

# CONFORTO VEICULAR EM UM VEÍCULO TOYOTA ETIOS NA CIDADE UNIVERSITÁRIA ARMANDO DE SALLES OLIVEIRA - USP

**Luis Felipe de Castro Aun Lima**

limapoli@usp.br

**Orientador:** Prof. Dr. Roberto Spinola Barbosa

**Resumo.** Este trabalho analisa o conforto, em relação às vibrações, de um veículo Toyota Etios na Cidade Universitária da USP – Campus Armando de Salles Oliveira e também verifica como a velocidade do carro, a pressão nos pneus e o carregamento influenciam nos resultados. Os principais conceitos sobre conforto veicular, suspensão automotiva e dinâmica veicular (o que se refere a conforto) são apresentados. Para a análise do conforto, é proposta a utilização da norma ISO 2631-1 (1997) e da técnica de análise modal. Testes com um sensor posicionado no veículo foram realizados para a coleta de dados, que foram tratados com o auxílio do software MatLab. Na análise modal pode-se chegar a duas conclusões: a pressão nos pneus pouco influi nos modos de vibrar do veículo e no conforto; o carregamento do carro influencia diretamente nas frequências naturais do veículo e no conforto dos passageiros. Quanto maior for o carregamento, menor a intensidade das vibrações transmitidas aos passageiros e maior o conforto. Na análise realizada de acordo com a ISO 2631-1 (1997), além de se ratificar as conclusões obtidas na análise modal, observou-se que quanto menor a velocidade com que o veículo trafega, melhor será o conforto de seus ocupantes. Por fim, é possível concluir que os níveis de conforto para o veículo Toyota Etios no trajeto realizado na Cidade Universitária da USP – Campus Armando de Salles Oliveira não são bons.

**Palavras-chave:** Conforto veicular Vibrações. Suspensão automotiva. Medições. Análise modal.

## Introdução

O motorista que utiliza o automóvel como principal meio urbano de locomoção, seja para ir ao trabalho, à faculdade ou qualquer outro destino, busca, primeiramente, estar confortável durante o percurso que realiza. O conforto, que significa bem-estar ou comodidade material, de acordo com o dicionário Michaelis (2015), pode ser analisado de diferentes maneiras quando se trata de um automóvel: acústico, térmico, dinâmico, entre outros.

Para proporcionar maior conforto ao motorista e aos passageiros de um veículo, foram desenvolvidos diversos componentes automotivos ao longo dos anos. O sistema de ar condicionado, por exemplo, propicia um controle da temperatura interna do veículo, aumentando o conforto térmico. Já os componentes emborrachados nas extremidades do carro, ajudam a isolar acusticamente o veículo de sons externos e, juntamente com o rádio, tornam possível a seleção de qual tipo de som e qual altura se deseja ouvir, garantindo um conforto acústico. Por fim, componentes como as suspensões, os pneus e os bancos garantem um maior conforto dinâmico, minimizando as vibrações e garantindo um trafegar mais confortável.

O presente trabalho tem como objetivo analisar o conforto, em relação às vibrações, de um veículo Toyota Etios na Cidade Universitária da USP – Campus Armando de Salles Oliveira. Para tal, serão realizados testes com um sensor posicionado no veículo, visando-se coletar dados em diferentes condições de velocidade, pressão nos pneus e carregamento. Posteriormente, esses dados serão tratados e será realizada uma análise modal, avaliando as frequências naturais e fatores de amortecimento, que são características do veículo, independentemente a via em que o automóvel está trafegando. Por fim, será analisado o conforto veicular de acordo com a norma ISO 2631-1 (1997), verificando como cada condição afeta o conforto dos passageiros e também qual é o nível de conforto no percurso realizado.

## 1. Conforto veicular

### 1.1. Vibrações

De acordo com Ganzarolli (2012), as vibrações de um corpo podem ser definidas como qualquer movimento executado em torno de um ponto fixo, podendo ser regular, senoidal, irregular, entre outros. Elas podem ser definidas pela frequência (Hz), pela aceleração máxima ( $m/s^2$  ou  $rad/s^2$ ) e direção do movimento.

Considerando-se as vibrações em um automóvel, elas podem ser sentidas por um passageiro ou motorista no corpo inteiro. Além disso, podem ser transferidas ao ocupante do veículo por meio de diversas interfaces, como os pés no assoalho, o tronco no assento e as mãos no volante ou no câmbio.

### 1.2. Sistema de coordenadas

De acordo com as normas ISO 4130 (1978) e DIN 70000 (1994), os eixos de coordenadas de um veículo são orientados de acordo com a Figura 1.1.

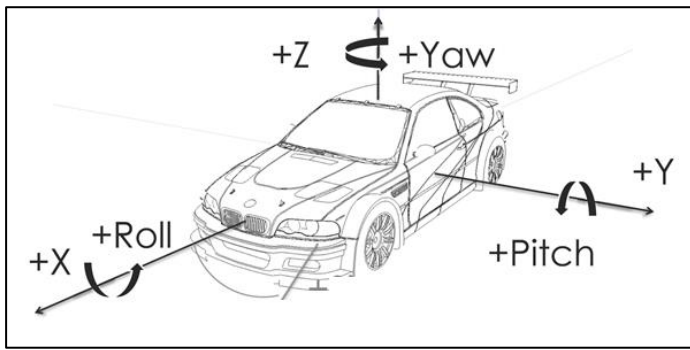


Figura 1.1 - Sistema de eixos normalizados [8]

Com:

X = longitudinal;  
Y = lateral;  
Z = vertical;

Roll = rolagem;  
Pitch = arfagem;  
Yaw = guinada.

