

AVALIAÇÃO DOS NÍVEIS DE TRANSMISSIBILIDADE DE VIBRAÇÃO E PREDIÇÃO DE LESÃO NA COLUNA VERTEBRAL EM DIFERENTES MODELOS DE VEÍCULOS AUTOMOTORES

Mário Fedatto Neto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, mariofedatto@hotmail.com

Herbert Martins Gomes, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, herbert@mecanica.ufrgs.br

Matheus Madrid Moreira, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, matheusmadrid@gmail.com

Resumo. Este artigo apresenta a avaliação experimental da exposição à vibração para previsão de possíveis riscos a lesão na espinha dorsal em função da transmissibilidade de vibração do piso para o assento, em seis diferentes modelos de automóveis. Os níveis de vibração foram medidos em um circuito de pista mista, por 3,4 km, com as mesmas condições de velocidade e peso dos passageiros. Com base na análise dos resultados encontrados para os valores de transmissibilidade SEAT, para o eixo z temos que o veículo Fiat Palio Weekend obteve, com o valor de 75%, a maior atenuação de valores a serem transmitidos do piso para o banco, e consequentemente para o motorista; para o eixo x observamos que o veículo Honda HRV obteve uma melhor atenuação dos níveis de vibração transmitidos com o valor de 95%. Já analisando os valores do fator R, que indicam uma probabilidade de lesão na espinha dorsal com o passar dos anos, tem-se que o veículo Volkswagen Jetta se destaca por ser o qual mais anos levará para se chegar a níveis de exposição em que haverá risco de lesão moderado, com 61 anos de exposição, e alto, com 68 anos de exposição. Foi proposto, no decorrer do texto, um modelo matemático geral para prever o fator de risco R em função dos anos de exposição do condutor à vibração. Os critérios para realização das análises são especificados ao longo do texto. Os experimentos tiveram os cuidados e seguiram fielmente as condições para análise expostas na ISO 2631(1997).

Palavras chave: Transmissibilidade. SEAT. Vibração. Espinha dorsal. Veículos automotores.

1. INTRODUÇÃO

As compras de veículos são conduzidas pelos requisitos do consumidor, como funcionalidade, segurança, luxo, conforto, custo e desempenho. As perspectivas dos consumidores sobre o cumprimento desses requisitos são muitas vezes baseadas em percepções subjetivas. Com a contínua sofisticação da indústria automotiva e a dura concorrência entre os diversos fabricantes, é provável que os veículos, que melhor satisfaçam esses requisitos e crie uma percepção de fazê-lo, serão os mais vendidos e, portanto, mais rentáveis para os fabricantes de automóveis.

O conforto do ocupante do veículo depende do conforto estático e dinâmico. O conforto estático refere-se àquele quando o automóvel está totalmente parado, onde a experiência de conforto estático inclui tudo, desde a impressão visual ao cheiro e toque no sentar no assento. Um assento estaticamente confortável requer um mínimo esforço muscular do ocupante para manter-se na posição sentada (Griffin, 1990).

Govindswamy *et al.* (2004) já diz que o conforto dinâmico é caracterizado principalmente pelos atributos de ruído, vibração e dureza quando o veículo é conduzido. A maioria das vibrações experimentadas pelos ocupantes é transmitida ao corpo através do assento. O ambiente de vibração, a resposta dinâmica do assento e a resposta do corpo humano a essa vibração combinadas determinam o conforto dinâmico do assento. O assento ideal é aquele que minimiza a resposta indesejada de vibração no ocupante do ambiente relevante exposto à vibração (Griffin, 1990).

De acordo com Palmer *et al.* (2000) a vibração é apontada como um dos riscos ocupacionais mais comuns na indústria britânica, estritamente ligada ao surgimento de dores nas costas em motoristas profissionais. Pode-se frisar que o termo dor nas costas é usado para indicar a dor na coluna cervical, torácica e lombar, não estando relacionado com infecção, tumores, doenças sistêmicas e/ou fraturas (Balbinot e Tamagna, 2002). Chaffin *et al.* (1999) apresentam um modelo biomecânico indicando que a ressonância ocorre em diferentes frequências para diferentes pontos do sistema e observaram que exposições à vibração vertical, na faixa de 5 a 10 Hz, causam ressonância no sistema tórax-abdômen e na faixa de 20 a 30 Hz no sistema cabeça-pescoço-ombros. Panjabi *et al.* (1986) concluíram que a transmissibilidade na coluna vertebral é maior na faixa de 4 a 5 Hz e que muitos dos veículos automotores apresentam frequências nesta faixa particular, sendo, assim, fontes potenciais de risco à coluna vertebral.

