

Estudo de dinâmica veicular utilizando um modelo de quarto de carro

Vehicle dynamics study using a quarter-car model

RESUMO

Gilmar Telles de Araújo
tellesgilmar@gmail.com
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil

Vinicius Piccirillo
piccirillo@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil

Neste estudo, utiliza-se um modelo de quarto de carro de modo a otimizar o conforto do motorista/passageiro, utilizando o software *MATLAB*[®] foi realizada uma análise computacional do problema de modo a descobrir amplitude máxima e aceleração rms (raiz do valor quadrático médio), para isso adimensionalizou-se as equações do modelo para o qual foram construídas as curvas de níveis, uma que relaciona fator de amortecimento e constante da mola com amplitude máxima e outra que relaciona fator de amortecimento e constante da mola com aceleração rms. O cálculo da aceleração rms é feita escolhendo um fator de compensação e multiplicando pela aceleração do sistema. Concluiu-se então que para uma função senóide agindo como estrada com amplitude de 30 centímetros, se obteve um modelo extremamente desconfortável.

PALAVRAS-CHAVE: Análise computacional. Otimização de conforto. Aceleração rms.

Recebido: 19 ago. 2019.

Aprovado: 01 out. 2019.

Direito autorial: Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



ABSTRACT

IN THIS STUDY, A QUARTER-CAR MODEL IS USED IN ORDER TO OPTIMIZE THE DRIVER/PASSENGER COMFORT USING THE SOFTWARE *MATLAB*[®]. A COMPUTATIONAL ANALYSIS OF THE PROBLEM IS MADE IN ORDER TO FIND THE MAXIMUM AMPLITUDE AND RMS (ROOT MEAN SQUARE) ACCELERATION, FOR THAT THE MODEL'S EQUATIONS ARE ADIMENSIONALIZED AND LEVEL CURVES ARE PLOTTED, ONE THAT ASSOCIATES DAMPING FACTOR AND SPRING CONSTANT WITH MAXIMUM AMPLITUDE AND ANOTHER THAT ASSOCIATES DAMPING FACTOR AND SPRING CONSTANT WITH RMS ACCELERATION. IN ORDER TO CALCULATE THE RMS ACCELERATION A COMPENSATION FACTOR IS CHOSEN AND MULTIPLIED WITH THE MODEL'S ACCELERATION. IT IS CONCLUDED, THEN, THAT FOR A SENOIDAL FUNCTION ACTING AS A ROAD WITH AMPLITUDE OF 30 CENTIMETERS AN EXTREMELY UNCOMFORTABLE MODEL IS OBTAINED.

KEYWORDS: Computational analysis. Comfort optimization. Rms acceleration.

INTRODUÇÃO

O quarto de carro é um modelo bastante estudado e conhecido pela literatura devido a sua fácil compreensão desde a modelagem matemática do problema até a simulação computacional.

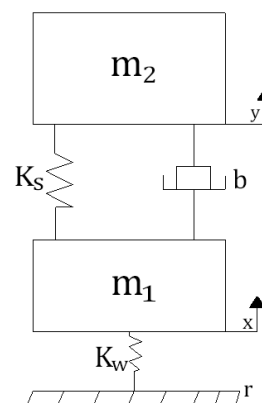
Por ser um modelo muito estudado, é necessário trazer algo de diferente para a análise do modelo. Alguns autores como TUSSET(2008) trazem uma mudança ao modo de ver o problema ao trabalhar com um amortecedor magneto-reológico não-linear, YOUN(1992) analisa o problema utilizando uma suspensão semi-ativa, e outros como KALAIVANI E SUDHAGAR(2014) analisam o problema utilizando um controlador fuzzy.

Assim sendo, neste trabalho o estudo do modelo de quarto de carro realizou-se com o intuito de melhorar o conforto do motorista/passageiro durante a viagem. Analisou-se parâmetros de amplitude máxima e aceleração *rms*(*root mean square*) do veículo de modo a relacionar ambas e achar o valor ótimo, levando em conta resultados computacionais e normas ISO.

