

CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS – UNIS/MG  
ENGENHARIA MECÂNICA  
ROBSON VENGA PETRIN

|            |            |
|------------|------------|
| N. CLASS.  | M 620.3P44 |
| CUTTER     | P496V      |
| ANO/EDIÇÃO | 2012       |

VIBRAÇÕES MECÂNICAS APLICADAS NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA

Varginha

2012

**FEPESMIG**

ROBSON VENGA PETRIN

**VIBRAÇÕES MECÂNICAS APLICADAS NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA**

Projeto apresentado ao curso Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS/MG como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel sob orientação do Prof.º Me. Altamiro Caldonazo Junior.

Varginha

2012

**FEPESMIG**

**ROBSON VENGA PETRIN**

**VIBRAÇÕES MECÂNICAS APLICADAS NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS/MG como pré-requisito para a obtenção do grau de bacharel pela Banca examinadora compostas pelos membros:

Aprovado em     /     /

---

Prof. Ms. Altamiro Caldonazo Junior

---

Prof. Ms. Alexandre de Oliveira Lopes

---

Profa. Esp. Luciene de Oliveira Prospero

OBS.:

Dedico este trabalho em homenagem a todos os amigos que sempre acreditaram em meu potencial e também aqueles que me assessoraram no meio profissional para meu crescimento profissional e também como ser humano.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus que me deu a benção da inteligência e a oportunidade de adquirir um curso superior. Agradeço aos meus amigos Antonio Otto, Marcelo Ferreira, Pablo Grandi e Rodrigo Grandi por todo apoio durante a trajetória na graduação de engenharia mecânica, também a minha esposa e filho que a cada dia me dão mais animo e apoio para crescer como pessoa. Agradeço também a empresa Cooper Standard por me dar a oportunidade de iniciar minha carreira profissional e me forneceu o conhecimento para conclusão deste trabalho.

“O que somos é um presente de Deus, e o que nos tornamos é o nosso presente para ele.”

Emmanuel

## RESUMO

As vibrações mecânicas são fenômenos oscilatórios mais comuns que imaginamos, todo o corpo possui uma frequência natural no qual oscila em um período harmônico. As vibrações sem controle podem levar ao mau funcionamento e até a ruína de um sistema mecânico. Nos automóveis o sistema de amortecimento tem sofrido grandes evoluções e a comparação entre os atuais e os novos coxins são importantes para o entendimento da atenuação das fadigas causadas pela oscilação não linear e a segurança do usuário.

**Palavras-chave:** Vibrações, Automotiva, Coxim, Amortecimento

## **ABSTRACT**

*Mechanical vibrations are the most oscillatory phenomenon common them we imagine, all body has a natural frequency witch has a harmonic oscillations. Vibrations uncontrolled can lead to unfunction and to destruction of a mechanical system. The damping system in vehicles have been suffering great developments and the comparison between current and new mounts are important for the understanding of the attenuation of fatigues caused nonlinear oscillation and the user security.*

**Keywords:** *Vibrations, Automotive, Mount, Damping.*

## LISTAS DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 – Equipamentos e sensores para mensuração da vibração e amortecimento. .... | 18 |
| Figura 2 – Equipamentos e sensores para mensuração da vibração e amortecimento. .... | 18 |
| Figura 3- Equipamentos e sensores para mensuração da vibração e amortecimento. ....  | 18 |
| Figura 4 – Coxim Standard ou Coxim Padrão.....                                       | 20 |
| Figura 5 – Coxim de Multi-Estação ou de Multi-estado .....                           | 23 |

## LISTA DE GRÁFICOS

|   |    |
|---|----|
| Gráfico 1 - Resistência a vibração dinâmica Coxim Padrão .....                  | 21 |
| Gráfico 2 - Resistência a vibração dinâmica Coxim Padrão .....                  | 22 |
| Gráfico 3 - Resistência a vibração dinâmica do Coxim de multi-estação (A) ..... | 23 |
| Gráfico 4 - Resistência a vibração dinâmica do Coxim de multi-estação (B).....  | 24 |
| Gráfico 5 - Resistência a vibração dinâmica do coxim de multi-estação (A) ..... | 24 |
| Gráfico 6- Resistência a vibração dinâmica do coxim de multi-estação (B).....   | 25 |

## SUMÁRIO

|   |    |
|---|----|
| 1 INTRODUÇÃO.....   | 11 |
| 2 MOVIMENTO HARMÔNICO.....  | 12 |
| 3 FREQUENCIA NATUAL.....  | 13 |
| 4 AMORTECIMENTO.....  | 14 |
| 5 SEGURANÇA E CONFORTO .....  | 15 |
| 6 VIBRAÇÕES NOS AUTOMÓVEIS.....                                       | 16 |
| 7 FERRAMENTAS DE ANÁLISE PRÁTICAS DE VIBRAÇÕES. ....                  | 18 |
| 8 SISTEMAS DE ANTI-VIBRAÇÃO NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA PARA MOTORES..... | 20 |
| 9 CONCLUSÃO.....  | 26 |
| REFERÊNCIAS .....   | 27 |

## 1 INTRODUÇÃO

Vibrações mecânicas é uma área da engenharia em grande expansão na atualidade, a compreensão dos fenômenos vibratórios e como ameniza-los é um vasto campo para pesquisas e descobertas. As vibrações mecânicas podem afetar uma estrutura levando-a ruir ou afetar o funcionamento de um sistema, os modelamentos matemáticos para análise dos sistemas são extremamente complexos, grande parte dos modelamentos hoje são simulados com softwares e equipamentos avançados medindo e avaliando as regiões mais afetadas pela vibração.

