

Avaliação dos níveis de vibração existentes em passageiros de ônibus rodoviários intermunicipais, análise e modificação projetual¹

Márcio Walber²
Alberto Tamagna³

Resumo

Este trabalho tem como objetivos avaliar os níveis vibratórios a que os passageiros de ônibus rodoviários intermunicipais estão submetidos e realizar uma mudança projetual na carroceria/poltrona que atenua tais efeitos. Neste estudo foram realizadas medições das acelerações produzidas na direção vertical, de acordo com a Norma ISO 2631, confrontando com as curvas-limite de conforto, saúde e fadiga. É importante quantificar os níveis de vibração a que o passageiro de ônibus está submetido e também avaliar quanto tempo ele pode utilizar o transporte sem que haja riscos à sua saúde. Também é necessário conhecer o comportamento da carroceria em relação aos efeitos vibratórios para dimensionar a estrutura. A modificação projetual foi realizada utilizando análise dinâmica, por meio do modelo numérico da carroceria, poltrona e chassi, aplicando ao modelo numérico a rugosidade de pavimentos asfálticos medida experimentalmente, permitindo visualizar numericamente os efeitos vibratórios na estrutura da poltrona e, em consequência, gerar uma mudança projetual amenizando tais efeitos.

Palavras-chave: Ônibus. Poltrona. Vibrações. Elementos finitos.

Abstract

The purpose of this work is to assess the vibratory levels the ones that passengers of inter-municipal road buses are submitted; and make a project changing in body/seat that attenuates such effect. In this study were conducted measurements of accelerations produced in the vertical direction according to ISO 2631, clashing with the curve-limit of comfort, health and fatigue. It is important to quantify the vibration levels that the bus passenger is submitted being seated in the armchair and also assess how long it can use the transport without risks to its health. It is also necessary to know the body's behavior related to the vibratory effect to measure the structure. The modification of the project was accomplished using dynamic analysis, using numerical model of the body, armchair and chassis,

¹Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS em 27/04/09.

²Doutor em Engenharia Mecânica PROMEC/UFRGS. Professor da Universidade de Passo Fundo, Faculdade de Engenharia e Arquitetura/FEAR. E-mail: mwalber@upf.br

³Doutor em Engenharia PROMEC/ UFRGS. Professor da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Mecânica. E-mail: tamagna@ufrgs.br

Artigo recebido em 04/12/09 e aceito em 18/05/10.

applying to the numerical model the roughness of measured asphalt floors, allowing to know numerically the vibratory effect in the structure of the armchair and, consequently, to generate a project changing easing such effect.

Keywords: *Bus. Seat. Vibrations. Finite elements.*

1 Introdução

A exposição a vibrações e choques mecânicos pode causar desconforto e alterações fisiológicas no corpo humano. Muitas pesquisas têm sido realizadas ao longo dos últimos anos com o objetivo de conhecer o comportamento do corpo humano quando exposto a vibrações mecânicas.

O Ministério da Saúde do Brasil (portaria 1339, 1999) considera as vibrações como agente de risco de natureza ocupacional. Porém há uma dificuldade em quantificar o período e também as faixas de frequências e magnitudes de vibrações a que o indivíduo pode ficar exposto sem que ocorram danos à sua saúde.

O passageiro de ônibus pode ficar, em certos casos, muitas horas, acomodado no interior da carroceria, submetido a efeitos vibratórios oriundos do funcionamento do motor, quando o veículo se encontra parado, e a efeitos vibratórios oriundos da estrada que não são totalmente absorvidos pela suspensão do chassi, quando o ônibus está em movimento.

O transporte intermunicipal coletivo tem sido um dos meios de locomoção mais procurados pelas pessoas na atualidade, e o ônibus, especificamente, é uma das opções de transporte mais utilizadas nesta categoria. A tabela 1 apresenta dados referentes aos números das frotas de ônibus e empresas

registradas no período de 2004 a 2007 no Brasil.

No Brasil, o transporte coletivo em carrocerias de ônibus tem se mostrado como um dos meios de locomoção mais utilizados para transporte de passageiros. Portanto, deve-se ter um cuidado especial ao elaborar o projeto deste produto, pois pessoas ficarão acomodadas em seu interior durante muitas horas. Assim, cresce a necessidade de realização de novas pesquisas e estudos, permitindo que as empresas fabricantes deste tipo de produto criem soluções capazes de evitar que aconteçam possíveis problemas aos usuários do produto, além de aumentar o seu conforto e melhorar as condições do transporte.

Neste estudo avalia-se como os efeitos vibratórios chegam até os passageiros e a que níveis de vibração estes estão submetidos; também se investiga se há algum tipo de risco ocupacional para, assim, contribuir para que o projeto do produto esteja de acordo com as expectativas dos usuários de ônibus.

O passageiro usuário de ônibus fica em contato com as vibrações da carroceria por meio da poltrona onde está sentado e do assoalho da carroceria (figura 1). As vibrações são transmitidas para o corpo do passageiro por meio dos pés em contato com o chão e das demais partes do corpo que estão em contato direto com a poltrona. Antes de chegar à poltrona, as oscilações oriundas do terreno pelo

Tabela 1 – Frota de ônibus no Brasil

	2004	2005	2006	2007
Quantidade de empresas	209	207	222	196
Quantidade de veículos (ônibus)	12.976	13.212	15.616	13.907

Fonte: Anuário Estatístico 2007 – ANTT

qual o ônibus transita passam pela suspensão do veículo; desta, para o chassi; deste, para a carroceria e, por fim, chegam ao passageiro.

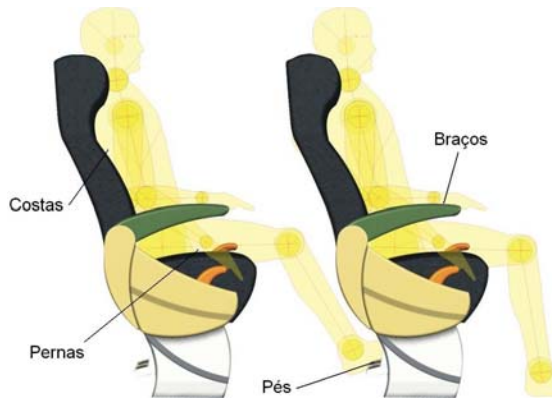


Figura 1 – Partes em contato entre o passageiro e poltrona – vista lateral

Basicamente, as vibrações transmitidas ao corpo humano são classificadas dependendo da região do corpo atingida, a saber:

- vibrações de corpo inteiro: são de baixa frequência e alta amplitude, situando-se na faixa de 1 a 80 Hz, mais especificamente 1 a 20 Hz. Estas vibrações são específicas para atividades de transporte e são normatizadas pela Norma ISO 2631;
- vibrações de extremidades (também conhecidas como segmentais, localizadas ou de mãos e braços): são as mais estudadas e situam-se na faixa de 6,3 a 1250 Hz, ocorrendo nos trabalhos com ferramentas manuais e normatizadas pela Norma ISO 5349.

2 Vibrações no corpo humano

A vibração no corpo humano é dividida em dois grandes grupos (GRIFFIN, 1990): vibração de corpo inteiro (*Whole Body Vibration* – WVB) e vibração no segmento mão-braço (*Hand Arm Vibration* – HAV). Este estudo tem como enfoque principal as vibrações de corpo inteiro (WVB) em pessoas sentadas, sendo que a frequência de ressonância humana para o corpo inteiro na direção vertical (eixo z) fica na faixa entre 4 a 8 Hz, direção na qual o corpo humano é mais sensível aos efeitos vibratórios.

