

## Conforto humano e limites de percepção para vibrações verticais

Cristiano Caria Guimarães Pereira

UFOP - Escola de Minas - Departamento de Engenharia Civil  
Mestrado em Construção Metálica  
E-mail: cristianocarria@yahoo.com.br

Francisco de Assis das Neves

UFOP - Escola de Minas - Departamento de Engenharia Civil  
CEP 35400-000, Ouro Preto, MG, Brasil  
E-mail: fassis@em.ufop.br

### Resumo

Esse trabalho apresenta um estudo sobre os níveis de vibrações relacionados à percepção e ao conforto humano. Portanto o objetivo principal desse trabalho é gerar curvas de percepção e conforto humano quanto à vibração através de experimentos de laboratório. As respostas para vibração vertical senoidal de 30 voluntários (15 homens e 15 mulheres) são determinadas para frequências no intervalo de 12 a 80 Hz. O primeiro experimento tem por objetivo a determinação do limite de percepção à vibração, realizando-se, também, uma análise sobre o intervalo de incerteza das respostas. O segundo experimento corresponde à determinação da relação entre o limite de conforto e o de percepção, considerando-se ambientes residenciais. Uma análise sobre o efeito da postura também é realizada. Não foram encontradas diferenças significativas entre os resultados para homens e mulheres. Para o limite de percepção, os resultados se apresentam em conformidade com a norma internacional ISO 2631/2 (1989) para a postura sentada, ocorrendo diferenças significativas para a postura em pé. Os resultados para o limite de conforto em ambientes residenciais se apresentam entre 2 a 4 vezes superiores ao limite de percepção.

**Palavras-chave:** vibração, limite de percepção, conforto humano.

### Abstract

*This work presents a study on vibration levels in connection with human comfort and perception. The main objective here was to experimentally generate human-comfort and perception curves as a function of vertical sinusoidal vibrations. Thirty volunteers (15 men and 15 women) and a frequency range varying from 12 to 80 Hz were considered in the experiments. The goal of the first experiment was to determine the vibration-perception limits. Also measured was the uncertainty interval of the analysis. The second experiment was related to the determination of the relation between the perception and comfort limit, taking into account residential areas. The effects of posture on the results are also investigated. No significant differences were found between the results for men and women. Furthermore, the perception limit for seated persons is in accordance with the ISO 2631/2 (1989). On the other hand, significant differences were found for the standing posture. The results for the human-comfort limit in residential areas are found to be 2 to 4 times greater than the experimentally measured perception limit.*

**Keywords:** vibration, perception limits, human comfort.

## 1. Introdução

Através da grande evolução tecnológica no campo da engenharia estrutural nos últimos anos, com emprego de novos materiais e o desenvolvimento de avançadas técnicas construtivas, as estruturas têm se tornado cada vez mais leves e esbeltas. O significativo crescimento da utilização da estrutura metálica, nas edificações, é um exemplo típico dessa tendência.

As estruturas metálicas apresentam inúmeras vantagens, tais como a fabricação 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; e facilidade de construção. No entanto, apresentam desvantagens no que diz respeito ao seu comportamento dinâmico.

As construções com estruturas metálicas, normalmente, possuem uma alta transmissibilidade de vibrações, devido, tanto ao seu baixo fator de amortecimento, quanto ao valor em que se encontra a razão entre a frequência de excitação a que estão submetidas e a frequência natural do sistema. Assim, devido a sua relação entre massa e rigidez, as frequências naturais das estruturas metálicas são, normalmente, inferiores às encontradas em estruturas de concreto. Esse fato deixa essas estruturas mais suscetíveis a uma série de carregamentos dinâmicos, já que suas frequências naturais passam a ficar cada vez mais próximas às frequências de excitação mais comuns, como atividades humanas, tráfego de veículos, vento, etc. 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 dessas edificações.

Desse modo, os problemas relacionados ao conforto humano quanto à vibração, em ambientes construídos, têm ganhado importância nos últimos anos. Assim, esse trabalho tem como principal objetivo estudar a influência da vibração sobre a percepção e conforto humano.

