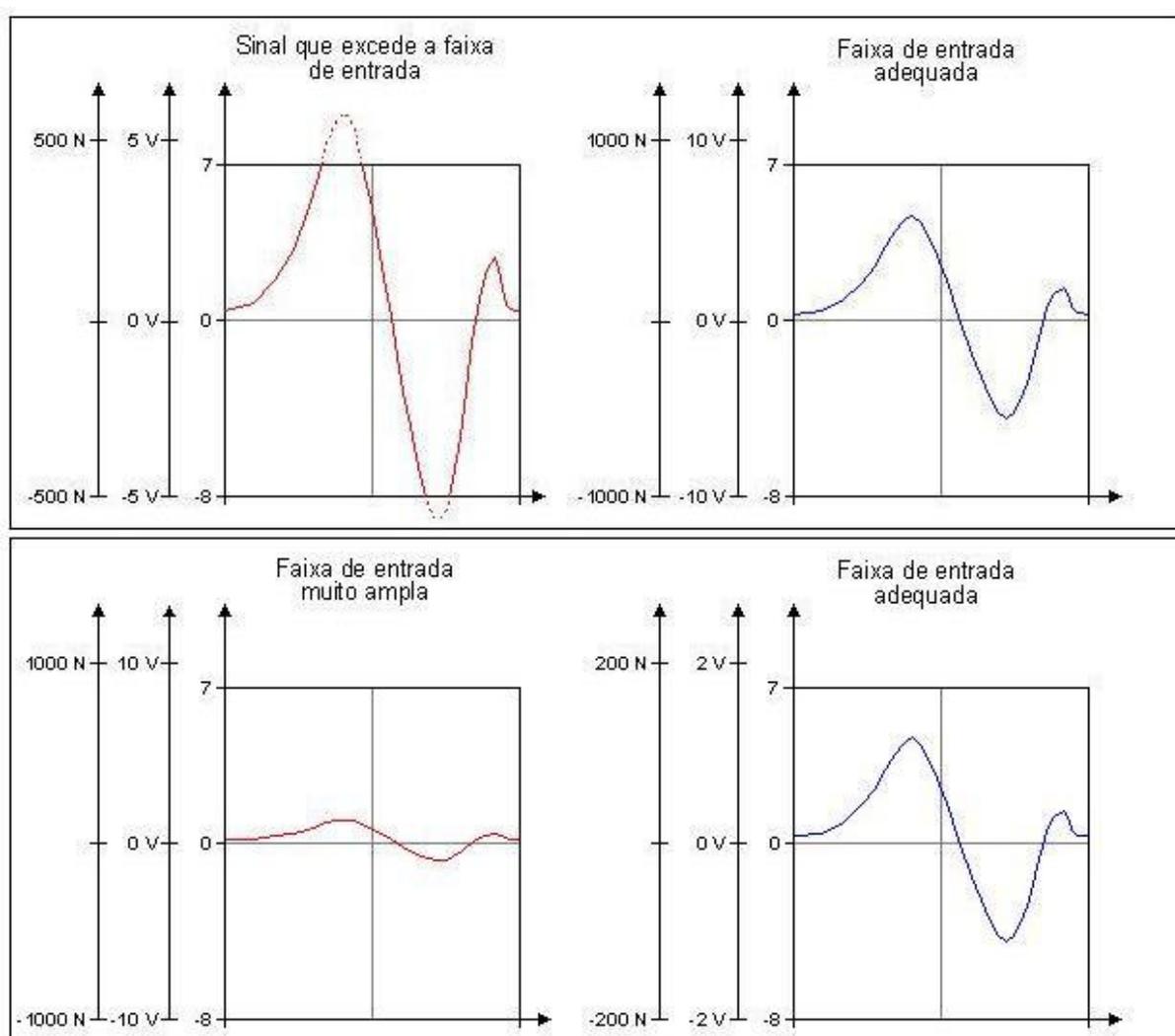


Figura B.3: Exemplo de condicionamento do sinal. Fonte: AqDados 7.0, 2003.

A resolução de um conversor A/D indica a menor variação do sinal analógico que o conversor pode detectar. É geralmente indicada em termos de número de bits. Assim, têm-se conversores com resolução de 6, 8, 10, 12, 14, 16, ...bits. O conversor A/D utilizado possui resolução de 16 bits.

A Figura B.4 mostra o mesmo sinal lido por conversores com resolução de 4 e 5 bits. Comparando-se os dois conversores, que possuem a mesma faixa de entrada, observa-se que o de maior resolução permitirá detectar variações menores no sinal de entrada.

Um conversor com faixa de entrada $\pm 5V$ e resolução de 4 bits pode representar o sinal de entrada em 16 níveis e detectará variações de 625 mV (10V dividido por 16 níveis). Já o conversor de 5 bits pode representar o mesmo sinal em 32 níveis e detectará variações de 312,5 mV.

