

# UMA METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE O LIMIAR DE PERCEPÇÃO E O LIMIAR DE CONFORTO AOS NÍVEIS DE VIBRAÇÕES

## **Marcos Roberto Misael**

Vallourec & Mannesmann Tubes – V & M do Brasil

Av. Olinto Meireles, 65 – Barreiro, Belo Horizonte/MG, Brasil, CEP:30640-010

Fax: (0xx31) 3443-3783

e-mail: [marcos.misael@vmtubes.com.br](mailto:marcos.misael@vmtubes.com.br)

## **Maria Lúcia Machado Duarte e Luiz Eduardo de Assis Freitas Filho**

Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica

Av. Antônio Carlos, 6627 – Pampulha, Belo Horizonte/MG, Brasil, CEP:31270-901

Fax: (0xx31) 3443-3783

e-mail: [mlduarte@dedalus.lcc.ufmg.br](mailto:mlduarte@dedalus.lcc.ufmg.br) e [luized@ig.com.br](mailto:luized@ig.com.br)

***Resumo:** O avanço na utilização de estruturas metálicas em construção civil nos últimos anos tem acentuado os incômodos provenientes de vibrações, uma vez que estas normalmente possuem uma alta transmissibilidade de vibrações devido ao seu baixo fator de amortecimento. Este fato aumentou a necessidade do estudo dos níveis de vibrações associados ao conforto humano. No estudo das reações do corpo humano as excitações a que estes estão sujeitos deve-se considerar as respostas mecânicas do sistema, o efeito psicológico, físico e fisiológico do indivíduo. Os seres humanos aceitam ou toleram níveis diferenciados de vibração, sendo que essas diferenças podem estar relacionadas à variabilidade humana e também com o ambiente e a atividade desempenhada pelo indivíduo. O objetivo principal deste trabalho é apresentar uma metodologia que vise determinar a relação entre os menores níveis de vibrações que as pessoas podem sentir (limiar da percepção) e os menores níveis de vibrações que estas mesmas pessoas consideram como desconfortável para um ambiente residencial (limiar do conforto). Conclusões interessantes puderam ser obtidas, relacionando os níveis de vibração aceitáveis as frequências de ressonância de alguns órgãos do corpo humano e a transmissibilidade da montagem utilizada.*

***Palavras chaves:** Metodologia, conforto, vibração, percepção, desconfortável.*

## **1. INTRODUÇÃO**

Nos últimos anos, os projetos estruturais na construção civil têm apresentado uma notável evolução advinda do emprego de novos materiais e do desenvolvimento das tecnologias construtivas. Este fato pode ser evidenciado pelo emprego de materiais metálicos em detrimento do concreto. Prédios construídos em estrutura metálica apresentam vantagens, tanto na rapidez, quanto na facilidade de construção. Por outro lado, devido à alta transmissibilidade de vibração destes materiais, proveniente do seu baixo fator de amortecimento, estas construções podem sofrer com problemas desde sua integridade estrutural, quanto problemas relacionados com o conforto de seus ocupantes.

O aumento da velocidade atingida pelas máquinas atuais e o tráfego intenso em algumas regiões também contribuem para o aumento dos níveis de vibrações a que estas edificações estão sujeitas. Portanto, a importância atribuída a solução destes problemas tem ganhado notoriedade principalmente devido ao aumento no rigor dos padrões sanitários e na rigidez das leis ambientais, além da

crescente busca do consumidor em adquirir um produto que o satisfaça plenamente. Estes são fatores relevantes para que um estudo sobre a relação entre a vibração e o conforto das pessoas seja realizado, como este aqui apresentado.

O principal objetivo deste trabalho é apresentar uma metodologia que possa ser utilizada na determinação da relação entre o limiar da percepção e o limiar do conforto, ou seja, um estudo que vise a relação entre os menores níveis de vibrações que as pessoas podem sentir e os menores níveis de vibrações que estas mesmas pessoas consideram como desconfortável para um ambiente residencial. Experiências têm demonstrado que os critérios de aceitabilidade ou tolerância para as vibrações em construções estão um pouco acima ou sobre o limiar da percepção para a maioria dos casos (Parsons & Griffin, 1988; von Gierke & Brammer).

Este artigo está organizado da seguinte forma. A seguir, no item 2, serão apresentados os efeitos que o movimento vibratório tem sobre o corpo humano e sobre as estruturas. Em seguida, no item 3, será apresentada a metodologia experimental utilizada, incluindo informações gerais, sobre a montagem experimental, sobre a amostra utilizada e uma descrição geral sobre o experimento. No item seguinte (item 4) são fornecidas informações gerais sobre as condições dos ensaios, os resultados obtidos para a transmissibilidade entre a placa e a cadeira utilizadas (uma vez que está terá influência direta nos resultados obtidos), seguido dos resultados dos ensaios propriamente ditos. Finalmente, no último item (item 5), são apresentadas as conclusões obtidas.

