



VI Encontro de Iniciação Científica e Tecnológica  
VI EnICT  
ISSN: 2526-6772  
IFSP – Câmpus Araraquara  
21 e 22 de outubro de 2021



## **Análise de uma suspensão automotiva de meio de carro com dois graus de liberdade**

Lucas Lourenço Dal Ri<sup>1</sup>, Fernando de Haro Moraes<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Graduando em Engenharia Mecânica, IFSP Campus Araraquara, [lucas.lourenco@aluno.ifsp.edu.br](mailto:lucas.lourenco@aluno.ifsp.edu.br).

**Área de conhecimento** (Tabela CNPq): 3.05.00.00-1

**RESUMO:** este projeto visa analisar o comportamento de um sistema isolador de vibrações de dois graus de liberdade em um modelo de meio carro. A suspensão estudada visa ser aplicada ao veículo fora de estrada do tipo Mini Baja. O dispositivo será composto por pneu, mola, amortecedor e o chassi tubular (massa suspensa), sendo que o modelo de suspensão é generalizado, pois é estudado apenas os elementos que compõem quaisquer tipos de suspensão, não se atentando a características específicas de cada variante de suspensão. O principal objetivo desta pesquisa é analisar as características do sistema com os parâmetros dos elementos mecânicos mola (coeficiente de rigidez) e amortecedor (coeficiente de amortecimento). As suspensões isoladoras de vibrações realizam a redução da magnitude de transmissibilidade, proporcionando melhor dirigibilidade e conforto veicular.

**PALAVRAS-CHAVE:** isolador de vibração, vibração mecânica.

### **INTRODUÇÃO**

O estudo das vibrações mecânicas são tópicos clássicos, cujos princípios devem ser conhecidos e estudados durante o desenvolvimento de um sistema absorvedor de vibrações Balachandran (2011). O estudo de vibrações é de grande importância quando relacionado a ampla área da engenharia automotiva, podendo destacar como objeto de estudo dentro desse amplo meio, os sistemas de suspensões automotivas, pois segundo De Brito et al. (2016) “o sistema de suspensão de um veículo desempenha papel fundamental na isolação das vibrações provenientes da pista e de outras fontes de excitações”. De acordo com Fernandes et al. (2016) e França (2006), a indústria automotiva está em constante busca para melhorar cada vez mais o conforto e segurança dos passageiros e apontam que na fase de projeto o correto é antecipar os problemas que podem ser gerados pelas vibrações, sejam eles relacionados ao conforto ou a falha prematura. As principais funções de um sistema de suspensão automotiva segundo Gillespie (1992) são:

- Prover conformação vertical, então as rodas podem se adaptar às estradas irregulares, isolando o chassi da vibração da via.
- Manter as rodas na direção e inclinação adequadas na superfície da estrada.
- Reagir as forças produzidas pelos pneus: forças longitudinais (aceleração e frenagem), forças laterais (durante curvas).
- Resistir a rolagem do chassi.
- Manter os pneus em contato com a estrada com a mínima variação de carga.

De acordo com as necessidades de realizar as funções de um sistema de suspensão, foi realizada a análise de um sistema de suspensão em um veículo Mini Baja SAE, considerando um sistema dianteiro e traseiro com dois graus de liberdade.

### **FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

As vibrações mecânicas são inerentes de diversos tipos de sistemas mecânicos, elas podem causar efeitos indesejáveis como elevadas amplitudes de deslocamento ou até mesmo a falha relativa a esforços excessivos. O sistema de suspensão de veicular automotor possui molas, amortecedores, elementos elásticos como o pneu. Nesses sistemas ocorrem alguns efeitos não tão fáceis de controlar, como o efeito mola dos pneus de perfil alto. Esse efeito de mola do pneu não é amortecido e com isso, acontecem indesejadas oscilações na suspensão do automóvel. Foram estudados diversos modelos de suspensões automotivas para futuro refinamento do modelo de 1/2 carro. Seguem os principais tipos de suspensões atualmente utilizados em automóveis de acordo com Gillespie (1992):

Modelo de suspensão dependente:

- **Eixo Sólido:** as rodas estão dispostas em um eixo rígido, sendo uma em cada extremidade, então qualquer tipo de movimento é transmitido para a roda oposta, fazendo com que as duas inclinem e mudem a direção juntas.

