

ANÁLISE DE COXIM PARA O MOTOR DE UM VEÍCULO BAJA.

Frederico de Paula Torres¹, Zoroastro Torres Vilar²

Resumo: O veículo baja é um protótipo desenvolvido por discentes de graduação e pós graduação de engenharia de instituições de ensino superior vinculado a Sociedade dos Engenheiros da Mobilidade. Este protótipo tem como fonte de propulsão um motor a combustão interna. O motor além de provocar o movimento é responsável pela transmissibilidade de vibração para todo o protótipo. A transmissibilidade de vibração no veículo causa danos tanto estruturais, como danos à saúde do piloto. Assim, neste artigo, foi realizado, por meio de teste de bancada, um estudo com coxim elastomérico a fim de reduzir a transmissibilidade de vibração e, então proporcionar maior vida útil aos componentes e maior conforto ao operador. Constatou-se no estudo que o coxim Neoprene CR melhor atenua a transmissão de vibração do motor para outras partes do protótipo.

Palavras-chave: Veículo Baja; Motor; Vibração; Coxim

1. INTRODUÇÃO

Regulamentado pela Sociedade dos Engenheiros da Mobilidade (Society of Automotive Engineers) - SAE, o veículo baja é o resultado de um projeto desenvolvido por graduandos e pós-graduandos de instituições de ensino superior do país e do mundo, no qual tem como objetivo proporcionar a aplicação do conhecimento adquirido ao longo dos cursos de engenharia, tais como, como por exemplo, metodologia de projeto, manufatura, diretamente na prática com a fabricação de um veículo protótipo para competição SAE.

Por se tratar de um veículo, necessita-se de um mecanismo que proporcione movimento, o motor. Entende-se por motores como dispositivos que transformam outras formas de energia em energia mecânica. Há motores de diversos tipos, dimensões e capacidade possibilitando aplicações diversas, desde sistemas simples (pouco complexo) até grandes sistemas (muito complexo). No Baja, um motor Briggs&Straton, 4 tempos, 10 HP, 305 cilindradas, fica responsável por essa conversão.

Tendo o motor como a principal fonte para início do movimento, observa-se que seu funcionamento tanto possui benefícios – locomoção – bem como malefícios – ruído e vibração. Restringindo-se aos malefícios, sabe-se que níveis de vibrações elevados podem não só causar danos à saúde do operador, como também causar problemas estruturais e mecânicos, inclusive no protótipo baja, e por isto deve ser controlada e/ou isolada.

Os problemas de vibrações não estão presentes apenas no baja e na engenharia mecânica. Estes são facilmente encontrados na engenharia civil, aeronáutica, naval, mineração, dentre outros, por exemplo. De modo geral, este problema é responsável por causar enormes prejuízos para a sociedade [1], podendo ser decorrente de fator humano provocado por erro na realização do projeto ou até mesmo natural, como por exemplo, os maremotos e terremotos que ocorrem frequentemente nas regiões situadas nas zonas de movimentação e choque das placas tectônicas.

Conhecer a fonte geradora de vibrações possibilita prevenir doenças, acidentes, quebra de equipamentos, máquinas e redução dos custos, por exemplo.

Voltando-se ao setor automobilístico, a crescente competitividade neste mercado, decorrente do perfil mais exigente dos consumidores, principalmente por conforto e segurança, provocou avanços significativos na tecnologia para a obtenção de melhores resultados para minimizar os efeitos de vibração advindos, principalmente, do motor.

Não diferente do cenário do setor automobilístico, para garantir melhores condições, tais como segurança e conforto do protótipo baja, a atenuação das vibrações por meio de coxim na base do motor é de suma relevância a fim de prolongar a vida útil dos componentes, da estrutura, e do operador.

Assim, o objetivo deste artigo será a análise, em experimento de bancada, de diversos tipos de coxim elastomérico e verificar qual será mais eficaz à redução da transmissibilidade de vibração do motor para estrutura.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Vibração

O movimento alternado de uma máquina ou equipamento e o movimento oscilatório de um corpo gerado em função de forças desequilibradas de componentes rotativos e movimentos alternados de uma máquina ou equipamento denomina-se vibração [2]. Pode considerar vibração como a propagação de ondas através de compressão e dilatação sucessivas. A teoria de vibração trata do estudo de movimentos oscilatórios de corpos e as forças associadas a eles [3].