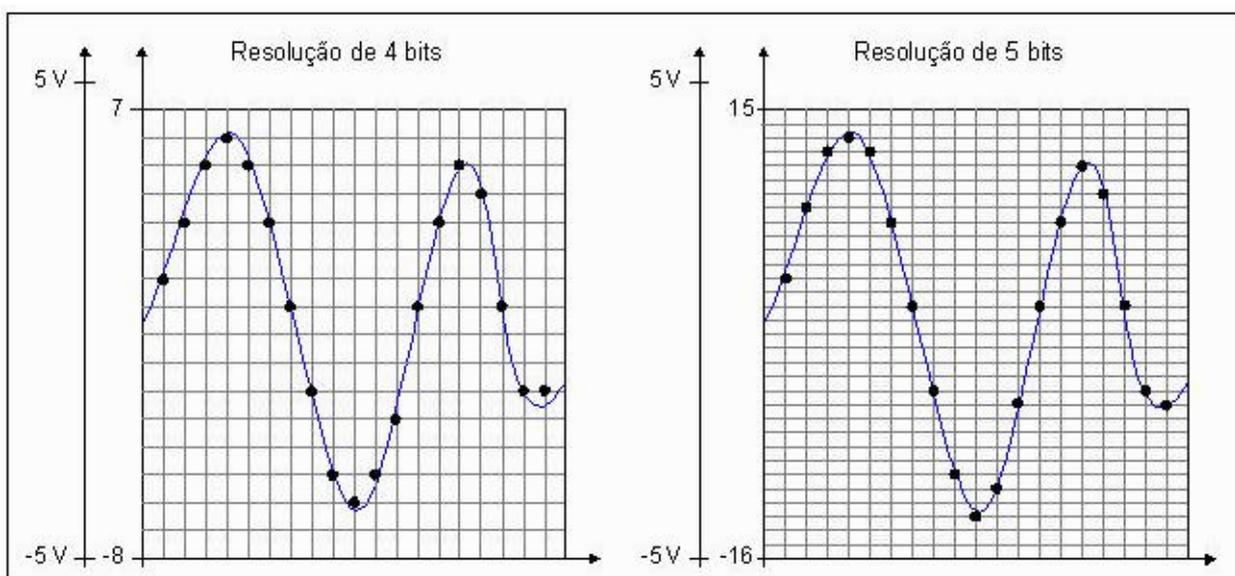


Figura B.4: Sinal lido por conversores com resolução de 4 e 5 bits. Fonte: AqDados 7.0, 2003.

Taxa de Amostragem

Em uma aplicação prática, o sinal de entrada do conversor A/D varia no decorrer do tempo e o que se deseja é registrar esta variação. Como a capacidade de armazenamento de um computador é finita, o registro não é contínuo e sim discreto.

A discretização é feita através da amostragem do sinal a intervalos regulares. O inverso desse intervalo é a taxa de amostragem. Por exemplo, para uma taxa de amostragem de 100 amostras por segundo (ou seja 100 Hz), o intervalo entre as amostras é de 10 ms (ou seja, 1/100 de segundo). A taxa de amostragem é equivalente à resolução da conversão A/D,

só que aplicada ao tempo. A Figura B.5 apresenta mostra graficamente dois exemplos de taxa de amostragem, uma de 10 Hz e outra de 20 Hz.

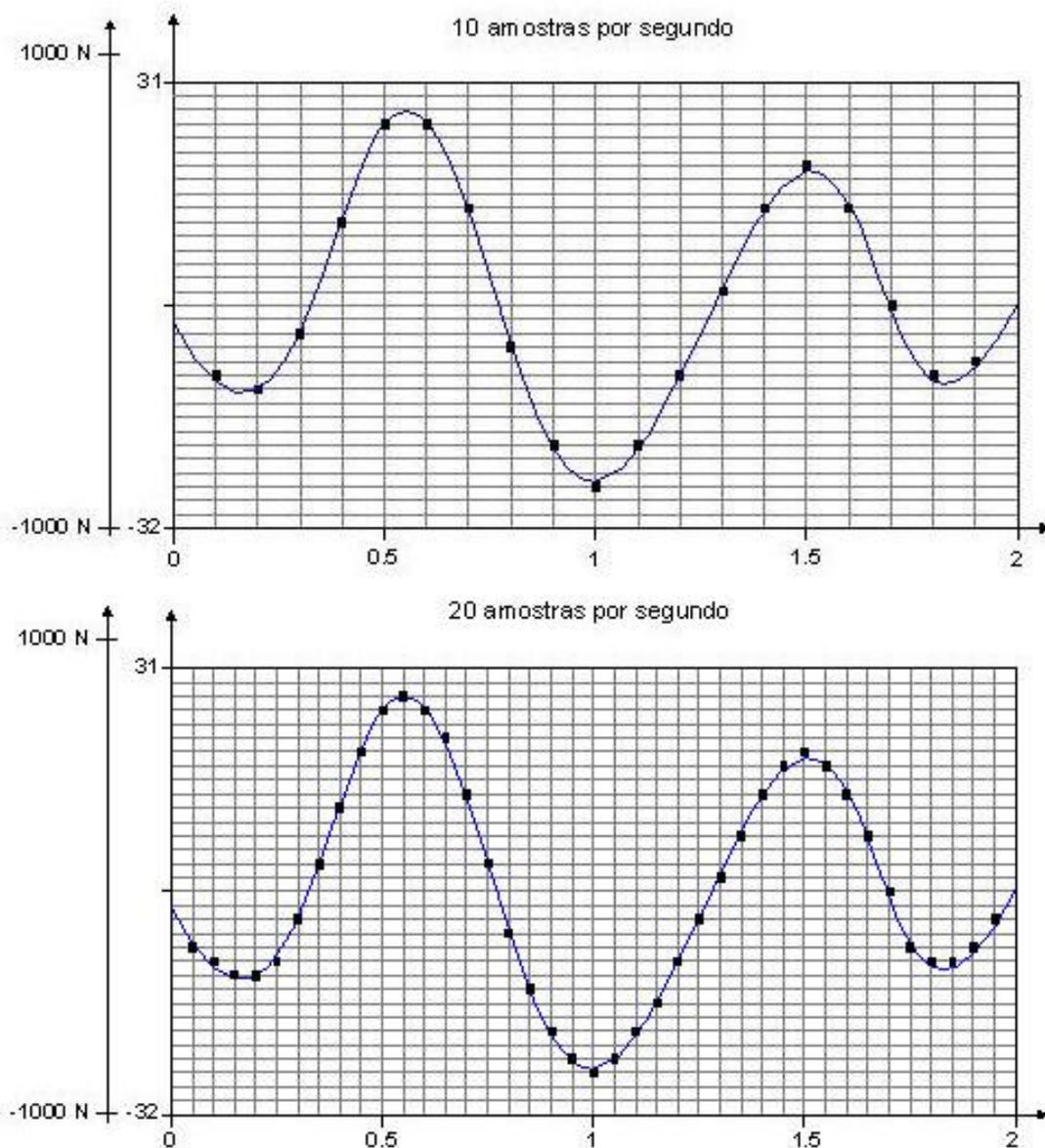


Figura B.5: Representação taxas ou freqüências de amostragem. Fonte: AqDados 7.0, 2003.