Modelos de suspensões independentes:

- Em contraste com os eixos sólidos, suspensões independentes permite cada roda se mover verticalmente sem afetar a roda oposta. Normalmente, todos os carros de passeio e caminhões leves usam a suspensão independente da dianteira do veículo, por causa das vantagens em fornecer mais espaço para o motor, e por causa da melhor resistência na vibração da direção. A suspensão independente também tem a vantagem de prover uma alta rigidez de rolagem em relação a taxa vertical das molas.
- **Trailing Arm Suspension:** um dos designs mais simples e econômicos de suspensão dianteira independente. Consiste no comprimento igual e paralelo dos braços conectados nos terminais dianteiros com as barras de torção laterais, que possibilitam o movimento. Com esse design as rodas permanecem paralelas com a carroceria e o camber com a rolagem da carroceria.
- **SLA Front Suspension:** os braços superiores e inferiores são, normalmente, de comprimentos diferentes, o que dá o nome de SLA (short-long arm, ou braços curto-longo). Esse modelo é bem adaptado para carros com motor dianteiro e tração traseira por causa do espaço que fornece, que permite o motor ser colocado longitudinalmente.
- **MacPherson:** a estrutura é formada por membro telescópico incorporando o amortecedor com a roda precisamente fixada no terminal inferior, de tal modo que a estrutura mante a roda sem variar a cambagem.
- **Suspensão traseira Multilink:** a suspensão Multilink é caracterizada pelas conexões de terminais rotulares nos finais das ligações da suspensão com a carroceria, então eles não sofrem de momento fletor. Olhando no geral, *four links* (4 ligações) são precisas para fornecer controle vertical e longitudinal das rodas, e reagir ao torque de frenagem. Adicionar uma ligação (link) causa um excesso de restrição na roda, mas permite um controle mais preciso dos ângulos de convergência e divergência da roda.
- **Suspensão traseira Trailing-arm:** suspensões desse tipo são geralmente usadas em veículos mais caros e de alta performance. Os braços de controle (trailing arms) absorvem as forças longitudinais e momentos de frenagem, e controlam as reações de *squat* (agachamento) na frenagem e *lift* (levantamento) na aceleração. A suspensão independente tem a vantagem de reduzir o peso não-suspensão pela montagem do diferencial na carroceria.

- **Suspensão Swing-Axle:** o comportamento do camber é inteiramente controlado por um eixo ligado por uma junta universal no diferencial, por causa disso, há muita mudança de camber durante o funcionamento da suspensão.

## METODOLOGIA

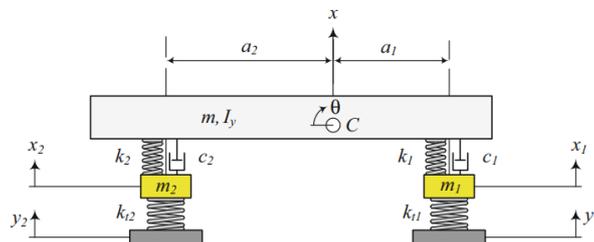
O modelo de vibração foi aplicado no tipo “bicicleta”, isto é, observando uma suspensão dianteira e uma suspensão traseira, sendo que o modelo da suspensão pode ser quaisquer dos diversos citados na fundamentação deste trabalho, sendo que o modelo escolhido é generalizado, pois é considerado apenas os elementos da suspensão e não o seu tipo em si, pois não é o objetivo deste artigo fazer a modelagem sob o aspecto de um modelo específico de suspensão.

Foi feito o estudo e desenvolvimento da modelagem matemática. O modelo de um quarto de carro é ótimo para estudar e analisar de maneira mais simples o modo de vibração no balanço de massa do automóvel, porém, é apenas uma modelagem inicial e visando um estudo e análises mais completos de uma suspensão automotiva, foi expandido este modelo para dois quartos de carro, com isso será incluído a inclinação da suspensão, bem como outros modos de vibração. Neste modelo, foi analisado o balanço e inclinação da carroceria, o movimento vertical das rodas e as excitações provenientes da pista. Sabendo os termos considerados, foi feita a modelagem matemática para obter as equações de movimento.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com o estudo sobre o modelo proposto neste projeto, as variáveis foram consideradas de acordo com a figura 1:

FIGURA 1: modelo de vibração de um veículo tipo “bicicleta”



Fonte: Reza N. Jazar

Os parâmetros foram descritos na tabela 1 abaixo:

TABELA 1: parâmetros do veículo

Parâmetro	Significado
$m$	Metade da massa total do veículo
$m_1$	Massa da roda dianteira
$m_2$	Massa da roda traseira
$x$	Coordenada do movimento vertical do carro
$x_1$	Coordenada do movimento vertical da roda dianteira
$x_2$	Coordenada do movimento vertical da roda traseira
$\theta$	Coordenada do movimento de inclinação do carro
$y_1$	Excitação da pista na roda dianteira
$y_2$	Excitação da pista na roda traseira
$I_y$	Metade do momento de inércia total do veículo

$\alpha_1$	Distância do centro até o eixo dianteiro
$\alpha_2$	Distância do centro até o eixo traseiro
$c_1$	Coefficiente de amortecimento do amortecedor dianteiro
$c_2$	Coefficiente de amortecimento do amortecedor traseiro
$k_1$	Coefficiente de rigidez da mola dianteira
$k_2$	Coefficiente de rigidez da mola traseira
$k_{t1}$	Coefficiente de rigidez do pneu dianteiro
$k_{t2}$	Coefficiente de rigidez do pneu traseiro