Griffin (1990) afirma que as vibrações de corpo inteiro ocorrem quando a massa do corpo está apoiada sobre uma superfície vibrante

(por exemplo, quando está sentado sobre um assento que vibra, em pé sobre um solo vibrante ou também encostado sobre uma superfície vibrante). As vibrações de corpo inteiro apresentam-se principalmente em transportes.

Segundo Vieira (1998), o corpo humano pode ser considerado como um sistema mecânico complexo, de múltiplos graus de liberdade. Na reação do corpo humano em um campo de vibrações e choque, deve-se considerar não apenas a resposta mecânica do sistema, mas também o efeito psicológico sobre o indivíduo. Os efeitos das vibrações sobre o corpo humano são, entre outros, visão turva, perda de equilíbrio, falta de concentração, dor de cabeça, náuseas, cinetose (enjôo decorrente dos movimentos) e urgência urinária. Há ainda fortes evidências de associação entre vibrações e lesão dos discos intervertebrais (COUTO, 2006).

A Norma ISO 2631 estabelece curvas de limite de aceleração máxima recomendadas para cada tempo de exposição. O corpo pode ser submetido a vibrações em várias direções e posições, em pé, sentado ou deitado. Três códigos de severidade são encontrados na norma:

1. limite de conforto, que é aplicável para passageiros de veículos;
2. limite de perda de eficiência causado por fadiga, que está relacionado à preservação da eficiência do trabalho e é relevante para operadores de máquinas e motoristas;
3. limite de exposição sob condições específicas que oferecem perigo à saúde.

Para medição de vibrações de corpo inteiro periódica, aleatória e transiente, a escala de frequência considerada é:

- 0,5 hertz a 80 hertz para a saúde, o conforto e a percepção;
- 0,1 hertz a 0,5 hertz para a doença de movimento.

2.1 Critérios para avaliação das vibrações no corpo humano

A norma ISO 2631 (1997) estabelece que a medida preliminar do valor da vibração será em termos de aceleração r.m.s. A frequência de vibrações é expressa em ciclos por segundo (Hz) e incide sobre a extensão dos objetos que transmitem vibrações.

A aceleração r.m.s. é expressa em metros por segundo ao quadrado (m/s^2) para a vibração translacional e em radianos por segundo ao quadrado (rad/s^2) para a vibração rotatória. A aceleração r.m.s. compensada é calculada com a expressão:

$$a_w = \left[\frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

onde $a_w(t)$ é a aceleração compensada em função do tempo em m/s^2 e T é a duração da medição, em segundos.

A Norma ISO 2631 apresenta valores de aceleração r.m.s. ponderada, indicando a reação das pessoas expostas a efeitos vibratórios em relação ao conforto. Os valores da tabela 2 mostram indicações aproximadas de prováveis reações das pessoas expostas.

Tabela 2 – Aceleração r.m.s em relação ao conforto

Aceleração r.m.s. (m/s^2)	Classificação
< 0,315	Confortável
0,315 a 0,63	Um pouco desconfortável
0,8 a 1,6	Desconfortável
1,25 a 2,5	Muito desconfortável
>2	Extremamente desconfortável

Fonte: ISO 2631-1, 1997

Conforme apontam históricos de estudo de vibrações, desde a metade do século XIX até a atualidade, inúmeros estudos sobre vibrações no corpo humano foram e estão sendo desenvolvidos. Especificamente em relação ao passageiro de ônibus rodoviário intermunicipal, existem poucos estudos que avaliam a exposição à vibração.

3 Análise dinâmica pelo método dos elementos finitos

Segundo Alves Filho (2005), os métodos analíticos clássicos permitiam, a partir da solução das equações diferenciais, calcular a resposta exata dos deslocamentos, deformações e tensões na estrutura em todos os seus

pontos, isto é, nos seus infinitos pontos. Contudo, essas soluções eram válidas apenas para sistemas de geometria simples, com condições de apoio e carregamentos simples. Essas técnicas foram complementadas por intermédio das técnicas de discretização de sistemas contínuos. Ao tratar um sistema estrutural como um sistema discreto, são calculados os deslocamentos de alguns pontos da estrutura, chamados de “nós” do modelo. Se o número de pontos discreto escolhido é suficiente para representar o deslocamento da estrutura inteira de forma aproximada, é possível calcular as tensões e deformações. Essa é a ideia do método dos elementos finitos (MEF). A figura 2 mostra os principais passos efetuados na análise pelo método dos elementos finitos.

Com base na matriz de rigidez de cada elemento, o *software* monta a matriz de rigidez da estrutura, onde, depois de calculados os deslocamentos nodais, são calculados os deslocamentos, as deformações e as tensões dentro dos elementos, permitindo avaliar a estrutura como um todo. Um grande número de aplicações em engenharia envolve componentes sujeitos a cargas dinâmicas. A maioria dos componentes mecânicos está sujeita a cargas que variam com o tempo e, portanto, possuem características dinâmicas (ALVES FILHO, 2005).

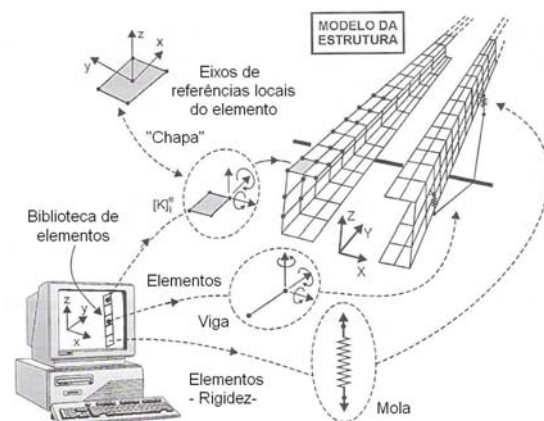


Figura 2 – Passos principais realizados na análise por MEF
Fonte: ALVES FILHO, 2005

O grande desafio na análise estrutural dinâmica é determinar a relação entre as cargas

variáveis com o tempo que atuam nos nós da estrutura e os deslocamentos da estrutura inteira, que também variam com o tempo. Considerando que no MEF são tratados os sistemas discretos, podem-se obter resultados satisfatórios envolvendo um número limitado de graus de liberdade para equacionar o problema dinâmico da estrutura.

3.1 Equação do movimento – um grau de liberdade

As equações do movimento de qualquer sistema dinâmico podem ser obtidas com a aplicação da segunda lei de Newton ou princípio fundamental da dinâmica. A equação 2 constitui o ponto de partida para o estudo do comportamento dinâmico de um grau de liberdade da estrutura obtida por meio do estudo de uma estrutura constituída de apenas um elemento finito.

$$m.\ddot{u} + c.\dot{u} + k.u = F(t) \quad (2)$$

onde $F(t)$ é a força externa aplicada ao corpo, variável com o tempo; u é o deslocamento do corpo; k é a constante de rigidez da mola; \ddot{u} é a primeira derivada do espaço em relação ao tempo (velocidade v do corpo); c é o coeficiente de amortecimento; \dot{u} é a segunda derivada do espaço em relação ao tempo (aceleração a do corpo) e m , a massa do corpo.