Na indústria automotiva, a vibração interfere diretamente no desempenho do veículo, segurança da estrutura e conforto de quem guia. Os sistemas para atenuar estes efeitos vibratórios melhoram a cada dia, os atuais sistemas são compostos por corpos metálicos preenchido com polímeros a base de borracha natural, já os mais modernos utilizados em veículos de luxo são compostos por canais onde o vácuo melhora a adaptação as oscilações.

O objetivo é comparar os dois sistemas evidenciando as diferenças destes amortecimentos viscosos aplicado a indústria automotiva global, gerando beneficiamento para rendimento do veículo e a segurança e conforto dos consumidores.

## 2 MOVIMENTO HARMÔNICO

De acordo com Thompson (1981) o movimento oscilatório pode se repetir regularmente, como o balanço da roda de um relógio ou com considerável irregularidade, assim como os terremotos. Quando o movimento se repete em um mesmo intervalo de tempo é chamado de movimento periódico, a forma mais simples de um movimento periódico é chamado de movimento harmônico.

Temos exemplos históricos famosos de quando uma vibração atinge o limite da frequência natural como os soldados do exercito marchando sobre uma ponte durante a guerra e a ponte desaba, é por conta do limite ou quando uma taça de vidro é quebrada por gritos. Na indústria automotiva iremos verificar que as vibrações não são harmônicas, ou seja, os movimentos oscilatórios não possuem um padrão, uma constância.

A equação da frequência em um movimento armonico ( $f$ ) é dada devido a relação da contante elastica ( $k$ ) e a massa ( $m$ ) do corpo.

Equação 1 – Equação da frequência em um movimento harmônico

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Fonte: THOMSON, William T.

### 3 FREQUENCIA NATUAL

A frequência natural é uma das características dos corpos extremamente importante para a compreensão dos efeitos vibratórios. De acordo com Graham (2012) cada corpo possui sua frequência natural que é determinada por sua massa e rigidez. Aumentar a massa de um objeto reduz a sua frequência natural. Aumentar a rigidez do objeto aumenta a sua frequência natural. A equação da frequência natural ( $f_n$ ) é dada pela relação da inércia ( $I$ ), massa ( $m$ ), comprimento ( $l$ ) e módulo de elasticidade do material ( $E$ ).

Equação 2 – Equação da frequência natural

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3EI}{Ml^3}}$$

Fonte: THOMSON, William T.

De acordo com Inman (2001) ressonância é uma vibração energética que se provoca em um sistema oscilante quando atingido por uma onda de frequência igual a frequência natural, ou ainda, é a transferência de energia de um sistema oscilante para outro quando a frequência do primeiro coincide com uma das frequências naturais do segundo. Isto significa que, quando um corpo está em repouso ou tem uma frequência natural de oscilação, este entrará em ressonância quando uma força interagir com este corpo tiver a mesma frequência do corpo. Em outras palavras, quando a amplitude aumenta a ponto da frequência se aproximar a frequência natural de oscilação, ocorre a ressonância. Este fenômeno é aplicado nas famosas s taças que são quebradas com os gritos de tenores ou quando ocorre uma microfonia, aquele som agudo e irritante que ocorre toda vez que alguém aproxima um microfone de uma caixa de som.

#### 4 AMORTECIMENTO

Amortecimento é a atenuação dos movimentos oscilatórios, ou seja, amenizar os efeitos das vibrações dos corpos. De acordo com Rao (2009) amortecimento é o mecanismo pelo qual a energia de vibração é atenuada gradativamente convertida em calor ou som. Embora a quantidade de energia convertida em calor ou som seja relativamente pequena, é importante considerar o amortecimento para uma previsão precisa de resposta de vibração de um sistema.

Admite-se que um amortecedor não tem massa e nem elasticidade, como consequência de uma dificuldade em determinar as causas do amortecimento em sistemas práticos, ele é modelado como um ou mais tipos, como o amortecimento viscoso e o amortecimento Coulomb. De acordo com Rao (2009) amortecimento por Coulomb é causado pelo atrito entre superfícies pelo atrito entre superfícies em contato que estejam secas ou não tenham lubrificação suficiente. De acordo com Graham (2012) amortecimento viscoso ocorre em um sistema mecânico, quando um componente deste sistema está em contato com um fluido viscoso. A força do amortecimento é proporcional a velocidade onde está ligado o coeficiente de amortecimento viscoso os valores de força tempo e comprimento.