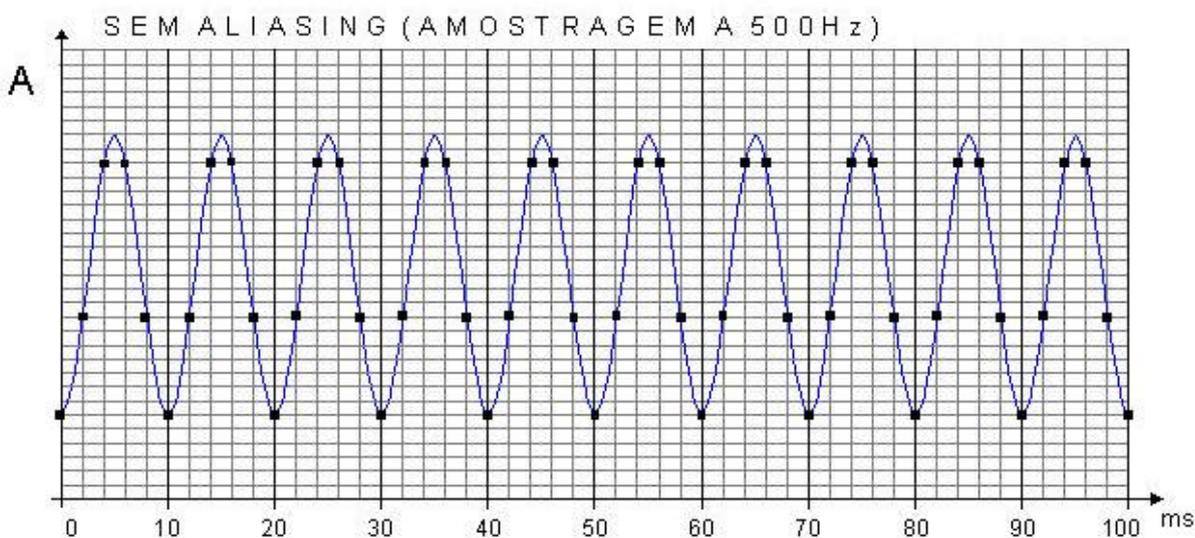
Quanto maior a taxa, melhor a representação do sinal. No entanto, devido à limitação do espaço disponível para armazenamento dos dados, há uma relação de compromisso entre a taxa de amostragem e a duração da aquisição. Quanto maior a taxa, menor será a duração da aquisição. Por exemplo, para um espaço disponível de um milhão de amostras e uma taxa de 100 amostras por segundo, a duração máxima da aquisição será de 166 minutos e 40

segundos. Se aumentarmos a taxa para 1000 amostras por segundo, a duração máxima será de 16 minutos e 40 segundos.

A taxa de amostragem também não pode ser muito baixa, comparada com a frequência de variação do sinal, devido ao efeito de subamostragem (*aliasing*).

O efeito *aliasing* ocorre sempre que a frequência de amostragem é menor que duas vezes a frequência da componente de maior frequência do sinal (Teorema de *Nyquist*).

A Figura B.6 mostra gráficos que representam um sinal senoidal de 100 Hz amostrado em diferentes taxas de amostragem. No Caso A, a taxa de amostragem é de 500 Hz e não ocorre *aliasing* (taxa = 500 Hz > 2 x 100 Hz). No caso B a taxa de amostragem é de 83.3 Hz e ocorre *aliasing*. Observe que os pontos amostrados representam um sinal senoidal de frequência menor que a da senoide original. No Caso C, a taxa de amostragem é exatamente igual à frequência do sinal de entrada, ou seja, 100 Hz. Neste caso, os valores amostrados são sempre iguais. O usuário terá a impressão de que se trata de um sinal contínuo.