3.2 Equação do movimento – vários graus de liberdade

Segundo Alves Filho (2005), nas estruturas reais, o analista estrutural se vê diante de um modelo representativo da estrutura constituído de muitos elementos e, como consequência, de muitos componentes de deslocamentos a determinar. Serão geradas milhares de equações que traduzem o comportamento dinâmico dos graus de liberdade da estrutura. O meio mais eficiente de armazenar essas equações e processá-las é por intermédio de matrizes. Nas estruturas reais existem muitos componentes de deslocamentos nodais, velocidades nodais, acelerações nodais e forças nodais. A equação 3 está representada numa “versão matricial” para todos os graus de liberdade da estrutura.

$$[M].[\ddot{U}] + [C].[\dot{U}] + [K].[U] = \{F(t)\} \quad (3)$$

4 Projeto de carrocerias de ônibus

Tendo em vista um dos objetivos principais deste estudo, que é medir e analisar a vibração a que os passageiros que utilizam o transporte em viagens de média e longa distância por ônibus estão submetidos, é muito importante conhecer o processo de projeto e montagem deste produto para poder entender como se dá a transferência dos efeitos vibratórios originados do chassi e também dos efeitos externos a que a carroceria e o chassi estão submetidos.

4.1 Componentes de carrocerias de ônibus

A montagem de uma carroceria de ônibus é feita pelo acoplamento de uma estrutura chamada de “casulo” num chassi.

A carroceria é revestida nas laterais abaixo da janela com chapas finas de alumínio. As partes frontal, traseira e teto são revestidas de fibra de vidro, as portas e portinholas externas também são compostas por estrutura e revestimento de alumínio, e as janelas podem ser montadas na estrutura do ônibus através de borracha ou coladas.

4.1.1 Casulo

O casulo de uma carroceria de ônibus é basicamente dividido em seis partes: base, teto, lateral direita, lateral esquerda, frente e traseira, conforme mostra a figura 3.

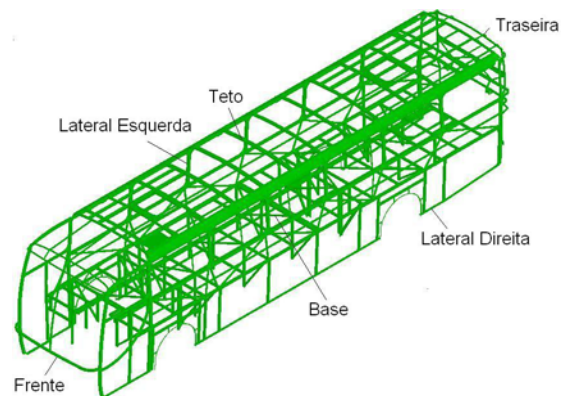


Figura 3 – Casulo de uma carroceria de ônibus

4.1.2 Chassi

O projeto de um chassi para carroceria de ônibus é desenvolvido com o objetivo de que a carroceria cumpra com as exigências de segurança e normas de legislação nacionais e internacionais. O chassi é diferenciado, basicamente, por dois tipos: chassi de motor dianteiro e chassi de motor traseiro. O chassi de motorização dianteira é mais utilizado em carrocerias de menor comprimento e de dimensões de altura menores. A figura 4 mostra um chassi de motor dianteiro.



Figura 4 – Chassi de motor dianteiro

Fonte: Diretrizes para construção de carrocerias – Mercedes-Benz

4.1.3 Suspensão

Segundo Morsh (2001), a função estrutural da suspensão é isolar o veículo das forças geradas pelas irregularidades das vias. Os pneus filtram efetivamente os picos de maior frequência, e suspensões macias reduzem o efeito das componentes de menor frequência.

O tipo de suspensão usualmente utilizado em chassis de carrocerias de ônibus é composto de dois eixos rígidos, na parte dianteira e traseira da carroceria. Neste caso a ligação das rodas nas extremidades dos eixos faz com que o comportamento de uma roda interfira no comportamento da outra, diferentemente das suspensões independentes, onde o movimento de uma roda não interfere no comportamento da outra. A figura 5 ilustra uma suspensão composta por feixes de molas e amortecedor, um dos tipos de suspensões utilizadas em carrocerias de ônibus.

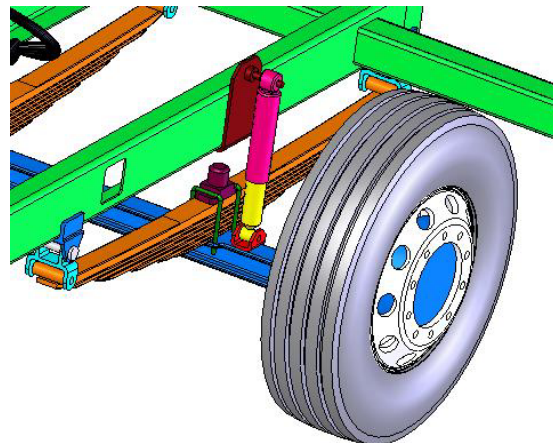


Figura 5 – Suspensão com feixe de molas e amortecedor

5 Forças dinâmicas na carroceria

Quando a carroceria de ônibus está em fase de concepção, os esforços a que será submetida devem ser levados em conta. A carroceria deve suportar todas as forças dinâmicas que atuam sobre ela quando está em movimento; sua estrutura deve ser suficientemente rígida, para que o eixo das rodas acompanhe as vibrações transmitidas pela suspensão e pelo motor. A carroceria deve tolerar e suportar a combinação de forças em todas as direções. Os esforços atuam principalmente em três direções: vertical, longitudinal e transversal (SCANIA, 2005).

5.1 Forças verticais

As forças dinâmicas verticais são originárias dos movimentos normais da suspensão. Forças verticais adicionais que afetam as laterais da carroceria ocorrem quando o ônibus transita em curvas.

5.2 Forças longitudinais

As forças longitudinais ocorrem normalmente quando ocorre frenagem do ônibus e também quando o ônibus passa por um desnível da estrada. O peso do teto cria forças nas laterais da carroceria durante a frenagem, as quais são absorvidas pelos tubos verticais das janelas e acabam passando para a estrutura do chassi e para as rodas.

5.3 Forças transversais

Quando a carroceria é submetida a curvas de velocidades médias a altas, ou são realizadas mudanças abruptas de marcha, ocorrem os esforços no sentido transversal. A seção do teto é pressionada para fora, impedida pela parte de baixo da carroceria, pelos tubos verticais das janelas e pelas rodas do chassi. As forças movem-se do assoalho, de dentro para fora, na direção das extremidades dos montantes da base.

6 Ligação do casulo com chassi

O casulo da carroceria de ônibus é apoiado no chassi sobre placas de sustentação colocadas ao longo das longarinas. Essas placas podem ser soldadas ou aparafusadas nas longarinas; dependendo do modelo do chassi as placas não podem ser soldadas. A parte inferior dos montantes da base é apoiada nessas placas e, após, soldada. A fim de reforçar ainda mais a ligação entre a estrutura da carroceria e o chassi, são colocadas placas de amarração, as quais são soldadas nos montantes da base e também no chassi. A figura 6 mostra o casulo acoplado com um chassi do tipo 4x2, com o posicionamento das placas de amarração e sustentação visto nos detalhes.