MODELO MATEMÁTICO DO QUARTO DE CARRO

Inicialmente tem-se o seguinte esquema, que representa a quarta parte da suspensão de um veículo:

Figura 1 – Representação esquemática do quarto de carro



Fonte: Autoria própria (2019)

Onde:

m_2 : massa de um quarto do carro, y : equação que dita o movimento da massa do carro, K_s : constante da mola da suspensão, b : coeficiente de amortecimento, m_1 : massa da roda, x : equação que dita o movimento da roda, K_w : constante do pneu, r : função que dita a forma da estrada.

Para chegar-se nas equações diferenciais que ditam o movimento deste modelo, uma decomposição de forças nas massas 1 e 2 será feita. Ao fazer a decomposição de forças que atuam na massas, temos:

$$F_1 = -K_s \cdot (y-x) \quad (1)$$

$$F_2 = -b \cdot (\dot{y}-\dot{x}) \quad (2)$$

$$F_3 = K_w \cdot (x-r) \quad (3)$$

Pela somatória de forças tem-se então que as equações diferenciais que ditam o movimento do sistema são dadas por:

$$m_2 \cdot \ddot{y} = -K_s \cdot (y-x) - b(\dot{y}-\dot{x}) \quad (4)$$

$$m_1 \cdot \ddot{x} = K_s \cdot (y-x) + b \cdot (\dot{y}-\dot{x}) - K_w \cdot (x-r) \quad (5)$$

A fim de resolver essas equações numericamente, utilizou-se o programa MATLAB® para escrever os códigos que resolvem o problema. Primeiramente, adimensionalizou-se as equações (4) e (5), isso foi feito para que o cálculo numérico fosse facilitado, necessitando de menos poder computacional e trabalhando com valores menores.

Seja,

$$u = \frac{x}{L} \text{ e } z = \frac{y}{L}$$

onde L é o comprimento da mola em metros. E seja,

$$\tau = t \cdot \omega_0, \text{ com } \omega_0 = \sqrt{\frac{K_s}{m_2}} \quad (6)$$

onde t é o tempo dado em segundos, e ω_0 é a frequência natural dada em rad/s.

Chega-se então nas seguintes equações diferenciais adimensionalizadas

$$u'' = \frac{m_2}{m_1} \cdot (z-u) + \gamma \cdot \sqrt{\frac{m_2}{K_s}} (z'-u') - \frac{K_w}{K_s} \cdot \frac{m_2}{m_1} \left(u - \frac{r}{L}\right) \quad (7)$$

$$z'' = (u-z) + \gamma \cdot \sqrt{\frac{m_2}{K_s}} (u'-z') \quad (8)$$

$$\text{Onde, } \gamma = \frac{b}{m_1}$$

Com as equações (7) e (8) em mãos pode se fazer um gráfico que nos mostra a curva de nível que relaciona a constante da mola (K_s) com o fator de amortecimento (γ) de modo a achar o menor valor da amplitude máxima. Este gráfico é representado pelas figura 2(a) e 2(b).

A segunda parte do problema é achar a aceleração rms e então comparar com normas ISO. A aceleração rms é uma variável importante de se calcular, pois muitas das normas que tratam de conforto para motorista/passageiro utilizam a aceleração por ser mais conveniente de se medir, algumas das normas que utilizam a aceleração como parâmetro de conforto são:

Quadro 1 - Especificação de normas ISO e BS

Normas	Especificação
ISO 2631:1974	Guide for the evaluation of human exposure to wholebody vibration
ISO 2631:1978	Guide for the evaluation of human exposure to wholebody Mechanical vibration and shock
ISO 2631:1985	Evaluation of human exposure to whole-body vibration – part 1: general requirements
ISO 2631:1997	Evaluation of human exposure to whole-body vibration– part 1: general requirements
BS 6841:1987	Measurement and evaluation of human exposure to whole-body mechanical vibration
BS 7085:1989	Safety aspects of experiments in wich people are exposed to mechanical vibration and shock.

Fonte: Tusset(2008) cita Anflor(2003)

Primeiramente, a aceleração da massa 2 é calculada da seguinte forma,

$$\ddot{y}_i = \frac{\dot{y}_{i+1} - \dot{y}_i}{h}$$

onde h é o passo.