Os limites de percepção à vibração e os níveis que causam desconforto às pessoas são medidos através de experimentos em laboratório, gerando-se curvas de conforto humano, baseado nos critérios de vibração, semelhantes às aquelas encontradas na norma internacional ISO 2631/2 (1989). A norma ISO 2631/2 (1989), através das suas curvas-base, é usada como referência pelos guias de projeto para avaliação do conforto humano devido a vibrações de pisos de edificações em todo mundo, inclusive no Brasil. Sendo assim, pretende-se verificar sua concordância para uma amostra da população brasileira. 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.

## 2. Metodologia

### 2.1. Amostra Utilizada

Um total de 30 voluntários, sendo 15 homens e 15 mulheres, participam dos experimentos realizados nesse trabalho. A duração média de cada experimento encontra-se em torno de 10 minutos. Embora se saiba que a temperatura, entre outros fatores, tenha influência sobre a sensação de conforto humano, o seu efeito não foi estudado com maior profundidade. A temperatura ambiente variou de 18 a 25°C durante a realização dos experimentos. As características da amostra utilizada nesse experimento

quanto à altura, ao peso e faixa etária se encontram nas Tabelas 1 a 3.

### 2.2 Montagem experimental

A montagem experimental consiste de uma placa de aço, apoiada sobre quatro molas (ver Figura 1). 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 produzir a máxima excitação na direção vertical e evitar movimentos rotacionais.

O acoplamento entre a placa e o excitador é feita usando um cabo de aço flexível. As dimensões da placa de aço são 700 x 1000 x 6,3 mm (área de 0,7 m<sup>2</sup>). As molas helicoidais de suporte para a placa eram feitas de aço inoxidável, com as dimensões: diâmetro externo = 8,0 cm, diâmetro do fio = 6,3 mm, altura = 32 cm e passo = 2,4 cm.

Os equipamentos necessários à realização das medidas dinâmicas nos experimentos são: acelerômetro, excitador eletromagnético (B&K 4809), amplificador de sinais (B&K 2706), gerador de funções, sistema de aquisição de dados e um microcomputador com software para a análise dos dados (como mostrado, esquematicamente, na Figura 2).

Tabela 1 - Distribuição da estatura para a amostra utilizada.

Estatura (m)	Homens (%)	Mulheres (%)	Total (%)
< 1,60	0	20	10
1,60 – 1,64	6,67	53,33	30
1,65 – 1,69	0	13,33	6,67
1,70 – 1,74	33,33	6,67	20
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

A excitação senoidal é gerada utilizando um gerador de funções e transmitida ao amplificador de sinais, onde a amplitude de vibração pode ser ajustada pelos voluntários. Após ser amplificado, o sinal de vibração 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 esses dados são analisados através do programa AqDados da Lynx [(AqDados 7.0 (2003)], específico para aquisição e análise de dados.

O sistema de aquisição usado foi o ADS2000 IP da Lynx com o controlador de aquisição AC2122 (com 8 canais de entrada e 8 de saída, 16 bits de resolução e uma taxa de conversão de 12,5  $\mu$ s). As respostas foram medidas no primeiro ponto de vibração do conjunto, isto é, no centro geométrico da placa. Um acelerômetro sísmico ASW-10A da KYOWA (faixa de frequência de 0-280 Hz e faixa dinâmica de 10 G) foi usado para capturar a resposta do sinal.

### 3. Experimentos

A definição dos experimentos aqui apresentados (Pereira, 2005) tem como referência os trabalhos de Parsons e Griffin (1988) e Misael (2001). O primeiro e segundo experimentos têm como objeti-



Figura 1 - Foto da cadeira e placa de aço.

Tabela 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 3 - Distribuição por faixa etária para a amostra utilizada.