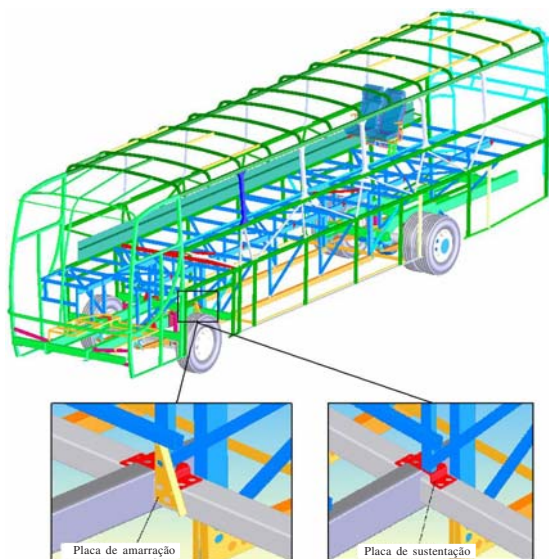


Figura 6 – Casulo acoplado ao chassi com placas de amarração e sustentação

7 Poltrona de carrocerias de ônibus

A estrutura da poltrona é fixada ao chassi com parafusos por meio de um trilho longitudinal soldado ao longo da estrutura da base e apoiada numa chapa perfilada também soldada longitudinalmente nas estruturas laterais. Uma poltrona é basicamente constituída de seis partes, que são: estrutura soldada, acabamento lateral, encosto para o braço, manípulo de acionamento, encosto lombar e assento inferior. A figura 7 mostra o corte transversal de uma carroceria de ônibus mostrando os pontos de fixação da poltrona.

A transferência das vibrações oriundas da estrada em que o ônibus transita passa pela suspensão do chassi e chega até o casulo, que está ligado diretamente a ele, chegando até a poltrona que acomoda o passageiro. O entendimento de como se dá a transferência das vibrações na carroceria também é de vital importância, pois ao propor uma mudança de projeto a tarefa de verificar onde se devem realizar mudanças que amenizem tais efeitos ficará mais fácil.

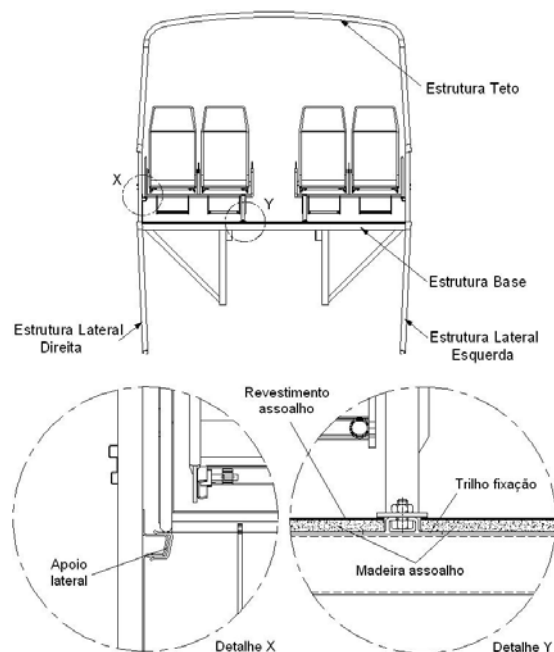


Figura 7 – Corte transversal de uma carroceria de ônibus

8 Procedimento experimental

Com objetivo de avaliar os níveis de vibração a que estão sujeitos os passageiros que

viam em ônibus rodoviários intermunicipais, foram realizadas medições com a carroceria em movimento. Foram realizadas medições simultaneamente em estradas com trechos em bom estado e com trechos irregulares numa linha regular de transporte, em duas carrocerias de motorização traseira, de dois fabricantes diferentes de carroceria de ônibus.

8.1 Definição das rotas utilizadas

A definição das rotas para as medições foi realizada, dando preferência a uma estrada que tivesse como piso asfalto irregular e também asfalto em bom estado, para avaliar em todas as condições a que as carrocerias e os passageiros estão submetidos. Levou-se em conta, também, as rotas utilizadas pela empresa que autorizou a realização das medições experimentais, desta maneira foi possível realizar os ensaios com o mesmo trajeto percorrido pelos passageiros em uma viagem normal.

Os ensaios foram realizados utilizando a rota entre a cidade de Passo Fundo e a cidade de Cruz Alta, na parte central do Estado do RS. Foram efetuadas medições em locais onde o asfalto estava em boas condições, em condições regulares e também em condições precárias. A classificação utilizada para os tipos de asfalto são, respectivamente, asfalto em bom estado, asfalto em estado regular e asfalto irregular.

8.2 Metodologia utilizada

A realização dos ensaios foi executada em três locais no interior da carroceria: na parte frontal, central e traseira. Foram fixados microacelerômetros em dois pontos da poltrona (assento e encosto) e no assoalho da carroceria. Os ensaios foram realizados simultaneamente nos três locais com objetivo de verificar os pontos de maior vibração transmitida ao passageiro, independentemente do posicionamento das poltronas em relação à suspensão e o motor. Foram utilizados três passageiros de estatura e peso medianos, em cada ponto do interior da carroceria,

especificamente nas poltronas ao lado da janela e do lado direito. A figura 8 mostra os locais de realização das medições.

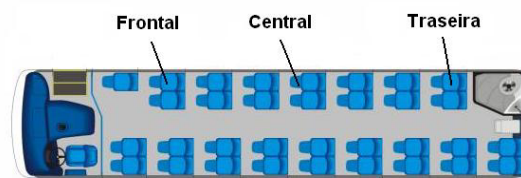


Figura 8 – Locais do interior da carroceria

Para realizar as medições, foram fixados micro acelerômetros nas seguintes posições do passageiro/carroceria, conforme estabelecido pela norma ISO 2631-1 (1997):

- Assento de apoio para as costas (acelerômetro nas direções X e Z);
- Assento de apoio para as pernas (direção Z);
- Assoalho (direção Z)

A figura 9a mostra a localização aproximada da colocação dos acelerômetros junto ao passageiro e à poltrona no interior da carroceria, a figura 9b mostra as direções de medição para cada acelerômetro montado.

8.3 Equipamentos utilizados

Como o ensaio foi realizado simultaneamente em três pontos do interior da carroceria, os equipamentos utilizados foram: 9 microacelerômetros modelo ADXL 321, 3 placas de aquisição DA/USB (*Computerboards*, 4 canais) e 3 computadores portáteis (Duo 1.8, 1024 RAM).

8.3.1 Programa de aquisição e tratamento de dados

A coleta do sinal vindo dos acelerômetros foi feita com um programa desenvolvido no *software* VEE Pro 7.5, onde cada eixo do acelerômetro utiliza um canal da placa e, posteriormente, são gravados arquivos binários em extensão *.dat para cada canal, para posterior tratamento dos dados. A faixa de tensão utilizada é de $\pm 5V$.

O programa de tratamento dos dados que compara o sinal medido com as curvas limites estabelecidas pela norma ISO 2631 foi desen-

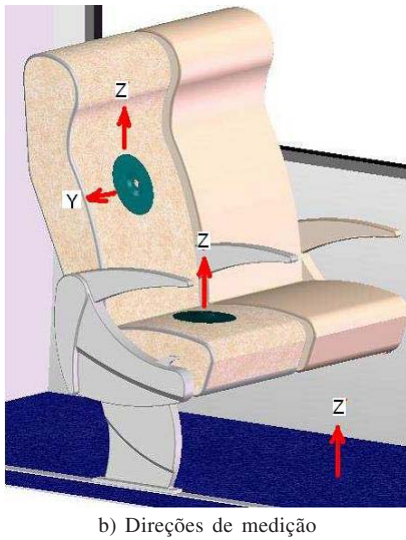
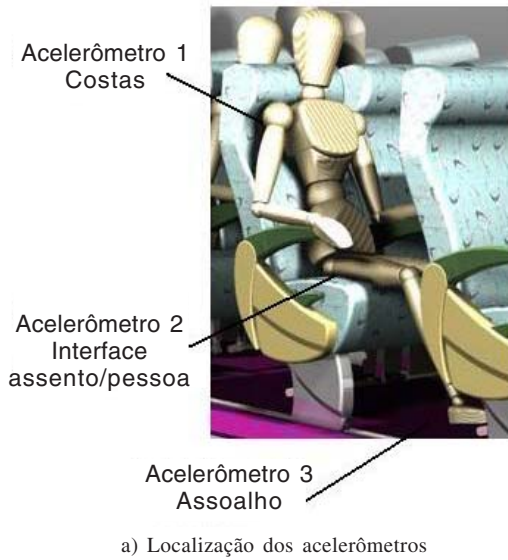