## **2. OS EFEITOS DO MOVIMENTO VIBRATÓRIO**

A vibração em edifícios pode ter uma grande variedade de fontes, tais como: rodovias, ferrovias, equipamentos industriais, equipamentos domésticos, etc. Além disso, fenômenos naturais como o vento (Chang, 1973, Simiu & Scanlan, 1986), o ato de caminhar (Murray, 1981) e movimentos de academias e casas de espetáculos (Allen 1990a, 1990b) podem ser citados como fonte de vibração. Portanto é praticamente impossível que uma construção não seja atingida por tais movimentos vibratórios. Cada uma destas fontes irá produzir uma excitação específica que apresentará características diferenciadas (direção, frequência e amplitude). Conseqüentemente, o conforto dos indivíduos expostos à vibração irá variar de acordo com estas características do movimento que está sendo aplicado à construção. Em ambientes residenciais, a faixa de frequência de interesse normalmente está entre 4 e 10 Hz, onde é comum a ocorrência da frequência fundamental de painéis de lajes de maior dimensão que vibram inclusive devido a excitação produzida pelos próprios usuários. As normas ISO (ISO 2631, 1989 e 1997) apontam no sentido de uma maior sensibilidade do ser humano a vibrações nesta faixa, relacionadas ao movimento do corpo como um todo ('whole body vibration'). Já as construções industriais muitas vezes estarão expostas aos movimentos vibratórios em frequências mais altas induzidas pelos equipamentos industriais.

Algumas vezes um movimento contínuo pode ser mais irritante do que um movimento transiente (impacto) (Murray, 1981). Deve-se também considerar que, antes que estas vibrações atinjam as pessoas, elas serão amortecidas pelos componentes estruturais da construção. Portanto, a vibração sentida pelo indivíduo diferirá daquela produzida pela fonte. Deste modo, deve-se tomar cuidado ao se analisar os dados, pois resultados não representativos do objeto de estudo podem ser obtidos.

O corpo humano pode ser considerado como um sistema complexo com vários graus de liberdade e, como tal, ele não apresenta linearidade nas respostas quando exposto aos movimentos vibratórios. Portanto, ao se fazer um estudo dos efeitos causados pela vibração sobre o corpo humano deve-se levar em consideração não somente a resposta do sistema, mas também os fatores patológicos, fisiológicos e psicológicos que a energia vibratória produzirá sobre o indivíduo (Gerges, 1992).

Os efeitos da vibração têm uma relação direta com a saúde e o bem estar dos indivíduos, o que tem sido prioridade no mundo atual. Uma pessoa quando exposta à vibração de pequena intensidade (alta frequência e baixa amplitude), mas por um longo período de tempo, pode ter sua capacidade de concentração influenciada. Isto faz com que seu desempenho na realização de tarefas seja afetado. Por outro lado, quando uma pessoa é exposta por um período curto de tempo a uma vibração de grande intensidade (baixa frequência e alta amplitude), poderá sofrer com problemas de saúde, tais como dores e lesões musculares ou de órgãos internos, dentre outros (Gerges, 1992; Naval Aeros-

pace Medical Institute, 1991; von Gierke & Brammer, 1998). De acordo com Griffin (1996), ISO 2631/1 (1997) e von Gierke & Brammer (1998), a vibração somente causa danos nos indivíduos quando expostos aos movimentos vibratórios por um período muito longo e estes movimentos apresentem altas amplitudes e/ou altas frequências, o que não ocorreu no experimento aqui proposto.

A vibração pode produzir no corpo humano tanto efeitos diretos, como indiretos (Griffin, 1996). Os efeitos diretos da vibração atingem os órgãos internos do organismo, sendo dependentes da frequência fundamental dos mesmos e da amplitude do movimento vibratório. Estes efeitos estão ligados à saúde da pessoa. Já os efeitos indiretos estão relacionados com o desempenho de tarefas dos indivíduos. Tanto o efeito direto, quanto o indireto, têm influências sobre o conforto do indivíduo e podem ser extremamente graves se não forem avaliados corretamente. A Tabela 1 fornece valores de frequências de ressonância de alguns órgãos do corpo humano.

**Tabela 1: Frequência de ressonância de órgãos do corpo humano**

<b>Órgãos</b>	<b>Frequências ressonância (Hz)</b>
Cabeça	20 a 40
Parede do tórax	60
Mãos e braços <sup>2</sup>	20 a 70
Globo ocular	60 a 90

Os dados apresentados na Tabela 1 foram obtidos de Chang (1973) e von Gierke & Brammer (1998). Exceto para a parede do tórax, cujo valor foi obtido através de um modelo biodinâmico (von Gierke, 1971), todos os outros valores aparecem como uma faixa de frequência devido a um fenômeno conhecido como variabilidade (Griffin, 1995). A variabilidade pode ser tanto intra, quanto intersubjetiva. O mesmo órgão, em indivíduos diferentes, apresenta frequências de ressonâncias diferentes (intrasubjetividade). Em alguns casos, o mesmo órgão no mesmo indivíduo pode apresentar respostas diferentes em situações diferentes (intersubjetividade). Em Chang (1973), Naval Aerospace Medical Institute (1991) e von Gierke & Brammer (1998) são fornecidos alguns trabalhos dedicados aos estudos dos distúrbios provocados pela vibração em diferentes faixas de frequências, independentemente da direção e da amplitude do movimento vibratório. Seidel & Heide (1986) listam artigos que estudam os efeitos da vibração sobre vários sistemas do corpo humano.