Embasado nos princípios de energia cinética – energia atribuída ao movimento de um corpo - e energia

potencial - energia relacionada a um sistema de interação com diferentes corpos, a vibração de um sistema envolve a transferência alternada de sua energia potencial para energia cinética e de energia cinética para potencial [3].

2.1.1 Importância de estudar vibração

O estudo da vibração é de fundamental importância não só para a engenharia moderna, mas também para sociedade em geral. Algumas atividades vitais do corpo humano só são realizadas devido as vibrações, por exemplo, ouvir está relacionado com a vibração dos tímpanos, enxergar com a vibração das ondas de luz, respirar com a vibração dos pulmões, falar com o movimento oscilatório da laringe e andar com o movimento periódico de braços e pernas [3]. Todavia, vibrações externas ao corpo humano resulta em perda de eficiência e conforto.

A análise de vibrações na área de engenharia – Figura 1 - tais como em máquinas, equipamentos, motores, turbinas e estruturas permite conhecer, melhorar e ganhar muito em qualidade, produtividade e desenvolvimento destes. Na engenharia, conhecer sobre vibração não está relacionado apenas ao que já foi mencionado, relaciona-se também com o desenvolvimento de produtos que tenham unicamente a funcionalidade de oscilação, tais como compactadores, massageadores e esteiras transportadoras, por exemplo.



Figura 1: Análise de vibração em máquinas. [4]

Assim, estudar a vibração relaciona-se com a importância de redução de níveis vibratórios por meio da adequação de projeto e montagem de máquinas para utilização correta.

2.1.2 Classificação de vibração

As vibrações podem ser classificadas de várias maneiras. Todavia, fisicamente: podem ser mencionadas 4 tipos como mais importantes: vibração livre e forçada; vibração não amortecida e amortecida; vibração linear e não linear; vibração determinística e aleatória.

As vibrações livres são causadas por condições iniciais de movimento, como por exemplo, bater em um diapasão e deixá-lo tocar. Já as vibrações forçadas são provocadas por uma força ou torque externo, neste tipo, as oscilações persistem durante a aplicação da força ou torque, e, uma vez encerradas as excitações, o sistema entra em vibração livre [1].

Nas vibrações não amortecidas e amortecidas ambas se divergem, principalmente, quanto há perda de energia. Para as não amortecidas não há perda de energia, enquanto na amortecida ocorre o inverso [3].

No sistema de vibrações lineares, ocorre uma proporcionalidade entre excitação e resposta [1].

As vibrações determinísticas caracterizam-se por possuir a magnitude da excitação conhecida para qualquer intervalo de tempo, logo, a resposta é previsível. Nas vibrações aleatórias, a magnitude da excitação não pode ser determinada para um intervalo de tempo [1].

2.1.3 Componentes elementares de um sistema vibratório

Para um movimento vibratório ser bem descrito (posição, velocidade, aceleração) faz-se necessário a escolha de um sistema de coordenadas – Figura 2. Define-se Grau de Liberdade como o número mínimo de coordenadas independentes necessárias para descrever completamente o movimento de todas as partes que compõem o sistema vibratório [3].

Os elementos vibratórios podem ser agrupados em discretos e contínuos. Os sistemas discretos podem ser subdivididos em partes de modo que cada uma delas possua um determinado número de graus de liberdade, levando a um número finito de graus de liberdade do sistema global. Diferentemente dos sistemas discretos, os sistemas aleatórios não podem ser divididos, uma vez que possuem um número infinito de graus de liberdade.