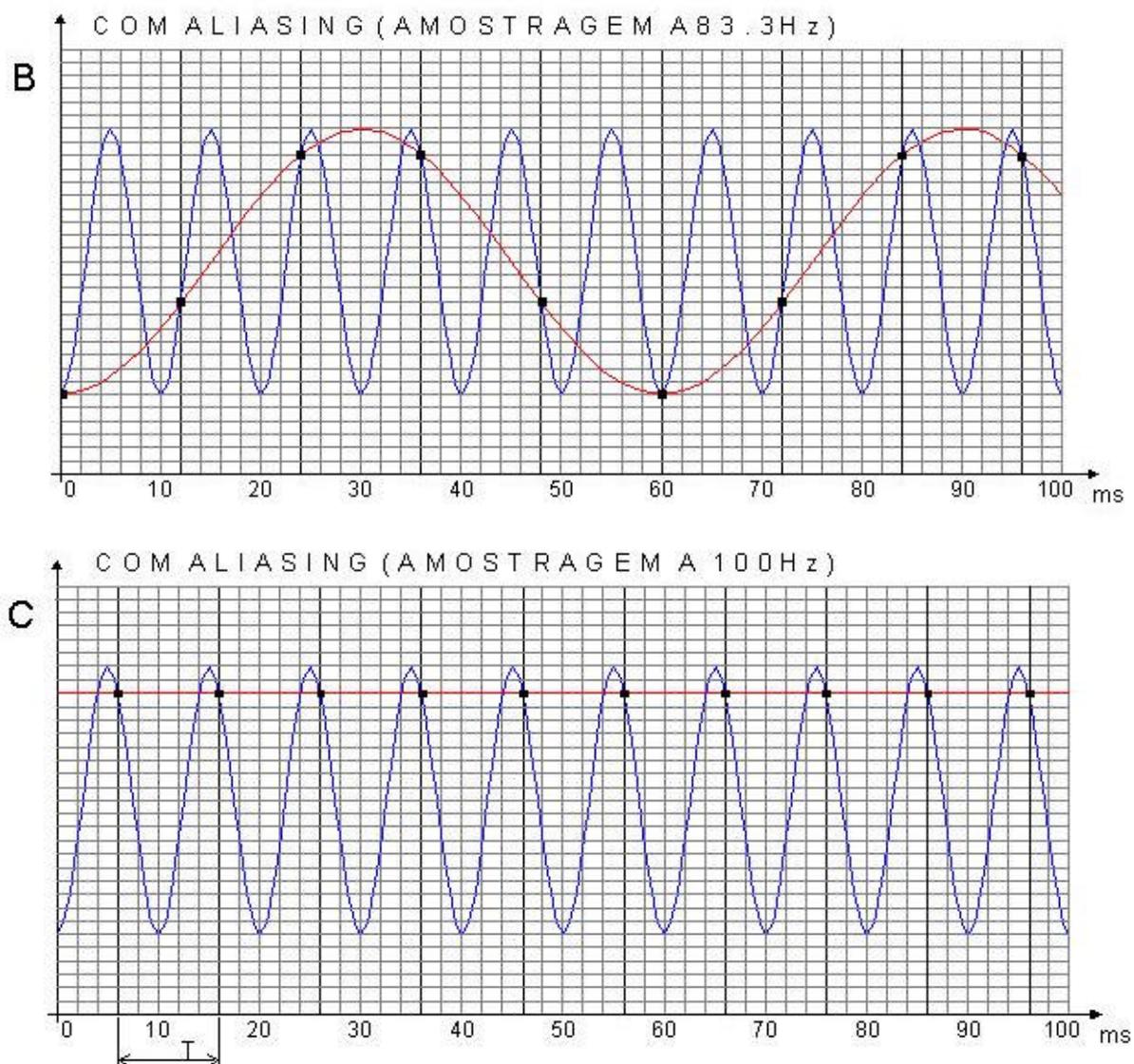


Figura B.6: Sinal senoidal de 100 Hz amostrado em diferentes taxas de amostragem. Fonte: AqDados 7.0, 2003.

Caso não se tenha certeza sobre a frequência mais alta presente no sinal, deve-se elevar a taxa de amostragem. Se taxas altas são inconvenientes (por falta de espaço para armazenamento em disco, por exemplo) utiliza-se o filtro passa baixas do amplificador ou condicionador de sinais para limitar a banda do sinal de entrada para abaixo da metade da frequência de amostragem utilizada e desta forma evitar a ocorrência de *aliasing*.

O fenômeno de *aliasing* pode ser evitado, mas não pode ser corrigido. Se um sinal é captado com *aliasing*, o sinal original não poderá mais ser recuperado. Portanto, deve-se considerar cuidadosamente estes fatores na escolha da frequência de amostragem adequada à sua aplicação.

Resumindo:

$$f_a > 2 \times f_b$$

onde,

- f_a = frequência de amostragem;
- f_b = banda do sinal (frequência mais alta presente no sinal).

No trabalho atual, utiliza-se uma frequência de amostragem igual a 500 Hz, sendo muito maior que a frequência mais alta presente no sinal que é igual a $2 \times 80 \text{ Hz} = 160 \text{ Hz}$. Deste modo, a ocorrência do fenômeno *aliasing* é descartada.

ANEXO C - TERMO DE COMPROMISSO

NOME: _____

ENDEREÇO: _____

TELEFONE: _____

Este questionário tem como objetivo determinar a aptidão do voluntário em se submeter a ensaios relacionados ao conforto humano quanto à vibração. Este ensaio faz parte de uma pesquisa desenvolvida pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PROPEC) da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), fazendo parte da dissertação de mestrado “*Curvas de Percepção e Conforto Humano para Vibrações Verticais*”, de responsabilidade do mestrando Cristiano Cária Guimarães Pereira, com orientação do Professor Dr. Francisco de Assis das Neves. Todas as medidas para garantir a segurança dos voluntários serão tomadas, não havendo risco à saúde dos mesmos.

A fidelidade das respostas é muito importante para a pesquisa, sendo as informações de uso exclusivo dos pesquisadores, mantendo-se, desta forma, total sigilo sobre o seu conteúdo.

Sexo: () M () F Profissão: _____

Idade: _____ anos; Altura: _____ m; Peso: _____ kg;

Apresenta doenças cardiovasculares?

() SIM – Especifique: _____

() NÃO

() NÃO SEI

Apresenta doenças respiratórias?

() SIM – Especifique: _____

() NÃO

() NÃO SEI

Apresenta doenças gastro-intestinais?

() SIM – Especifique: _____

() NÃO

() NÃO SEI

Apresenta doenças genito-urinárias?

() SIM – Especifique: _____

() NÃO

NÃO SEI

Apresenta doenças ou deficiências musculares ou esqueléticas?

SIM – Especifique: _____

NÃO

NÃO SEI

Apresenta doenças ou problemas relacionados ao sistema nervoso?

SIM – Especifique: _____

NÃO

NÃO SEI

História de trauma ou cirurgia recentes?

SIM – Especifique: _____

NÃO

Apresenta algum tipo de prótese?

SIM – Especifique: _____

NÃO

Faz uso de medicamentos controlados?

SIM – Especifique: _____

NÃO

Somente para mulheres.

Está grávida?