### 1.3. ISO 2631-1 (1997)

A norma ISO 2631-1 (1997) avalia a exposição humana à vibração de corpo inteiro, classificando diferentes níveis de conforto e de segurança (limites prejudiciais à saúde), de acordo com a aceleração ponderada,  $a_w$ , que será apresentada no decorrer desta seção. Essa norma relaciona a aceleração RMS (do inglês root mean square) em função da frequência (para banda de um terço de oitava) e tempo de exposição. O intervalo de frequências considerado é de 0,5 Hz a 80,0 Hz, mais indicado para o estudo de danos à saúde e conforto. A faixa de 0,1 a 0,5 Hz é indicada para o estudo dos enjoes com origem nos transportes.

As medições das vibrações, segundo a norma ISO, devem ser realizadas de acordo com um sistema de eixos coordenados, apresentado na Figura 1.2, centrado no indivíduo exposto e também no ponto de transferência de vibração. A fixação do sensor deverá ser feita na interface homem-fonte vibracional (nádega-assento, costas-encosto e pés-chão).

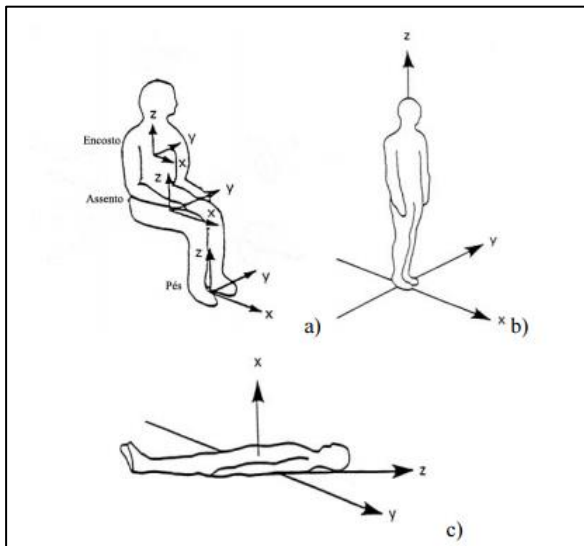


Figura 1.2 - Sistema referência de eixos coordenados [8]

Na Figura 1.2, são apresentados os sistemas de eixos coordenados para as seguintes situações:

a) Indivíduo sentado;

b) Indivíduo de pé;

c) Indivíduo deitado.

A aceleração RMS, por banda de terço de oitava, que é a base para toda a análise, pode ser calculada pela equação (1), segundo a norma ISO 2631-1 (1997).

$$a_{\text{rms}} = \left( \frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) \cdot dt \right)^{1/2} \quad (1)$$

Em que:

$a_{rms}$  = aceleração eficaz [m/s<sup>2</sup>];

$a(t)$  = função atemporal da aceleração [m/s<sup>2</sup> ou g];

$t$  = tempo [s];

$T$  = duração ou período da medição [s].

A aceleração ponderada para a banda de terço de oitava,  $a_w$ , que é utilizada para classificar os níveis de conforto e saúde na ISO 2631-1 (1997), é calculada pela equação (2).

$$a_w = \left( \sum_i (w_i \cdot a_i)^2 \right)^{1/2} \quad (2)$$

Em que:

$a_w$  = aceleração ponderada [m/s<sup>2</sup>];

$w_i$  = fator de ponderação para a  $i$ -ésima banda de terço de oitava, tabelado na ISO 2631-1 (1997), em função do ponto de medição e da direção da vibração;

$a_i$  = valor da aceleração eficaz,  $a_{rms}$ , da  $i$ -ésima banda de terço de oitava [m/s<sup>2</sup>].

Para a direção Z, deve-se utilizar os valores tabelados de  $w_k$  e para as direções X e Y, os valores de  $w_d$ . Os fatores de ponderação  $w_k$  e  $w_d$  são fixos e podem ser encontrados em tabelas na ISO 2631-1 (1997) para cada banda de terço de oitava.

Por fim, quando a vibração se faz sentir em mais de uma direção, o valor da aceleração total ponderada,  $a_{eq}$ , é calculado a partir da equação (3).

$$a_{eq} = (k_x \cdot a_{wx}^2 + k_y \cdot a_{wy}^2 + k_z \cdot a_{wz}^2)^{1/2} \quad (3)$$

Em que:

$a_{eq}$  = aceleração total ponderada ou equivalente [m/s<sup>2</sup>];

$a_{wx}$ ,  $a_{wy}$  e  $a_{wz}$  = aceleração ponderada por banda de terço de oitava, nos eixos X, Y e Z, respectivamente [m/s<sup>2</sup>];

$k_x$ ,  $k_y$  e  $k_z$  = fatores multiplicativos adimensionais das direções X, Y e Z, respectivamente.