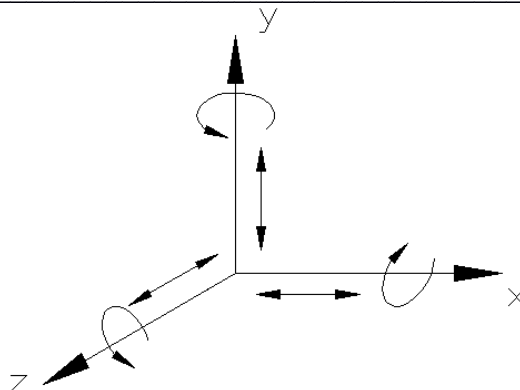


Figura 2: Quantidade de graus de liberdade. [5]

As propriedades mais importantes dos sistemas mecânicos sob o aspecto da vibração são a elasticidade, a inércia e o amortecimento. A elasticidade é uma característica que é atribuída com a capacidade do sistema de armazenar energia elástica. A inércia se relaciona com a capacidade de armazenamento de energia cinética e energia potencial gravitacional. Já o amortecimento provoca as perdas de energia em função das resistências passivas provocadas por atrito.

2.1.4 Controle de vibração

O controle de vibração diretamente na origem, é mais eficiente. A primeira providência em relação às vibrações é tentar reduzi-las junto à fonte, devendo ser estudada particularmente as vibrações que provocam ressonância mecânica.

O fenômeno de ressonância mecânica ocorre quando um sistema físico recebe energia por meio de excitações de frequência igual a uma de suas frequências naturais de vibração. A ressonância mecânica provoca o aumento na amplitude de oscilação cada vez maiores em relação a outras faixas de frequências [6].

As frequências naturais indicam a taxa de oscilação livre da estrutura. Uma estrutura possui diversas frequências naturais já que ela pode vibrar livremente (após ter sido excitada por uma força) em diversas direções. A frequência natural mais importante é a primeira, menor entre todas [7].

As vibrações podem ser eliminadas de diversas maneiras, tais como: utilização de lubrificações e manutenções periódicas das máquinas e equipamentos; utilização de calços de borracha absorvedoras (coxim) de vibrações.

2.2 Coxim elastomérico

Convencionalmente conhecido como coxim elastomérico, a borracha tem sido utilizada no setor automobilístico desde a década de 30 para isolar a estrutura do veículo da vibração do motor.

Os projetos de coxim elastomérico são realizados de acordo com as devidas faixas características de rigidez elástica necessárias para o isolamento da vibração em todas as direções. Alcançar um desempenho mais consistente e tempo de vida útil mais longo dos componentes está diretamente relacionado com a utilização de coxim nas montagens em que envolvem peças de metal [8].

O modelo mecânico elastomérico [9] da Figura 3 representa um coxim elastomérico na qual consiste em uma mola (k) e um amortecedor viscoso (c).

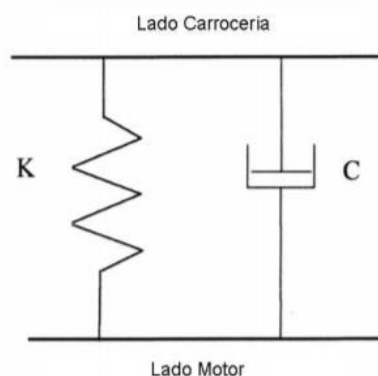


Figura 3: Modelo mecânico de coxim elastomérico. [9]

A Figura 4 apresenta o comportamento da rigidez dinâmica de um coxim elastomérico. Nota-se nesta figura que para maiores frequências há um aumento na sua rigidez, isso acontece devido ao amortecimento.

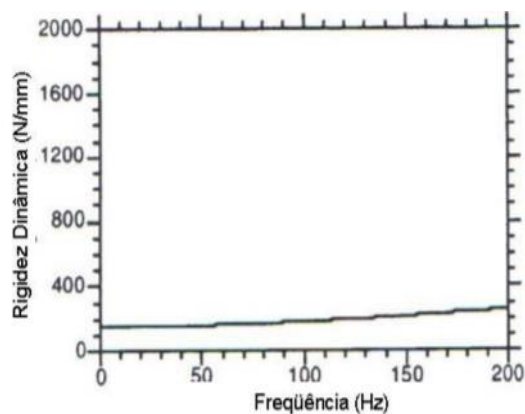


Figura 4: Rigidez dinâmica de um coxim elastomérico. [10]

Baseado na característica de rigidez, o coxim elastomérico é capaz de relacionar-se entre o isolamento da vibração e o deslocamento estático [9].