Em seguida, o rms da aceleração é calculado pela seguinte fórmula,

$$rms = \sqrt{\left(\frac{1}{N} \sum \ddot{y}_i^2\right)} \quad (9)$$

Com esta fórmula, pode-se finalmente relacionar constante da mola (K_s) com o fator de amortecimento (γ) para achar a menor aceleração rms. Com o dado de aceleração rms, calcula-se então a aceleração rms compensada, pela seguinte fórmula:

$$a_w = [\sum_i (W_i a_i)^2]^{1/2} \quad (10)$$

onde W_i é uma constante que pode ser achada da seguinte forma:

Quadro 2 - Guia para avaliação de compensações

Fator de compensação	Efeito na(o)					
	Saúde		Conforto		Percepção (fadiga)	
	eixos	postura	eixos	postura	eixos	postura
W_k	z	sentado	z	sentado	z	sentado
			z	em pé	z	em pé
W_d	x e y	sentado	x e y	sentado	x e y	sentado
			x e y	em pé	x e y	em pé

Fonte: Tusset,2008.

Quadro 3 - Compensações em um terço de oitava

Frequência [Hz]	$W_k (x10^3)$	Frequência [Hz]	$W_k (x10^3)$
1	482	10	988
1,25	484	12,5	902
1,6	494	16	768
2	531	20	638
2,5	631	25	513
3,15	804	31,5	405
4	967	40	314
5	1039	50	246
6,3	1054	63	186
8	1036	80	132

Fonte: Tusset, 2008.

Neste modelo, utilizou-se uma compensação W_k , que pode ser calculada por $w = \sqrt{\frac{K_s}{m_2}}$. O K_s é um valor que varia em cada iteração do programa. E pelo fato de o peso total de carro e motorista ser 275,5kg, onde 65% do peso se localiza na traseira e o peso se divide em dois por levar-se em conta um quarto de carro, temos um $m_2=89.5\text{kg}$.

Em cada iteração do programa um valor novo de K_s será colocado na fórmula, dessa maneira, pode-se achar o w ótimo. Com o valor ótimo, achamos a frequência pela seguinte fórmula, $w=2\pi f$. Achado a frequência basta escolher o W_k que está mais próximo no quadro 2, calcular a aceleração compensada pela fórmula (10) e então analisar onde o valor se encaixa no quadro 4. As figuras 3(a) e 3(b) relacionam os parâmetros de fator de amortecimento e constante da mola com a aceleração RMS.

Quadro 4 - Aceleração rms compensada como uma indicação das reações com relação ao conforto.

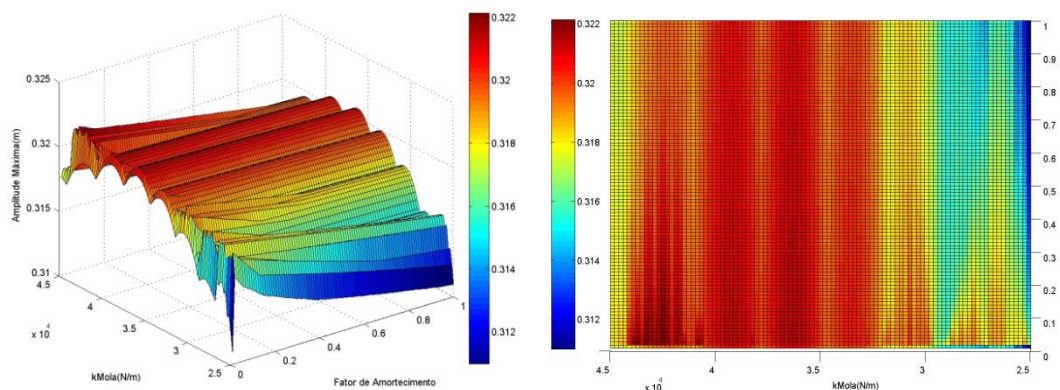
Aceleração rms (m/s^2)	Classificação
<0,315	Confortável
0,315 a 0,63	Nível de desconforto baixo
0,5 a 1	Nível de desconforto médio
0,8 a 1,6	Desconfortável
1,25 a 2,5	Muito desconfortável
> 2,0	Extremamente desconfortável

Fonte: Tuset, 2008.