SIM

NÃO

Ouro Preto ____/____/_____

Assinatura: _____

ANEXO D – PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DE INSTRUMENTOS SÍSMICOS

Um esquema de um instrumento sísmico típico está apresentado na Figura D.1. A massa está conectada paralelamente entre um arranjo de molas e amortecedores dentro de um compartimento. Este compartimento é então conectado na fonte de vibração a ser medida. A massa tende a permanecer fixa em sua posição tal que o movimento vibracional é registrado como um deslocamento relativo entre a massa e o comportamento. Este deslocamento é então indicado por um transdutor apropriado, como mostrado no diagrama esquemático da Figura D.2. Evidentemente, a massa sísmica não permanece absolutamente em repouso, mas para intervalos de frequência específicos, esta pode dispor-se em uma posição de referência satisfatória.

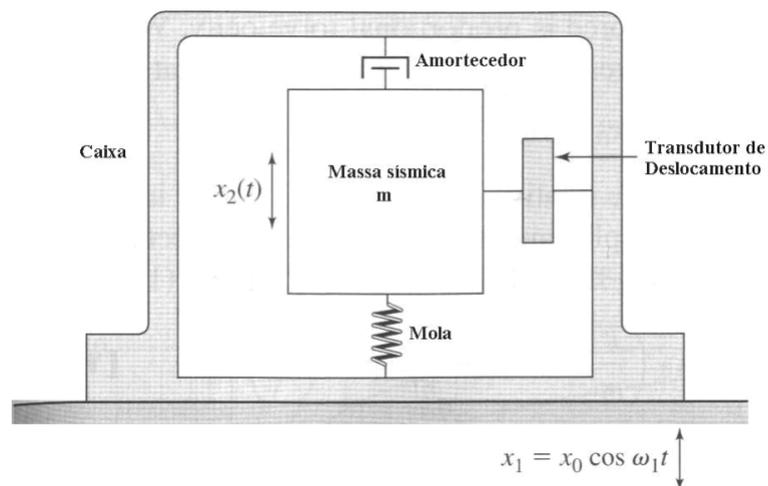


Figura D.1: Esquema de um instrumento sísmico típico. Fonte: Holman, 2001.

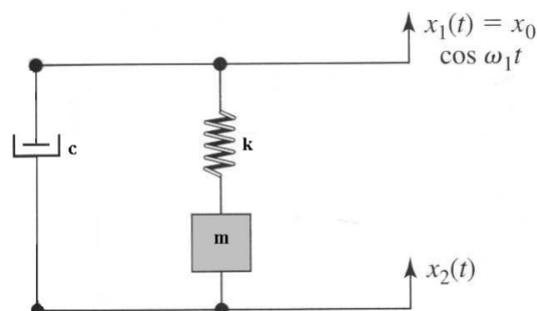


Figura D.2: Sistema mecânico de um instrumento sísmico. Fonte: Holman, 2001.

O instrumento sísmico pode ser usado tanto para medidas de deslocamento ou aceleração por uma seleção apropriada das combinações da massa, mola e amortecimento. Em geral, uma massa grande e uma mola com baixa rigidez são desejadas para medidas de deslocamento, enquanto que uma massa relativamente pequena e uma mola rígida são usadas para medidas de aceleração. Isto será mostrado na discussão teórica que se segue.

Usando a Segunda Lei de Newton pra analisar o sistema mecânico da Figura D.2, temos:

$$m \frac{d^2 x_2}{dt^2} + c \frac{dx_2}{dt} + kx_2 = c \frac{dx_1}{dt} + kx_1 \quad (D.1)$$

Assume-se que um movimento vibratório harmônico é imposto ao instrumento, tal que:

$$x_1 = x_0 \cos(\omega_1 t) \quad (D.2)$$

Com isso, procuramos obter uma expressão para o deslocamento relativo ($x_2 - x_1$) em termos deste movimento imposto. O deslocamento relativo é detectado por um transdutor mostrado na Figura D.1. Reescrevendo a Equação D.1 e substituindo na Equação D.2, temos:

$$\frac{d^2 x_2}{dt^2} + \frac{c}{m} \frac{dx_2}{dt} + \frac{k}{m} x_2 = x_0 \left[\frac{k}{m} \cos(\omega_1 t) - \frac{c}{m} \omega_1 \sin(\omega_1 t) \right] \quad (D.3)$$

A solução da Equação D.3 é:

$$x_2 - x_1 = e^{-(c/2m)t} [A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t)] + \frac{m x_0 \omega_1^2 \cos(\omega_1 t - \phi)}{[(k - m\omega_1^2)^2 + c^2 \omega_1^2]^{1/2}} \quad (D.4)$$

Onde a frequência é dada por:

$$\omega = \left[\frac{k}{m} - \left(\frac{c}{2m} \right)^2 \right]^{1/2} \quad \text{para } c/c_c < 1,0 \quad (D.5)$$

E o ângulo de fase dado por:

$$\phi = \text{tg}^{-1} \left(\frac{c\omega_1}{k - m\omega_1^2} \right) \quad (D.6)$$

A e B são constantes de integração determinadas através das condições iniciais.