Faixa Etária (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

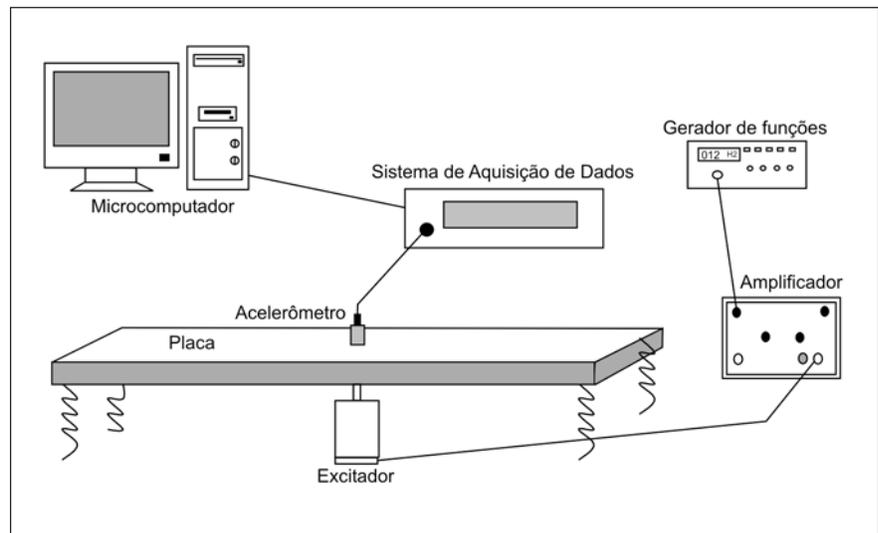


Figura 2 - Desenho esquemático da montagem experimental.

vo a aquisição de dados sobre o limite de percepção das pessoas quanto à vibração. O terceiro experimento visa à obtenção dos níveis de conforto quanto à vibração para o ambiente residencial. Somente as frequências de centro separadas por 1/3 de banda de oitava na faixa de 10 a 100 Hz (isto é, 12,5; 16; 20; 25; 31,5; 40; 50; 63 e 80 Hz) foram usadas para vibrações senoidais aplicadas na direção vertical. Adota-se o limite inferior de 10 Hz para a faixa de frequência estudada devido a limitações do excitador eletromecânico. Além disso, devido ao gerador de frequências usado, as frequências de 12,5 Hz e 31,5 Hz da faixa acima não puderam ser aplicadas, sendo usadas no lugar as frequências inteiras de 12 Hz e 32 Hz. O limite superior de 80 Hz foi adotado, porque as vibrações danosas ao organismo estão na faixa de frequências de 1 a 80 Hz e para se comparar os valores medidos com aqueles da norma ISO 2631/2 (1989), que apresenta o mesmo limite superior de frequência. Todos os resultados de aceleração apresentados a seguir estão expressos como valores RMS (raiz quadrada do valor quadrático médio), calculados a partir do sinal temporal.

Os quartis, para aquelas curvas apresentadas nos gráficos seguintes, dividem um conjunto de dados em quatro partes iguais. Assim, o primeiro quartil corresponde ao valor em que 25% dos elementos são inferiores a esse valor. Já o terceiro quartil deixa 75% dos elementos.

### 3.1 Experimento 1: Limite de percepção

Esse experimento tem como finalidade obter os níveis de aceleração perceptíveis às pessoas, ou seja, o limiar de percepção quanto à vibração (o valor mínimo de aceleração que uma pessoa pode sentir). Desse modo, os voluntários são solicitados a responderem qual o nível de vibração mínimo que podem detectar. Nas Figuras 3 e 4, apresentam-se os resultados do limite de percepção para a postura sentada e em pé.

Nos resultados obtidos, fica nítida a redução da sensibilidade das pessoas

para frequências mais elevadas. Esse 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, reduzindo-se a sensibilidade das pessoas.

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 utilizarem valores médios de respostas em experimentos. Com a utilização desses valores, ter-se-ia uma grande parcela da população com valores de sensibilidade à vibração abaixo da curva média da per-

cepção. Portanto essas pessoas estarão susceptíveis a movimentos vibratórios desconfortáveis em edificações. 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 abaixo da média dos resultados para o limite de percepção à vibração. Na Figura 5, apresentam-se os valores médios, o primeiro e terceiro quartis, juntamente com a curva básica da ISO 2631/2 (1989) para vibração vertical com as pessoas na postura sentada.

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. Desse modo, esse resultado confirma o exposto anteriormente, onde se apresenta a necessidade de se utilizarem valores mais conservadores que os resultados médios das

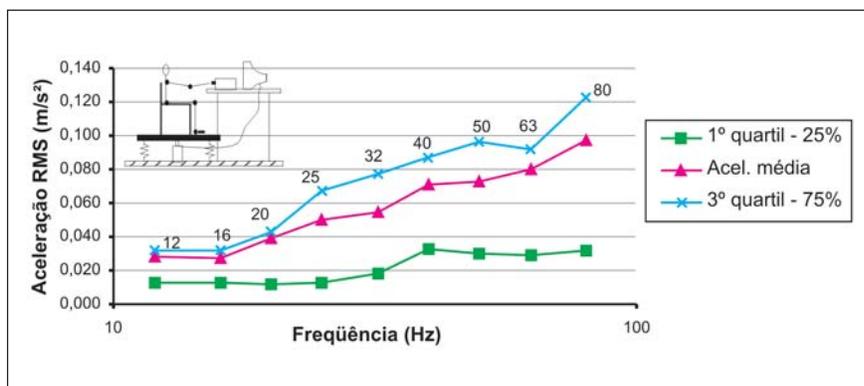


Figura 3 - Limite de percepção - Postura sentada.