O objetivo deste trabalho foi avaliar o comportamento dinâmico dos assentos, observando e comparando os valores coletados de vibração no piso e assento de seis veículos automotores diferentes. Realizando estudos sobre níveis de transmissibilidade SEAT e o fator R, especificado pela ISO 2631-5 (2004), para uso na avaliação de efeitos adversos para a saúde.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Transmissibilidade de amplitude efetiva do assento

Atualmente, um dos métodos mais populares utilizado para avaliar a dinâmica do conforto do assento é o valor de *SEAT* (*seat effective amplitude transmissibility*). Este valor *SEAT* pode ser calculado a partir de uma função de transferência para uma variedade de espectros de entrada de vibração. É definido como uma porcentagem proveniente da divisão do valor de vibração do assento pelo valor de vibração do piso, representada por seu valor *rms* ou valor de dose de vibração VDV, medidos no sinal.

Um valor de *SEAT* de 100% indica que não existe melhoramento ou degradação no desconforto produzido pelo assento; se o valor é maior que 100%, o desconforto causado pela vibração é aumentado pelo assento e se o *SEAT* é menor do que 100 % indica que o assento isolou parte da vibração produzida.

2.2. Determinação da resposta da região lombar da coluna à vibrações de impacto

Uma pessoa sentada em posição vertical, conforme ilustrado na Figura 1, submetida à exposição prolongada de vibrações está sujeita a sofrer efeitos adversos à saúde. A ISO 2631-5:2004 aborda esta exposição humana a choques mecânicos múltiplos medidos no assento através de um modelo de resposta da coluna na região lombar. O procedimento de cálculo é apresentado a seguir.

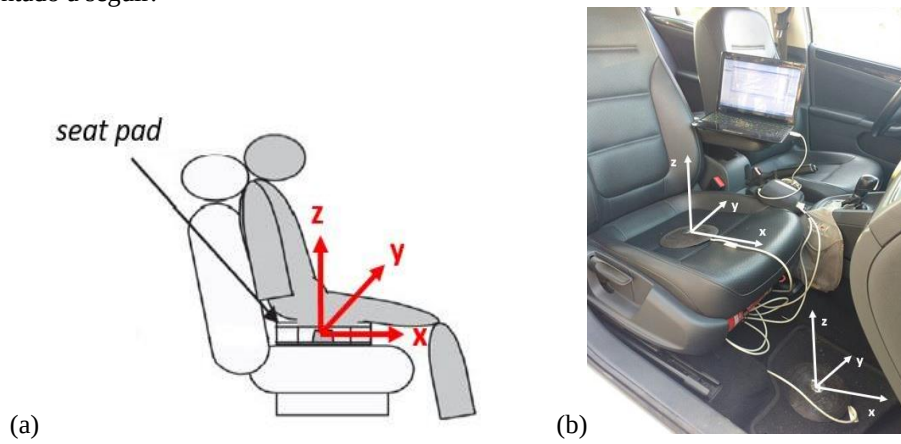


Figura 1. (a) Representação esquemática da configuração avaliada. (b) Instrumentação realizada nos veículos, com indicação da direção e sentido dos eixos Cartesianos.

2.2.1 Resposta da coluna lombar na direção horizontal (eixos x e y) e na direção vertical (eixo z)

Nos eixos x e y, a resposta é aproximadamente linear e representada por um modelo de um grau de liberdade. A resposta da lombar a_{lk} , em m/s^2 , é calculada a partir da Equação (1).

$$a_{lk}(t) = 2\xi\omega_n(v_{sk} - v_{lk}) + \omega_n^2(s_{sk} - s_{lk}), \quad (1)$$

onde, $\xi = 0,22$ é a razão de amortecimento crítico; $\omega_n = 13,35 s^{-1}$ é a frequência natural; $k = x$ ou y ; v_{sk} e v_{lk} são os históricos de velocidades no assento e na coluna lombar; s_{sk} e s_{lk} são os históricos de deslocamentos no assento e na coluna lombar.