Os fatores  $k_x$ ,  $k_y$  e  $k_z$  possuem valores de acordo com a avaliação que se pretende realizar. No caso de conforto, todos os fatores assumem valor unitário, já no caso de saúde,  $k_x$  e  $k_y$  valem 1,4 e  $k_z$  possui valor unitário. Como o objetivo do presente trabalho é analisar apenas o conforto, a equação (3) pode ser substituída pela equação (4).

$$a_{eq} = (a_{wx}^2 + a_{wy}^2 + a_{wz}^2)^{1/2} \quad (4)$$

Quando o conforto veicular for analisado em mais de um ponto de contato entre o ser humano e a fonte de vibração, o valor da aceleração global deverá ser calculado pela raiz quadrada da soma dos quadrados das acelerações totais ponderadas.

A Tabela 1.1 apresenta a classificação da percepção conforto de acordo de acordo com as diferentes faixas de aceleração ponderada, disponibilizada na ISO 2631-1 (1997).

Tabela 1.1 - Percepção do conforto [8]

<b>Aceleração ponderada</b>	<b>Percepção</b>
Menor que 0,315 m/s <sup>2</sup>	Confortável
0,315 m/s <sup>2</sup> a 0,63 m/s <sup>2</sup>	Ligeiramente confortável
0,5 m/s <sup>2</sup> a 1 m/s <sup>2</sup>	Ligeiramente desconfortável
0,8 m/s <sup>2</sup> a 1,6 m/s <sup>2</sup>	Desconfortável
1,25 m/s <sup>2</sup> a 2,5 m/s <sup>2</sup>	Muito desconfortável
Maior que 2 m/s <sup>2</sup>	Extremamente desconfortável

Os valores apresentados pela norma ISO 2631-1 (1997) são médios para os seres humanos, podendo variar dentre diferentes indivíduos.

## **2. Suspensão automotiva**

A suspensão automotiva é o principal componente responsável por garantir conforto aos ocupantes do veículo, armazenando e dissipando parte da energia transmitida ao carro. Ela pode ser descrita como sendo o conjunto de componentes que conectam a roda ao chassi do veículo. Simplificadamente, é composta de um sistema mola amortecedor e possui a função primária absorver as irregularidades do terreno pelo qual o automóvel circula e não transmitir perturbações aos passageiros. As suspensões podem ser ativas ou passivas. Em um sistema ativo, possuem uma tecnologia responsável por controlar os movimentos verticais das rodas, não deixando que sejam inteiramente determinados pelas condições da pista. Já no passivo, o movimento das rodas é determinado pela superfície da via na qual o veículo estiver trafegando.

Além disso, a suspensão possui outras funções que não serão abordadas no presente trabalho, como garantir aderência dos pneus ao solo, suportar a carga do veículo e também estabilizar o carro quando em movimento, principalmente nas curvas.

### **2.1. Massas suspensa e não suspensa**

A massa total do veículo pode ser dividida em duas partes. A massa suspensa compreende todos os elementos do veículo sustentados pelas molas da suspensão veicular, já a massa não suspensa é definida como a que fica entre o solo e as molas da suspensão, como rodas, pneus, discos e tambores de freios, entre outros.

### **2.2. Principais tipos de suspensão**

Os diferentes tipos de suspensão foram desenvolvidos fazendo adaptações aos mais variados estilos de veículos, devido à busca por maior conforto e segurança, e também devido ao avanço das tecnologias no setor automotivo ao longo dos anos.

As suspensões automotivas podem ser divididas em três principais tipos: com eixos rígidos, com eixos de torção e suspensões independentes.

#### **a) Eixo rígido**

Neste tipo de suspensão, as rodas esquerda e direita estão ligadas por um único eixo. Assim, o movimento de uma roda afeta o da outra, tornando mais fácil a perda de contacto com a pista. Os eixos e os seus apoios são pesados, aumentando a massa suspensa do carro, além de ocuparem um grande espaço. No entanto, como é barata de produzir e bastante resistente, a suspensão de eixo rígido foi por muito tempo utilizada nas suspensões traseiras de carros populares.

As suspensões Hotchkiss, de quatro barras e De Dion são as mais conhecidas de eixo rígido.

#### **b) Eixo de torção**

As suspensões tipo eixo de torção estão presentes na maioria dos veículos comercializados no Brasil. Sua configuração simples e robusta faz com que os custos de fabricação e manutenção sejam reduzidos. A energia, em sua maioria, é dissipada por meio da torção do eixo central.

Apesar de simples, o sistema com eixo de torção possui uma característica muito interessante. Ao passar por obstáculos, ele se mostra macio, proporcionando conforto aos passageiros, porém nas curvas, apresenta resistência à torção do eixo e diminui a rolagem da carroceria, mantendo certa independência entre os eixos e estabilizando o veículo.

#### **c) Independente**

Nas suspensões independentes, o movimento vertical de uma roda não interfere no movimento da roda oposta, o que é excelente para lidar com irregularidades nas pistas. O sistema é leve, estável e oferece uma condução confortável, além de ocupar menos espaço. No entanto, é mais cara que os outros dois tipos.

As suspensões braço de arrasto, multi barras, braço oscilante e MacPherson são as mais conhecidas desse tipo.

## **3. Outros componentes do veículo**

Além do sistema de suspensão, outros componentes automotivos que também influenciam na dinâmica veicular, no que diz respeito à transmissão de vibrações e, conseqüentemente, no conforto, são os pneus e os assentos.

Os pneus estão diretamente em contato com a pista. As interfaces de contato do veículo com o solo são os pneus. Eles possuem características elásticas e também de amortecimento. Uma das propostas do presente trabalho é analisar como a variação da pressão interna dos pneus afeta no conforto dos passageiros do veículo e também na análise modal do último.