## 5 SEGURANÇA E CONFORTO

De acordo com ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1983), a NR 15: atividades e operações insalubres no Anexo 8 diz que as atividades e operações que exponham os trabalhadores, sem a proteção adequada, às vibrações localizadas ou de corpo inteiro, serão caracterizadas como insalubres, ou seja, toda a vibração gerada por uma atividade que causa vibrações em algum grupo de músculos do corpo causam fadiga e/ou danos a saúde.

Nos automóveis a vibração pode não somente causar danos a estrutura do veículo, mas também a fadiga excessiva do usuário durante o uso e também a aderência do veículo para que não saia do caminho, através das vibrações algumas vezes pode ocorrer do motorista perder o controle do volante do veículo pelos músculos estarem cansados.

O efeito vibratório do conforto do usuário é de extrema importância para o consumidor que a cada dia exige mais tecnologia, conforto e segurança por um menor custo, entendemos que a vibração não é somente um efeito para melhorar potência e vida útil de um veículo automotor, mas também a segurança e conforto do usuário.

## 6 VIBRAÇÕES NOS AUTOMÓVEIS

As vibrações mecânicas no motor e na estrutura do automóvel geram desgastes mecânicos nos componentes e perda de potencia do motor devido ao desgaste e desbalanceamento. De acordo com Rao (2009) a maioria dos motores de acionamento tem problemas de vibração em razão do desbalanceamento inerentes aos motores e de acordo com Graham (2012) vibrações ocorrem na maioria dos sistemas mecânicos e se essas vibrações não forem controladas, elas podem levar a situações catastróficas e de acordo com Seto (1971) Vibração, em geral, é uma forma de energia perdida e indesejável em muitos casos. Isto é particularmente verdadeiro para máquinas, porque produz barulho, quebra peças e transmite forças e movimentos indesejáveis a objetos nas vizinhanças.

Os sistemas de anti-vibração, os coxins, foram desenvolvidos para atenuar a vibração sofrida pelo motor e estrutura durante o seu funcionamento e deslocamento. Iremos focar nos coxins desenvolvidos para a aplicação em motores, powertrain.

De acordo com Seto (1971) Muitos problemas de vibração em engenharia são de natureza não-linear, isto é, as forças restauradoras não são proporcionais aos deslocamentos e as forças de amortecimento não são proporcionais a primeira potência da velocidade e de acordo com Rao (2009) Uma vez que todos os sistemas vibratórios tendem a comportar-se não linearmente com o aumento da amplitude de oscilação, é bom conhecer vibrações não lineares ao lidar com sistemas vibratórios na prática.

Uma diferença essencial no estudo de sistemas não-lineares é que a solução geral não pode ser obtida por superposição, em geral se requer matemática avançada para a análise e solução de sistemas não-lineares.

A equação diferencial do movimento em vibrações forçadas não-amortecidas com forças restauradoras não-lineares é dada pela relação do diferencial do movimento em relação ao tempo ( $d^2x/dt^2$ ), tempo ( $t$ ) e velocidade angular ( $\omega$ ):

Equação 3 - Equação diferencial do movimento não-amortecido

$$\frac{d^2x}{dt^2} + f(x) = F(0). \cos. \omega t$$

Fonte: SETO, William W.

A partir da equação diferencial do movimento é possível calcular uma estimativa do valor da vibração permanente aproximada. No caso dos automóveis o coxim tem que trabalhar impedindo fortes vibrações no motor durante a ignição, primeira marcha que consiste em uma maior vibração e esforço do motor e também a vibrações mais suaves como em uma quinta marcha, portanto o coxim não pode trabalhar sempre com uma propriedade, ele deve trabalhar em duas situações, como uma mola dura e como uma mola macia.

Um sistema com amortecimento viscoso é mais eficiente em um sistema não linear de vibrações, pois o escoamento do material viscoso consegue suprir a necessidade de amortecimento independente da direção ou sentido da força. De acordo com Rao (2009) Se o sistema tiver amortecimento viscoso, seu movimento enfrentará a resistência de uma força cuja magnitude é proporcional a da velocidade, porém em direção oposta e usualmente o amortecimento viscoso é adicionado ao sistema mecânico com fins de controle de vibração. O amortecimento viscoso reduz a amplitude de vibrações livres e também reduz a amplitude de força causa pela vibração e excitação harmônica.

O amortecimento viscoso é a melhor solução encontrada para minimizar os efeitos da vibração que chega ao motor do automóvel. Os coxins comuns, coxim standard, são basicamente constituídos de uma estrutura de alumínio que é preenchido por borracha, em geral esta borracha é natural e é injetada dentro do corpo de alumínio.