2.2.1 Sistema de coxinzagem de motores

O sistema de coxinzagem de motores – Figura 5 - tem como principal função suportar seu peso bem distribuído e manter seu centro de gravidade durante o funcionamento, desse modo será garantido que as condições de funcionamento não irão afetar seu projeto. Isolar as forças internas proveniente do funcionamento, que forçam o desequilíbrio do motor na estrutura do veículo, também é uma função deste sistema [11].

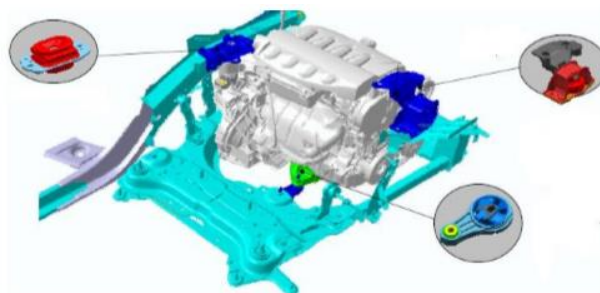


Figura 5. Modelo de coxinzagem de um motor de um automóvel a combustão. [8]

Como já mencionado anteriormente, o funcionamento de máquinas e motores provocam uma excitação em diferentes faixas de frequência. Para efeito de compensação, coxim específico deve ser utilizado. A utilização de coxim de alta rigidez e alto amortecimento, por exemplo, satisfaz a condição de funcionamento para baixa frequência, uma vez que baixa frequência provoca grandes amplitudes de deslocamento. Analogamente, o inverso ocorre para alta frequência, na qual conduz para menores amplitudes de deslocamento. Na busca de encontrar esse meio termo, a Figura 6 representa a rigidez dinâmica ideal de um coxim.

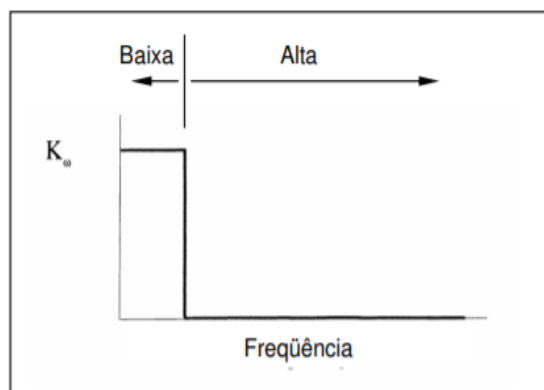


Figura 6: Rigidez ideal de um coxim de motor. [9]

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Será apresentada uma estrutura conforme mostra a Figura 7 de como foi desenvolvido o trabalho para obtenção dos resultados.



Figura 7: Fluxograma de condução dos trabalhos. (Autoria própria)

Desenvolvido no Laboratório Automotivo de Baja (LAB) da UFRSA, para realização do experimento foi utilizado o protótipo Cactus Baja 16 (CB16) como bancada de teste. Para realização do teste foram instalados alguns equipamentos para coletar, monitorar e processar os dados. A Figura 8 mostra a montagem destes equipamentos na bancada.



Figura 8: Montagem dos componentes na bancada. (Autoria Própria)

Os equipamentos utilizados no teste experimental, bem como seu modelo/tipo e função estão dispostos na Tabela 1.

Tabela 1: Lista de equipamentos utilizados no teste experimental

Equipamento	Modelo/Tipo	Função
Arduíno (I)	Uno R3	Coletar dados
Notebook (II)	Lenovo Ideaped 320	Processar dados
Tacômetro (III)	Bosh Sport li 3-3	Medir rotação do motor
Acelerômetro (IV)	MPU 2560	Medir aceleração
Motor (V)	Briggs & Stratton 10 HP	Converter outras formas de energia em energia mecânica
Coxim (VI)	Balata (C1) Balata com alma de aço (C2) Microporosa (C3) Neoprene CR (C4)	Amortecer

Com o intuito de executar o experimento em condições de trabalho mais próximas do real, o protótipo CB16 foi colocado diretamente no solo com as configurações de pressões de pneus e amortecedores iguais as utilizadas com o veículo em operação. A Figura 9 ilustra o posicionamento do protótipo conforme foi realizado o experimento.