As principais interfaces entre o veículo e os passageiros são os assentos. A maior parte das vibrações é transmitida aos passageiros por eles. Por isso, também podem ser considerados na análise da dinâmica veicular. Entretanto, para a

análise do presente projeto, como os assentos do veículo testado não sofrerão qualquer alteração, eles não serão considerados no trabalho, sendo abordados na nesta seção apenas a título de informação.

#### 4. Dinâmica veicular

A resposta dinâmica de um veículo pode ser caracterizada por entradas e saída de um sistema. As entradas são as excitações geradas por fontes externas (pista) ou internas (rodas, transmissão e motor). As saídas podem ser acelerações, velocidades ou deslocamentos do sistema e/ou estruturas do veículo, em qualquer direção.

##### 4.1. Modelo de 2 graus de liberdade

O modelo de ¼ de carro, com 2 graus de liberdade, representa apenas uma das rodas do veículo, com uma suspensão, e ¼ da massa suspensa. Ele é importante para uma melhor compreensão da dinâmica de um veículo, principalmente no que se trata da transmissão de vibrações. Nesse modelo, apresentado na Figura 4.1, o pneu também é representado.

Primeiramente, são introduzidas as seguintes hipóteses, visando simplificar o equacionamento matemático: o modelo não prevê o deslocamento do pneu com o perfil da pista; a suspensão é independente; a suspensão é passiva; o assento do veículo é desconsiderado; o pneu está em contato pontual com a pista; a deflexão do pneu é considerada linear.

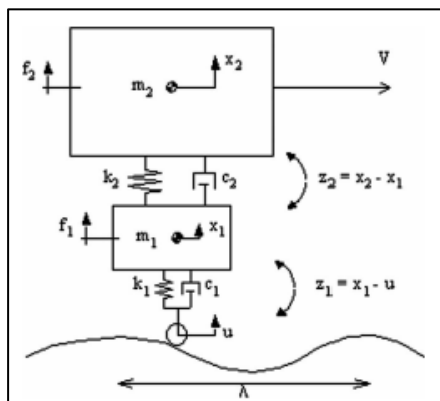


Figura 4.1 - Modelo de um quarto de carro [1]

Na Figura 4.1, o bloco  $m_2$  representa ¼ da massa suspensa do veículo e  $m_1$  ¼ da massa não suspensa. As forças aplicadas ao sistema são  $f_1$  e  $f_2$ . A entrada  $u$  equivale às excitações causadas pela pista,  $k_2$  e  $c_2$  são a constante elástica da mola e o coeficiente de amortecimento da suspensão e  $k_1$  e  $c_1$  do pneu, respectivamente. Por fim,  $x_2(t)$  e  $x_1(t)$  são os deslocamentos verticais da massa suspensa e não suspensa, respectivamente.

Utilizando-se da Segunda Lei de Newton, aplicada nos dois blocos, pode-se chegar às equações do movimento do sistema com dois graus de liberdade:

$$m_1 \cdot \ddot{x}_1 + c_1 \cdot (\dot{x}_1 - \dot{u}) + k_1 \cdot (x_1 - u) - c_2 \cdot (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) = f_1 \quad (5)$$

$$m_2 \cdot \ddot{x}_2 + c_2 \cdot (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_1 \cdot (x_2 - x_1) = f_2 \quad (6)$$

##### 4.2. Frequências naturais, modos de vibrar e fator de amortecimento

Segundo Gillespie (1992), pode-se obter a fórmula da frequência natural da massa suspensa de um veículo pelo modelo de ¼ de carro, como o apresentado pela Figura 4.1. A equação (7) apresenta como se calcular essa frequência, em rad/s. Para se obter a frequência natural em Hz, basta dividir o valor da frequência natural em rad/s por  $2\pi$ .

$$\omega_n = \sqrt{\frac{RR}{m_2}} \quad (7)$$

Com:

$$RR = \frac{k_1 \cdot k_2}{k_1 + k_2}$$

Em que:

RR = rigidez equivalente [N/m];  
 $\omega_n$  = frequência natural [rad/s].

Como se pode verificar, a frequência natural depende da rigidez dos pneus e das molas da suspensão e também da massa. De acordo Freitas (2006), a relação entre a rigidez equivalente e a massa suspensa do veículo representa a deflexão estática da suspensão devido ao peso próprio do veículo e é um indicativo da capacidade da suspensão de isolar a massa suspensa de vibrações. Então, quanto menor a frequência natural, melhor será o isolamento.

O conjunto de todas as frequências naturais de um sistema compõem os modos de vibração. A primeira frequência natural dos modos de vibração, que possui o menor valor em Hz, é chamada de frequência fundamental. Além disso, o primeiro modo é denominado de modo fundamental.

Gillespie (1992) recomenda que a frequência natural não amortecida da massa suspensa na direção Z em um veículo fique em torno de 1 Hz, minimizando a aceleração, ou vibração, transmitida para o chassi e seus ocupantes.

Quando o amortecimento é levado em conta, a frequência é chamada de frequência natural amortecida, apresentada na equação (8).

$$\omega_d = \omega_n \cdot \sqrt{1 - \xi^2} \tag{8}$$

Em que:

$\omega_d$  = frequência natural não amortecida [rad/s ou Hz];  
 $\xi$  = fator de amortecimento.