Além dos efeitos da vibração sobre as pessoas, não se pode esquecer dos efeitos da mesma na estrutura. A vibração pode comprometer a integridade estrutural de um edifício exposto a estes movimentos. Os níveis de vibração que atingem as construções devem estar de acordo com aqueles definidos pelas normas técnicas que tratam do assunto (ISO 2631, 1989 e 1997). Estes níveis encontrados nas normas dependem do tipo de utilização dada para a construção (lazer, hospitalar, residencial, comercial, industrial, etc.) e do horário de utilização (diurno e/ou noturno).

Griffin (1996) apresenta uma lista de trabalhos e normas técnicas interessados no estudo do conforto humano relacionado a vibração. Os resultados obtidos na maioria destes estudos diferem um dos outros. Isto se deve primeiro a variabilidade humana presente nos trabalhos (Griffin, 1995), pois as características da amostra são diferentes em cada estudo. Segundo, devido a dificuldade de se repetir um ensaio com as mesmas características e condições de um outro já realizado, uma vez que poucas informações sobre estes ensaios são fornecidas.

### **3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL**

#### **3.1. Informações Gerais**

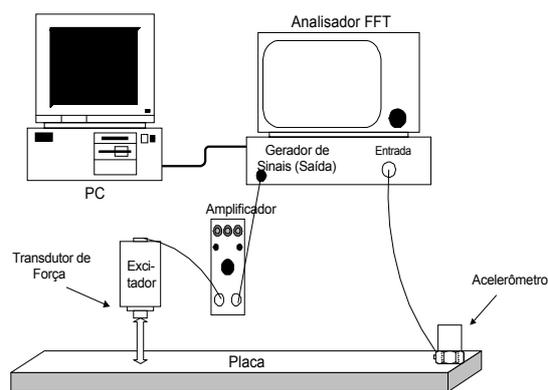
Para se obter melhores resultados, um estudo sobre a relação entre o conforto humano e a vibração deve ser realizado, sempre que possível, em um ambiente que melhor se aproxime da situação real encontrada. Geralmente estes estudos são realizados em laboratório sob condições controladas, apesar do estudo em campo ser o mais indicado. Isto porque, muitas vezes os estudos *in loco* não são possíveis devido a problemas culturais (Misael, 2001). Isto aconteceu no estudo em questão, o

que fez com que o mesmo fosse realizado sob condições laboratoriais. A principal vantagem disto foi a possibilidade de se obter um controle maior sobre as variáveis que possivelmente influenciariam nas respostas dos indivíduos quando expostos a energia vibratória. Além disso, a variabilidade e o nível sócio – cultural da amostra estudada também tiveram relevante papel nas respostas obtidas para o experimento aqui proposto. Para este trabalho, somente os efeitos das características de vibração, tais como direção, amplitude e frequência, foram estudadas.

### 3.2. Montagem Experimental

Neste experimento utilizou-se uma cadeira de madeira com encosto, sendo que os pés da mesma eram feitos de material metálico. A cadeira foi colocada sobre uma placa metálica com borda dobrada cuja dimensão era 660,0 x 950,0 x 3,0 mm. Esta placa por sua vez estava posicionada sobre quatro molas de compressão. As dimensões das molas eram: diâmetro externo ( $D$ ) = 15,0 cm; diâmetro do arame da mola ( $d$ ) = 5,0 mm e altura da mola ( $h$ ) = 36,0 cm. A posição da cadeira foi escolhida de modo que o centro de gravidade do conjunto (cadeira + pessoa) coincidissem com o centro geométrico da placa para que a excitação fosse máxima na direção vertical (eixo  $z$ ), evitando-se assim problemas de movimentos rotacionais indesejados.

Os sinais de vibração senoidal foram gerados e medidos por um analisador Hewlett-Packard, modelo HP35670A. Para a amplificação do sinal enviado ao excitador utilizou-se um amplificador de sinal B&K modelo 2706. O excitador utilizado foi um B& K, modelo 4809, cuja força máxima é 45 N. O sinal da vibração foi medido por um acelerômetro uniaxial, modelo 353B34 da PCB, cuja sensibilidade é de 96,0 mV/g e frequência de ressonância de 30 KHz. A Figura 1 mostra o desenho esquemático do sistema de medição. Já na Figura 2 é mostrada a montagem do experimento.



