



ALEXANDRE TAUFENBACH DA SILVA

**SISTEMAS DE SUSPENSÃO:
AMORTECEDORES AUTOMOBILÍSTICOS**

Joinville
2019

ALEXANDRE TAUFENBACH DA SILVA

**SISTEMAS DE SUSPENSÃO:
AMORTECEDORES AUTOMOBILISTICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade Anhanguera de Joinville, como requisito parcial para a obtenção do título de graduado em Engenharia Mecânica.

Orientador: Amanda Rodrigues Jerônimo Siebert

ALEXANDRE TAUFENBACH DA SILVA

SISTEMAS DE SUSPENSÃO:
AMORTECEDORES AUTOMOBILISTICOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Instituição Faculdade Anhanguera em Joinville, como requisito parcial para a obtenção do título de graduado em Engenharia Mecânica.

BANCA EXAMINADORA

Prof(a). Titulação Nome do Professor(a)

Prof(a). Titulação Nome do Professor(a)

Prof(a). Titulação Nome do Professor(a)

Joinville, de Dezembro de 2019

Da Silva, Alexandre Taufenbach. **Sistemas de Suspensão**: Amortecedores Automobilísticos. 2019. 37 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade Anhanguera de Joinville, Joinville, 2019.

RESUMO

A suspensão de um automóvel desempenha papel fundamental na isolação de vibrações provenientes das excitações do contato solo-pneu. Essa eficiência da suspensão depende integralmente dos componentes da mesma, e dois desses componentes são de suma importância: molas e amortecedores. O objetivo desse trabalho foi entender a importância do amortecedor no controle da suspensão dos veículos, de forma geral em abrangendo o funcionamento do mesmo em conjunto com a mola. Com essa finalidade foi realizada uma pesquisa bibliográfica, de forma qualitativa, descritiva e exploratória, e apresentada todo conhecimento adquirido a partir de bases textuais. Generalizando seu funcionamento, abordando a dinâmica vertical que acontece na estrutura da suspensão, entende-se que, entre os tipos de amortecedores e molas mais comuns, foram desenvolvidos estudos e essencialmente avaliados as reações do conjunto mola-amortecedor. Através de três tópicos foi elaborado uma solução, abordando a dinâmica vertical que acontece na estrutura da suspensão, de forma geral, explicando a evolução desse sistema que deixou uma variada gama de tipos de amortecedores e molas, que também foram apresentados os mais conhecidos, e apresentado as principais funções do conjunto mola-amortecedor. Por último, foi descrito os resultados dessa pesquisa, onde é caracterizado suas principais funções, que consistem em melhorar o conforto dos passageiros, melhorar a integridade das cargas transportadas e principalmente aumentar a segurança proporcionando a melhor aderência no contato solo-pneu decorrente.

Palavras-chave: Amortecedor; Molas; Dinâmica Vertical; Suspensão Veicular.

Da Silva, Alexandre Taufenbach. **Suspension Systems: Automobile Shock Absorbers**. 2019. 37 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade Anhanguera de Joinville, Joinville, 2019.

ABSTRACT

Car suspension plays a key role in isolating vibrations from ground-to-tire contact excitations. This suspension efficiency depends entirely on the suspension components, and two of these components are of paramount importance: springs and shock absorbers. The objective of this work was to understand the importance of the shock absorber in the suspension control of vehicles, generally covering the operation of it in conjunction with the spring. For this purpose, a qualitative, descriptive and exploratory literature search was performed and all knowledge acquired from textual bases was presented. By generalizing its operation, addressing the vertical dynamics that occur in the suspension structure, it is understood that, among the most common types of shock absorbers and springs, studies were developed and essentially evaluated the reactions of the shock absorber assembly. Through three topics a solution was elaborated, addressing the vertical dynamics that happens in the suspension structure, in general, explaining the evolution of this system that left a varied range of shock absorbers and springs types, which were also presented the most well-known, and The main functions of the spring-damper assembly are presented. Finally, the results of this research were described, where its main functions are characterized, which are to improve passenger comfort, improve the integrity of the loads carried and mainly increase safety by providing the best grip on the resulting ground-tire contact.

Key-words: Shock Absorber; Springs; Vertical Dynamics; Vehicle Suspension.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Modelo de 1 Quarto de Veículo Dupla Massa.....	12
Figura 2 – Modelo de 1 Quarto de Veículo Massa Simples.....	12
Figura 3 – Gráficos de diferentes coeficientes de amortecimento.....	13
Figura 4 – Esquemática da deflexão de um elemento mola.....	14
Figura 5 – Mola Semielíptica convencional.....	14
Figura 6 – Ilustração de enrolamento da mola semielíptica.....	15
Figura 7 – Braço Tensor Anti-enrolamento.....	15
Figura 8 – Ilustração das Pastilhas Redutoras de Atrito.....	16
Figura 9 – Mola Helicoidal com 5 espiras ativas.....	17
Figura 10 – Mola Cilíndrica Linear.....	18
Figura 11 – Molas com Arame Cônico.....	18
Figura 12 – Amortecedor de Tubo Duplo.....	19
Figura 13 – Amortecedor Monotubo.....	20
Figura 14 – Representação da ação do conjunto mola-amortecedor.....	22
Figura 15 – Suspensão sem e com o controle do amortecedor.....	24
Figura 16 – Ressonância na relação da frequência de entrada e frequência natural do sistema.....	25
Figura 17 – Frequências de ressonância do corpo humano.....	26
Figura 18 – Oscilações da suspensão em função do seu fator de amortecimento.....	27

LISTA DE SIMBOLOS

- x_0 - Posição de operação (inicial)
- ΔF - Variação na força
- Δx - Variação da posição
- k ou k_s - Constante da mola
- N - Número de espiras ativas
- d - Diâmetro do fio
- D - Diâmetro médio da mola
- G - Módulo de cisalhamento do material
- f - Frequência natural
- m - Massa associada
- N/mm – Newtons por milímetro
- Hz - Hertz

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	8
2. DINÂMICA VERTICAL VEICULAR.....	10
3. MOLAS E AMORTECEDORES.....	14
4. CONJUNTO MOLA-AMORTECEDOR – PRINCIPAIS FUNÇÕES.....	22
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.	28
REFERÊNCIAS.....	30

1. INTRODUÇÃO

Um veículo automotivo possui diversos sistemas, que funcionando em conjunto, conferem dirigibilidade, segurança e desempenho, tais como a direção, a suspensão, freios, transmissão, etc.... O sistema de suspensão desempenha o papel de isolar a carroceria do carro das vibrações provenientes das excitações geradas no contato solo-pneu. Melhoria do conforto dos passageiros, melhorar o desempenho em curvas e pistas irregulares, e ainda garantir estabilidade, são umas de suas funções. Essa eficiência da suspensão depende dos componentes da mesma, e dois desses componentes são de suma importância: molas e amortecedores. As molas conferem o trabalho mecânica do conjunto, conferindo a altura desejada ao automóvel e recebendo diretamente os impactos do terreno percorrido se deformando e acumulando energia mecânica, enquanto os amortecedores fazem o controle dessa energia da mola, dissipando a energia mecânica das molas transformando-as em energia térmica.