O fator de amortecimento influencia na dissipação de energia absorvida pelo veículo proveniente das perturbações externas. Quando o fator de amortecimento zero, o sistema é não amortecido, isto é, nenhuma energia é dissipada. Quando o fator é maior que zero e menor que um, ele é subamortecido. Quando vale um, é chamado de crítico. Por fim, quando é maior do que um, é denominado superamortecido.

Em um sistema, a frequência natural e seu respectivo modo de vibração podem ser obtidos graficamente no espectro do sinal de saída de um deslocamento, velocidade ou aceleração. Segundo Inman (2001), quando a curva do gráfico apresentar um pico, o último representa um dos modos de vibrar do sistema em análise. A frequência no valor máximo deste pico é a frequência natural amortecida do modo em questão.

Para se obter o fator de amortecimento,  $\xi$ , será utilizado o método da meia banda de potência. Neste método, a medida do fator de amortecimento é baseada na resposta da frequência. A largura da banda (a meia potência), que também é utilizada no cálculo, é definida como a largura da curva da resposta de frequência quando a magnitude vale 0,707 vezes o valor do pico. O fator de amortecimento pode ser obtido a partir da relação entre a largura de banda e a frequência central de uma ressonância, ou frequência natural, apresentada na equação (9). De acordo com Inman (2001), esse método pode ser utilizado tanto para curvas de deslocamento, quanto para aceleração e velocidade, desde que o fator de amortecimento seja pequeno.

$$\xi = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta\omega}{\omega_d} = \frac{1}{2} \cdot \frac{(\omega_b - \omega_a)}{\omega_d} \tag{9}$$

A Figura 4.2 ilustra os métodos gráficos.

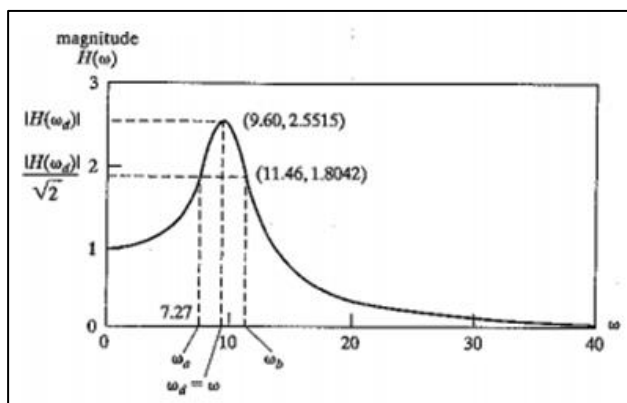


Figura 4.2 - Método da meia banda de potência [7]

## 5. Sensoriamento

Para se obter as acelerações resultantes das irregularidades da pista em um veículo na Cidade Universitária da USP – Campus Armando de Salles Oliveira, é necessária a coleta de dados por meio de um sensor posicionado em um veículo em movimento.

O sensor utilizado no presente trabalho é composto de três acelerômetros, para medir as acelerações de saída nas direções vertical, longitudinal e lateral, e três velocímetros angulares (giroscópios), responsáveis por obter as velocidades angulares de saída nas direções de guinada, rolagem e arfagem. O fabricante é a empresa InvenSense e o modelo é o MPU-6000. Sua frequência de amostragem típica é de 1 kHz. O sensor foi posicionado entre o motorista do veículo e o assento.

O software utilizado para aquisição de dados é o Baseflight. Apesar de sua máxima frequência de amostragem ser baixa, 100 Hz, o software foi escolhido por ser gratuito, não necessitando a obtenção de uma licença paga para utilizá-lo, e também pela simplicidade para obter dados com o mesmo.

Nas medições realizadas, os sinais da saída são conhecidos, graças ao software Baseflight e à captação de dados pelos sensores. Entretanto, não se pode dizer o mesmo para os sinais de entrada, já que são randômicos e desconhecidos, devido às diferentes condições da pista em que foram realizadas as medições.

A aleatoriedade do sinal de entrada pode impossibilitar a visualização de alguns modos de vibrar em determinada direção, já que é possível que não haja a excitação do modo na frequência necessária.

O veículo utilizado nas medições, Toyota Etios 1.3 X, possui massa de 940 kg, suspensões dianteiras independentes, do tipo McPherson e traseiras do tipo eixo de torção.

### 5.1. Percurso realizado

O trajeto percorrido pelo carro para a realização das medições será na Cidade Universitária da USP - Campus Armando de Salles Oliveira pode ser visualizado na Figura 5.1. Ele não foi escolhido por acaso. O objetivo é que o veículo trafegue por diferentes tipos de vias, para se verificar o efeito no conforto veicular e também tentar excitar o carro com diferentes frequências, possibilitando uma melhor análise modal. Também houve a preferência por vias retilíneas, com lombadas e com a menor quantidade possível de curvas, para facilitar o deslocamento do veículo com velocidade constante.