**Figura 1: Desenho esquemático do sistema de medição**



**Figura 2: Montagem dos equipamentos**

### 3.3. Informações Sobre a Amostra

Na maioria dos trabalhos pesquisados que relacionam conforto humano com vibração, os voluntários foram obtidos dentro do universo acadêmico. Neste trabalho não foi diferente, sendo a amostra obtida entre os indivíduos que frequentam o Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais (DEMEC-UFMG). Foi tomado o cuidado para que esta amostra fosse representativa da população de estudo e fosse o mais casuística possível para se evitar respostas viciadas. Uma maneira encontrada por Fairley & Griffin (1988) para isto foi a contratação dos voluntários. Este procedimento não foi possível neste trabalho devido a pouca verba disponível para realização do mesmo.

Os voluntários foram escolhidos após responderem a um questionário que visava verificar o seu estado de saúde, conforme procedimento recomendado por Griffin (1996). Após esta seleção, os pesquisadores informavam aos voluntários os objetivos e a metodologia do experimento, seguindo recomendação do Comitê de Ética em Pesquisa da UFMG que aprovou o trabalho (Misael, 2001).

Foi necessário a realização de um ensaio piloto composto por dez voluntários para se determinar algumas características da população (desvio padrão e erro do experimento). Ao final, utilizando-se a metodologia proposta por Triola (1999), conclui-se que amostra seria composta por 20 indivíduos, sendo 10 (dez) homens e 10 (dez) mulheres. Para determinação deste número utilizou-se a equação (1) abaixo com um intervalo de confiança igual a 95% (erro 5%), o que resulta em  $z_{\alpha/2}$  igual a 1,96.

$$n = \left[ \frac{z_{\alpha/2} \sigma}{E} \right] \quad (1)$$

Infelizmente, para o experimento aqui apresentado, este tamanho da amostra mostrou-se insuficiente para algumas das situações. Isto ocorreu devido ao alto valor do desvio padrão obtido, que foi influenciado pela variabilidade das respostas do ensaio (Misael, 2001). Entretanto, outra maneira de se determinar o tamanho de uma amostra é se tomar como base o número de indivíduos utilizados em trabalhos anteriores relacionados com a área estudada. Neste caso, a maioria dos trabalhos utilizava uma amostra com tamanho entre 08 e 40 pessoas, sendo que metade eram homens e metade mulheres. Portanto, pode-se considerar referendada o tamanho da amostra escolhida inicialmente.

Os voluntários foram obtidos de maneira aleatória, sem distinção de grupo ou classe social, sexo ou cor, e com idade entre 18 a 30 anos. Os voluntários tinham em média 22,79 anos, 1,74 metros e 68,21 quilos. É importante mencionar que nenhuma recomendação foi dada aos voluntários com relação ao tipo de roupa e sapato que deveria ser utilizado durante o experimento. Os pontos relevantes observados pelos pesquisadores foram anotados na ficha de ensaio de cada voluntário.

### 3.4. Experimento

Este experimento visava determinar a relação entre os menores níveis de vibrações que as pessoas poderiam sentir e os menores níveis de vibrações que estas mesmas pessoas considerariam como inadmissíveis para um ambiente residencial (i.e., os limites máximos aceitáveis de vibração em residências). Apesar de se saber que a vibração mais comum em residências é devido a frequência fundamental das lajes (que ocorre normalmente na faixa de 4 a 10 Hz), devido a limitação do excitador utilizado que só operava acima de 10 Hz, apenas as frequências acima deste valor foram consideradas no estudo. Isto não inviabiliza o estudo uma vez que, apesar de não serem as frequências mais comum, estas também podem estar presentes. Além disso, este experimento visava também verificar se os valores de amplitudes considerados como inaceitáveis em residências eram duas vezes os valores obtidos para o limiar da percepção, como encontrado por Parsons & Griffin (1988). Parsons somente fez a comparação para frequência de 16 Hz e aqui foram comparadas outras frequências. A comparação entre as respostas dadas por homens e mulheres também foi realizada, usando-se para isto os teste não paramétricos de *Mann – Whitney* (Spiegel & Di Franco, 1997).

Os voluntários estavam sentados em uma postura confortável e ao mesmo tempo ereta. O ajuste da amplitude foi feito pelo próprio voluntário até que se atingisse o nível desejado. O método do ajuste foi utilizado neste caso, ou seja, os voluntários ajustavam um determinado nível de amplitude de vibração de forma a produzir uma sensação a ser comparada com uma condição de referência. Este condição de referência era dada pelo menor nível de vibração que a pessoa conseguia sentir ou a máxima vibração aceitável para um ambiente residencial. Foram estudadas oito frequências pontuais (16; 20; 25; 31,5, 40; 50; 63 e 80 Hz) para a vibração senoidal na direção vertical (eixo z). Cada uma das respostas foi gravada e anotada pelos pesquisadores na ficha de ensaio de cada voluntário. A ordem de apresentação das frequências para os voluntários foi comandada pelos pesquisadores e era fornecida de forma aleatória. Os voluntários responderam aos estímulos de acordo com as seguintes situações:

- (a) O menor nível de vibração que a pessoa pode sentir;
- (b) O maior nível de vibração aceitável para um ambiente residencial;

Metade das pessoas começaram pelo caso ‘a’, enquanto a outra metade começou pelo caso ‘b’. Após a primeira bateria de testes, inverteu-se o caso ‘a’ em o caso ‘b’.