Os amortecedores são estudados já a mais de um século, devido a sua importância na suspensão e suas aplicações, porém a maioria, em 2019, funciona sob o mesmo princípio: força de amortecimento é gerada pela resistência à passagem do fluido por orifícios presentes em um pistão que se move no interior de uma câmara repleta desse mesmo fluido. Apesar desta similaridade, o conjunto que compõe o amortecedor varia em formatos e configurações, onde alguns se destacam por proferirem maior constância no seu trabalho e maior confiança em determinadas aplicações.

Eles desempenham controle importante no isolamento das vibrações e excitações de fontes diversas que a suspensão sofre ao decorrer de um trajeto. De maneira geral, é uma ferramenta imprescindível aos automóveis, levando em conta tanto a segurança, conforto, quanto ao desempenho do mesmo em variados percursos. A predição do desempenho do amortecedor na suspensão torna possível uma avaliação mais precisa na escolha do modelo a ser usado, evitando assim avarias se o sistema ficar subdimensionado, ou custos excessivos no caso de um sistema de amortecimento superdimensionado.

Qual a importância dos amortecedores no controle da suspensão dos veículos?

Para responder a esta questão, foi necessário entender o funcionamento do amortecedor em conjunto com a suspensão, e através de três objetivos específicos foi elaborado uma solução, abordar a dinâmica vertical que acontece na estrutura da suspensão, de forma geral, explicar a evolução desse sistema que deixou uma variada gama de tipos de amortecedores e molas, que também foram apresentados os mais conhecidos. Por último, descrever as reações do conjunto mola-amortecedor, que em conjunto, mantem a aderência, dirigibilidade e segurança do automóvel.

Para a construção deste trabalho, foi realizada uma pesquisa bibliográfica, de forma qualitativa, descritiva e exploratória, apresentando todo conhecimento adquirido a partir de bases textuais, para compreender de forma geral o funcionamento de um conjunto mola-amortecedor e seus principais componentes. Serão abordados livros, dissertações e publicações desde o começo do século XX, até os mais recentes, no ponto de vista dos autores (LANCHESTER, 1907, GILLESPIE, 1992, SMITH, 1978, BOSCH, 2005, LOSEKANN et al. 2003 e FREITAS et al. 2003). As palavras-chave utilizadas na busca foram: *Amortecedor, Molas, Dinâmica vertical, Suspensão Veicular*.

2. DINÂMICA VERTICAL VEICULAR

No início da fabricação de automóveis, o grande avanço de utilizar um aparato mecânico para transporte, movido a combustão, ao invés de cavalos, foi um marco na história humana. Com o avanço da tecnologia de fabricação dos mesmos, foram notados novos desafios para a melhoria do funcionamento geral dessas máquinas, onde a reação do carro ao terreno por onde ele atravessa também começaram a ser levadas em consideração.

Barbieri (2009) diz que os estudos da dinâmica vertical se concentram em analisar o comportamento dos automóveis e seus ocupantes quando afetados por excitações provenientes de meios externos (contato do solo com os pneus do carro) e meios internos (motor, roda, transmissão, etc.).

Freitas (2006) expõe que para isto, foram desenvolvidos sistemas de suspensão afim de fornecer elasticidade vertical as rodas, afim de acompanhar as irregularidades da pista, isolando os chassis destas, e mantendo o contato dos pneus com a pista de rolagem com a mínima variação das forças normais (melhorando aderência e conseqüentemente a segurança).

Era evidente a necessidade de dissipar a energia do trabalho da suspensão, de forma a evitar ao máximo as oscilações provenientes, e a partir de Lanchester (1907) evidencia-se como aceitável a frequência natural vertical de 1,5 Hz, e vantajosa a utilização de feixe de molas em conjunto ao amortecedor, pois o atrito entre as laminas do mesmo realiza essa função.

Cox (1955) cita alguns fenômenos considerados complexos para avaliação da dinâmica vertical de veículos como: características não lineares das molas e dos pneus, amortecimento significativo presente nos modos de vibrar, dificuldade de obtenção dos valores de momentos de inércia da massa suspensa e da massa não-suspensa. Cox acrescenta que apesar destas dificuldades, é possível entender características globais do comportamento dinâmico na vertical do veículo através de modelos simples, contendo corpos rígidos, molas lineares e amortecimento proporcional à velocidade. Ele utiliza um modelo de 2 graus de liberdade para apresentar os efeitos dos modos de vibrar de massa suspensa e não-suspensa na transmissibilidade de vibrações entre pista e veículo. Também é apresentada a necessidade de amortecimento para atenuar os picos de transmissibilidade próximos às frequências dos 2 modos e a consequência da introdução do

amortecimento para frequências acima de 10HZ.

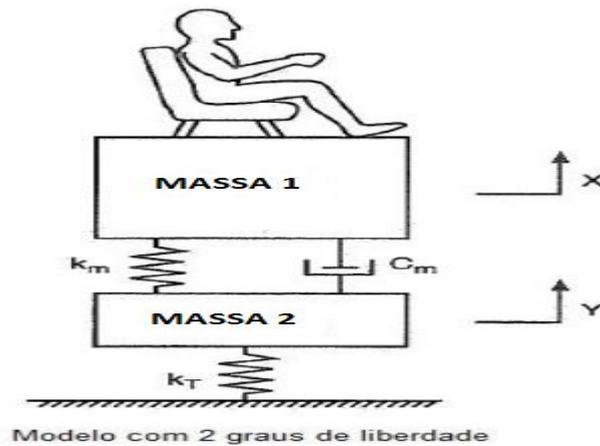
De acordo com Rowell (1923), afirmou-se que existem muitas dificuldades para definição de um coeficiente de vibração aceitável geral para definição de uma suspensão, afinal, existem diferentes tipos de superfícies de passagem, diferentes determinações dos níveis de conforto, níveis de segurança das cargas transportadas, redução necessária das tensões no chassi.