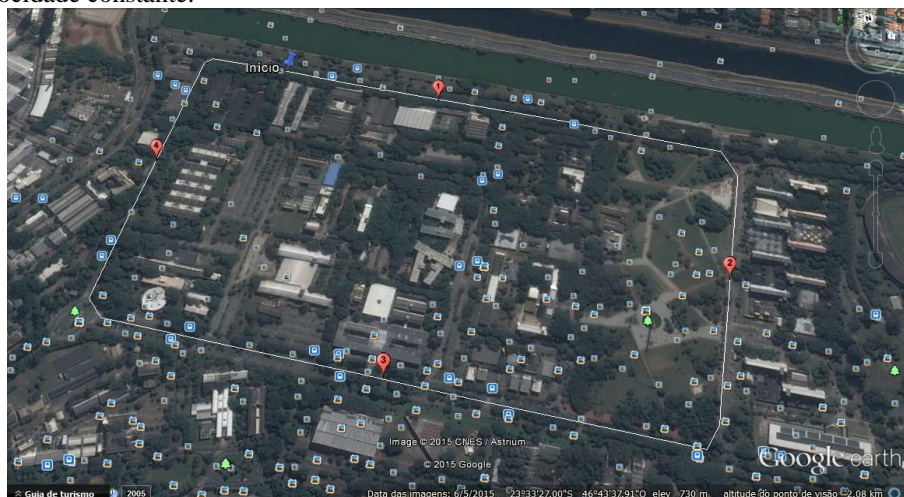


Figura 5.1 – Percurso na Cidade Universitária da USP [6]

A descrição do trajeto é:

Início - Av. Prof. Mello Moraes (Raia) em frente ao prédio do PME-EPUSP;

1 - Av. Prof. Mello Moraes (Raia);

2 - Rua do Anfiteatro;

3 - Av. Prof. Luciano Gualberto;

4 - Av. Prof. Almeida Prado;

Fim - Mesmo local do início.

### 5.2. Parâmetros variáveis

Para se estudar como as vibrações e, conseqüentemente, o conforto veicular se relacionam com alguns parâmetros de entrada, os testes foram realizados variando-se:

a) Pressão nos pneus:

- dianteiros: 32 psi / traseiros: 29 psi (recomendada no manual do veículo);

- dianteiros: 22 psi / traseiros: 19 psi.

b) Velocidade do veículo:

- 20 km/h;

- 40 km/h;

- 60 km/h.

- c) Carregamento do veículo:  
 - somente o motorista (78 kg);  
 - motorista + quatro passageiros (373 kg).

## 6. Tratamento de dados

Antes de qualquer análise, foi necessário o tratamento dos dados obtidos. Ferramentas como matriz de rotação, filtros digitais, decimações e interpolações das curvas foram implementadas, visando-se melhorar a qualidade dos dados obtidos e evitar análises e resultados equivocados. O software MatLab foi utilizado nesta etapa.

Na aquisição de dados, o sensor foi posicionado no banco do automóvel, que possui certa inclinação em relação ao eixo de coordenadas do veículo. Os ângulos de guinada e rolagem eram muito pequenos, podendo ser aproximados por 0°. Já o ângulo de arfagem valia 17°. Sendo assim, a matriz de rotação pode ser simplificada por:

$$R_{xyz}(0^\circ, 17^\circ, 0^\circ) = \begin{bmatrix} \cos 17^\circ & 0 & \sin 17^\circ \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin 17^\circ & 0 & \cos 17^\circ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,9563 & 0 & 0,2924 \\ 0 & 1 & 0 \\ -0,2924 & 0 & 0,9563 \end{bmatrix}$$

O período de amostragem do sensor acaba não sendo constante como desejado, devido às limitações do software utilizado, variando de 9,5 ms a 10,5 ms. Sendo assim, a frequência varia de 95 Hz a 105 Hz. Para corrigir esse erro foi utilizada a interpolação linear, mesmo sabendo que a curva não possui a forma linear.

Por definição, os filtros são dispositivos cuja principal finalidade é permitir a passagem de componentes de um sinal na faixa selecionada de frequências, rejeitando ou atenuando os componentes indesejados. Na análise modal foi utilizado um filtro passa-baixa ou “*lowpass*”. No presente projeto, adotou-se como limite a frequência de 25 Hz. Já na verificação do conforto pela norma ISO 2631-1 (1997) foi utilizado um filtro passa-banda ou “*bandpass*”, já que as frequências de interesse são na faixa de 0,5 a 80 Hz.

A decimação trata-se do processo que reduz o ritmo de amostragem, isto é, existirá um novo espaço amostral no qual serão coletados dados a cada N amostras do espaço original. Nesse processo ocorre a diminuição de ruído devido à redução da banda passante e aumento da resolução da curva. A técnica de decimação será utilizada apenas na análise modal, com um novo ritmo a cada 4 amostras. Como os resultados da análise serão obtidos graficamente, o aumento da resolução torna-se interessante neste caso.

## 7. Análise modal

Após a análise modal, apresenta-se a Tabela 7.1, com os resultados retirados dos espectros de resposta.