## 7 FERRAMENTAS DE ANÁLISE PRÁTICAS DE VIBRAÇÕES.

As tecnologias dos equipamentos de medição e análise dos efeitos vibratórios estão a cada dia mais avançados, equipamentos que podem através de sensores e verificar as ações das vibrações em todo o veículo e replicar em laboratório os fenômenos vibratórios e a eficácia do amortecimento.

Figura 1 – Equipamentos e sensores para mensuração da vibração e amortecimento.



Fonte: Cooper Standard Automotive Sealing/Brüel&Kjaer

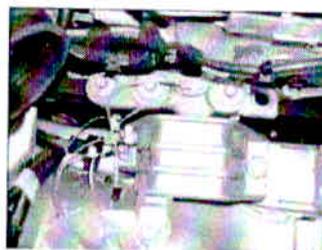
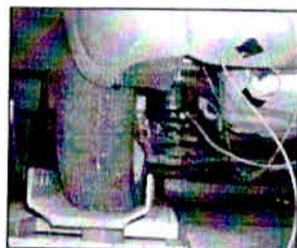
Figura 2 – Equipamentos e sensores para mensuração da vibração e amortecimento.



Fonte: Cooper Standard Automotive Sealing

Figura 3- Equipamentos e sensores para mensuração da vibração e amortecimento.

### Vehicle instrumentation



Accelerometers, displacement sensor, camera...



On road acquisition



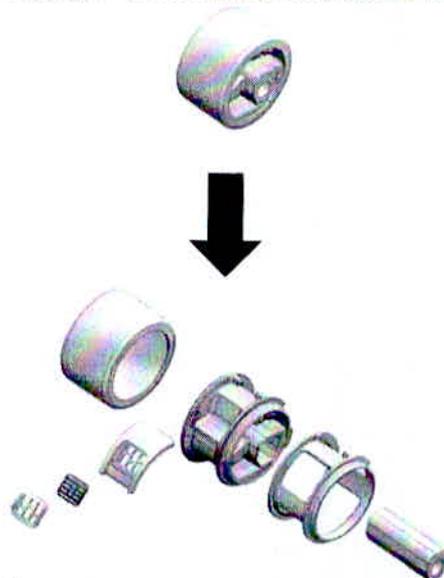
Fonte: Cooper Standard Automotive Sealing

Estes sensores e equipamentos se comunicam com softwares potentes, como Time Wave form Replication and Control, que conseguem mensurar cada efeito das vibrações e suas absorções de acordo com o desenvolvimento do motor de combustão interna em funcionamento. Nos desenvolvimentos dos sistemas estas leituras e softwares como Unigrafics e Catia de design mostram a rigidez de cada elemento mecânico no sistema e garantindo um bom amortecimento.

## 8 SISTEMAS DE ANTI-VIBRAÇÃO NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA PARA MOTORES.

Coxins standard são os coxins padrão que conforme citado anteriormente possui um corpo de alumínio e preenchido por uma borracha.