Figura 9: Posicionamento do veículo. (Autoria própria).

Foram utilizados 4 tipos de coxim de composições distintas como objeto de estudo. Para cada experimento foram utilizadas as mesmas condições: pré-carga nos parafusos, tempo de funcionamento em mesma rotação e incremento de rotação. Tais valores da Tabela 2 foram utilizados por ser o aperto necessário para fixação do motor, por ser um tempo necessário para obter uma quantidade de dados significativos e por ser um valor que satisfaz todo o intervalo considerado, respectivamente.

Tabela 2: Condições de realização do experimento

Condições	Valores
Pré-carga dos parafusos	30 N.m
Tempo na mesma rotação	10 s
Incremento de rotação	400 RPM

O teste foi realizado a partir da variação da rotação do motor, na qual variou de 1800 RPM (rotação de funcionamento com o veículo parado) até 4600 RPM (rotação máxima configurada que não cause danos ao motor) com incremento conforme a Tabela 2. A necessidade de variação da rotação está relacionada com as condições de uso do protótipo, uma vez que estando em operação há sua constante alteração.

O incremento de rotação do motor foi possível ser controlado mediante o auxílio de um tacômetro analógico, e então, garantiu-se que todos os intervalos de medições foram iguais.

Considerando um grau de liberdade, um acelerômetro foi instalado na base do motor para que pudesse captar, quantitativamente, a vibração transmitida do motor para a estrutura. Uma vez instalado próximo ao motor, obteve o valor máximo de frequência para determinada faixa de rotação.

A fim de coletar os dados de aceleração instantânea enviados pelo acelerômetro foi utilizado um arduino no sistema de aquisição. A escolha desse instrumento de medição foi realizada tendo em vista que este possui uma fácil e eficaz programação na elaboração do conteúdo para apanhar os dados.

O armazenamento dos dados adquiridos no sistema de aquisição foi realizado com o software Excel. Para o processamento dos dados e elaboração dos resultados foi realizado o cálculo da raiz quadrada da média (RMS), na qual representa uma medida estatística que melhor mostra a magnitude de uma quantidade variável de valores.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (1)$$

Tendo em vista a melhor interpretação dos resultados do experimento, após o processamento dos dados, foram traçadas as curvas de aceleração RMS em função da rotação do motor para cada coxim elastomérico. Os resultados encontrados experimentalmente serão apresentados e debatidos no tópico seguinte.

Continuando o experimento a fim de obter resultados que propicie uma maior eficácia para o amortecimento das vibrações do motor foram analisados também a influência da espessura do coxim. Após os resultados encontrados nos demais experimentos selecionou-se o coxim que foi constatado de maior eficácia. Desse modo, um novo experimento foi realizado com este coxim analisando a variação da espessura, 7 mm e 12 mm. Tais espessuras foram utilizadas devido questões geométricas do coxim. A metodologia utilizada para esta análise consistiu no mesmo método realizado nas demais análises.

4. RESULTADO E DISCUSSÕES

Os ensaios foram divididos em cinco etapas inicialmente, sendo quatro para os diferentes tipos de coxim e uma para análise sem coxim. A Figura 10 apresenta os coxins elastomérico utilizados.



Figura 10: Tipos de coxim elastomérico. (Autoria Própria)

Para cada etapa foi mantido o procedimento experimental a fim de manter as condições de contorno iguais. As frequências obtidas em cada experimento estão representadas na Tabela 3.