A Equação D.4 possui dois termos: (1) o termo transiente envolvendo a função exponencial e (2) o termo permanente. Após o desaparecimento do termo transiente, o movimento harmônico permanente é estabelecido conforme o segundo termo da equação. A frequência deste movimento permanente é a mesma do movimento imposto ao sistema, e a magnitude vale:

$$(x_2 - x_1)_0 = \frac{x_0 \left(\frac{\omega_1}{\omega_n} \right)^2}{\left\{ \left[1 - \left(\frac{\omega_1}{\omega_n} \right)^2 \right]^2 + \left[2 \left(\frac{c}{c_c} \right) \left(\frac{\omega_1}{\omega_n} \right) \right]^2 \right\}^{1/2}} \quad (\text{D.7})$$

Onde a frequência natural ω_n e o coeficiente de amortecimento crítico c_c são:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (\text{D.8})$$

$$c_c = 2\sqrt{mk} \quad (\text{D.9})$$

O ângulo de fase também pode ser escrito como:

$$\phi = \text{tg}^{-1} \frac{2 \left(\frac{c}{c_c} \right) \left(\frac{\omega_1}{\omega_n} \right)}{1 - \left(\frac{\omega_1}{\omega_n} \right)^2} \quad (\text{D.10})$$

A Equação D.7 está plotada na Figura D.3. Pode ser visto que a amplitude de saída é muito próximo à amplitude de entrada quando $c/c_c=0,7$ e $\omega_1/\omega_n>2$. Para valores baixos da taxa de amortecimento, a amplitude pode tornar-se muito grande. A saída torna-se praticamente uma função linear para razões de frequências altas. Portanto, instrumentos para medida de deslocamento deveriam ser utilizados para movimentos com frequências substancialmente mais altas que sua frequência natural. As constantes do instrumento c/c_c e ω_n devem ser conhecidas ou obtidas da calibração. A precisão da medida pode então ser calculada para várias frequências.

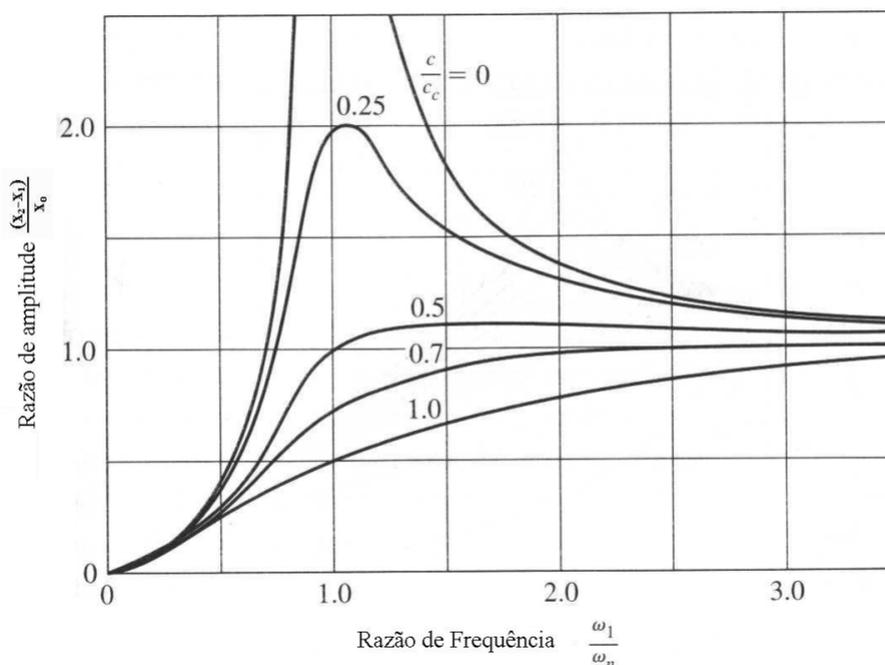


Figura D.3: Resposta de um instrumento sísmico em termos do deslocamento dado pela Equação D.7. Fonte: Holman, 2001.

A amplitude de aceleração da vibração de entrada é:

$$a_0 = \left(\frac{d^2 x_1}{dt^2} \right)_0 = \omega_1^2 x_0 \quad (D.11)$$

Portanto, pode-se usar a medida de saída do instrumento como uma medida de aceleração. Existem problemas associados com esta aplicação. Na Equação D.7, o termo entre parênteses é o que governa a linearidade da resposta em aceleração desde que ω_n seja fixo para um dado instrumento. Na Figura D.4 tem-se uma plotagem de

$$\frac{(x_2 - x_1)_0 \omega_n^2}{a_0} \text{ versus } \frac{\omega_1}{\omega_n}$$

que indica a resposta em aceleração adimensional. Portanto, medindo-se $(x_2 - x_1)_0$, pode-se calcular a aceleração de entrada a_0 . Geralmente, resultados insatisfatórios são observados em razões de frequência acima de 0,4. Desta forma, para medidas de aceleração, procura-se operar em frequências muito menores que a frequência natural do instrumento, em contraste com as medidas de deslocamento. Com isso, os instrumentos para medida de deslocamento devem ter frequências naturais baixas (molas pouco rígidas e grande massa) e os instrumentos para medida de aceleração devem ter frequências naturais altas (molas rígidas e massa

pequena) para serem aptos a operar sobre um amplo intervalo de frequências e ainda fornecerem respostas lineares.

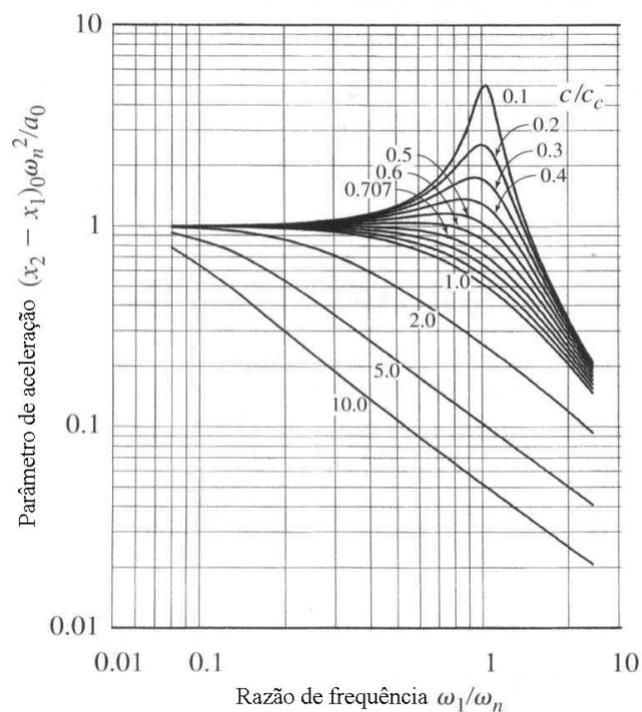


Figura D.4: Resposta em termos da aceleração de um instrumento sísmico para uma entrada harmônica de frequência ω_1 como dado pela Equação D.11. Fonte: Holman, 2001.