Figura 4 - Coxim Standard ou Coxim Padrão

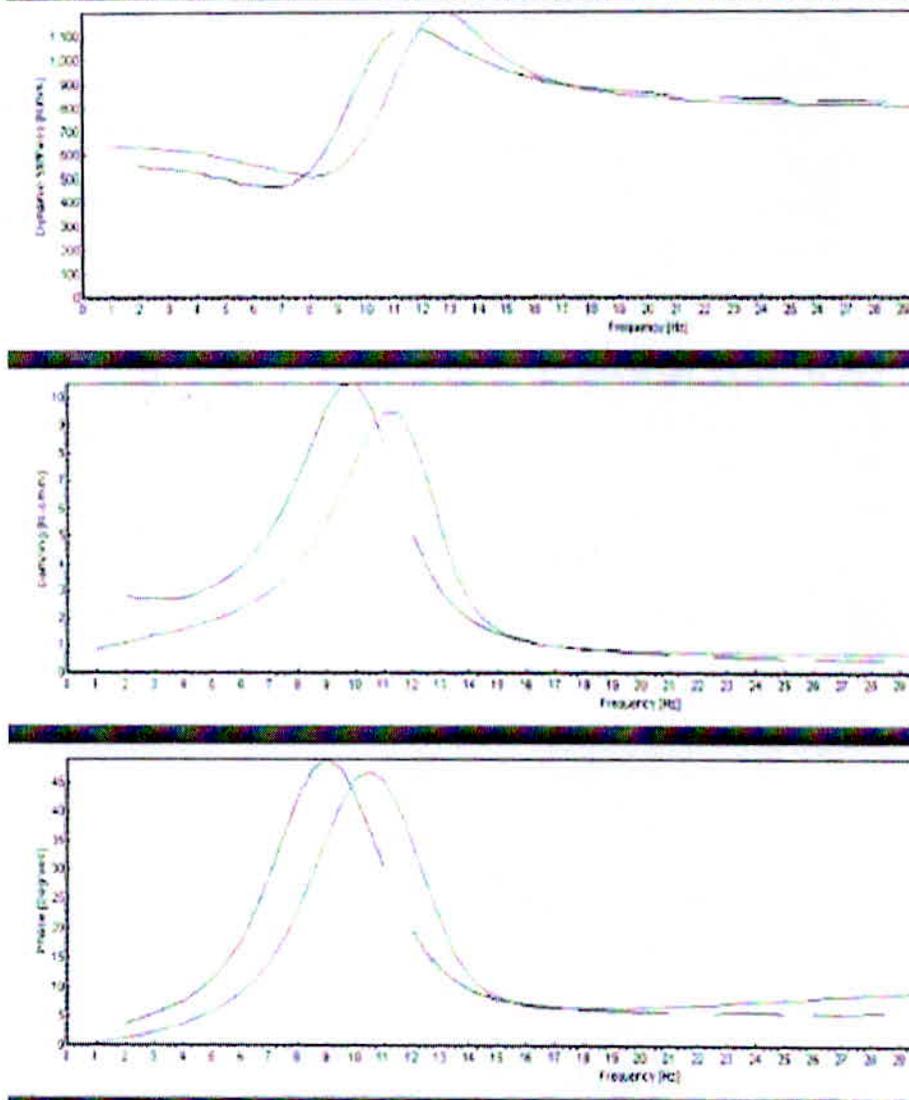


Fonte: Cooper Standard Automotive Sealing

Estes coxins são mais baratos por não ter nenhum tipo de controle da dureza do amortecimento, por essa razão o composto de borracha (utilizando borracha natural) tem que possuir uma dureza mediana no qual trabalha como uma mola dura durante a ignição e a primeira marcha, onde ocorre a maior vibração, e como uma mola macia durante a quinta marcha, onde ocorre a menor vibração.

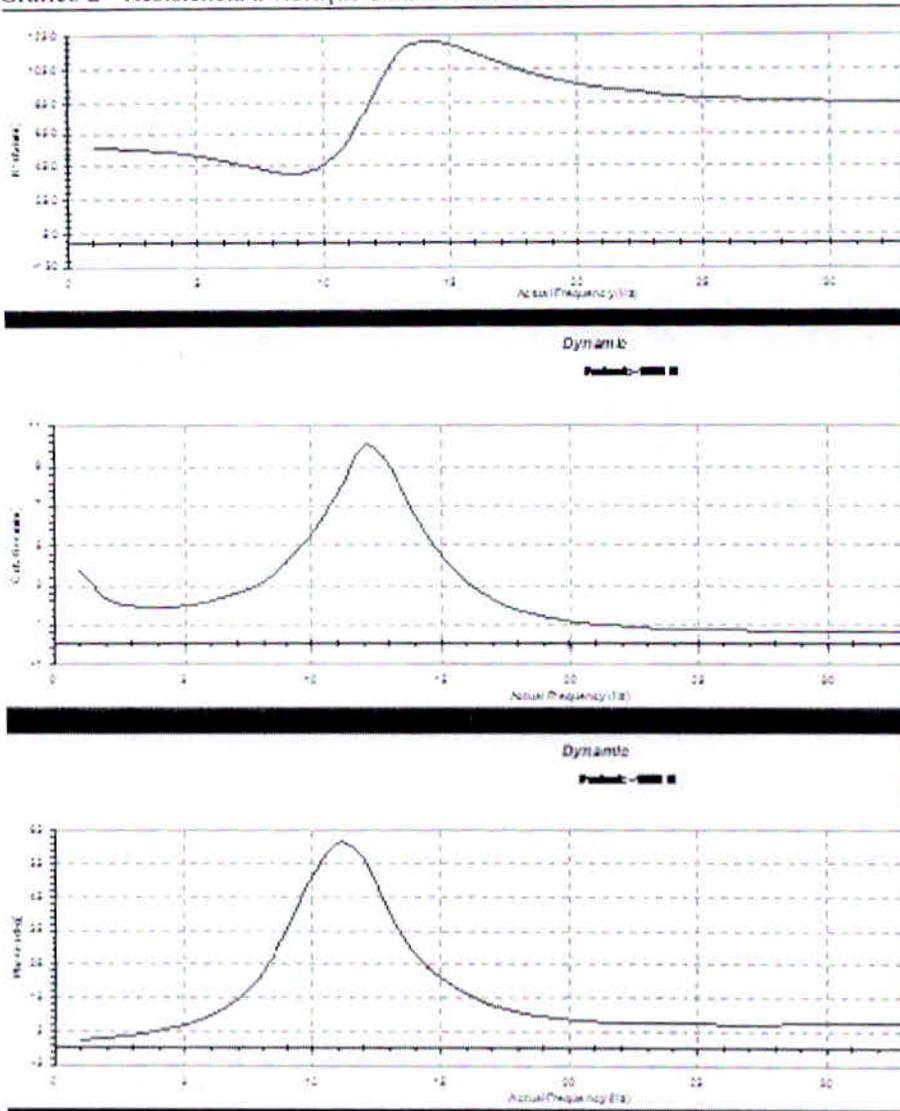
Com equipamentos de captação de vibrações computadorizados, é possível medir e fazer simulações resistência a vibração dinâmica conforme gráfico abaixo:

Gráfico 1 - Resistência a vibração dinâmica Coxim Padrão



Fonte: Cooper Standard Automotive Sealing

Gráfico 2 - Resistência a vibração dinâmica Coxim Padrão

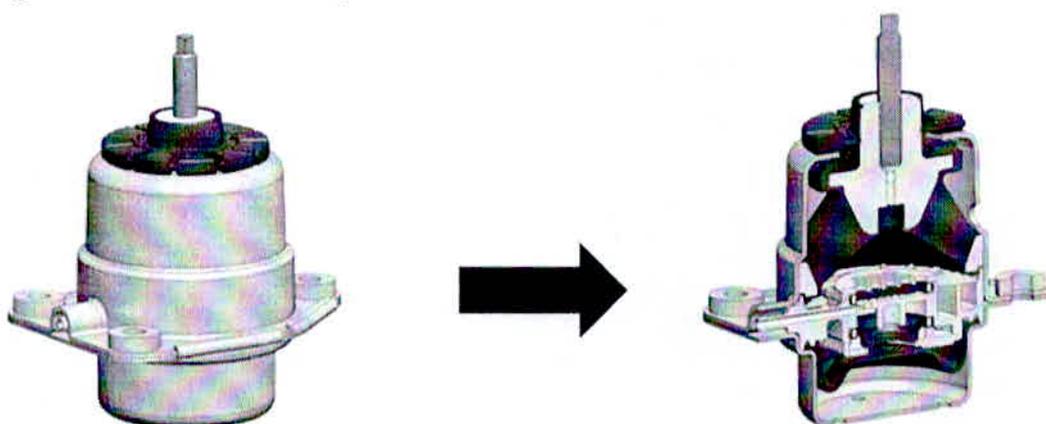


Fonte: Cooper Standard Automotive Sealing

Estes resultados mostram o esforço do coxim de acordo com a variação da velocidade em diferentes ângulos. Concluímos que com o aumento da velocidade o esforço é reduzido e o amortecimento necessário é o mínimo possível.

Coxins de multi-estação ou de multi-estado possui o corpo de alumínio e borracha injetada internamente em suas paredes na forma de membranas e canais no seu corpo. O coxim de multi-estado trabalha com alteração do vácuo internamente no coxim deixando o amortecimento com uma maior variabilidade de reações de acordo com que as vibrações são solicitadas.

Figura 5 – Coxim de Multi-Estação ou de Multi-estado



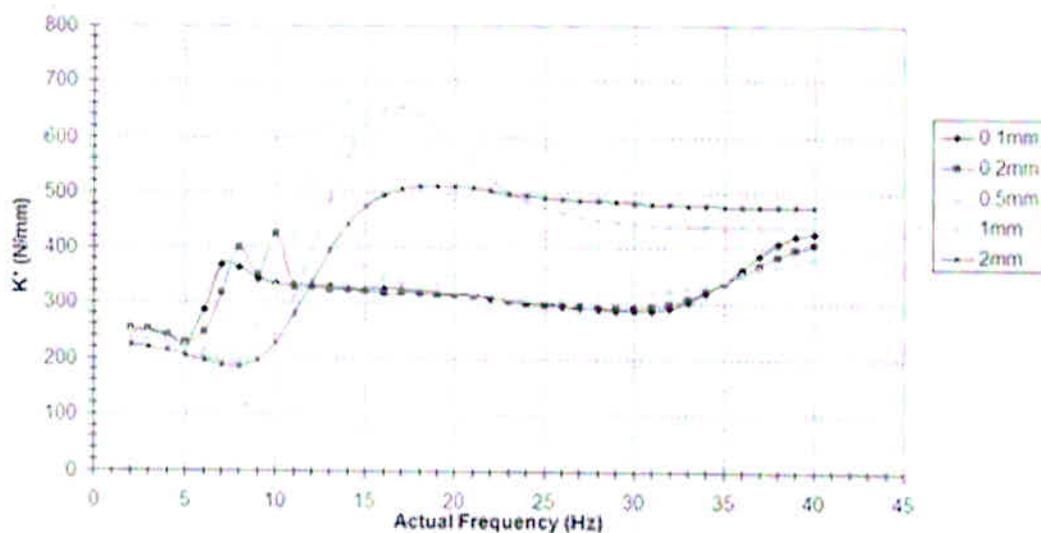
Fonte: Cooper Standard Automotive Sealing

De acordo com os gráficos simulados abaixo, podemos visualizar que independente da frequência, a taxa dinâmica durante a variação da velocidade em solicitações variadas do motor.