Tabela 3: Dados experimentais

SEM COXIM								
Rotação (RPM)	1800	2200	2600	3000	3400	3800	4200	4600
Aceleração RMS (m/s²)	1,5734	1,6664	1,7154	2,1900	2,59359	5,3913	7,41641	6,5579
Média RMS (m/s²)	3,6380							
BALATA (C1)								
Rotação (RPM)	1800	2200	2600	3000	3400	3800	4200	4600
Aceleração RMS (m/s²)	1,4818	1,4674	1,5232	2,3142	4,7351	6,4658	6,2477	4,4249
Média RMS (m/s²)	3,5825							
BALATA COM ALMA DE AÇO (C2)								
Rotação (RPM)	1800	2200	2600	3000	3400	3800	4200	4600
Aceleração RMS (m/s²)	1,4859	1,4745	1,5122	2,2318	3,1107	6,5047	6,3185	5,0978
Média RMS (m/s²)	3,4670							
MICROPOROSA (C3)								
Rotação (RPM)	1800	2200	2600	3000	3400	3800	4200	4600
Aceleração RMS (m/s²)	1,3909	1,5275	1,6527	2,1707	3,2100	6,7146	6,4327	5,2519
Média RMS (m/s²)	3,5439							
NEOPRENE CR (C4)								
Rotação (RPM)	1800	2200	2600	3000	3400	3800	4200	4600
Aceleração RMS (m/s²)	1,4704	1,4683	1,5671	2,0861	2,8544	6,3869	5,9881	4,3128
Média RMS (m/s²)	3,2668							

Para melhor analisar e representar os dados experimentais foi elaborado um gráfico Aceleração x Rotação. O Gráfico 1 representa as curvas referentes aos resultados da Tabela 3.

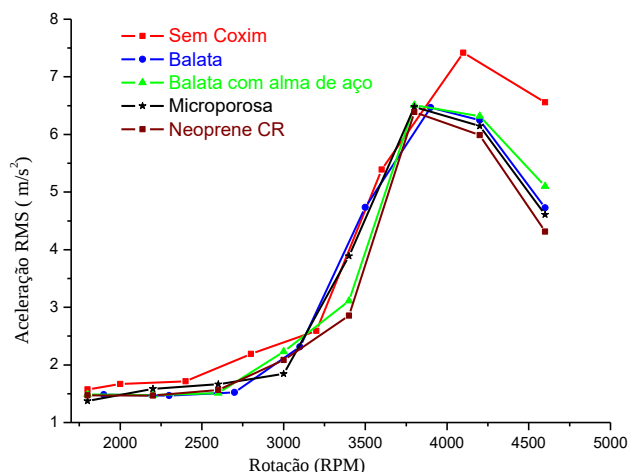


Gráfico 1. Comportamento de diferentes coxins. (Autoria própria).

Analisando os dados, foi observado que a estrutura do protótipo atinge frequência natural na faixa de rotação de 3300 RPM. Baseado em explicações anteriores, após o sistema alcançar a faixa de excitação na frequência natural é esperado que ocorra um aumento da amplitude de oscilação, assim, o resultado experimental condiz com o resultado teórico, na qual este aumento ocorre e possui uma variação da amplitude de oscilação em, aproximadamente, $5,22 \text{ m/s}^2$ para a pior situação.

Foi observado que o maior valor de ressonância foi atingido na pior situação de montagem do sistema motor com a estrutura, na qual equivale a utilização do sistema sem nenhum tipo de coxinzização – curva com maior valor de aceleração RMS. No entanto, de acordo com os dados experimentais, o sistema amortecido com coxim elastomérico atenua a transmissão de vibração do motor para a estrutura em maior proporção. Assim, o coxim C4 mostrou-se mais eficaz para atenuar a vibração, uma vez que os valores de aceleração RMS para cada rotação ficaram abaixo das demais curvas plotadas no gráfico. A Tabela 4 mostra a eficácia de atenuação deste coxim em relação aos outros submetidos no experimento. Estes valores de eficácia foram obtidos por meio da diferença entre a média total de aceleração RMS do coxim C4 para os demais coxins e sem coxim.

Tabela 4: Eficácia C4

Tipo de Coxim	Eficácia (m/s^2)
Balata	0,3157
Balata com alma de aço	0,2002
Microporosa	0,2771
Sem coxim	0,3712

Após constatar que o coxim C4 possui maior eficácia, proporcionando menor transmissibilidade de vibração, foi realizado um novo experimento para verificar qual a espessura do coxim C4 melhor otimiza a transferência de vibração. A partir dos resultados obtidos foi plotado o Gráfico 2.