Tabela 7.1 - Análise modal de todas as condições

Condição	1	2	4	5	7	8
Veloc. (km/h)	40	60	40	60	40	60
P-pneus (psi)	32/29	32/29	22/19	22/19	32/29	32/29
Carregam. (kg)	78	78	78	78	373	373
fn vertical (Hz)	1,3672	1,4648	1,3672	1,4648	1,15	1,2695
ξ vertical	0,2065	0,2141	0,1964	0,2035	-	0,2052
fn longitudinal (Hz)	-	-	-	-	-	-
ξ longitudinal	-	-	-	-	-	-
fn lateral (Hz)	3,418	-	3,5156	-	3,2303	-
ξ lateral	0,1932	-	0,2265	-	0,3149	-
fn guinada (Hz)	-	-	2,5391	-	-	-
ξ guinada	-	-	0,2668	-	-	-
fn rolagem (Hz)	0,6836	1,0742	0,6836	1,0742	0,7813	0,9766
ξ rolagem	0,705	0,6083	0,7037	0,5228	0,5616	0,4724
fn arfagem (Hz)	1,7578	1,8555	1,7578	1,8555	1,3672	1,5625
ξ arfagem	0,2579	0,2192	0,2315	0,2207	0,2603	0

As condições 3, 6 e 9, com velocidade 20km/h, tiveram resultados inconsistentes e não foram adicionadas à tabela.

Isso não quer dizer que as medições tenham sido feitas de forma errada. Apenas não foram suficientes para a análise modal.



A Tabela 7.2 apresenta o valor da variação das frequências naturais e da raiz quadrada da variação das massas. O erro percentual também é apresentado.

Tabela 7.2 - Análise modal de todas as condições

Condição	1	7	2	8
Massa total (kg)	1018	1313	1018	1313
fn vertical (Hz)	1,3672	1,1500	1,4648	1,2695
$\frac{f_{nA}}{f_{nB}}$	1,188869565		1,153840095	
$\sqrt{\frac{m_B}{m_A}}$	1,135686528		1,135686528	
Erro	4,68%		1,60%	

## 8. Conforto veicular - ISO 2631-1 (1997)

O procedimento foi o mesmo para cada condição. Foi utilizado um filtro passa-banda para retirar as frequências indesejadas do sinal. A aceleração eficaz,  $a_{rms}$ , foi calculada de acordo com a equação (1), utilizando o período da medição. Como os indivíduos dentro do veículo estavam sentados, foram utilizados os fatores de ponderação para banda de terço de oitava adequados para essa situação,  $w_k$  e  $w_d$ , tabelados na ISO 2631-1 (1997), para o cálculo da aceleração ponderada,  $a_w$ , nas direções vertical (Z), longitudinal (X) e lateral (Y), como indicado na equação (2). Por fim, com o auxílio da equação (3) e utilizando-se os fatores multiplicativos adimensionais com valor unitário, já que está sendo analisado apenas o conforto, obtém-se a aceleração ponderada total,  $a_{eq}$ , com a qual é possível determinar o nível de conforto para cada condição, de acordo com a norma. A Tabela 8.1 mostra os resultados obtidos para as condições de 1 a 9 após as etapas descritas acima.

Tabela 8.1 – Avaliação de conforto de acordo com a ISO 2631-1 (1997)

Condição	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Veloc. (km/h)	40	60	20	40	60	20	40	60	20
P-pneus (psi)	32/29	32/29	32/29	22/19	22/19	22/19	32/29	32/29	32/29
Carregam. (kg)	78	78	78	78	78	78	373	373	373
aw x (m/s <sup>2</sup> )	0,2608	0,4014	0,1882	0,2737	0,3774	0,1777	0,2080	0,3101	0,1612
aw y (m/s <sup>2</sup> )	0,2593	0,5100	0,1777	0,2539	0,5350	0,1750	0,2549	0,5209	0,1487
aw z (m/s <sup>2</sup> )	0,6533	1,1063	0,4930	0,6531	1,0604	0,4978	0,6039	0,8627	0,4705
aeq (m/s <sup>2</sup> )	0,7497	1,2827	0,5569	0,7522	1,2462	0,5567	0,6877	1,0544	0,5192
Nível de conforto (1 a 6)	3	4	2	3	4	2	3	4	2

Com base na Tabela 8.1 e nas acelerações ponderadas totais obtidas para cada condição, foram classificados os níveis de conforto de 1 a 6, em que: 1- Confortável; 2- Um pouco confortável; 3- Moderadamente desconfortável; 4- Desconfortável; 5- Muito desconfortável; 6- Extremamente desconfortável.

## 9. Conclusões

As medições compõem a parte mais importante do projeto, uma vez que sem elas não haveria dados para serem analisados. Entretanto, vários obstáculos surgiram durante a realização dos testes. Milhares de veículos circulam diariamente pela Cidade Universitária da USP – Campus Armando de Salles Oliveira. Alguns desses veículos trafegavam com velocidade muito baixa, fazendo com que o carro com o sensor tivesse que se desviar do trajeto ou reduzir sua velocidade. Outro problema foi como se realizar exatamente o mesmo trajeto em todos os testes. Para isso, foi adotada como guia a faixa pintada na cor branca mais à direita da pista, na qual a roda esquerda do Toyota Etios deveria seguir em todo o percurso. Mas, infelizmente, boa parte desta faixa branca estava apagada no trajeto escolhido, dificultando a realização das medições. Mesmo com todas as dificuldades levantadas, as medições foram satisfatórias para o presente projeto.

Na análise modal, o primeiro obstáculo foi o sinal de entrada. Como ele era randômico e desconhecido, não se sabia ao certo qual a frequência de excitação. Isso pode ter ocasionado o não aparecimento de alguns modos de vibrar. Além disso, os testes realizados a 20 km/h não trouxeram resultados coerentes. Apesar das dificuldades na obtenção dos dados, os resultados foram bastante satisfatórios. Prova disso são os erros de 4,68% e 1,60%, considerados baixos, quando são comparadas a variação da massa suspensa do veículo com a variação de frequência natural de acordo com a equação.