RESULTADOS

Os resultados da modelagem podem ser vistas nos seguintes gráficos abaixo:

Figura 2(a) - Curva de nível para a amplitude máxima e Figura 2(b) - Curva de nível para a amplitude máxima visto de cima



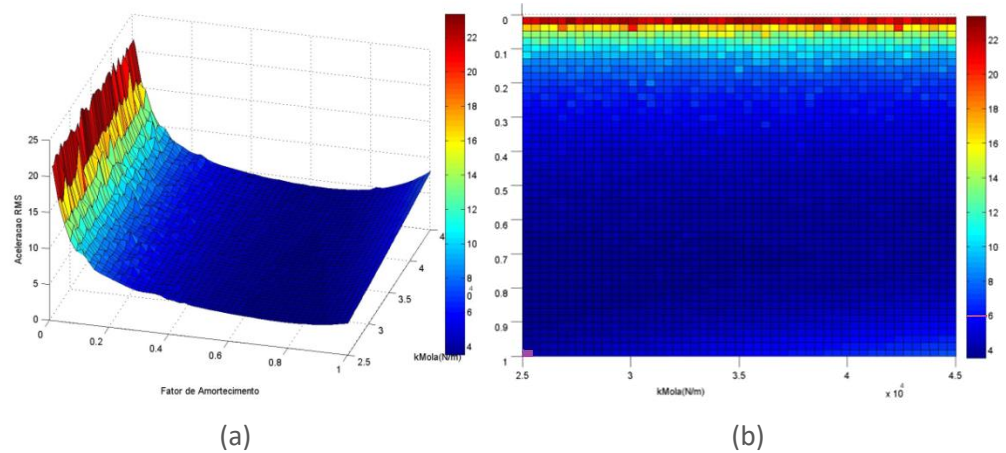
(a)

(b)

Fonte: Autoria própria (2019)

Em relação a amplitude máxima, é possível ver que a menor amplitude máxima se encontra na região em 1 para fator de amortecimento e 25.000N/m para constante da mola, esse resultado é bom pois temos um fator de amortecimento criticamente amortecido, que é para o propósito deste modelo o desejado. Já em relação a aceleração rms, temos:

Figura 3(a) - Curva de nível para a aceleração rms compensada e Figura 3(b) – Curva de nível para a aceleração rms compensada visto de cima



Fonte: Autoria própria (2019)

CONCLUSÕES

Concluí-se ao analisar as curvas de nível resultantes que a constante da mola e fator de amortecimento que dão tanto conforto quanto aceleração mínima são: 1 para o fator de amortecimento e 25000N/m para a constante da mola. Da curva de nível para a aceleração rms compensada, vemos nas figuras 3(b) e 3(a) que para os valores de fator de amortecimento e constante da mola ditos acima, a aceleração se encontra em 6. Isso significa que para os valores ótimos, temos segundo o quadro 3, um modelo extremamente desconfortável.

REFERÊNCIAS

TUSSET, A. M. **Controle ótimo aplicado em modelo de suspensão veicular não-linear controlada através de amortecedor magneto-reológico**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008. <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/15395>. Acesso em 17 ago. 2019.

HAĆ, A.; YOUN, I.. **Optimal Semi-Active Suspension with Preview Based on a Quarter Car Model**. *Journal Of Vibration And Acoustics*, [s.l.], v. 114, n. 1, p.84-92, 1992. ASME International. <http://dx.doi.org/10.1115/1.2930239>. Acesso em 18 ago. 2019.

KALAIVANI, R.; LAKSHMI, P.; SUDHAGAR, K.. **Hybrid (DEBBO) Fuzzy Logic Controller for quarter car model: DEBBOFLC for Quarter Car model**. *2014 Ukacc International Conference On Control (control)*, [s.l.], p.1-6, jul. 2014. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/control.2014.6915157>. Acesso em 18 ago. 2019.