Figura 9 – Localização dos acelerômetros e direções de medição

volvido por Balbinot (2001). O programa é dividido em duas etapas principais: rotinas de processamento básicas (FFT, r.m.s., média, desvio padrão, etc.) e rotinas de avaliação dos níveis de vibração do corpo humano (vibrações de corpo inteiro). O arquivo gerado para cada canal pela rotina de aquisição é lido por esse programa, passa pelo processo de filtragem e após pela ponderação, segundo as funções fornecidas pela norma ISO 2631-1 (1997). Após este processo se obtêm os parâmetros estatísticos como média, desvio padrão, VDV e

eVDV, etc. O programa representa de forma gráfica os dados adquiridos comparando com as curvas limite da norma ISO 2631, que servem para avaliação do(s) efeito(s) da vibração medida com relação à saúde, ao conforto e ao desempenho no trabalho. A figura 10 mostra a janela de interação do programa de tratamento de dados com o usuário.

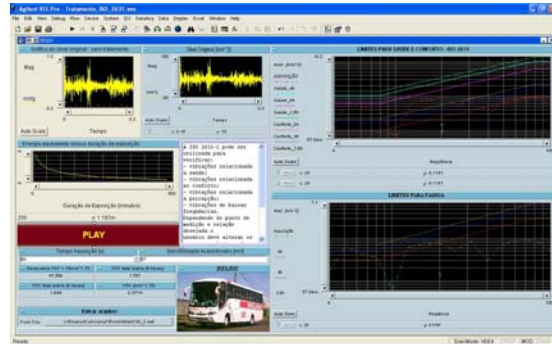


Figura 10 – Tela programa de tratamento de dados

8.4 Resultados

Os resultados médios obtidos durante os ensaios relacionam a aceleração ponderada média com os limites para saúde, conforto e fadiga (conforme especifica a norma ISO 2631), comparando os dois tipos de carroceria ensaiados. Os gráficos estão relacionados ao tipo de estrada, citados anteriormente.

Os gráficos mostrados nas figuras 11 a 13 mostram as avaliações realizadas para saúde e conforto na parte frontal das carrocerias, no assoalho e com o ônibus parado. Os gráficos relacionam Frequência (Hz) e Aceleração ponderada (m/s^2). Os gráficos comparam as duas carrocerias ensaiadas nesta situação.

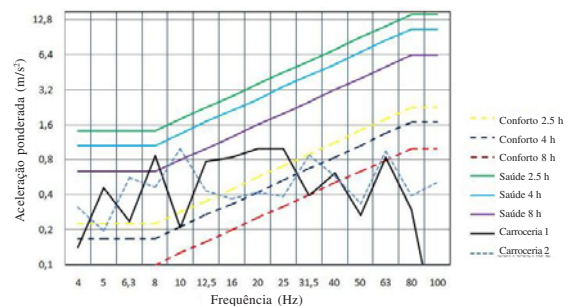


Figura 11 – Saúde e conforto: medição frontal, assoalho, ônibus parado

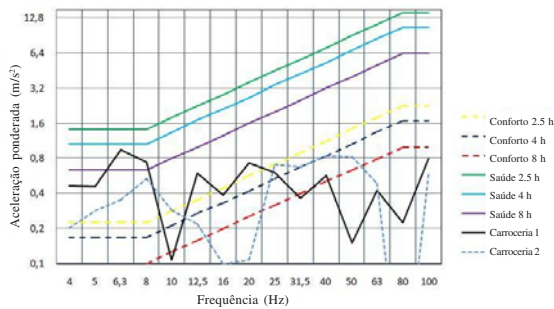


Figura 12 – Saúde e conforto: medição frontal, assento, ônibus parado

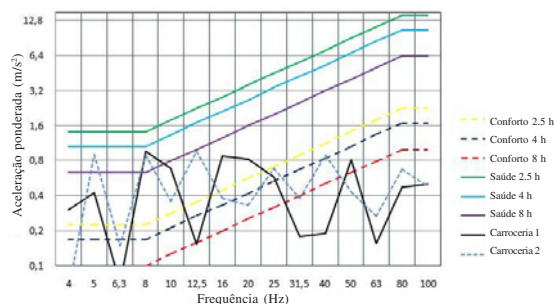


Figura 13 – Saúde e conforto: medição frontal, encosto, ônibus parado

Foram realizadas também medições na parte central e traseira da carroceria, e em asfalto bom estado, regular e irregular, totalizando 36 medições.

Verificou-se que os limites definidos pela norma ISO 2631 com relação ao conforto (exposição de 2,5, 4 e 8 horas) foram excedidos em todas as faixas de frequência, em todos os tipos de asfalto ensaiados, nas duas carrocerias simultaneamente e em todos os locais no interior da mesma (assoalho, assento e encosto), inclusive com a carroceria sem movimento. A exposição acima de 2,5 horas foi excedida nas faixas de frequência de 4 a 40 Hz, a partir dessas faixas o tempo de exposição que apresenta problemas é de 4 horas a 8 horas.

Com relação à saúde, as duas carrocerias apresentam acelerações que ultrapassam os limites de exposição estabelecidos pela norma para um tempo igual ou superior a 8 horas. As acelerações para esse caso ficam em faixas menores de frequência (de 4 a 8 Hz), não tendo distinção entre as partes ensaiadas, ou seja, ocorre tanto no assoalho como

no assento da poltrona. Os trabalhos de Griffin (1990) e Ishitake (2000) mostram que, na faixa de frequência de 1 a 30 Hz, as pessoas apresentam dificuldade para manter postura e reflexos. Esses autores também registram a grande incidência de problemas na região das costas, provenientes de efeitos vibratórios.

As figuras 14 a 16 apresentam os resultados médios obtidos durante os ensaios, relacionando a aceleração ponderada média com os limites para fadiga (conforme especificado na norma ISO 2631), comparando os dois tipos de carroceria ensaiados. Os gráficos estão relacionados aos mesmos tipos de estradas citados anteriormente e também com os ônibus parados com motor ligado.

Do mesmo modo que as análises em relação à saúde e ao conforto, foram realizadas avaliações na parte central e traseira da carroceria, e em asfalto bom estado, regular e irregular, totalizando 36 medições.