Segundo Smith (1978), não importa, do ponto de vista geométrico, se a roda se move por causa de um solavanco ou um mergulho na estrada ou se o chassi se move em resposta a uma transferência de carga ou a uma alteração na força aerodinâmica. Se a roda se mover, leva o motor a pontos de articulação dos elos de suspensão que força os links a descrever arcos sobre seus pivôs internos. Se o chassi se mover, os pontos de articulação internos movem-se com ele e a mesma coisa acontece. Os resultados geométricos serão os mesmos. O movimento do chassi em resposta a transferências de carga é mais interessante do que o movimento transitório da roda em resposta a solavancos.

Smith (1978) complementa, explicando que massa suspensa é todo o peso suportado pelas molas da suspensão do veículo (chassis, motor, motorista, combustível, caixa de engrenagens, em outras palavras, a maior parte do peso), e massa não-suspensa, é todo o resto do veículo, ou seja, que não inflige carga nas molas da suspensão (rodas, pneus, cubos, freios, 50 % do peso dos elos da suspensão,), mas exercem forças nos amortecedores quando em *bump* (colisão), aonde estes devem controlá-los afim de manter o máximo de contato entre pneus e solo.

Como afirma Bosch (2004), o controle das oscilações da carroceria é fundamental para o nível de conforto do veículo, e no quesito segurança, é levada em determinação os níveis de flutuação dinâmica das rodas do veículo. A flutuação da carga da roda deriva da soma das acelerações das massas. Também analisa que ambas as grandezas são caracterizadas por correlações de frequências específicas na forma de relações de amplitude, avaliando um sistema de dupla massa, onde a massa 1 são os eixos e pneus, e a massa 2 a carroceria (modelo de um $\frac{1}{4}$ do veículo, aplicável também ao veículo real).

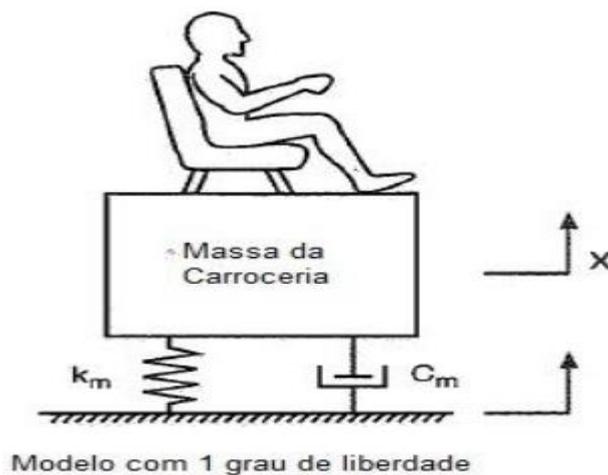
Figura 1 – Modelo de 1 Quarto de Veículo Dupla-Massa



Fonte: MILLIKEN, W.F and MILLIKEN, D.L., (1995)

Mas também Rowell (1923) comenta existe a análise sem considerar a constante elástica dos pneus, considerando-os como rígidos.

Figura 2 - Modelo de 1 Quarto de Veículo Massa Simples



Fonte: MILLIKEN, W.F and MILLIKEN, D.L., (1995)

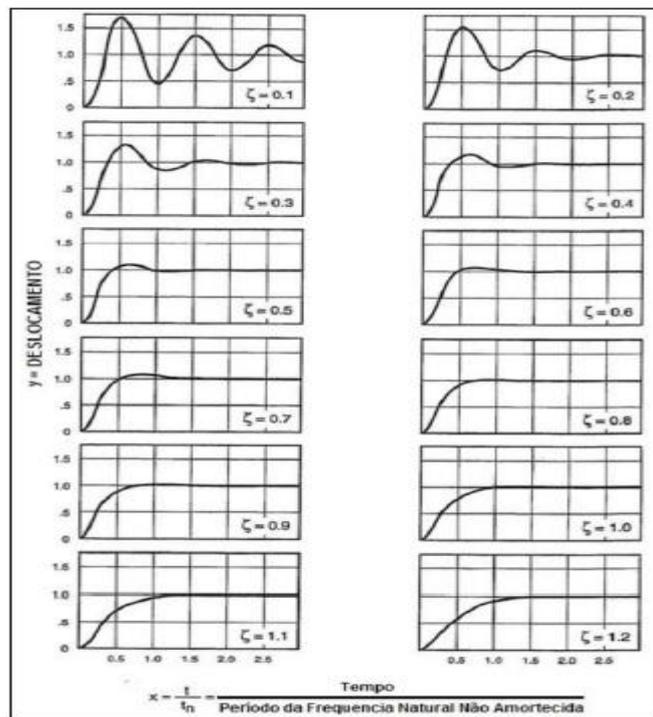
Nesse sistema, existem os coeficientes da mola e do amortecedor que realizam o trabalho de receber o impacto do solo e amenizar a reação ao mesmo, respectivamente.

Segundo Sharp e Pilbeam (1987), explicam sobre a utilização do modelo de $\frac{1}{4}$ do veículo para avaliação da suspensão em relação ao conforto, redução da

variação da força de contato pneu-solo e redução nos esforços transmitidos a carroceria. Este modelo representa uma boa visão destas propriedades, tendo assim uma boa predição do desempenho da suspensão.

Conforme Milliken (1995) elaborou uma tabela para distinguir os efeitos que ocorrem em um amortecedor com diferentes índices de coeficiente de amortecimento, como o sub amortecido ($\zeta < 1$), o amortecimento crítico ($\zeta = 1$) e superamortecido ($\zeta > 1$). Nota-se, a variação de curvas do deslocamento vertical do amortecedor, obtido pelo eixo y, e decrescendo sua amplitude gradativamente ao longo do tempo, representado pelo eixo x. Pode-se avaliar qual é o melhor amortecimento que deva ser utilizado em um amortecedor de veículo para uma aplicação específica.

Figura 3 – Gráficos de diferentes coeficientes de amortecimento



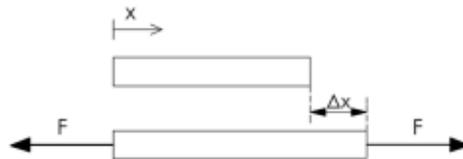
Fonte: MILLIKEN, W.F and MILLIKEN, D.L., (1995)

Porém Rowell (1923) explica que, para uma determinada severidade de pista, o nível de conforto é aumentado ao reduzir a rigidez de amortecimento. No entanto, para determinado valor de rigidez, o amortecimento para melhor conforto é menor do que o necessário para minimizar a variação de força vertical. Então, ao reduzir a rigidez, a diferença entre o melhor valor de amortecimento para conforto e para variação de força normal, aumenta.

3. MOLAS E AMORTECEDORES

É definido mola conforme uma adaptação do que é postulado por Budynas (2015). Desta forma elemento de mola é aquele que responde estaticamente a aplicação de uma força longitudinal com uma deflexão determinada na mesma direção, como ilustrado pela Figura 4. A força interna presente no componente é sempre no sentido de retornar à posição livre, sem carga, por isso também é chamada de força restituída.