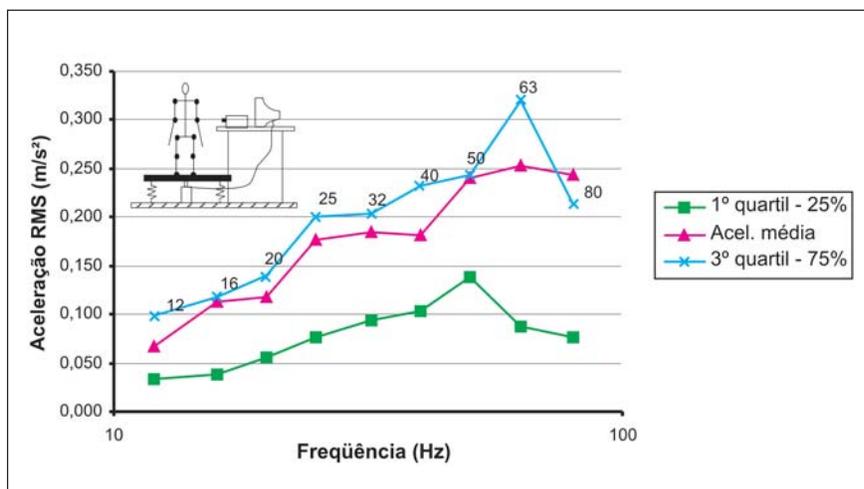


Figura 4 - Limite de percepção - Postura em pé.

respostas dos voluntários para o limite de percepção, como, por exemplo, o primeiro quartil, onde 25% dos resultados individuais estão abaixo da curva.

Na Figura 6, apresentam-se os resultados do limite de percepção para a postura em pé e sentado, onde os resultados 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. Esse comportamento pode ser atribuído a diferenças na transmissão da vibração pelo corpo para as duas posturas. Pode-se observar também, uma redução mais acentuada da sensibilidade para frequências mais elevadas para pessoas em pé que sentadas. Essa constatação está em conformidade com o trabalho de Harazin e Grzesik (1998). Esses pesquisadores demonstraram uma redução acentuada na 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.

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). Considerando-se o atendimento de 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.

### 3.2 Experimento 2: Incerteza das respostas para o limite de percepção

O objetivo desse experimento é determinar o intervalo de incerteza dos resultados encontrados no experimento anterior. Conforme Parsons e 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 a detectará. Investigações práticas realizadas pelos mesmos pesquisadores revelaram que, para uma vibração próxima do limite, os indivíduos

os, algumas vezes, registrarão que podem sentir o movimento e, algumas vezes, registrarão que não podem. Portanto existe um intervalo de incerteza nas respostas. Esse intervalo corresponde às magnitudes de vibração, onde os indivíduos nem estão certos que podem sentir a vibração, nem estão certos que não podem. Portanto esse experimento visa à identificação do intervalo de incerteza de percepção à vibração. Os voluntários são orientados a ajustarem uma magnitude de vibração vertical senoidal conforme as instruções a seguir, sendo os resultados apresentados nas Figuras 7 e 8.

**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.

Em Parsons e Griffin (1988), os voluntários deveriam responder se podiam ou não sentir a vibração. Esses pesquisadores verificaram que uma parcela das pessoas registra que não podem detectar a vibração, quando, na verdade, podem, sendo esse 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