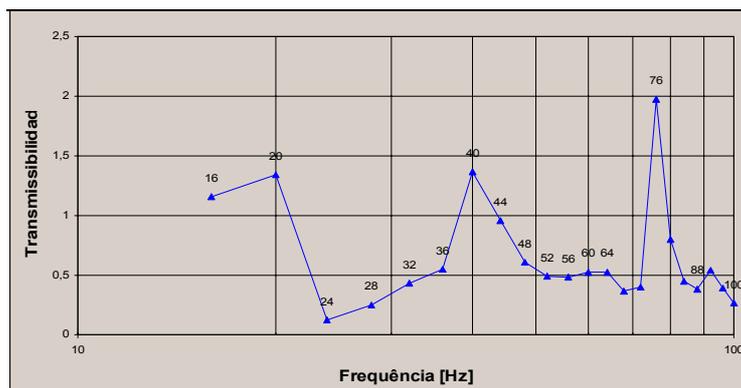
## 4. RESULTADOS

### 4.1. Informações Gerais

O experimento foi realizado no Laboratório do Grupo de Acústica e Vibração (GRAVI<sub>DEMEC</sub> – UFMG) do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais. Durante os testes, a temperatura ambiente variava de 22 °C a 30 °C. Devido a proximidade deste com a oficina mecânica do Departamento, o ruído desta sala variou de 50 dBA (quando a oficina estava inoperante) até 70 dBA (quando a oficina estava em funcionamento). O tempo médio de duração deste experimento foi de aproximadamente 15 minutos, incluindo os testes e a gravação dos dados.

### 4.2. Transmissibilidade

A transmissibilidade de vibração entre a placa e a cadeira mostrou-se muito importante durante a análise dos resultados. Esta transmissibilidade foi obtida através de ensaio aparte, com frequência de 16 a 80 Hz e incremento de 4 Hz (Misael, 2001). Dois acelerômetros foram utilizados, sendo um localizado sobre a placa e outro sobre a cadeira. Deve-se mencionar que não havia ninguém sentado na cadeira. Na entrada do sistema foi utilizado um sinal senoidal de frequência igual a 60 Hz. A função de transferência (transmissibilidade) foi obtida através da relação entre o sinal de saída e o sinal de entrada. Esta transmissibilidade foi a considerada porque devido a montagem experimental utilizada, a placa pode ser dita como sendo a fonte de excitação do sistema, apesar da fonte ser na realidade o excitador. A Figura 3 mostra o gráfico obtido para esta transmissibilidade.

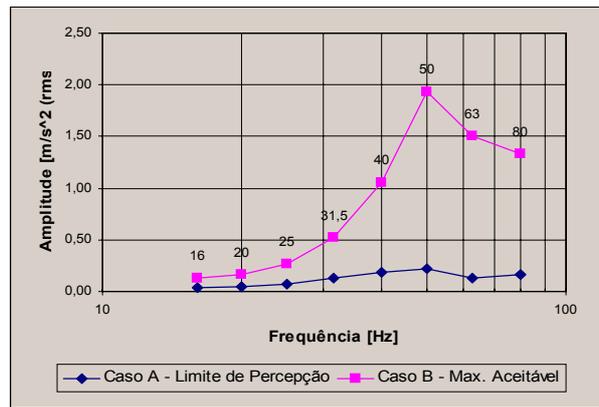


*Figura 3: Transmissibilidade entre a placa e a cadeira utilizadas*

Através da extrapolação dos valores fornecidos na Figura 3 nota-se que de 16 a 21 Hz e em torno de 40 Hz ocorre uma pequena amplificação, próxima de 1,5 vezes o sinal de entrada. Já na região próxima a 76 Hz a amplificação é maior, próxima de 2 vezes o sinal de entrada. Entre 21 e 38 Hz, entre 44 e 73 Hz e por volta de 80 Hz, o sinal de entrada é atenuado. Estes valores de transmissibilidade, que foram obtidos com o auxílio da técnica de extrapolação, influenciaram diretamente as respostas dos voluntários. Este fato poderá ser visto na próxima seção.