Na direção z, a resposta é não linear e é representada por um modelo de rede neural recorrente. A aceleração no eixo z da lombar a_{lz} , em m/s^2 , é prevista usando as equações

$$a_{lz}(t) = \sum_{j=1}^7 W_j u_j(t) + W_8, \quad (2)$$

$$u_j(t) = \tanh \left[\sum_{i=1}^4 w_{ji} a_{lz}(t-i) + \sum_{i=5}^{12} w_{ji} a_{sz}(t-i+4) + w_{j13} \right], \quad (3)$$

onde, os coeficientes W_j e w_j são fornecidos em tabelas da ISO2631-5 e são parâmetros aplicáveis quando os dados são amostrados a 160 Hz.

2.2.3 Cálculo da dose de aceleração

A dose de aceleração D_k , em m/s^2 , é definida como:

$$D_k = \left[\sum_i A_{ik}^6 \right]^{1/6}, \quad (4)$$

onde, A_{ik} é o i -ésimo pico da resposta em termos da aceleração $a_{ik}(t)$ e $k = x, y$ ou z .

Um pico é definido como o valor absoluto máximo da resposta em termos da aceleração entre dois zeros consecutivos. Para as direções x e y , os picos positivos e negativos devem ser contados. Para a direção z , apenas os picos positivos devem ser contados. Para avaliar os efeitos sobre a saúde, é útil determinar a dose diária média D_{kd} , em m/s^2 , a qual uma pessoa será exposta. Quando a exposição diária à vibração consiste em dois ou mais (n) períodos de diferentes magnitudes, a dose de aceleração, para a exposição diária total deve ser calculada usando a Equação (5).

$$D_{kd} = \left[\sum_{j=1}^n D_{kj}^6 \frac{t_{dj}}{t_{mj}} \right]^{1/6}, \quad (5)$$

onde, t_{dj} é a duração da exposição diária a condição j e t_m é o período durante o qual D_{kj} foi medido.

2.2.4 Avaliação dos efeitos à saúde

Com o uso de um modelo biomecânico, baseado em dados experimentais, verificou-se que há uma relação linear entre a tensão compressiva que se deve aos choques de entrada pelo assento e a resposta em termos dos picos de aceleração na coluna. Uma tensão compressiva estática equivalente diária S_{ed} , em MPa, é calculada a partir da Equação (6):

$$S_{ed} = \left[\sum_{k=x,y,z} (m_k D_{kd})^6 \right]^{1/6}, \quad (6)$$

onde, D_{kd} é a dose de aceleração diária média na direção k e m_k são coeficientes, cujos valores recomendados para cada direção são igualmente fornecidos na ISO 2631-5:2004. Valores recomendados para m_k são 0,015 0,035 e 0,032 MPa/m/s².

Em geral, um fator R pode ser definido para avaliação dos efeitos adversos à saúde relacionados com a resposta humana à dose de aceleração. R deve ser calculado sequencialmente levando em consideração a idade aumentada (e a resistência reduzida) à medida que o tempo de exposição aumenta. É definido pela Equação (7).

$$R = \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{S_{ed} N^{1/6}}{S_{ui} - c} \right)^6 \right]^{1/6}, \quad (7)$$

onde, N é o número de dias de exposição por ano; i é o contador de anos; n é o número de anos de exposição; c é uma constante que representa a tensão estática devido à força gravitacional, sendo usado normalmente $c = 0,25$ MPa para a postura de dirigir; S_{ui} é a resistência máxima da coluna lombar para uma pessoa com $(b + i)$ anos de idade e b é a idade na qual a exposição à vibração inicia. O valor de S_{ui} varia com a densidade óssea das vértebras, que normalmente é reduzida com a idade. A partir de estudos, a seguinte relação foi obtida:

$$S_{ui} = 6,75 - 0,066(b + i), \quad (8)$$

Existe uma variabilidade humana significativa. $R < 0,8$ indica uma baixa probabilidade de um efeito adverso para a saúde; $R > 1,2$ indica uma alta probabilidade de um efeito adverso à saúde.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para a determinação dos valores vibracionais efetivamente transmitidos ao corpo se utilizou acelerômetros, devidamente posicionados em uma placa de contato compatível com o equipamento de leitura empregado. No caso, a ferramenta usada para a leitura e armazenamento dos dados coletados foi o medidor e analisador portátil de vibrações, por meio de utilização de um software matemático comercial. Este aparelho tem a capacidade de interpretar as informações apresentadas por seis canais de entrada distintos, para os estímulos recebidos no terno axial x , y e z em cada um dos dois *seat pads* nele acoplados.