A primeira das conclusões alcançadas na análise modal foi a respeito da pressão dos pneus. Pode-se observar que a variação na pressão dos pneus pouco influencia nos modos de vibrar com frequências baixas, somente nos com frequências altas. Sendo assim, a variação da pressão dos pneus pouco importa para a avaliação do conforto veicular. A

segunda constatação obtida é o fato de a velocidade não levar a uma alteração nos modos de vibrar do veículo. Entretanto não se pode afirmar o mesmo a respeito do conforto. Ainda, verificou-se na análise modal que o carregamento do veículo altera significativamente os modos de vibrar da massa suspensa do carro, como era de se esperar. Com um carregamento maior, as frequências naturais diminuem, o que acarreta um maior conforto aos passageiros.

Os testes realizados também não foram ideais para a avaliação do conforto veicular pela norma ISO 2631-1 (1997). A máxima frequência de amostragem do software Baseflight é de 100 Hz, considerada muito baixa para esse tipo de análise. Além disso, é indicado que se utilize mais de um sensor nas medições para a ISO, coletando as vibrações em diferentes pontos e a instrumentação também não foi adequada.

Mesmo com os pontos negativos levantados acima, os resultados da análise pela ISO 2631-1 (1997) foram satisfatórios para o presente trabalho. Pode-se validar as conclusões obtidas na análise modal, verificando-se que a pressão dos pneus quase não influencia na variação do conforto. Além disso, observou-se que para carregamentos maiores, o conforto também é maior, resultado já sinalizado na análise modal.

Pela ISO 2631-1 (1997), ainda se pode concluir que em veículos com velocidades menores, o conforto é maior. Uma possível explicação é que automóveis se locomovendo com maior velocidade possuem maior energia cinética, resultando em maiores vibrações no impacto com as irregularidades da pista. Além disso, vale ressaltar que a velocidade não altera os parâmetros característicos do veículo, só os sinais de entrada, não influenciando nos resultados da análise modal, apenas no conforto.

Por último, chegou-se a níveis ruins de conforto nos testes realizados, principalmente nas condições 1, 4 e 7 (40 km/h) e 2, 5 e 8 (60 km/h). Mas isso não quer dizer que o problema esteja na suspensão do Toyota Etios ou nas medições realizadas. Infelizmente, os resultados ruins são devidos às diversas irregularidades nas pistas da Cidade Universitária da USP – Campus Armando de Salles Oliveira, principalmente na Av. Prof. Mello Moraes (Raia).

## Referências

- [1] Barbosa, R. S., “Vehicle dynamic response due to pavement roughness”, Journal of Transportation Engineering, 2011.
- [2] DIN German Institute for Standardization, “DIN 70000: Road vehicles; vehicle dynamics and road-holding ability; vocabulary”, 1994.
- [3] Freitas, L. M. P., “Estudo da Dinâmica Vertical de uma Suspensão Veicular do Tipo MacPherson”, 2006.
- [4] Ganzarolli, F., “Influência das frequências de *ride* no conforto e dirigibilidade veiculares na faixa linear de uso do veículo”, 2012.
- [5] Gillespie, T. D., “Fundamentals of Vehicle Dynamics”, SAE, 1992.
- [6] Google Earth, site acessado em Setembro de 2015. <https://www.google.com/earth/>
- [7] Inman, D. J., “Engineering Vibration”, Prentice Hall, 2001.
- [8] ISO International Organization for Standardization, “ISO 2631-1 : Evaluation of human exposure to whole-body vibration”, 1997.
- [9] ISO International Organization for Standardization, “ISO 4130: Road vehicles -- Three-dimensional reference system and fiducial marks - Definitions”, 1978.

## VEHICULAR COMFORT OF A TOYOTA ETIOS DRIVEN THROUGH CIDADE UNIVERSITÁRIA DA USP - CAMPUS ARMANDO DE SALLES OLIVEIRA

Luis Felipe de Castro Aun Lima  
limapoli@usp.br

**Abstract.** *This term paper analyzes the comfort, associated with vibrations, of a vehicle Toyota Etios driven through Cidade Universitária da USP – Campus Armando de Salles Oliveira and verifies how the speed of the car, the air pressure inside the tires and loading influence the results. The main concepts of vehicular comfort, automotive suspension and vehicular dynamics are introduced. For the analysis of comfort, the use of standard ISO 2631-1 (1997) and modal analysis technique is proposed. Tests with a sensor placed inside the vehicle are done to collect data, which was treated with the MatLab software. In the modal analysis, two conclusions can be drawn: the air pressure inside the tires has little influence over vibration modes and over the comfort; loading exerts direct influence over the natural frequencies of the car and thus over passenger comfort. The heavier the loading, the smaller the vibrations transmitted to the passengers, and the higher the comfort will be. In the analysis carried out in accordance with ISO 2631-1 (1997), in addition to ratifying the modal analysis results, it could be observed that the lower the speed of the vehicle, the greater the passenger comfort will be. Finally, it is possible to conclude that comfort levels of a vehicle Toyota Etios driven through Cidade Universitária da USP – Campus Armando de Salles Oliveira are unsatisfactory.*

**Keywords.** *Vehicular comfort. Vibrations. Automotive suspension. Measurements. Modal analysis.*