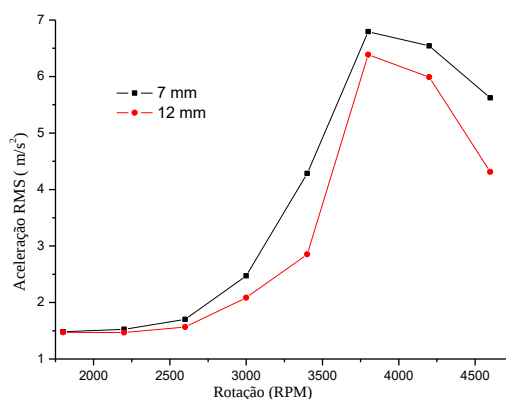


Gráfico 2. Influência da espessura do coxim. (Autoria própria).

Foi constatado que a espessura de 12 mm consegue minimizar em média 0,5665 m/s² os efeitos de transmissibilidade de vibração em relação a espessura de 7 mm. Vale ressaltar também que a atenuação maior ocorre para rotações acima da frequência natural do sistema.

5. CONCLUSÕES

Ao final do trabalho verificou-se que a utilização de coxim no motor do baja propicia benefícios na qual não seria possível sem a utilização deste. A menor amplitude de excitação observada, 3,2668 (m/s²), com a presença do sistema amortecido com o coxim Neoprene CR é capaz de provocar maior conforto ao piloto, maior durabilidade do sistema e da estrutura.

Também foi constatado que a espessura do coxim tem total influência na transmissibilidade de vibração do motor para a estrutura. Observou-se que para a espessura 12 mm o coxim elastomérico minimiza os efeitos causados pela fonte geradora de vibração.

Assim, nota-se que o desenvolvimento de estudos no setor automobilístico para a utilização de coxim pode estar sendo desenvolvido constantemente em busca de garantir aos usuários maior segurança e conforto. Vale ressaltar também a importância de conhecer a fonte causadora do problema para que possa ser isolada e/ou minimizada do restante do sistema na qual há interação.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SOEIRO, N. S. – Curso de Fundamentos de Vibração e Balanceamento de Rotores. Belém: UFPA-ELETRONORTE, 2008.
- [2] SALIBA, T. M. Manual Prático de Avaliação e Controle do Ruído. 7ª Ed., LTr Editora, 2013
- [3] RAO, Singiresu. Vibrações mecânica. 4. ed. [S. l.]: Pearson, 2009. 424 p.
- [4] SHENCK. Smart Balancer - Balanceamento em campo. Disponível em: <<http://www.schenck-rotec.com.br/products/products/SmartBalancer3.php>>. Acesso em: 15 jan. 2020.
- [5] PAULO. Sistemas de Transmissão de Movimento: Sistemas de Transmissão de Movimento. 2017. Disponível em: <https://www.researchgate.net/figure/Graus-de-liberdade-no-espaco-tridimensional_fig4_281975929>. Acesso em: 25 jan. 2020.
- [6] HELERBROCK, Rafael. "Ressonância"; *Brasil Escola*. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/ressonancia.htm>. Acesso em 18 de janeiro de 2020
- [7] Nóbrega, P.G.B.; Hanai, J.B. A Análise Modal na Avaliação de Estruturas de Concreto Pré-moldado. 1o. Encontro Nacional de Pesquisa-Projeto-Produção em Concreto pré-moldado. São Carlos, 2005.
- [8] SIMPÓSIO DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO E TECNOLOGIA, 10., 2013, Resende. CNEBCA: COMPARAÇÃO NUMÉRICA x EXPERIMENTAL DE BORRACHA PARA COXINS AUTOMOTIVOS. Rio de Janeiro: Unitau, 2013. 14 p.
- [9] YU Y.; NAGANATHAN N. G.; DUKKIPATI R. V. A literature review of automotive vehicle engine mounting systems. Mechanism and Machine Theory, v.36, n.1, p. 123-142, jan.2001
- [10] SWANSON, D. A. Active engine mounts for vehicles. IN. INTERNATIONAL OFF-HIGHWAY & POWER LANT & EXPOSITION, Milwaukee, Wisconsin, 1993.
- [11] ANON. Engine mounts and NVH. Automotive Engineering, July 1994