Fonte: próprio autor

Com as variáveis em mãos, foi aplicado o método de balanço de massa de Newton para obter as seguintes equações de movimento:

$$m\ddot{x} + c_1(\dot{x} - \dot{x}_1 - \alpha_1\dot{\theta}) + c_2(\dot{x} - \dot{x}_2 - \alpha_2\dot{\theta}) + k_1(x - x_1 - \alpha_1\theta) + k_2(x - x_2 - \alpha_2\theta) = 0 \quad (1)$$

$$I_y\ddot{\theta} + \alpha_1c_1(\dot{x} - \dot{x}_1 - \alpha_1\dot{\theta}) + \alpha_2c_2(\dot{x} - \dot{x}_2 - \alpha_2\dot{\theta}) - \alpha_1k_1(x - x_1 - \alpha_1\theta) + \alpha_2k_2(x - x_2 - \alpha_2\theta) = 0 \quad (2)$$

$$m_1\ddot{x}_1 - c_1(\dot{x} - \dot{x}_1 - \alpha_1\dot{\theta}) + k_{t1}(x_1 - y_1) - k_1(x - x_1 - \alpha_1\theta) = 0 \quad (3)$$

$$m_2\ddot{x}_2 - c_2(\dot{x} - \dot{x}_2 - \alpha_2\dot{\theta}) + k_{t2}(x_2 - y_2) - k_2(x - x_2 - \alpha_2\theta) = 0$$

Posteriormente serão analisadas as equações acima de simuladas numericamente, sendo feito a plotagem dos gráficos e comparações com diferentes parâmetros a fim de tirar conclusões sobre o funcionamento da suspensão automotiva aplicada no veículo Mini Baja SAE.

## CONCLUSÕES

Com o projeto ainda em desenvolvimento, foi realizado o estudo e a modelagem matemática, onde foi possível obter as equações que descrevem o comportamento da suspensão para o modelo proposto neste trabalho, sendo que esta pode ser descrita como a primeira parte do projeto. Posteriormente, será feita a segunda parte, que consiste na simulação numérica, sendo que para realizar a simulação numérica, o corpo do veículo será assumido como uma barra rígida, cuja massa e momento de inércia são metade de seus respectivos valores totais do veículo. Serão consideradas massas independentes para cada roda e coeficientes de rigidez independentes para cada mola. Como o amortecimento dos pneus são muito menores em relação aos do amortecedor, será desconsiderado em nosso sistema. Futuramente, com os dados em mãos, que foram adotados de um veículo Mini Baja, onde está pesquisa futuramente será utilizada para realizar o dimensionamento da suspensão, juntamente com equações de movimento obtidas, serão feitas as simulações numéricas utilizando o software Gnu Octave.

## REFERÊNCIAS

BALACHANDRAN, B.; MAGRAB, E.B. Vibrações mecânicas. 2ª ed., São Paulo: Cengage Learning, 2011.

BRITO, S. H. R.; SOARES, R. C.; SÁ, A. S. Resposta de um sistema amortecido a movimento harmônico de base em um carro, [s. l.], 2016. Disponível em: <https://ssl4799.websiteseuro.com/swge5/PROCEEDINGS/PDF/CON-2016-1094.pdf>. Acesso em: 8 set. 2020.

FLANNELLY, W. G. Dynamic Atiresonant Vibration Isolator. [S.l.]: Google Patents, maio 20, 1969. US Patent 3,445,080

GILLESPIE, D, T. Fundamentals of Vehicle Dynamics: Society of Automotive Engineers, 1992

GOODWIN. Vibration isolators. 1967. 3,322,379 A. US Patent 3,322,379 A. SMITH, M. C. Force controlling mechanical device. [S.l.]: Google Patents, jan. 8 2008. US Patent 7,316,303.

USHIJIMA, T.; TAKANO, K.; KOJIMA, H. High performance hydraulic mount for improving vehicle noise and vibration. [S.l.], 1988.

Rao, Singiresu. Título: Vibrações Mecânicas. 4ed. Pearson Universidades, 28 NOV 2008.

EVANGELOU, S. et al. Steering compensation for high performance motorcycles. In: IEEE. Decision and Control, 2004. CDC. 43rd IEEE Conference on. [S.l.], 2004. v. 1, p. 749-754.

VEHICLE Vibrations. In: JAZAR, Reza N. Vehicle Dynamics: Theory and Application Third Edition. [S. l.: s. n.], 2017. v. 3, cap. 12, ISBN 978-3-319-53440-4.

YU, Y.; NAGANATHAN, N. G.; DUKKIPATI, R. V. A literature review of automotive vehicle engine mounting systems. Mechanism and machine theory, Elsevier, v. 36, n. 1, p. 123-142, 2001.