ANEXO E – TESTE DE HIPÓTESE DE U MANN-WHITNEY

O teste de hipótese trata-se de uma técnica para se fazer interferência estatística. Ou seja, a partir de um teste de hipóteses, realizado com os dados amostrais, pode-se interferir sobre a população. Formula-se uma hipótese quanto ao valor do parâmetro populacional, e pelos elementos amostrais faz-se um teste que indicará a aceitação ou rejeição da hipótese formulada.

Hipótese Estatística

Trata-se de uma suposição quanto ao valor de um parâmetro populacional, ou quanto à natureza da distribuição de probabilidade de uma variável populacional. Um exemplo de hipótese estatística:

- A altura média da população brasileira é 1,65 m, isto é $H_0: \mu = 1,65$ m.

Teste de Hipótese

É uma regra de decisão para aceitar ou rejeitar uma hipótese estatística com base nos elementos amostrais. Designa-se por H_0 , chamada hipótese nula, a hipótese estatística a ser testada, e por H_1 a hipótese alternativa. A hipótese nula expressa uma igualdade, enquanto a hipótese alternativa é dada por uma desigualdade.

Exemplo:

$H_0: \mu = 1,65$

Dará origem a um teste bicaudal.

$H_1: \mu \neq 1,65$

$H_0: \mu = 1,65$

$H_1: \mu > 1,65$

Dará origem a um teste unicaudal à direita.

$H_0: \mu = 1,65$

$H_1: \mu < 1,65$

Dará origem a um teste unicaudal à esquerda.

Tipos de Erro

Há dois tipos possíveis de erro ao testar uma hipótese estatística. Pode-se rejeitar uma hipótese quando ela é, de fato, verdadeira, ou aceitar uma hipótese quando ela é, de fato, falsa. A rejeição de uma hipótese verdadeira é chamada “erro tipo I”. A aceitação de uma hipótese falsa constitui um “erro tipo II”.

As probabilidades desses dois tipos de erros são designados, respectivamente por α e β .

A probabilidade α do erro tipo I é denominada “nível de significância” do teste.

Os possíveis erros e acertos de um teste estão sintetizados na Tabela E.1:

Tabela E.1: Tipos de erros de um teste de hipótese.

		Realidade	
		H ₀ verdadeira	H ₀ falsa
Decisão	Aceitar H ₀	Decisão correta (1- α)	Erro tipo II (β)
	Rejeitar H ₀	Erro tipo I (α)	Decisão correta (1- β)

Observe que o erro tipo I só poderá ser cometido se se rejeitar H₀, e o erro tipo II, quando se aceitar H₀.

O tomador de decisão deseja, obviamente, reduzir ao mínimo as probabilidades dos dois tipos de erros. Infelizmente, esta é uma tarefa difícil, porque, para uma amostra de determinado tamanho, a probabilidade de se incorrer em um erro tipo II aumenta à medida que diminui a probabilidade do erro tipo I, e vice-versa. A redução simultânea dos erros poderá ser alcançada pelo aumento do tamanho da amostra.

Teste de U Mann-Whitney

È usado para testar se duas amostras independentes foram retiradas de populações com médias iguais. O teste U Mann-Whitney não exige nenhuma consideração sobre as distribuições populacionais e suas variâncias. Este teste pode ser aplicado para variáveis intervalares ou ordinais e segue o seguinte procedimento:

- Considerar n_1 = número de casos do grupo 1 e n_2 = número de casos do maior grupo.

- b) Organizar os dados dos dois grupos em ordem crescente, numerando-os de 1 até $N = n_1 + n_2$.
- c) Calcular $P_1 =$ soma dos postos do grupo n_1 .
 $P_2 =$ soma dos postos do grupo n_2 .
- d) Teste: H_0 : não há diferença entre os grupos.
 H_1 : há diferença.
- e) Fixar α e determinar $Z_{\alpha/2}$. Exemplo: $\alpha=0,05 \rightarrow Z_{\alpha/2}=1,96$.
- f) Obter os parâmetros U que representa o parâmetro de Mann-Whitney, μ que é a média dos valores da amostra e σ que representa o desvio padrão dos valores da amostra.

$$U = n_1 \cdot n_2 + \frac{n_1(n_1 + 1)}{2} - P_1$$

$$\mathbf{m} = \frac{(n_1 \cdot n_2)}{2}$$

$$\mathbf{s} = \sqrt{\frac{n_1 \cdot n_2 (n_1 + n_2 + 1)}{12}}$$

$$z = \frac{U - \mathbf{m}}{\mathbf{s}}$$

- g) Conclusão:

Se $-Z_{\alpha/2} \leq z \leq Z_{\alpha/2}$, não se pode rejeitar H_0 .

Se $z > Z_{\alpha/2}$ ou $z < -Z_{\alpha/2}$, rejeita-se H_0 , concluindo, com risco α , que há diferença entre os grupos.

ANEXO F – CARACTERÍSTICAS DOS EQUIPAMENTOS

Neste anexo são fornecidas as principais características dos equipamentos utilizados na montagem experimental, desde a geração do movimento vibratório até a aquisição dos dados. A Tabela F.1, F.2 e F.3 apresentam as características do excitador eletromagnético, do amplificador de sinais e dos acelerômetros resistivos. A Figura F.1 apresenta o efeito da temperatura sobre a resposta em frequência do acelerômetro.