Figura 4: Esquemática da deflexão de um elemento mola



Fonte: Adaptado de Budynas (2015)

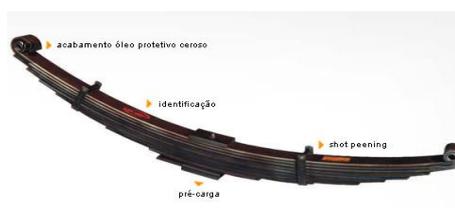
Neste estudo, Budynas (2015) comenta que as molas podem ser consideradas lineares para uma dada região de operação de modo que seja conveniente estabelecer um coeficiente constante de rigidez.

As molas recebem os impactos provenientes do contato das rodas as oscilações do piso, gerando uma excitação, e por ser um componente elástico, gera uma frequência de trabalho.

Bosch (2004) acrescenta que essa excitação é controlada pelo amortecedor, transformando a energia gerada pelas oscilações da carroceria em energia térmica (calor), aliviando o retorno da mola ao seu estado de repouso.

A mola semielíptica convencional é composta por várias lâminas sobrepostas.

Figura 5: Mola Semielíptica convencional

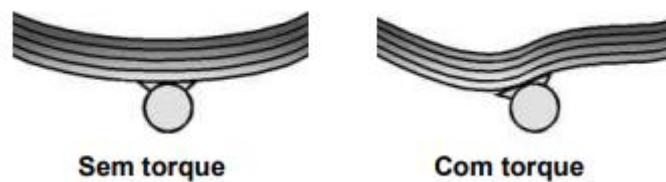


Fonte: Adaptado de Freitas Jr, L.M.P. (2005)

Gillespie (1992) enfatiza como vantagens: simplicidade de construção, robustez e baixo custo. Uma de suas características é o atrito interno gerado pelo escorregamento entre as lâminas. A alta rigidez, devido à alta histerese deste tipo de mola quando submetida a vibrações de pequenas amplitudes e altas frequências faz com que este tipo de mola tenha uma alta transmissibilidade neste modo de operação, com conseqüente deterioração de conforto.

Segundo Gillespie (1992), outra de suas características é a diminuição da rigidez sob carga lateral que tem, como conseqüência, menor estabilidade lateral, quando são fabricadas mais longas para atingir menor rigidez vertical. Com molas mais longas também ocorre maior “enrolamento” (figura 5) quando submetida a torques de frenagem ou grandes torques de aceleração, comum em veículos do pós-guerra.

Figura 6: Ilustração de enrolamento da mola semielíptica



Fonte: FREITAS JR, L.M.P (2005)

Para absorver estes torques torna-se necessário adicionar um braço tensor, figura 6.

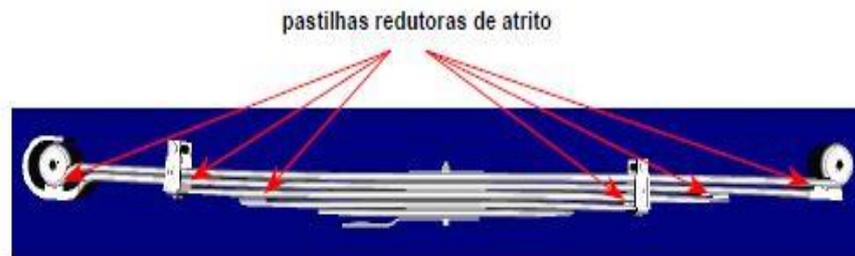
Figura 7: Braço Tensor Anti-enrolamento



Fonte: FREITAS JR, L.M.P (2005)

Como forma de reduzir o atrito interno das molas semielípticas, Freitas (2005) explica que foram introduzidas pastilhas redutoras de atrito entre as lâminas, nos pontos onde há contato entre elas. São introduzidas exatamente nos pontos onde há o contato entre as laminas da mola semielíptica.

Figura 8: Ilustração das Pastilhas Redutoras de Atrito



Fonte: FREITAS JR, L.M.P (2005)

As molas helicoidais são a mais utilizadas, e, como afirma Smith (1978), por transmitir valores mínimos de vibrações à carroceria, permitem um valor elevado de conforto e controle. Possuem tamanho mais compacto, otimizando o uso do espaço na suspensão. Dentre elas existem alguns tipos de molas, as quais serão abordadas as mais comuns.

Barbieri (2009) cita a mola cilíndrica linear, que é o tipo mais comum de mola, e possui como direção de atuação da carga recebida sendo paralela ao eixo axial da mola. A variação da frequência de ressonância diminui quando uma suspensão com esse tipo de mola é carregada.

Para dada posição de operação x_0 é aplicada uma pequena variação ΔF na força de modo que a deflexão se altere por Δx , que é a variação da posição, então:

$$k = \frac{\Delta F}{\Delta x} \quad (1)$$

Conforme explica Budynas (2015), a aplicação gradativa de uma força durante um dado deslocamento realiza trabalho, e esta energia fica armazenada na estrutura do material e pode ser devolvida à fonte à medida que a força é retirada. Por isso dizemos que a mola é um agente que armazena energia potencial. A

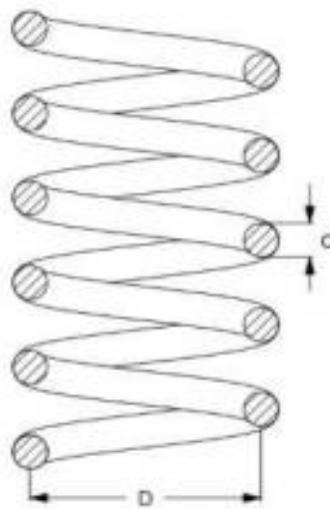
energia absorvida por uma mola linear durante a aplicação de uma força pode ser descrita pela equação (2).

$$Ep = \frac{1}{2} k(\Delta x)^2 \quad (2)$$

Como convenção deste trabalho, a constante elástica de um destes dispositivos será denotada por k_s (spring). Molas helicoidais automotivas tem o formato de um fio de aço enrolado em hélice, geralmente com algumas espiras das extremidades modificadas para permitir o acoplamento mecânico. Segundo Budynas (2015) o k_s da mola pode ser calculado de forma aproximada pela equação (3).

$$k_s = \frac{d^4 G}{8 D^3 N} \quad (3)$$

Figura 9 - Mola Helicoidal com 5 espiras ativas



Fonte: Adaptado de Budynas (2015)

Onde N é o número de espiras ativas, isto é, as que fazem parte de uma hélice idealizada e se deformam sob uma força, d é o diâmetro do fio, D é o diâmetro médio da mola e G é módulo de cisalhamento do material. A Figura 9 mostra as dimensões características para o cálculo da rigidez de uma mola.