Para gerar os dados de entrada necessários ao analisador utiliza-se dois acelerômetros transdutores de três eixos, que fazem a conversão da energia mecânica gerada pela aceleração do corpo de testes em sinais elétricos proporcionais, de forma que a excitação mecânica, percebida pelos acelerômetros, seja interpretada pelo analisador. O transdutor aplicado

foi um *seat pad*, que é um disco com a borda externa feita de um material flexível, para se adequar ao formato do local de medição e com um núcleo rígido, onde estão encapsulados os acelerômetros, de forma padronizada, para manter-se fixo na interface do usuário e superfície permitindo uma leitura de vibração tri-axial sem deslocamentos relativos. Posicionou-se um *seat pad* na interface entre passageiro x assento, e outro na interface piso x pés, aonde há a transferência de vibração no veículo, com a orientação da plataforma devidamente correspondente com as exigências da norma ISO 2631-1, 1997, conforme demonstra a ilustração da Figura 1(b); também foi observada a posição do alinhamento entre o núcleo do *seat pad* de acordo com a ISO 2631-1 (1997). Para determinar o nível de exposição à vibração é importante considerar que existe uma gama diversa de modelos de veículos automotores, conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1. Ficha técnica dos veículos submetidos aos testes.

Veículos Automotores	VW Jetta 2.0 Comfortline	Chevrolet Prisma 1.4 LTZ	Chevrolet S10 2.8 LTZ	Fiat Palio Weekend 1.8 Adventure	Honda HRV 1.8 EX	Peugeot 207 1.4 XR
Ano	2013	2016	2014	2012	2016	2012
Quilometragem [km]	180.000	20.000	70.000	40.000	20.000	40.000
Dimensões [mm]						
Comprimento	4.644	4.275	5.347	4.310	4.294	3.872
Largura	1.778	1.705	1.882	1.720	1.772	1.669
Entre-eixos	2.651	2.528	3.096	2.470	2.610	2.443
Altura	1.473	1.484	1.908	1.640	1.586	1.446
Peso [kg]	1.346	1.079	2.081	1.206	1.270	1.045
Suspensão						
Dianteira	McPherson	McPherson	Braços sobrepostos	McPherson	McPherson	McPherson
Traseira	Eixo de torção	Eixo de torção	Eixo rígido	Braço arrastado	Eixo de torção	Braço arrastado
Transmissão	Automática, 6 velocidades	Automática, 6 velocidades	Automática, 6 velocidades	Manual, 5 velocidades	Automática, 6 velocidades	Manual, 5 velocidades
Potência [cv]	120	106	200	132	139	82
Torque [kgfm]	18,4	13,9	51	18,9	17,4	13
Pneus	205/55 R16	185/65 R15	255/65 R17	205/70 R15	215/55 R17	185/65 R14



Figura 3. Percurso no qual foram realizados os ensaios.

Optou-se por tomar as medições em seis diferentes veículos. As medições foram feitas durante a operação normal em um circuito pré estipulado em uma pista mista pavimentada por asfalto e paralelepípedo, como pode ser visto na Figura 3, com transporte de passageiros e nas velocidades condizentes com a realidade diária de condução.

Para análise do risco de lesão na espinha dorsal, em relação à exposição temporal de vibração, foi adotado um padrão considerando: exposição iniciada aos 20 anos de idade; carga diária de percepção à oscilação de 8h; anualmente sendo considerado 220 dias de exposição. Foi selecionado este padrão com base em uma pessoa que irá exercer uma atividade vinculada à condução de veículos, numa jornada de trabalho regular (40h semanais e 220 dias trabalhados por ano).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Avaliação dos valores de SEAT

A análise dos valores do nível SEAT para os veículos supracitados estão descritos na Tabela 2 abaixo.

Tabela 2. Valores do nível de vibração SEAT.