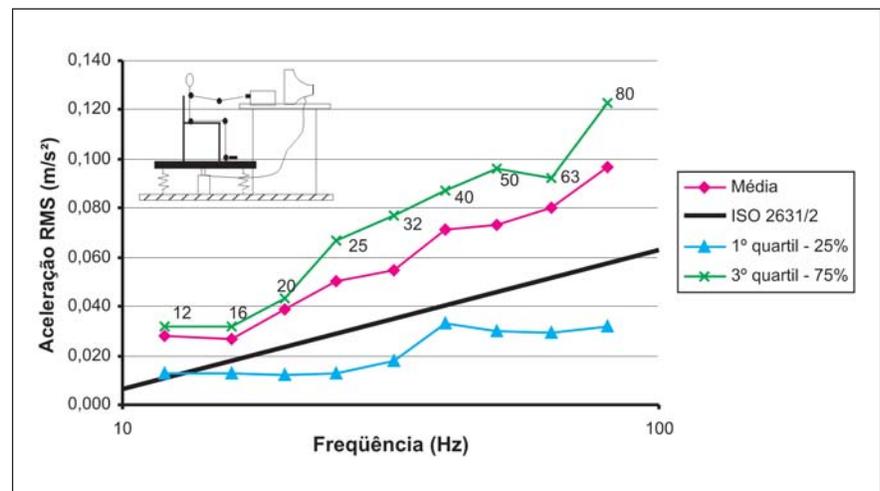


Figura 5 - Comparação entre os resultados do presente trabalho para o limite de percepção com a curva básica da ISO 2631/2 (1989).

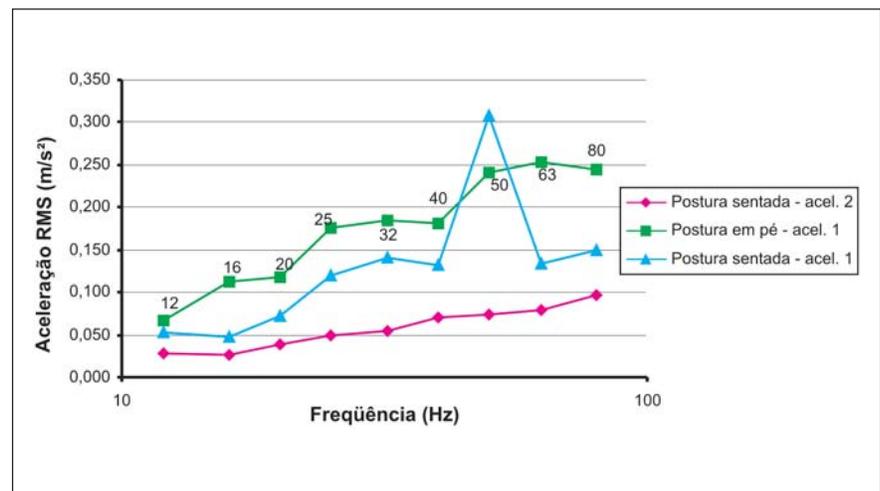


Figura 6 - Efeito da postura na sensibilidade à vibração das pessoas para o limite de percepção.

a vibração. Desse modo, em Parsons e 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 presente trabalho, é razoável admitir que uma parcela dos voluntários pode detectar a vibração mesmo quando registram que não podem. Assim, a porcentagem de indivíduos nessa 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 anterior, 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, nesse 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 anteriormente, apresentam-se os resultados nas Figuras 9 e 10, 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 sentada e 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 nesse trabalho são maiores que os apresentados pela ISO 2631/2 (1989).

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 11, apresenta-se essa curva em comparação com a curva básica da ISO 2631/2 (1989), podendo-se verificar a concordância entre os resultados para a postura sentada e vibração senoidal na direção vertical.

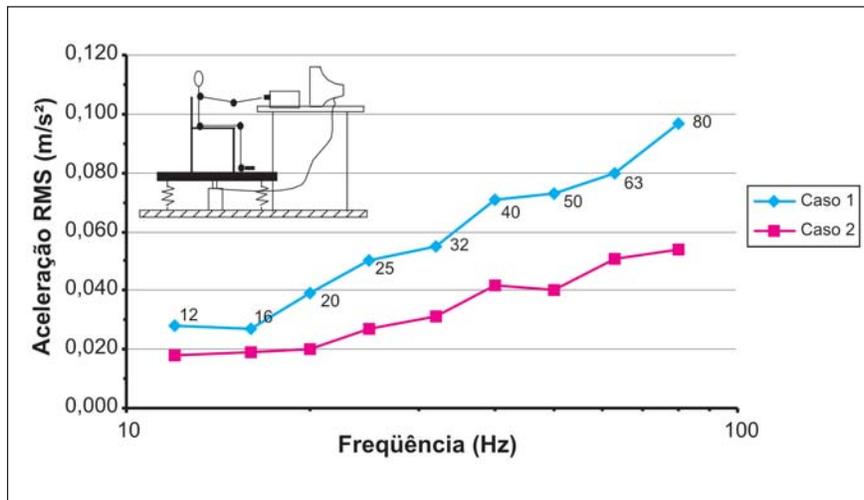


Figura 7 - Comparação entre o Caso 1 e o Caso 2 - Postura sentada.