Tabela F.1: Características do excitador mecânico.

Modelo	4809
Fabricante	Bruel & Kjaer
Capacidade	45,5 N/pico
Intervalo de frequência	10 Hz a 20 kHz
Frequência de ressonância axial	20 kHz
Máxima aceleração sem carga	736 m/s ² /pico
Máxima corrente de entrada	5 A r.m.s

Tabela F.2: Características do amplificador de sinais.

Modelo	2706
Fabricante	Bruel & Kjaer
Corrente limite	5 A r.m.s
Intervalo de resposta	10 Hz até 20 kHz
Distorção	< 0.2%
Atenuador	0 até 40 dB
Controle de ganho	0 até - ∞ dB logarítmico
Temperatura de trabalho	5 a 40 °C

Tabela F.3: Características dos acelerômetros resistivos.

Modelo	ASW-10A
Fabricante	KYOWA
Resposta em frequência	0 – 280 Hz
Capacidade	10 G
Razão de Saída	$\frac{614mV/V}{1228 \times 10^{-6}}$
Não-linearidade	1,00 %RO
Constante de calibração	$\frac{0,01629 G/1mV/V}{0,008143 G/1 \times 10^{-6}}$
Temperatura de trabalho	25 °C
Resistência de entrada e saída	122,6Ω
Umidade	60%

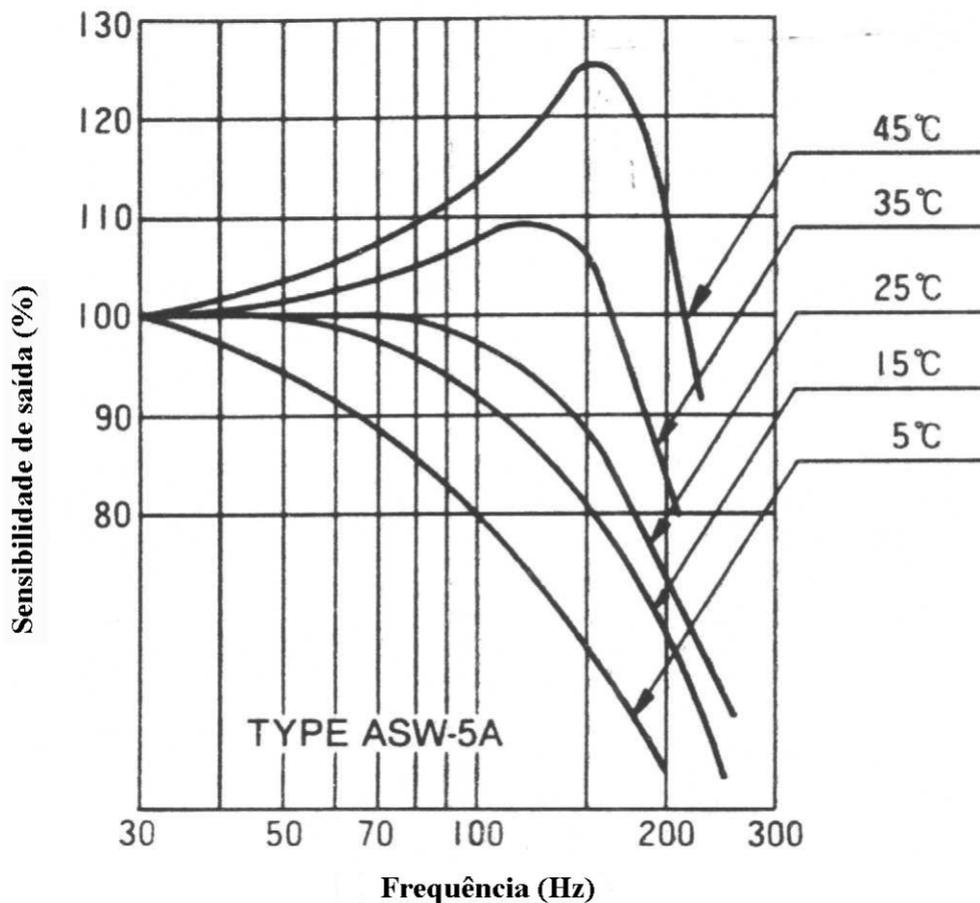


Figura F.1: Efeito da temperatura sobre a resposta em frequência do acelerômetro. Fonte: Kyowa.

O sistema de aquisição de dados utilizado é o ADS2000 IP da Lynx Tecnologia Eletrônica. As características deste equipamento estão apresentadas nas Tabelas F.4 e F.5.

Tabela F.4: Características do sistema de aquisição de dados - Controladores de aquisição.

Controladores de aquisição	AC2122
Interface	IP(Ethernet)
Conversor A/D	
Resolução	16 bits
Quantidade de canais	16 simples
Tempo de conversão	12,5 μ s
Conversor D/A	
Quantidade x resolução	N.D.
Tensão de saída	
Entradas/saídas digitais	8e/8s/TTL
Entradas de pulsos	6 ^{opc} (ct/f _{MD} /f _{pp})
Interrupção	NA.
DMA	N.A.

Tabela F.5: Características do sistema de aquisição de dados – Condicionadores de sinais.

Condicionadores de sinais	AI2164
Família	ADS2000
canais	8/16
Tipo de entrada	V,I, ponte R, tp, pot
Ganhos	1 a 5000, seq 1/2/5 (ssw)
Filtros	3/30/100/1k/3kHz (ssw)
Alimentação de sensores	0,125/2,5/57,5/10 V
Balanço	Ssw
Shunt cal	3 para terra/Vexc (ssw)
Isolação galvânica	N.D.

Legenda:

OPC: opcional N.A.: não aplicável N.D.: não disponível ssw: selecionável por programa

ct: contagem f_{MD} : frequência média f_{PP} : frequência período a período