### 4.3. Resultados Experimentais

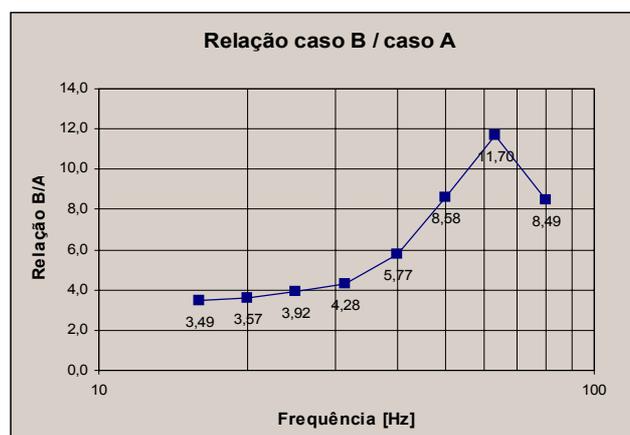
A Figura 4 mostra as respostas obtidas para os dois casos estudados, a saber, o limite de percepção das pessoas à vibração (Caso A) e o máximo de vibração que as mesmas aceitariam em seu ambiente residencial (Caso B). Pelo gráfico, caso A, nota-se que os voluntários foram mais sensíveis nas frequências inferiores. A sensibilidade diminuiu com o aumento da frequência até atingir um pico em 50 Hz. Após este valor a sensibilidade cresceu até 63 Hz e caiu novamente em 80 Hz. Esta tendência também foi encontrada por Parsons & Griffin (1988) e na norma ISO 2631 (1989).



**Figura 4: Comparação entre os limites do caso A e B**

Este comportamento pode ser explicado pelo fato de que as respostas dos voluntários foram influenciadas pelas frequências de ressonância de alguns órgãos do corpo humano e também pela transmissibilidade da montagem. As respostas para os movimentos vibratórios localizados na região entre 20 a 40 Hz foram dominadas pela frequência de ressonância da cabeça. Já em torno de 63 Hz, as respostas foram dominadas pelas frequências de ressonância da parede do tórax e do globo ocular (ver Tabela 1). Estes dois fatores fizeram com que a sensibilidade dos voluntários nestas regiões fosse mais alta. Desta maneira os indivíduos sentiram as vibrações em um nível mais baixo de amplitude. Deve-se salientar também que as medições das amplitudes de aceleração eram pontuais, não cobrindo o espectro de forma contínua em todos os seus valores de frequência, i.e. as tendências aqui explicadas são referentes à frequências discretas. Já entre 40 e 63 Hz, as respostas foram influenciadas pela baixa transmissibilidade da placa, conforme pode ser visto na Figura 3. Este fato fez com que os voluntários ajustassem um alto nível de amplitude de movimento para começarem a sentir a vibração. Como o acelerômetro estava fixado em uma região onde a transferência de vibração era máxima, o sinal de vibração que este transdutor recebia era maior do que aquele que o voluntário estava sentindo.

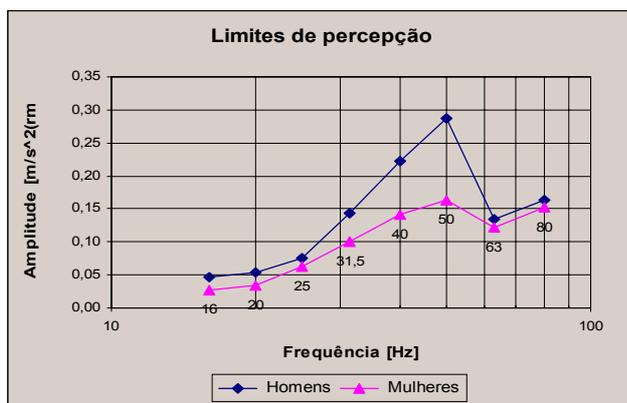
Para o caso B deste experimento, onde os voluntários deveriam ajustar a amplitude até um valor considerado por eles como uma situação de desconforto em um ambiente residencial, pode ser visto que os voluntários foram menos tolerantes para os movimentos vibratórios em baixas frequências do que para os movimentos em alta frequência. Isto pode ser explicado pelo fato de que o deslocamento do sistema foi menor em altas frequências do que em baixas frequências. Como o deslocamento é menor para altas frequências, a sensação de desconforto também foi menor. Portanto, é necessário que ocorra uma amplitude de aceleração muito grande para se ter um certo desconforto. A visão também tem influência neste caso, pois as pessoas não conseguiam perceber o movimento a que estavam sendo expostas através deste sentido.



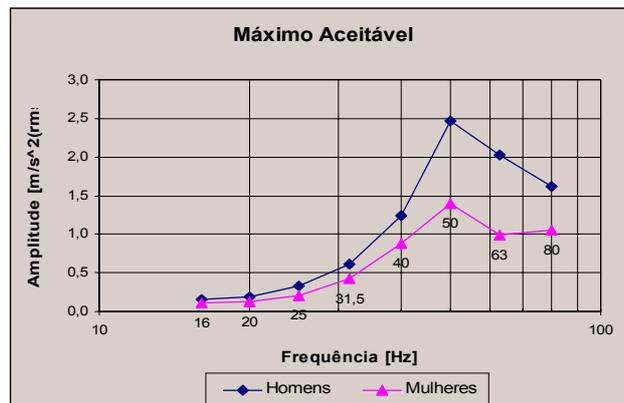
**Figura 5: Relação entre as respostas do caso A e o caso B**

Na Figura 5 são apresentadas as relações entre os dois casos. Esta relação aumentou com o aumento da frequência até atingir um pico em 63 Hz, depois caiu. Isto mostra que com o aumento da frequência os voluntários tornaram-se mais tolerantes. Apesar da amplitude de aceleração ter aumentado, o deslocamento do sistema diminuiu. O valor desta relação para a frequência de 16 Hz encontrado neste ensaio foi igual a 3,5, valor muito diferente daquele obtido por Parsons & Griffin. (1988), que foi igual a 2. As explicações para estas diferenças podem ser dadas por: a) as posições de medições nos dois trabalhos são diferentes, ocasionando desta maneira diferentes valores de resposta, b) os objetivos dos dois trabalhos foram diferentes, tornando o limite aceitável deste trabalho maior do que o encontrado no trabalho de Parsons e Griffin (1988).