Quanto às propriedades do material, segundo Budynas (2015), o valor de para aços carbono, material comumente utilizado para molas é constante em torno de 79,4 *Gpa*.

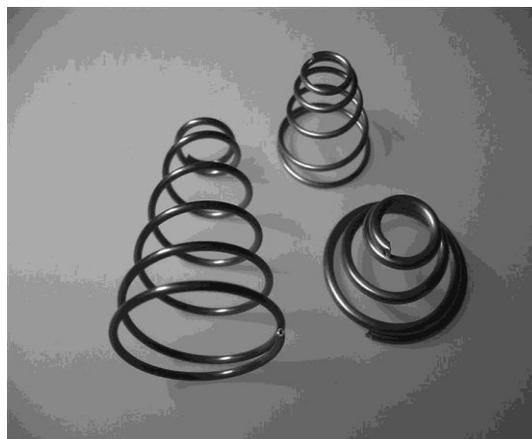
Figura 10 – Mola Cilíndrica Linear



Fonte: Rassini - NHK Automotive (2016)

Gillespie (1992) acrescenta a mola com arame cônico: É um tipo de mola progressiva, e a variação de frequência de ressonância é menor em relação a mola cilíndrica linear. Também possuem menor variação da altura da suspensão quando carregada.

Figura 11: Molas com Arame Cônico



Fonte: Directindustry (2014)

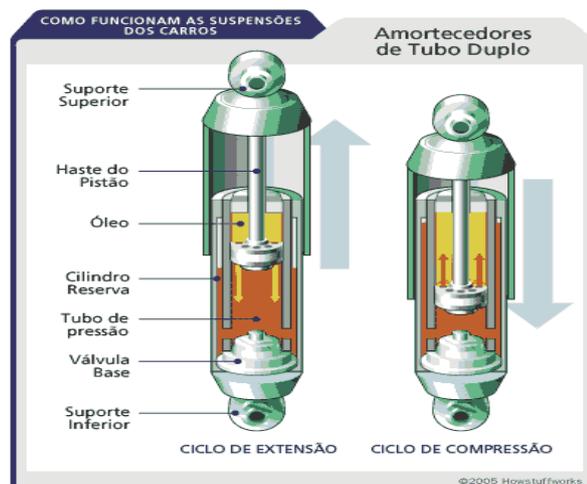
Complementando, Gillespie (1992) cita ainda as do tipo barril e a do tipo side-load. As do tipo barril possuem uma variação de diâmetros externos na sua fabricação (de onde deriva seu nome), diminuindo assim a altura de bloqueio, que é o momento em que todos os elos da mola helicoidal se tocam. Sua vantagem em relação a linear é o menor espaço de montagem requerido para um mesmo curso total disponível. As molas side load foram desenvolvidas para evitar os esforços laterais provocados pelo atrito do pneu com o solo, diminuindo assim a fricção dos componentes do amortecedor que causam desconforto e diminuem a sua durabilidade.

Além de absorverem os impactos provenientes das irregularidades do piso e suportar o peso do veículo, as molas helicoidais com conceito side load absorvem estes mesmos esforços laterais gerando forças contrárias a estas, e perpendiculares ao eixo axial da mola. Esses tipos de molas que são empregados na suspensão do tipo MacPherson.

Em relação aos amortecedores, segundo Smith (1978), existem dois tipos dentre os mais utilizados: os monotubos e os bitubos. Dentre estes podem ainda ser citados os totalmente hidráulicos, e os hidrogás, que possuem gas nitrogênio trabalhando em conjunto com o óleo.

Sharp e Pilbeam (1993) citam os amortecedores de tubo duplo (bitubo), como na Figura 12, são os mais comuns, encontrados em diversos automóveis.

Figura 12: Amortecedor de Tubo Duplo



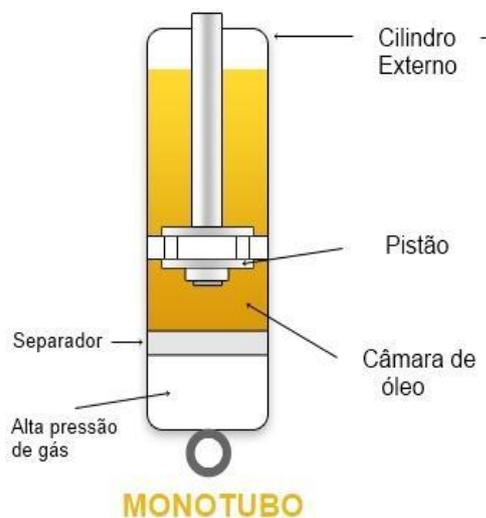
Fonte: Outpec – Autopeças (2005)

Barbieri (2009) caracteriza que se trata de uma unidade de ótima relação

entre custo e benefício que propicia ótimas características de controle e manuseio para a maioria das condições de condução. Possuem dois cilindros, sendo que o interno, ou cilindro de trabalho, é onde o pistão e o eixo movem-se para cima e para baixo. O cilindro externo serve de reservatório para o fluido hidráulico. Há válvulas de fluido no pistão e na válvula da base fixa. A válvula da base controla o fluxo do fluido entre os dois cilindros e fornece um pouco da força de amortecimento. As válvulas no pistão controlam a maior parte do amortecimento. O termo “hidrogás” geralmente refere-se ao mesmo desenho de tubo duplo, mas com um aprimoramento: gás nitrogênio de baixa pressão é adicionado para substituir a presença do ar-oxigênio. Essa tecnologia diminui a cavitação (formação de bolhas de ar) do fluido e a perda de desempenho dos amortecedores.

Smith (1978) salienta que no modelo de tubo simples, o cilindro é dividido em duas seções: a área do óleo e a câmara de gás. O eixo e o pistão trabalham na área do óleo. Como pode ser visto na Figura 13, esse tipo de amortecedor usa um conjunto único de válvula de fluido no pistão.