Gráfico 3 - Resistência a vibração dinâmica do Coxim de multi-estação (A)

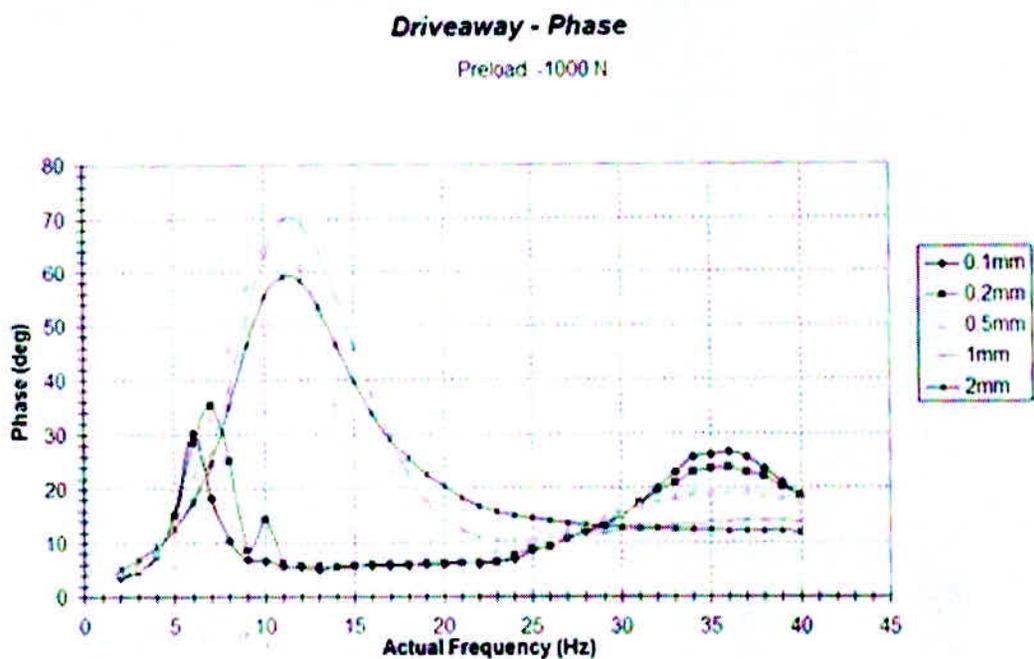
**Driveaway - Dynamic Rate**

Preload -1000 N



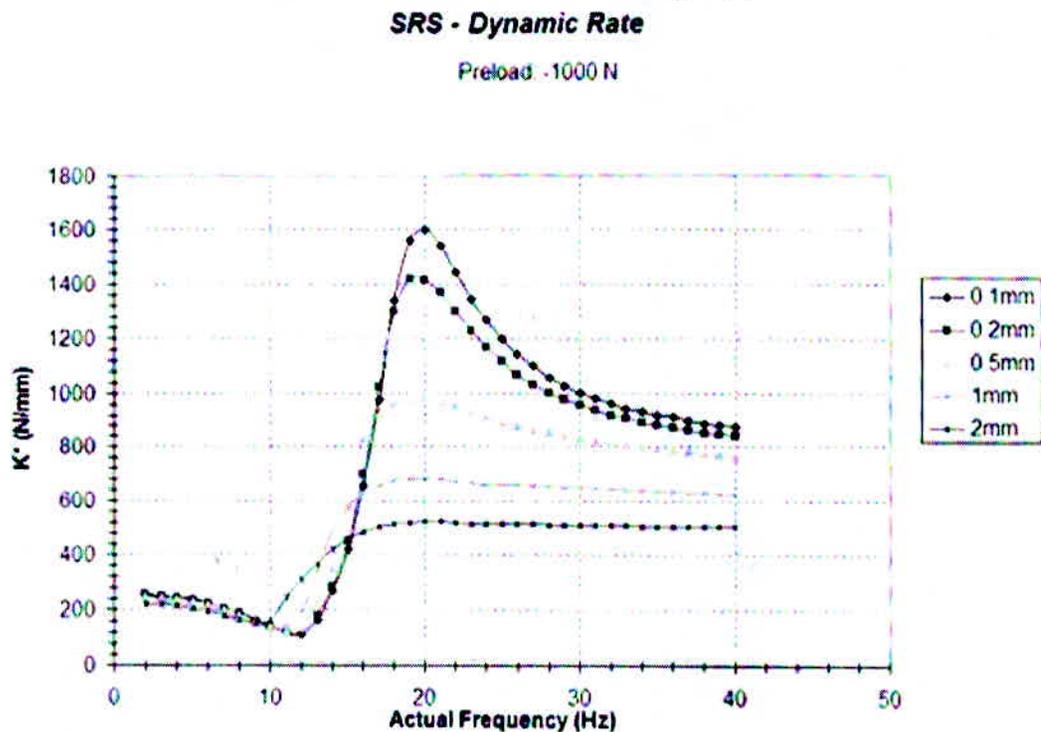
Fonte: Cooper Standard Automotive Sealing