Na Figura 6 e na Figura 7 são feitas as comparações entre as respostas dos homens e das mulheres para o caso A e caso B, respectivamente. Através da análise visual, pode-se perceber que as mulheres são mais sensíveis que os homens (Figura 6) e aceitam uma vibração com menor intensidade no ambiente residencial (Figura 7).



**Figura 6: Comparação entre os limiares de percepção (homens e mulheres)**



**Figura 7: Comparação entre os limiares da aceitação (homens e mulheres)**

Já quando se faz a análise estatística dos resultados, utilizando-se a metodologia do teste não paramétrico de *Mann – Whitney* (Spiegel & Di Franco, 1997), pode-se verificar que somente para as frequências de 16 e 20 Hz no caso A houve uma diferença significativa de 5% entre as respostas dos homens e das mulheres. Na Tabela 2 são apresentadas as comparações estatísticas entre os resultados médios obtidos para os homens e mulheres neste experimento.

**Tabela 2: Comparação entre homens e mulheres**

Frequências [Hz]	16	20	25	31,5	40	50	63	80
caso A	*	*	---	---	---	---	---	---
caso B	---	---	---	---	---	---	---	---

--- \_ não houve diferenças significativas entre as respostas dos homens e das mulheres.

\* \_ diferença para  $z_{\alpha/2} = 1,96$  (erro 5%).

## 5. CONCLUSÕES

Este trabalho tinha como principal objetivo o estudo da relação entre o limiar de percepção e o máximo nível de vibração que uma pessoa é capaz de aceitar em um ambiente residencial. Apesar de se saber que a faixa de frequência de interesse principal para estes ambientes é de 4 a 10 Hz (devido a frequência fundamental de lajes), apenas as frequências acima de 10 Hz foram utilizadas devido a limitação do excitador utilizado. Apesar destas não serem mais as comuns, podem estar presentes. Além disto, a frequência de 16 Hz foi utilizada em trabalho similar que seria comparado.

Os voluntários foram escolhidos de maneira aleatória entre os estudantes do Departamento de Eng. Mec. da UFMG. O tamanho da amostra se mostrou inadequado para o caso B (máxima vibra-

ção aceitável), devido a grande variabilidade das respostas encontradas nesta situação. Apesar disto, a amostra foi mantida, pois trabalhos semelhantes utilizaram este mesmo número de voluntários.

Os resultados mostram que os voluntários ajustaram níveis de amplitudes de aceleração menores para as frequências mais baixas. Nas frequências mais altas, os níveis de amplitude de aceleração foram maiores. Estas respostas foram influenciadas por dois fatores, a saber, frequências de ressonância de alguns órgãos do corpo e/ou a transmissibilidade entre a placa e a cadeira utilizadas na montagem.

Quando se fez a relação entre os dois casos de interesse, notou-se que esta aumentava com o aumento da frequência. Isto pode ser explicado pelo fato de que o deslocamento do sistema em altas frequências é menor do que em baixas frequências. Na comparação entre o valor da relação para 16 Hz deste experimento e aquele obtido por Parsons & Griffin (1988) na mesma frequência, nota-se que o valor aqui encontrado é maior do que o de Parson e Griffin. Isto tem relação direta com as diferenças dos dois sistemas de medições e dos objetivos dos dois trabalhos. Nem sempre experimentos similares darão a mesmas respostas, uma vez que diversas variáveis podem influenciar nas respostas, além de existir a variabilidade inter e intra pessoal presente nos resultados.

Na comparação entre as respostas dadas pelos homens e pelas mulheres viu-se que somente para as frequências de 16 Hz e 20 Hz no caso A é que houve uma diferença de 5% entre as médias das respostas. Este fato pode estar relacionado também com a variabilidade da amostra.

## NOMENCLATURA

$n$  = tamanho da amostra

$z_{\alpha/2}$  = intervalo de confiança

$\sigma$  = desvio padrão

$E$  = erro esperado para o experimento

## AGRADECIMENTOS

As agências de fomento CNPq (Conselho Nacional de Pesquisa) e FAPEMIG (Fundação de Apoio à Pesquisa de Minas Gerais), pelo pagamento de bolsas e verba para os equipamentos.

## BIBLIOGRAFIA

Allen, D. E. *Floor Vibrations Fron Aerobics*. Canadian Journal of Civil Engineering, vol. 17, no. 5, p. 771 – 779, 1990a.