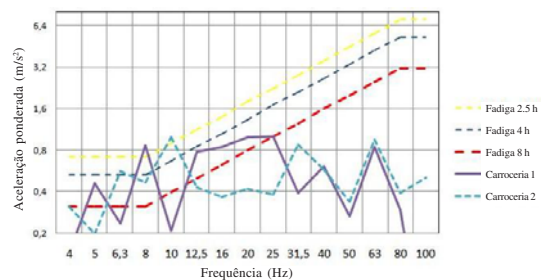


Figura 14 – Fadiga: medição frontal, assoalho, ônibus parado

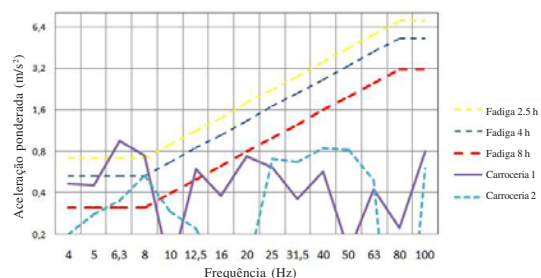


Figura 15 – Fadiga: medição frontal, assento, ônibus parado

Verificou-se que os limites definidos pela norma ISO 2631 com relação à fadiga (exposição de 2,5 horas) tiveram poucos re-

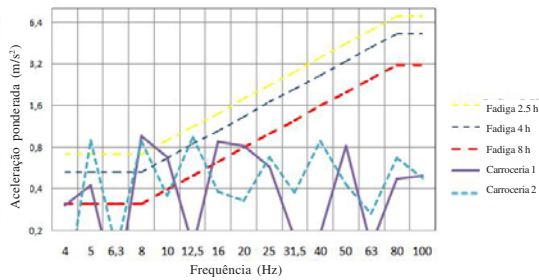


Figura 16 – Fadiga: medição frontal, encosto, ônibus parado

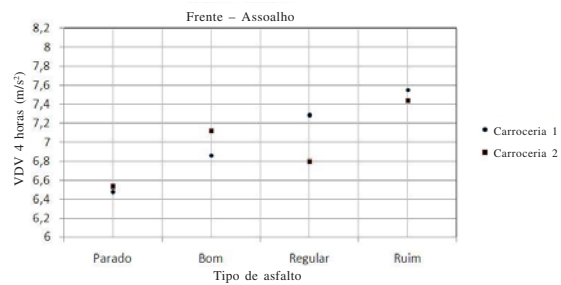


Figura 18 – VDV frente carroceria – assento

sultados excedentes, os pontos que excederam ficaram em faixas de frequência de 4 a 8 Hz. Acima de 8 Hz, todos os ensaios apresentaram valores que podem ocasionar fadiga ao passageiro, tanto no tempo de 4 h como no de 8 h de exposição. Como nos ensaios de conforto e saúde, os ensaios que apresentaram problemas foram excedidos em todos os tipos de asfalto ensaiados, nas duas carrocerias e em todos os locais no interior da mesma (asfalto, assento e encosto), inclusive com a carroceria sem movimento.

Os gráficos apresentados nas figuras 17 e 18 mostram, de forma comparativa, o comportamento do VDV 4 horas médio para os tipos de asfalto ensaiados, comparando as duas carrocerias na parte dianteira das mesmas, avaliando o asfalto e o assento. Também foram analisados os VDV's da parte central e traseira.

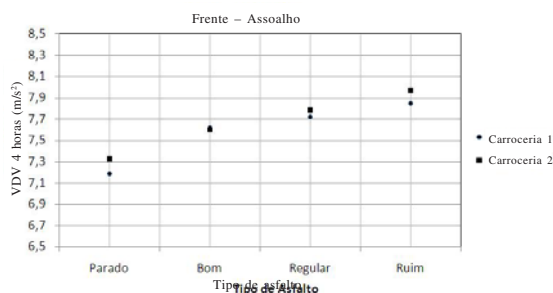


Figura 17 – VDV frente carroceria - asfalto

Com relação ao parâmetro VDV 4 horas, nenhuma carroceria em nenhum tipo de asfalto apresentou um valor de dose de vibração no valor de $15 \text{ m/s}^{1,75}$; a faixa apresentada ficou em torno de 6,29 a $8,17 \text{ m/s}^{1,75}$, o que estaria no intervalo considerado

“desconforto mínimo”, de acordo com os dados das normas BS 6841 e ISO 2631. Em todos os casos os VDV's são maiores no asfalto da carroceria do que no assento da poltrona. Fica evidenciado através dos resultados, para as duas carrocerias, que conforme diminui a qualidade do asfalto, aumenta o índice VDV.

Os maiores valores de acelerações encontrados nas poltronas foram na carroceria 1 (parte traseira), mesmo esta tendo menores valores de aceleração no asfalto. Os resultados das medições experimentais apresentados mostram claramente que os níveis vibratórios a que os passageiros de ônibus estão submetidos ultrapassam os limites estabelecidos pela norma ISO 2631 em relação ao conforto, e com relação à saúde as duas carrocerias ensaiadas apresentaram acelerações que ultrapassaram os limites de exposição para um tempo igual ou superior a 8 horas.

9 Modificação projetual da carroceria

9.1 Modelo básico utilizado

Para entender como se realizará a análise numérica pode-se visualizar a carroceria por meio de um modelo de meio veículo (Figura 19), no qual são considerados os movimentos de translação da suspensão dianteira e traseira na direção vertical e o movimento em direções translacionais e rotacionais nos três eixos para a massa da estrutura da carroceria.

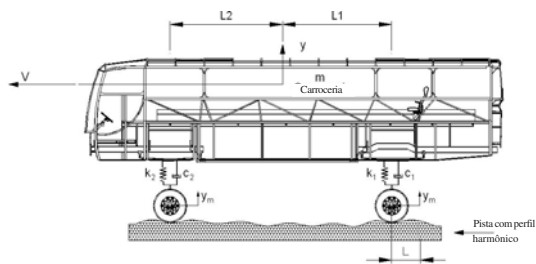


Figura 19 – Representação do modelo de meio veículo

9.2 Modelamento da carroceria

Como passo anterior à análise por elementos finitos da carroceria foi realizado o modelamento tridimensional completo da mesma. O modelamento realizado da carroceria é apresentado na figura 20. Nesta montagem foram acrescentados itens como assoalho, trilho de fixação e chapa de apoio da poltrona, os estabilizadores dianteiros, rodas, suspensão e pneus.

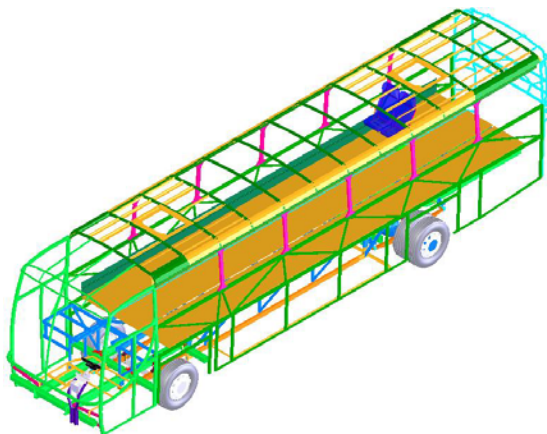


Figura 20 – Modelamento completo da carroceria

9.3 Modelo numérico da carroceria

Para facilitar e reduzir o tempo de processamento dos dados numéricos, optou-se por utilizar na simulação dinâmica um modelo com elementos de barra, atribuindo para todos os elementos seções conforme as diferentes partes da carroceria. O modelo possui 5500 nós e 2500 elementos com opção de formulação Hughes_Liu, com integração da seção transversal. A figura 21 mostra o modelo da carroceria gerado no *software* de pós-processamento.

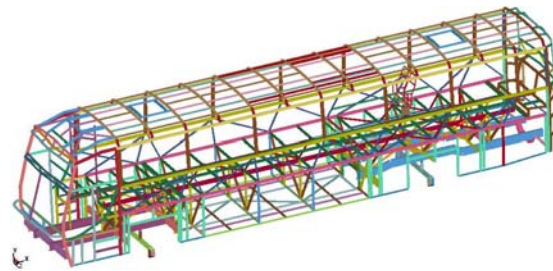


Figura 21 – Modelo numérico da carroceria

9.4 Modelo teórico da suspensão

A suspensão utilizada foi do tipo feixe de molas com a calibração do modelo numérico realizada com resultados experimentais. Os pneus foram considerados através de elementos de mola e amortecedor, com valores de k e c fornecidos pelo fabricante. O sinal das irregularidades do pavimento é aplicado diretamente nos pneus.