Figura 13: Amortecedor Monotubo



Fonte: Luiso Offlimits – 4x4 Brasil (2012)

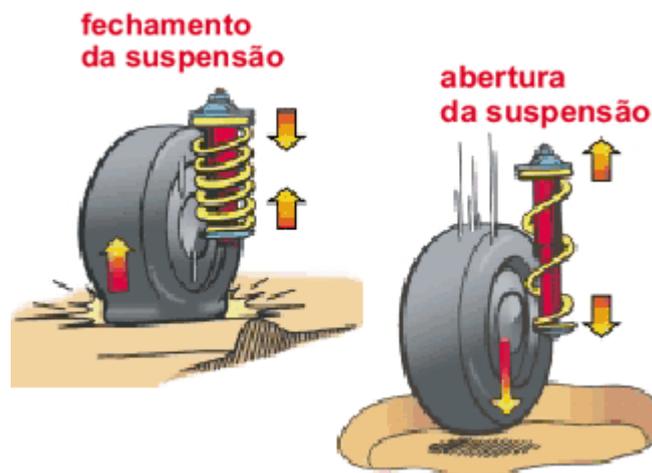
O diâmetro da válvula do pistão e do cilindro de trabalho é maior que o de um amortecedor de tubo duplo, mesmo que as dimensões externas dos dois modelos possam parecer iguais. Existe maior robustez no projeto, e com o óleo em apenas um reservatório, o movimento do pistão não provoca um superaquecimento,

oferecendo assim uma melhor resistência e longevidade. A válvula opera de maneira mais responsiva, evitando assim cavitação do fluido ou perda de desempenho. A câmara de gás de alta pressão (300 - 400psi) é separada da área do óleo por um conjunto flutuante de pistão (ou separador) e vedação. Isso promove uma área de expansão para o movimento do excesso de óleo formado durante o curso de compressão. Em movimentos mais agressivos, o pistão flutuante é empurrado ainda mais para dentro da câmara de gás, o que aumenta a pressão do gás rapidamente e cria uma força de amortecimento adicional. Suas capacidades são de alto desempenho, e por isso é utilizado como equipamento original em alguns veículos e oferecido como upgrade em veículos equipados com um modelo de tubo duplo de fábrica.

4. CONJUNTO MOLA-AMORTECEDOR – PRINCIPAIS FUNÇÕES

Barbieri (2009) explica que os amortecedores têm como função controlar as oscilações da suspensão, mantendo as rodas do veículo em contato permanente com o solo estabilizando a carroceria do veículo, propiciando conforto, segurança, estabilidade e prevenindo o desgaste excessivo dos componentes da suspensão e pneus. O amortecedor abre e fecha aproximadamente 2.600 vezes por quilômetro rodado, o que equivale dizer que aos 30.000 km completa 78.000.000 desses movimentos, produzindo desgastes em seus componentes internos. Com o veículo em movimento todas as imperfeições da pista são absorvidas pelas molas. Uma lombada causa o fechamento da mola enquanto um buraco provoca sua abertura, no fechamento a mola irá absorver energia, que, ao ser liberada, será controlada pelo amortecedor, suavizando assim os movimentos de retorno da mola para a posição original. A mola é quem absorve grande parte dos movimentos recebidos pela suspensão, representados na Figura 14.

Figura 14: Representação da ação do conjunto mola-amortecedor



Fonte: Autostart - Técnicas Automotivas (2015)

Barbieri (2009) ainda complementa que para um projeto de suspensão deve-se levar em conta que um veículo se locomovendo a uma determinada velocidade é excitado por uma ampla gama de vibrações externas ou internas. Estas vibrações são filtradas pelo sistema de suspensão e chegam aos passageiros na forma de sensações tácteis, visuais e/ou audíveis.

Segundo Costa (2005), as vibrações, quanto às frequências, podem ser divididas em 3 faixas: até 25Hz, a sensação dos passageiros é somente tátil, em função do ouvido humano geralmente ter capacidade de ouvir somente frequências acima de 25Hz. Na faixa de 25Hz até 20.000Hz, a sensação dos ocupantes é de ruído (audível), e, entre 25Hz e 100Hz, a sensação é de aspereza (tátil).

Gillespie (1992) afirma que a vibração é um dos mais importantes critérios, embora de natureza subjetiva, pelo qual as pessoas julgam a qualidade de construção e o do projeto de um veículo.

Conforme Costa (2005), a dinâmica vertical pode ser dividida em 3 subproblemas, dentre a modelagem e caracterização das fontes de excitação, a resposta dinâmica do veículo e a tolerância e percepção às vibrações dos passageiros.

Bastow (1980) também comenta que existem dúvidas se todo conhecimento sobre a questão está disponível a ponto de se calcular o valor de amortecimento ideal para o sistema de suspensão e que uma das grandes dificuldades, realmente é propiciar uma quantidade de amortecimento que satisfaça todas as condições de carga e variações de rigidez em função do curso de trabalho. No entanto, verifica-se que, se os amortecedores forem inadequados, pode-se comprometer o conforto e o contato entre pneu e solo.

Bastow (1980) disse que, com a introdução de uma suspensão independente traseira, ocorre redução na massa não-suspensa e afirma que isso gera uma melhoria no conforto do veículo.

Hartog (1984) discute vários exemplos de sistemas mecânicos que podem ser representados por modelos de poucos graus de liberdade em seu livro sobre vibrações mecânicas, explicando as funções das molas e amortecedores da suspensão de um veículo.

Hartog (1984) comenta que não parecem ser racionais as teorias e argumentos dados pelos fabricantes como justificativa para a prática de curva de tração dos amortecedores de automóveis mais acentuadas do que a curva de compressão.

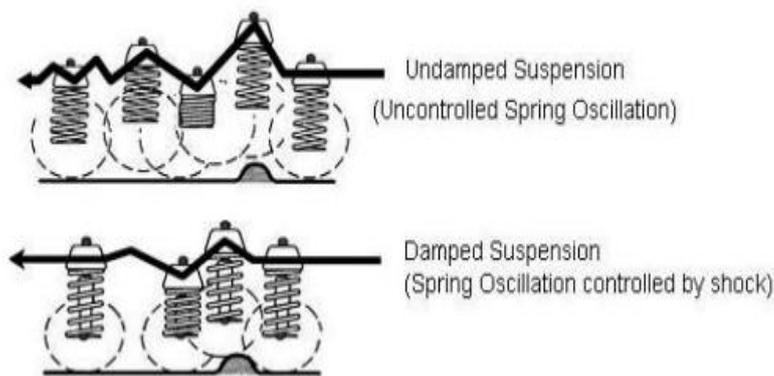
Em 1955 Cox cita alguns fenômenos considerados complexos para avaliação da dinâmica vertical de veículos como: características não lineares das molas e dos pneus, amortecimento significativo presente nos modos de vibrar, dificuldade de

obtenção dos valores de momentos de inércia da massa suspensa e da massa não-suspensa.

Cox (1955) acrescenta que apesar destas dificuldades, é possível entender características globais do comportamento dinâmico na vertical do veículo através de modelos simples, contendo corpos rígidos, molas lineares e amortecimento proporcional à velocidade.