Allen, D. E. *Building Vibrations Fron Humans Activities*. ACI, Concrete International, vol. 6, p. 63 – 73, 1990b.

Chang, F. –K. *Human Response to Motions in Tall Buildings*. Journal of the Structural Division, America Society of Civil Engineers, vol. 99, No. ST6, 1973.

Fairley, T. E. and Griffin, M. J. *Predicting dhe Discomfort Caused By Simultaneous Vertical and Fore-and- Aft Whole-body Vibration*. Journal of Sound and Vibration, vol. 124 (1), pp 141 – 156, 1988.

Gerges, S. N. Y. *Ruído: Fundamentos e Controle*. Primeira Edição. Biblioteca Universitária da Universidade Federal de Santa Catarina. Samir N. Y. Gerges, 1992.

Griffin M. J. *handbook of Human Vibration*. London: Academic Press, 1996.

Griffin, M. J. *The Ergonomics of Vehicle Comfort*. Third International Conference. Bologna: Vehicle Comfort and Ergonomics, 1995.

ISO – International Organization for Standardization. ISO 2631/1; *Mechanical Vibration and Shock – Evaluation of Human exposure to Whole-Body Vibration – Part 1: General Requirements*. Second Edition. Geneve: International Organization Standardization, 1997.

ISO – International Organization for Standardization. ISO 2631/2; *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 Standardization, 1989.

- Murray, T. M. *Acceptability Criterion for Occupant-Induced Floor Vibration*. Engineering Journal, American Institute of Steel Construction, 1981.
- Naval Aerospace Medical Institute. *United States Naval Flight Surgeon's Manual; Chapter 2: Acceleration and Vibration*. Third Edition. 1991.
- Parsons, K. C. and Griffin, M. J. *Whole-body Vibration Perception Thresholds*. Journal of Sound and Vibrations, vol. 121, p. 237 – 258, 1988.
- Seidel, H. and Heide, R. *Logn-term effects of whole-body vibration: a critical survey of the literature*. International Architecture Occupation Enviroment Health, vol. 58, p. 1 – 26, 1986.
- Simiu, E. and Scanlan, R. H. *Wind Effects on Structures: An Introduction to Wind Engineering; Chapter 15: Wind-Induced Discomfort in Around Buildings*. Second edition, John Wiley & Sons, p.448 – 485, 1986.
- Spiegel, M. R. And Di Franco, D. *Schaum's Outline of Theory and Problems of Statistics*. Ed. Mc Graw-Hill, Inc. and Math Soft, Inc., 1997.
- Triola, M. F. *Introdução à Estatística*. Sétima Edição. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., 1999.
- von Gierke, H. E. *Biodynamic Models and Their Applications*. Journal Acoustical Society of America. 50: 1397, 1971. apud von Gierke, H. E. and Brammer, A. J. *Shock and Vibration Handbook; Chapter 44: Effects of Shock and Vibration on Humans*. Fourth Edition. Cyril M. Harris, 1998.
- von Gierke, H. E. and Brammer, A. J. *Shock and Vibration Handbook; Chapter 44: Effects of Shock and Vibration on Humans*. Fourth Edition. Cyril M. Harris, 1998.

## **A METHODOLOGY FOR DETERMINING A RELATIONSHIP BETWEEN PERCEPTION AND COMFORT LIMITS TO VIBRATION LEVELS**

### **Marcos Roberto Misael**

Vallourec & Mannesmann Tubes – V & M do Brasil

Av. Olinto Meireles, 65 – Barreiro, Belo Horizonte/MG, Brasil, CEP:30640-010

Fax: (0xx31) 3443-3783

e-mail: [marcos.misael@vmtubes.com.br](mailto:marcos.misael@vmtubes.com.br)

### **Maria Lúcia Machado Duarte e Luiz Eduardo de Assis Freitas Filho**

Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica

Av. Antônio Carlos, 6627 – Pampulha, Belo Horizonte/MG, Brasil, CEP:31270-901

Fax: (0xx31) 3443-3783

e-mail: [mlduarte@dedalus.lcc.ufmg.br](mailto:mlduarte@dedalus.lcc.ufmg.br) e [luized@ig.com.br](mailto:luized@ig.com.br)

**Abstract.** *The growth use of steel in civil engineering structures during the last few years has accentuated the inconveniences caused by vibration. The reason for that is the high transmissibility of vibration of these structures due to their low damping factor. So, there is a increasing need for vibration studies related to human comfort. When studying the human body reactions to vibration, one has to consider not only the mechanical responses, but also the psychological, physical and physiological effects. Human beings accept or tolerate different levels of vibration due to both the human variability and also to the environment and activity developed by the subject. The objective of this paper is to present a methodology to determine the relationship between the smallest level of vibration a subject can feel (perception limit) and the smallest level of vibration that some subject consider as uncomfortable for a residential environment (comfort limit). Interesting conclusions were drawn relating the levels of acceptable vibration to the resonance frequencies of some human being organs and to the transmissibility of the setup used.*

**Keywords.** *Methodology, comfort, vibration, perception, uncomfortable*