9.5 Determinação e descrição das irregularidades do pavimento

Para excitar o modelo numérico do presente trabalho foram usados os dados obtidos por Nardello (2005) em frequência espacial passando para o domínio do tempo, estes caracterizados como sinais ergódicos, ajustando com as mesmas velocidades de tráfego realizadas nos ensaios anteriores. A figura 22 mostra o perfil de rugosidade de um asfalto em bom estado em frequência espacial.

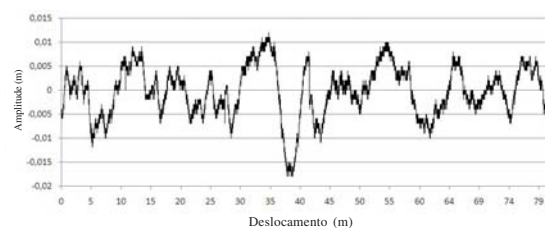


Figura 22 – Perfil de rugosidade de asfalto em bom estado

10 Simulação dinâmica

10.1 Suspensão

Para representar a suspensão do modelo numérico utilizou-se a validação numérica obtida por Peres (2006), que apresentou um

procedimento experimental e numérico para validação de uma suspensão de feixes de molas trapezoidais.

No estudo, Peres realizou medições no feixe de molas variando a magnitude da carga e a velocidade de aplicação. A rigidez da mola é obtida através da função que representa a curva de carga; o amortecimento é obtido pela diferença entre as curvas de carga e descarga, ou seja, pela histerese do sistema (PERES, 2006). A figura 23 mostra os valores de carga e descarga para o ensaio realizado.

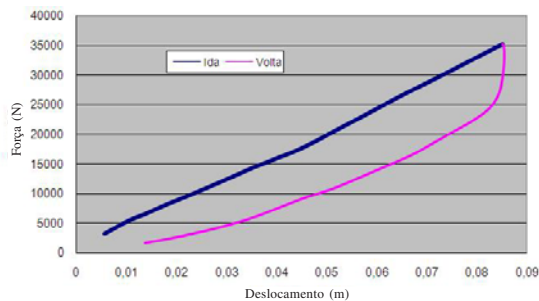


Figura 23 – Força aplicada em função do deslocamento
Fonte: Peres, 2006

A suspensão da carroceria estudada possui quatro feixes de molas; assim, o modelo numérico deve contemplar o comportamento desses feixes quanto à aplicação de cargas no sentido vertical. Para representar o feixe de molas numericamente, optou-se por elaborar um modelo simplificado, de fácil construção, que representasse o comportamento complexo desse tipo de suspensão.

Para modelagem numérica da suspensão, utilizou-se a metodologia baseada em sistemas multicorpo. Segundo Ambrósio (2001), um sistema multicorpo é uma coleção de corpos rígidos ou flexíveis conectados por juntas cinemáticas (esféricas, translacionais). Estruturas podem comportar-se como sistemas multicorpo devido a grandes rotações ou porque desenvolvem mecanismos de deformação definidos. A metodologia montada por Ambrósio propõe-se a montar elementos rígidos unidos através de juntas.

A junta translacional consiste de quatro elementos; os elementos rígidos da junta são

os dois elementos centrais, os dois elementos das pontas são flexíveis e interligados no eixo da carroceria e chassi, respectivamente. Assim, os efeitos originados pelo deslocamento dos pavimentos passarão pelos pneus, sendo transferidos para o eixo e, após, amortecidos pelas juntas e transmitidos para a estrutura do casulo e poltrona. A figura 24 ilustra a representação da junta translacional do modelo numérico.

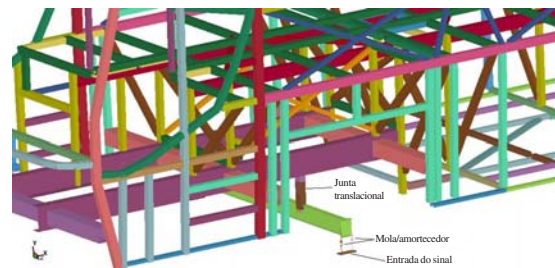


Figura 24 – Representação numérica da suspensão e pneus

10.2 Validação do modelo numérico

Com o objetivo de validar o modelo numérico proposto, foi realizado um ensaio experimental com a carroceria de ônibus em movimento para obter as frequências da estrutura através da medição das acelerações nas direções longitudinal (x), transversal (z) e vertical (y), para comparar com os modos naturais de vibração do modelo numérico. A figura 25 mostra o local de instalação dos acelerômetros na parte traseira da carroceria; a figura também mostra os eixos de referência das medições realizadas.



Figura 25 – Local de fixação dos microacelerômetros

A figura 26 mostra graficamente a comparação entre os resultados experimentais e os modos naturais de vibração do modelo numérico para os cinco primeiros modos. Os resultados demonstram boa concordância entre as medições realizadas, comparando com os modos naturais de vibração do modelo numérico. As diferenças percentuais entre os resultados são pequenas, assim, essas comparações demonstram que o modelo numérico representa com boa precisão o veículo real, podendo ser utilizado nas simulações dinâmicas.

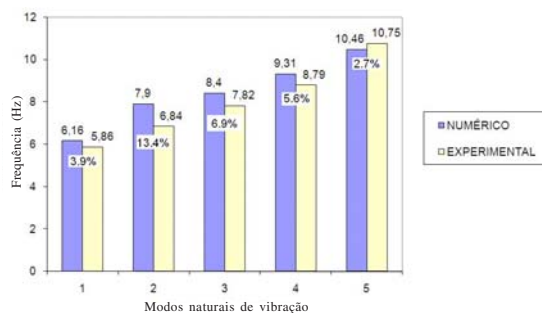


Figura 26 – Comparação entre resultado experimental e numérico

10.3 Análise dinâmica

Na análise dinâmica, foi usado o método de integração implícita de Newmark, no qual a matriz de rigidez é invertida e aplicada aos nós para se obter um incremento de deslocamento. A grande vantagem em utilizar este método é que o passo de tempo pode ser selecionado pelo usuário de acordo com sua necessidade; a desvantagem é o grande recurso computacional necessário para formar e inverter a matriz de rigidez nos cálculos numéricos.

O tempo utilizado para a análise foi de 3,2 segundos, mesmo tempo dos perfis de pista aplicados ao modelo. O passo de tempo configurado foi de 1×10^{-6} segundos e a taxa de frequência dos resultados, de 100 Hz. O perfil de rugosidade no domínio do tempo foi introduzido no eixo dianteiro e no eixo traseiro como um movimento de translação na direção vertical (eixo Y).

A avaliação dos resultados foi feita verificando as acelerações verticais produzidas num ponto na estrutura da poltrona. Inicialmente, a análise foi realizada no modelo da carroceria “original” e, após, foram realizadas propostas de modificação. A figura 27 mostra o local de saída dos resultados da análise dinâmica.

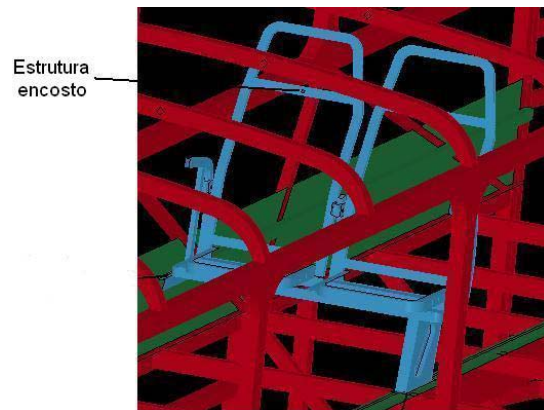


Figura 27 – Local de saída de dados na análise dinâmica

A figura 28 mostra as acelerações do modelo numérico obtidas no domínio do tempo; a figura 29, no domínio da frequência, tendo como deslocamento aplicado asfalto em bom estado com velocidade de 80 km/h. Também foram realizadas análises para os outros tipos de asfalto.