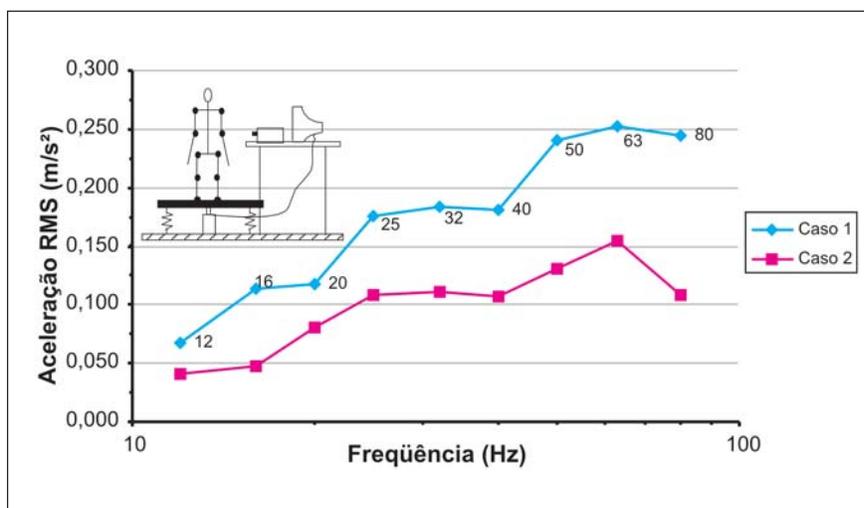


Figura 8 - Comparação entre o Caso 1 e o Caso 2 - Postura em pé.

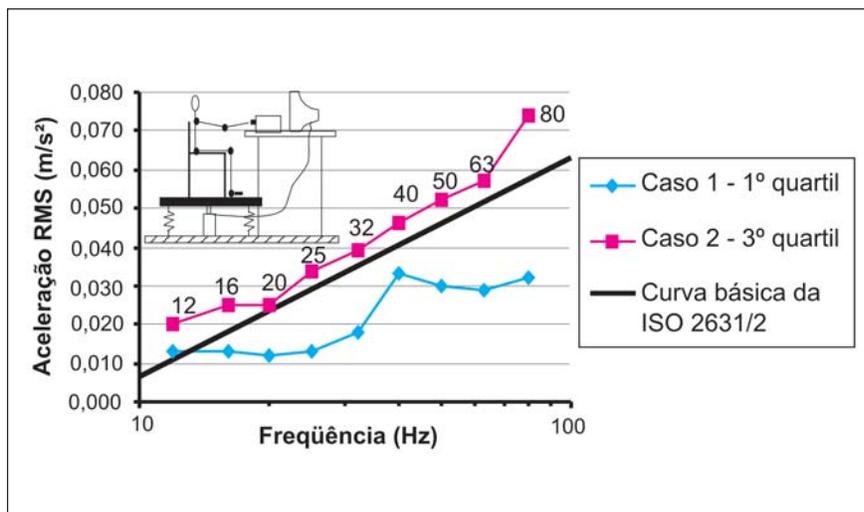


Figura 9 - Comparação do atual trabalho com a curva básica da ISO 2631/2 (1989) - Postura sentada.

### 3.3 Experimento 3: Limite de conforto

Para esse experimento, busca-se conhecer os níveis de vibração vertical senoidal que as pessoas consideram desconfortáveis em seu ambiente residencial. Assim, os voluntários são solicitados a ajustarem os níveis de vibração conforme esse objetivo. No entanto, sabe-se que as respostas obtidas nesse experimento servem apenas como uma referência, pois os voluntários não estavam realmente em seu ambiente residencial. Cada voluntário responde aos estímulos referentes ao menor nível de vibração que considera como desconfortável em seu ambiente residencial. O objetivo principal desse experimento é determinar a relação existente entre o limite de percepção e conforto. Nas Figuras 12 e 13, apresentam-se as curvas para os limites de percepção e conforto nas posturas sentada e em pé.