Meccia (2015) explica que as molas armazenam e liberam a energia gerada pelos impactos dos pneus com o solo. Os amortecedores complementam o sistema, gerenciando as velocidades dos elementos das suspensões, em movimentos independentes de compressão e distensão, transformando a energia mecânica gerada em calor. Como é demonstrado na Figura 15, a mola armazena energia em seu movimento de compressão e o amortecedor a dissipa de maneira controlada tanto na compressão quanto na distensão.

Figura 15: Suspensão sem e com o controle do amortecedor



Fonte: Carlos Meccia – Autoentusiastas (2015)

Meccia (2015) acrescenta que as molas têm algumas características fundamentais em seu projeto, sendo as mais importantes a sua constante ou rate e a sua frequência natural, quando associada a uma massa em regime oscilatório.

A constante da mola é a relação entre a carga aplicada e a deflexão resultante, normalmente expressa em N/mm (newtons por milímetro). Quanto mais newtons forem necessários para defletir a mola em 1 mm, mais dura é a mola.

A oscilação própria ou frequência natural na interação com uma massa associada é definida matematicamente com a seguinte relação:

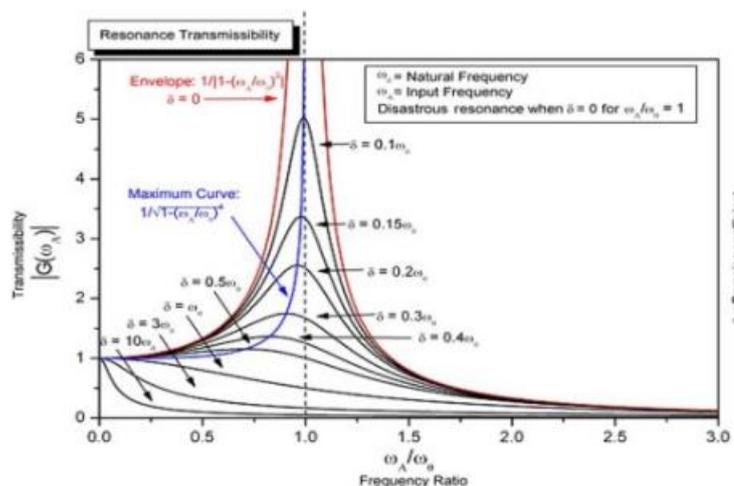
$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

(4)

Sendo k = constante da mola, m a massa associada, π a constante universal 3,1416 e f a frequência natural em hertz (Hz), por exemplo.

Outro parâmetro importante a ser considerado, apresentado na Figura 16, é a frequência de ressonância. Sempre que um movimento induzido coincidir com a frequência natural do sistema, haverá o fenômeno ressonante, que nada mais é do que um aumento pontual significativo da aceleração resultante.

Figura 16: Ressonância na relação da frequência de entrada e frequência natural do sistema.

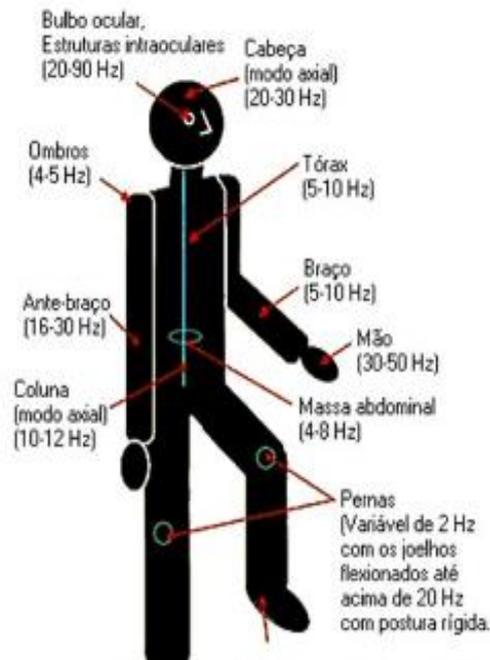


Fonte: Carlos Meccia – Autoentusiastas (2015)

Quanto maior o efeito de amortecimento do sistema, tanto menor será a amplitude do movimento.

O projeto do veículo em termos de suspensões, amortecimentos, rigidez de carroceria e bancos, deve atentar para evitar a coincidência das frequências geradas no contato pneu com o solo com as transmitidas ao corpo dos ocupantes. Veículos mais equilibrados neste aspecto tendem a cansar menos os ocupantes tanto em tráfego de estrada quanto em cidade.

Figura 17: Frequências de ressonância do corpo humano



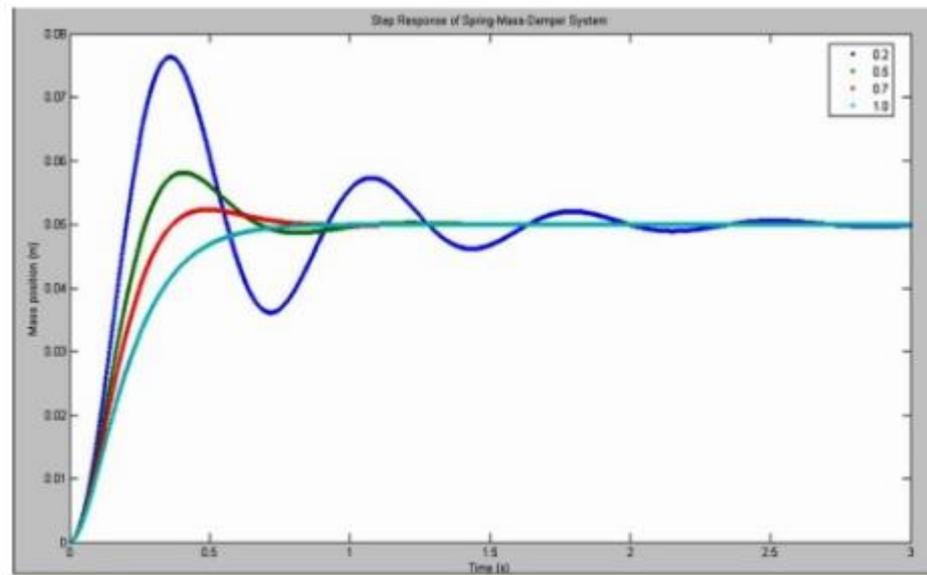
Fonte: Carlos Meccia – Autoentusiastas (2015)

Como a coincidência de frequências pode ocorrer de várias maneiras, segundo Meccia (2015), o grau de amortecimento do sistema ajuda a diminuir a amplitude ressonante, melhorando o conforto dos ocupantes do veículo. O que realmente se faz sentir é o rate da suspensão, ou seja, a força de carga na roda em função do seu curso vertical, incluindo o seu fator de amortecimento.

Os valores de frequência primária das suspensões variam de 0,5 a 1,5 Hz para carros de passeio. Também é importante o balanceamento das frequências primárias entre a suspensão dianteira e a traseira, de maneira a garantir um conforto de rodagem sem “arremessos” e sem movimentos de “cavalgar”.