SEAT %	VW Jetta	Chevrolet Prisma	Chevrolet S10	Fiat Palio Weekend	Honda HRV	Peugeot 207
x	107,1	102,2	138	105,9	95,1	97,7
y	104,1	106,8	101,5	111,1	104,6	106,4
z	90,7	88,8	81,7	75,9	90,4	103,5

Entende-se que, ao analisar os valores de transmissibilidade obtidos experimentalmente para os carros, para o eixo z, todos os modelos atenuaram a vibração transmitida do piso para o assento (valores menores que 100%), com exceção do Peugeot 207. Em especial observa-se que o veículo Fiat Palio Weekend apresentou a maior redução de transmissão de vibração, com valor de 24,1%. No eixo y, houveram ampliações dos valores de vibração transmitidos por todos os veículos testados. No eixo x, vê-se que os automóveis de modelo Honda HRV e Peugeot 207 atenuaram levemente os níveis de vibração, enquanto os demais amplificaram seus valores. Destaca-se, neste contexto, o Chevrolet S10, com valores de transmissão aumentados de, aproximadamente, 40% neste eixo.

4.2 Avaliação dos resultados para vibração na espinha dorsal

Em relação à vibração na espinha dorsal, foi analisada a possibilidade de risco de lesão em função do tempo em anos de exposição nos veículos automotores em questão. Chegando-se a valores contabilizados em anos para risco moderado e elevado, conforme Tabela 3 abaixo.

Tabela 3. Análise do risco de lesão na espinha dorsal, em anos de exposição.

Vibração na Espinha Dorsal	VW Jetta	Chevrolet Prisma	Chevrolet S10	Fiat Palio Weekend	Honda HRV	Peugeot 207
Risco de Lesão em anos de exposição						
Moderado	61	55	55	59	57	55
Alto	68	64	64	66	65	64

Pode-se observar que, para risco moderado de lesão, em média, leva-se 57 anos para ser atingido este nível. Sendo que, apenas o modelo VW Jetta, necessita mais de 60 anos de exposição para atingir tal risco. Três veículos de diferentes modelos (*hatch*, *pick-up* e *sedan*) mostram-se iguais, em termos de anos de exposição para causarem risco moderado de lesão na espinha dorsal. E, para alto risco de lesão, em média, a exposição requerida é de, aproximadamente, 65 anos. Novamente, os mesmos três veículos citados no parágrafo anterior apresentaram igual valor entre eles, neste caso 64 anos de exposição. O automóvel VW Jetta destaca-se, mais uma vez, como aquele que exige maior período submetido há anos de vibração. A Figura 4 indica uma correlação entre o fator R com os anos de exposição à vibração.

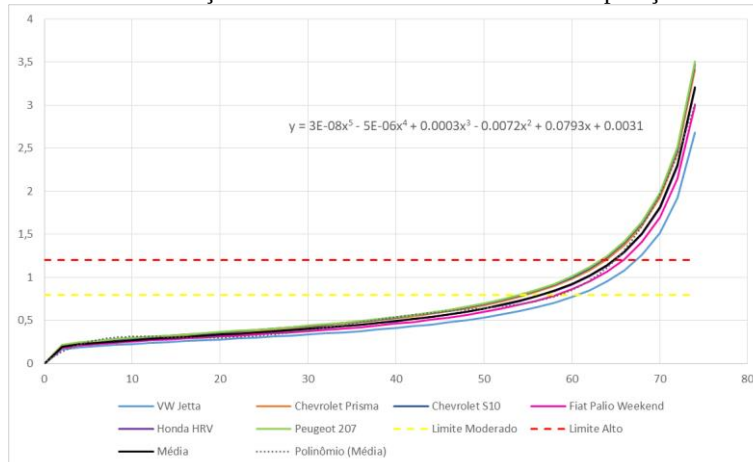


Figura 4. Relação do fator R, eixo vertical, com tempo de exposição, em anos, no eixo horizontal.