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. Consta-se, através das respostas dos voluntários, que, para frequências mais baixas, o desconforto é causado por vibrações de órgãos internos do corpo (massa abdominal e pulmões). Nas faixas de frequências mais elevadas, os voluntários apenas registram vibrações nos pés. Essa constatação está em conformidade com o trabalho de Harazin e Grzesik (1998), podendo-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.

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. Esse resultado está em conformidade com os valores apresentados na ISO 2631/2 (1989), especificamente para ambientes residenciais em horário diurno. No entanto, essa razão cresce com o aumento da frequência. Desse modo, não faz sentido em se utilizar um fator multi-

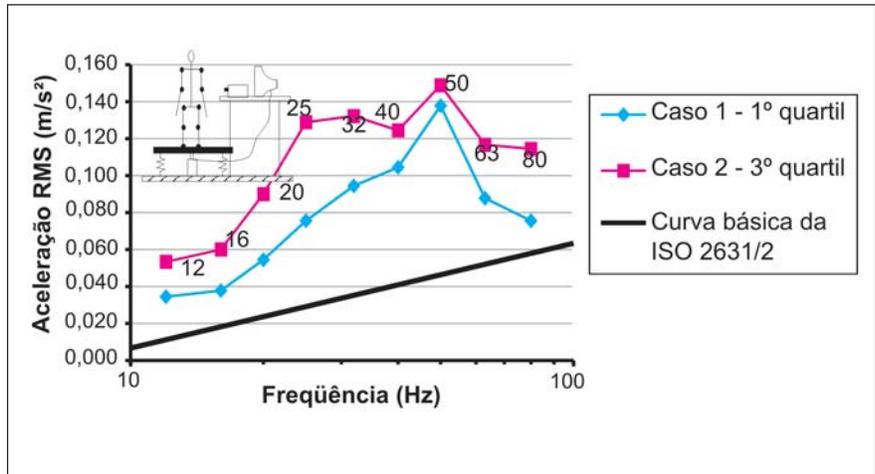


Figura 10 - Comparação do atual trabalho com a curva básica da ISO 2631/2 (1989) - Postura em pé.

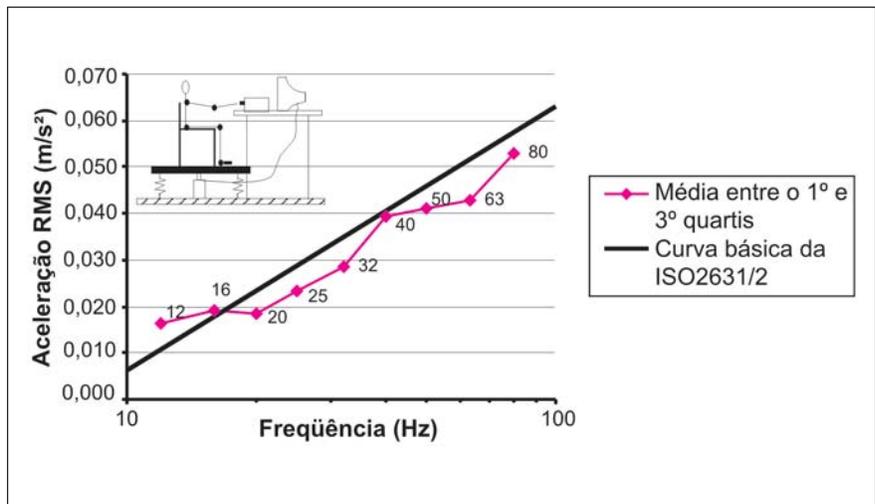


Figura 11 - Limite de percepção para o presente trabalho e a curva básica da ISO 2631/2 (1989).