Gráfico 4 - Resistência a vibração dinâmica do Coxim de multi-estação (B)



Fonte: Cooper Standard AutomotiveSealing

Gráfico 5 - Resistência a vibração dinâmica do coxim de multi-estação (A)

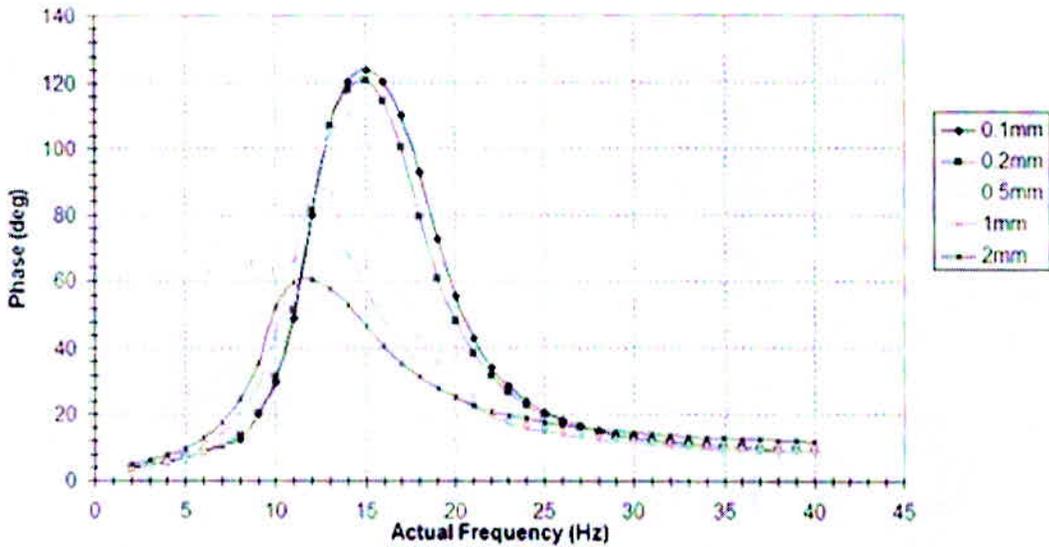


Fonte: Cooper Standard AutomotiveSealing

Gráfico 6- Resistência a vibração dinâmica do coxim de multi-estação (B)

**SRS - Phase**

Preload -1000 N



Fonte: Cooper Standard AutomotiveSealing

Estes resultados mostram que os coxins de multi-estação conseguem se adaptar conforme a variação do amortecimento solicitado. As propostas do coxim de multi-estado é remover o sistema convencional de amortecimento dos motores ganhando em packaging, eficiência no amortecimento e redução de custo em quantidade de uso de coxim por veículo e uma maior segurança e conforto para o usuário final.

## 9 CONCLUSÃO

Temos em alguns processos produtivos a vibração como aliado, como na movimentação de objetos e testes de desempenho, porém na indústria automotiva as oscilações podem causar danos no motor e em toda sua estrutura mecânica, por essa razão é utilizado diversos sistemas de amortecimentos para atenuar estas oscilações para que não causem prejuízo ao sistema mecânico, a segurança e o conforto do usuário.

Vimos o sistema de coxim que atenua os movimentos oscilatórios gerados pelo desempenho do automóvel e que trabalha em amortecimento viscoso, as novas tecnologias são superiores as atuais, pois são capazes de se adaptar a maiores variações de oscilações e da melhor maneira possível para atenuá-las a partir do controle do vácuo no sistema de anti-vibração.

Os coxins de multi-estado contribuem para um menor packaging, maior durabilidade dos motores, melhor desempenho do veículo, e grande conforto e segurança para os usuários que sentem menos os efeitos da vibração nos automóveis.

É possível compreender a importância dos estudos relacionados a vibrações, que por ser um fenômeno físico observado ainda de maneira abstrata, o mesmo possui em alguns casos soluções simples e eficazes que trazem maior comodidade e eficiência aos produtos e processos.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NR 15**: atividades e operações insalubres. Rio de Janeiro, 1983. Anexo 8.

GRAHAM, KellyS. **Mechanical Vibrations**. Stamford, USA:Cengage Learning, 2012

IANMAN, Daniel J. **Engineering Vibration**. 2 ed. São Paulo: Pearson Education, 2001.

RAO, Singiresu. **Vibrações Mecânicas**. 4. ed. São Paulo: Pearson Education, 2009.

Search Results – “automotive” – Products. Germany: Brüel & Kjaer, 2012. Disponível em: <http://www.bksv.com/search.aspx?searchText=automotive&page=1&category=products&itemsPerPage=20>. Acesso em: 12 de agosto de 2012.

SETO, William W. **Vibrações Mecânicas**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1971.

THOMPSON, William T. **Theory of vibration with applications**. Santa Barbara, USA: Mackays of Chatham, 1981.