Percebe-se que, aproximadamente, dos 2 aos 40 anos expostos há um aumento linear do índice R, a partir de então ocorre um crescimento de forma exponencial. Com base na média dos dados adquiridos nos ensaios experimentais dos

veículos automotores e uma interpolação polinomial de quinto grau que permitiu um ajuste fino da curva real, propõe-se um modelo matemático simplificado para prever o fator de risco R de lesão na espinha dorsal nas condições e veículos analisados, na forma da Equação 9 abaixo:

$$R = 2,9948 \cdot 10^{-8}T^5 - 4,8544 \cdot 10^{-6}T^4 + 2,8592 \cdot 10^{-4}T^3 - 7,2325 \cdot 10^{-3}T^2 + 7,9256 \cdot 10^{-2}T + 3,1421 \cdot 10^{-3} \quad (9)$$

onde, T representa o tempo de exposição em anos.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram avaliados 6 automóveis de passeio quanto ao seu nível de vibração no assento. Foram escolhidas condições de comparação em termos de trajeto de pista mista de forma que as comparações representem as características de cada assento/modelo utilizado. Um sistema de medição composto por 2 *seat pads*, um sistema de aquisição de dados e software desenvolvido em ambiente Matlab foi empregado segundo as recomendações normativas de forma a avaliar o risco de lesões na coluna em decorrência de exposição prolongada a vibrações com picos de impacto seguindo indicações da ISO 2631-5 (2004). Também o índice SEAT respectivo para os três eixos coordenados do assento foram avaliados e comparados. Em geral para a transmissibilidade avaliada pelo índice SEAT, na direção vertical, o veículo Palio Weekend foi o que mais atenuou a vibração e o Peugeot que mais amplificou. No eixo x o veículo que mais atenuou a vibração foi o Honda HRV e no eixo y , o que menos amplificou foi o Chevrolet S10. No geral pode-se perceber pelos resultados medidos que o risco alto à lesão na coluna é atingido mais tardiamente no VW Jetta e mais cedo, com 64 anos de exposição, no Chevrolet S10, Prisma ou Peugeot 207. Para risco moderado, novamente, o VW Jetta é o que mais tardiamente apresenta este risco e novamente Chevrolet S10, Prisma ou Peugeot 207 são os que mais cedo apresentam este risco. Em geral, para alto risco de lesão, em média 65 anos de exposição seriam necessários, o que para usuários contínuos destes veículos nas situações apresentadas não seria problemático.

5. REFERÊNCIAS

- GRIFFIN, M. J. **Handbook of human vibration**. London: Academic Press Limited, 1990.
- ISO 2631-1 **Mechanical vibration and shock – evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 1: General requirements**. Geneva: International Organization for Standardization, 1997.
- ISO 2631-5 **Mechanical vibration and shock – evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 5: Method for vibration containing multiple shocks**. Geneva: International Organization for Standardization, 2004.
- WESTHUIZEN, A.; NIEKERK, J. L. Verification of seat effective amplitude transmissibility (SEAT) value as a reliable metric to predict dynamic seat comfort. **Journal of Sound and Vibration**, South Africa, v. 295, p. 1060-1075, 2006.
- ROTH, C. W. **Transmissibilidade da vibração e distribuição da pressão na interface assento-operador de tratores agrícolas em condições dinâmicas**. 2010. 142f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil.
- GOVINDSWAMY, K.; HARTWIG, M.; ALT, N.; WOLFF, K. Designing sound to build character, **Automotive Engineering International**, v. 112, p. 172-76. 2004.
- WESTHUIZEN, A.; NIEKERK, J. L. Verification of seat effective amplitude transmissibility (SEAT) value as a reliable metric to predict dynamic seat comfort. **Journal of Sound and Vibration**, South Africa, v. 295, p. 1060-1075, 2006.
- 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**, Brasil, v. 18, p. 31-38, 2002.
- 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**, v. 8, p. 695-702, 1986.
- PALMER, K. T.; GRIFFIN, M. J.; BENDALL, H.; PANNETT, B. Prevalence and pattern of occupational exposure to whole-body vibration in Great Britain: finding from a national survey. **Occupational Environmental Medicine**, v. 57, p. 229-236, 2000.
- CHAFFIN, D. B.; ANDERSSON, G. B. J.; MARTIN, B. J. **Occupational biomechanics**. New York: Wiley Interscience, 1999.

6. AGRADECIMENTOS

Agradecemos aos proprietários e amigos que, de boa vontade, cederam os seus veículos próprios para a possível realização deste trabalho experimental. Este trabalho recebeu apoio financeiro parcial da CAPES.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.