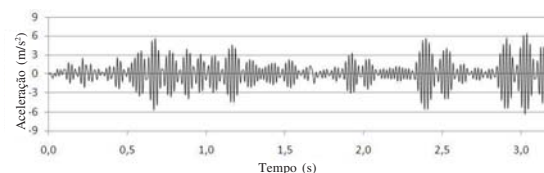


Figura 28 – Aceleração vertical estrutura poltrona, asfalto bom estado

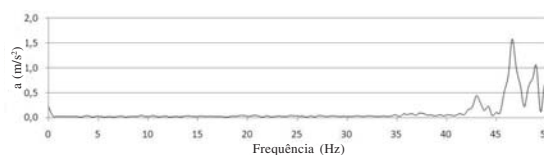


Figura 29 – Aceleração domínio frequência estrutura poltrona, asfalto bom estado

10.4 Modificação projetual

A proposta de modificação projetual consiste, basicamente, em acrescentar ao mo-

delo numérico um material isolador de vibração, de baixa espessura entre os elementos de contato da poltrona com a carroceria, ou seja, entre o apoio lateral da estrutura da poltrona e a chapa longitudinal lateral e, também, entre a peça inferior do pé da poltrona e o trilho de fixação. A figura 30 mostra os locais onde os materiais foram acrescentados.

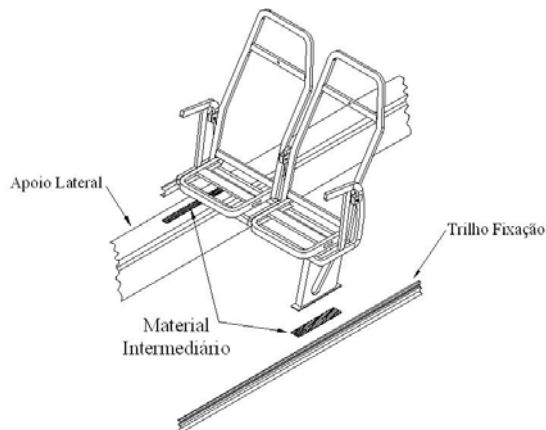


Figura 30 – Elementos isoladores de vibração

A tabela 3 mostra as acelerações médias obtidas numericamente na estrutura da poltrona, para a carroceria original e para os diferentes materiais isolantes aplicados ao modelo numérico.

Os valores mostram que os dois materiais de borracha aplicados no modelo modificado atenuam satisfatoriamente os efeitos vibratórios na estrutura da poltrona, em torno de 35% em relação à estrutura sem modificações. Os ma-

teriais mais rígidos não apresentam um comportamento adequado, inclusive aumentam as acelerações produzidas sob a estrutura da poltrona, portanto, não são recomendados.

A proposta de modificação pode ser adaptada na montagem da estrutura da poltrona na carroceria, colocando o elemento intermediário entre o apoio lateral da estrutura da poltrona e a chapa de apoio lateral da estrutura lateral do casulo, e entre o pé da estrutura da poltrona e o trilho de fixação da base da carroceria.

11 Conclusões

Os resultados obtidos com medições experimentais mostram que os níveis vibratórios a que os passageiros de ônibus estão submetidos ultrapassam os limites estabelecidos pela Norma ISO 2631 em relação ao conforto. Com relação à saúde, as duas carrocerias ensaiadas apresentaram acelerações que ultrapassaram os limites de exposição para um tempo igual ou superior a 8 horas. A verificação do parâmetro VDV aponta que as carrocerias apresentam valores de dose de vibração que ficam na faixa “desconforto mínimo” para um intervalo de 4 horas de exposição. Os resultados obtidos reforçam a necessidade de modificações no projeto para atenuar os efeitos vibratórios na estrutura da poltrona.

O modelo numérico foi desenvolvido de maneira fiel ao projeto de uma carroceria que

Tabela 3 – Resultados análise dinâmica

Local	Aceleração média (m/s ²)			
	Asfalto em bom estado	Redução(%)	Asfalto irregular	Redução(%)
Carroceria original	1,7716	—	2,0087	—
Material borracha	1,0917	38,37	1,3169	34,44
Material borracha sintética	1,0909	38,42	1,3170	34,43
Material ABS	2,4309	—	2,6000	—
Material PVC rígido	2,3764	—	2,5492	—

ainda está em utilização, mesma geometria de uma das carrocerias ensaiadas. A magnitude das acelerações verticais obtidas numericamente não pode ser comparada diretamente com as obtidas experimentalmente, porque no modelo numérico não foram levados em consideração alguns elementos que compõem a carroceria, como a madeira do assoalho, a espuma do assento, peças de acabamento, entre outros.

A validação do modelo numérico com a comparação dos modos naturais de vibração medidos experimentalmente demonstrou que o modelo numérico representa com boa precisão o modelo real, validando o resultado das simulações dinâmicas realizadas.

Através deste trabalho, cumpriu-se o propósito de avaliar os níveis de vibração a que os passageiros que utilizam ônibus rodoviários em viagens de média e longa distância estão submetidos e apresentar uma proposta de modificação para o projeto da carroceria. O modelo numérico desenvolvido pode ser facilmente adaptado para outras configurações de propostas de modificação do conjunto carroceria/poltrona. Salienta-se que este estudo mostra que os possíveis benefícios gerados para a sociedade com a implementação de melhorias no projeto da carroceria dos ônibus de forma a amenizar os efeitos vibratórios que chegam aos passageiros seriam muito significativos.

7 Referências

- ALVES FILHO, A. **Elementos Finitos. A base da tecnologia CAE – Análise Dinâmica.** São Paulo: Editora Érica, 2005.
- AMBRÓSIO, J. A. C. **Crashworthiness. Energy management and occupant protection.** New York: Springer Wien, 2001. p. 205-302.
- BALBINOT, A. **Caracterização dos níveis de vibração em motoristas de ônibus: um enfoque no conforto e na saúde.** Tese. (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.
- BRASIL. Ministério dos transportes. <http://antt.gov.br>.
- COUTO, H. A. **Índice tor-tom: Indicador ergonômico.** Editora Ergo, 2006
- GRIFFIN, M. J. **Handbook of human vibration.** UK: Academic Press, 1990.
- ISO 2631. **Guide for the evaluation of human exposure to whole-body vibration.** International Standard. 1974.
- ISO 2631-1. **Mechanical vibration and shock – evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 1: general requirements.** International Standard. 1997.
- ISHITAKE, T., MATOBA, T. Frequency weighting for the effects of exposure to whole-body vibration on gastric motility. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WHOLE-BODY VIBRATION INJURIES. 2nd, 2000, Siena. **Proceedings...** Siena, 2000.
- MORSCH, I. B. **Análise estrutural de veículos comerciais tipo ônibus.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2001.
- NARDELLO, A **Projeto e Desenvolvimento de uma Pista de Testes.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.
- PERES, G. **Uma metodologia para simulação e análise estrutural de veículos de transporte de carga.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.
- VIEIRA, S. I. **Medicina básica do trabalho.** 3 ed. Genesis, 1998. V.2.
- MERCEDES-BENZ. **Diretrizes para construção de carrocerias.** 2007.
- SCANIA. Manual dos construtores de ônibus. 2 ed. 2005.