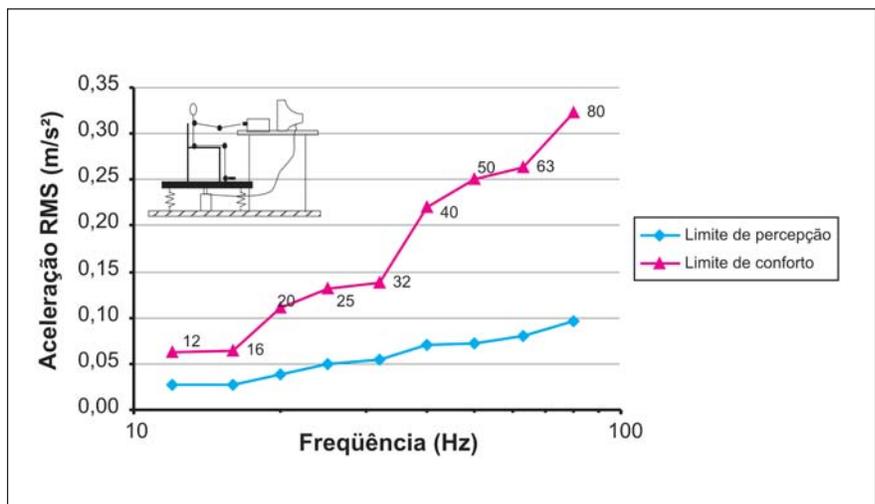


Figura 12 - Comparação entre o limite de percepção e o limite de conforto - Postura sentada.

plicativo médio para a curva de percepção de modo a se obterem curvas de conforto como ocorre na ISO 2631/2 (1989). Esse procedimento pode resultar em valores superestimados, para frequências mais baixas de vibração, e subestimados, para frequências mais elevadas.

#### 4. Conclusões

Os resultados apresentados nesse trabalho mostram que existe um intervalo de incerteza para as respostas de percepção à vibração em que as pessoas não podem afirmar com certeza se podem ou não detectar o estímulo vibratório. Deste modo, 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. No entanto, no contexto 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.

Através dos resultados para o terceiro experimento, 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 sentadas. Portanto não é indicada a utilização de um fator multiplicativo médio para a curva do limite de percepção na predi-

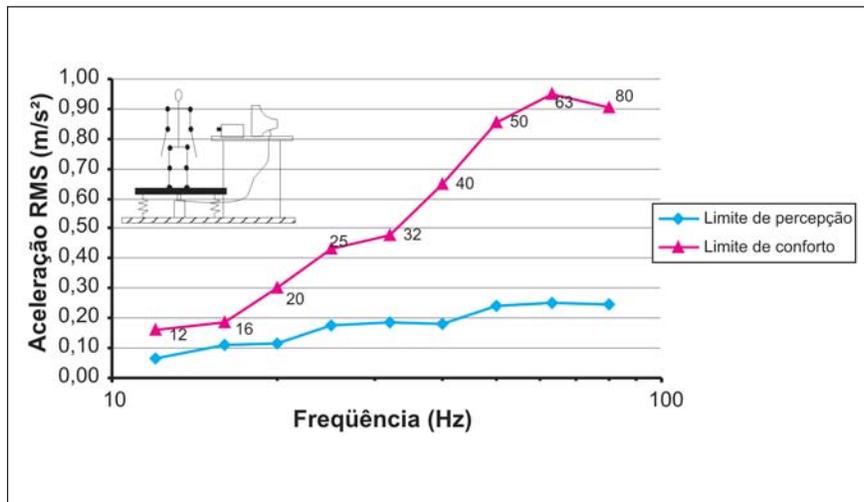


Figura 13 - Comparação entre o limite de percepção e o limite de conforto - Postura em pé.

ção 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.

#### 5. Referências bibliográficas

AqDados 7.0. Programa de Aquisição de Dados. Lynx Tecnologia Eletrônica Ltda. Manual do Usuário. 2003.

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

ISO 2631/1 (1997). Mechanical Vibration and Shock - Evaluation of Human Exposure to Whole Body Vibration - Part 1: General Requirements. Second Edition. Geneve: International Organization for Standardization.

ISO 2631/1 (1989). Evaluation of human exposure to whole body vibration - Part 2: continuous and shock-induced vibration in buildings (1 to 80 Hz). First Edition. Geneve: International Organization for Standardization.

MISAEL, M. R. Conforto humano aos níveis de vibração. Belo Horizonte: UFMG, Departamento de Engenharia Mecânica, 2001. 114p. (Dissertação de Mestrado).

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

PEREIRA, C.C.G. *Curvas de percepção e conforto humano para vibrações verticais*. Ouro Preto: Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, 2005. 149 p. (Dissertação de Mestrado).

Artigo recebido em 27/10/2005 e aprovado em 29/06/2006.

\*\*\*\*\*

**REM - Revista Escola de Minas**  
**70 anos divulgando CIÊNCIA.**

\*\*\*\*\*