Normalmente, a frequência primária dianteira é menor que a traseira, dependendo principalmente da distância entre eixos do veículo, como é explanado na Figura 18.

Figura 18: Oscilações da suspensão em função do seu fator de amortecimento



Fonte: Carlos Meccia – Autoentusiastas (2015)

Resumindo, o conjunto mola-amortecedor tem as funções de suportar a carga do veículo mantendo a altura nivelada de rodagem, manter os pneus em contato com o solo, manter o conforto primário ao motorista e passageiros, isolar as vibrações, prevenir/reduzir os danos ao chassi e carroceria em impactos, buracos, redutores de velocidade, valetas, etc. e manter o correto alinhamento dinâmico das rodas evitar movimentos oscilatórios indesejáveis da carroceria.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi alcançado o entendimento sobre os estudos da dinâmica vertical, que, no meio automobilístico, se concentraram em analisar o comportamento dos automóveis e seus ocupantes quando afetados por excitações provenientes de meios externos. Para isto, foram desenvolvidos sistemas de suspensão afim de fornecer elasticidade vertical as rodas, afim de acompanhar as irregularidades da pista, isolando os chassis destas. Porém, com a adição das molas para fornecer essa elasticidade, era necessário algo que controlasse a oscilação destas.

Também foi compreendido que amortecedor é um dispositivo que controla o deslocamento indesejado da mola pelo processo conhecido como amortecimento, mantendo o contato dos pneus com a pista de rolagem com a mínima variação das forças normais (melhorando aderência e conseqüentemente a segurança). O funcionamento de um amortecedor consiste basicamente de uma bomba de óleo posicionada entre o chassi do carro e as rodas. Sua parte superior fixa-se ao chassi e inferior fixa-se ao eixo, próximo à roda. No amortecedor tipo de dois tubos, (mais comuns), a parte de cima é fixa a uma haste e esta ligada a um pistão. O amortecedor está inserido em um tubo contendo fluido hidráulico. O tubo interno é conhecido é o tubo de pressão. O externo é o tubo de reserva, que armazena o excesso do fluido hidráulico. Quando a roda do carro encontra um obstáculo via, se comprime e se distende. Sua energia transfere-se ao amortecedor através da parte de cima e segue-se pela haste para dentro do pistão. Os orifícios no pistão permitem que o fluido passe através dele movendo-se para cima e para baixo no tubo de pressão. Os orifícios são relativamente pequenos; assim, somente uma pequena quantidade de fluido passa sob grande pressão causando desaceleração do pistão, desacelerando assim a mola. Os amortecedores operam em dois ciclos: o de compressão e o de distensão. O ciclo da compressão ocorre quando o pistão se move para baixo, comprimindo o fluido hidráulico na câmara abaixo. O ciclo da extensão ocorre quando o pistão se move acima do tubo de pressão, comprimindo o fluido na câmara acima.

Sem os amortecedores, a mola aumentaria e dissiparia a energia absorvida em um impacto vertical descontroladamente e continuaria oscilando na sua frequência natural até que toda a energia originalmente aplicada a ela dissipasse.

Uma suspensão que consiste apenas de molas ficaria balançante e, dependendo do terreno, seria impossível de controlar o carro. Ele reduz a magnitude dos deslocamentos oscilatórios. Isso ocorre quando o equipamento transforma a energia cinética do movimento da suspensão em calor, energia dissipada através do fluido hidráulico.

Outra situação da importância do amortecimento também é evitar a coincidência das frequências geradas no contato pneu com o solo com as transmitidas ao corpo dos ocupantes. Veículos mais equilibrados neste aspecto tendem a cansar menos os ocupantes tanto em tráfego de estrada quanto em cidade. Existem muitas dificuldades para definição de um coeficiente de vibração aceitável geral para definição de uma suspensão, afinal, existem diferentes tipos de superfícies de passagem, diferentes determinações dos níveis de conforto, níveis de segurança das cargas transportadas, redução necessária das tensões no chassi, porém, através desses estudos foi possível definir que o controle da frequência natural entre 0,5 Hz a 1,5 Hz é o mais confortável e seguro.

REFERÊNCIAS

BARBIERI, F., **Sistemas de Suspensão**. São Paulo: Cursos SAE BRASIL, 2009.

BASTOW, D., **Car Suspension and Handling**, Reino Unido, Society of Automotive Engineers; 3rd edition, 1980.

BOSCH, R., **Manual da Tecnologia Automotiva** (“Kraftfahrtechnisches Taschenbuch”). São Paulo, Editora Edgard Blucher Ltda, 2005.

BUDYNAS, Richard G., **Shigley's Mechanical Engineering Design 10th**. New York, Mc GrawHill, 2015.

COX, H. L., **The Riding Qualities of Wheeled Vehicles**, Proceeding of I.Mech.E., Automobile Division, n° 10, 1955/1956.

DEN HARTOG, J. P., **Mechanical vibrations**, Dover Publications, New York, (1984).

FREITAS JR, L.M.P., **Estudo da dinâmica vertical de uma suspensão veicular do tipo MacPherson**. 2006. 131 f. Dissertação (Mestrado em Eng. Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

GILLESPIE, T.D., **Fundamentals of Vehicle Dynamics**. Warendale, PA, Society of Automotive Engineers, Inc. 1992.

LANCHESTER, F. W., **Some problem peculiar to the design of the automobile:** Proceedings of the Institution of Automobile Engineer, 1907.

LOSEKANN, C., Eixo Temático Sistemas de Suspensão. Florianópolis, 2003.

LUIZO OFFLIMITS. **Entendendo o Básico de Amortecedores.** Disponível em: <
<https://www.4x4brasil.com.br/forum/canal-de-comunicacao-anunciantes/133711-off-limits-entendendo-o-basico-dos-amortecedores>. Acessado em: 15 de outubro 2019.

MECCIA, C., **Molas, o balanço necessário**, Revista Autoentusiastas, São Paulo, BR, 2015.

MILLIKEN, W.F and MILLIKEN, D.L., **Racecar Vehicle Dynamics**, Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pa. USA, 1995.

NETO, Á. COSTA, **Dinâmica Veicular**, Universidade de São Paulo, São Carlos, BR, 2005.

OUTPEC AUTOPEÇAS. **Amortecedor a Óleo ou a gás? Diferenças e escolha.** Disponível em: <
<https://outpec.wordpress.com/2017/12/15/amortecedores-a-oleo-ou-a-gas-diferencas-e-escolha/>. Acessado em: 16 de outubro 2019.

RASSINI NHK AUTOMOTIVE. **Molas Helicoidais – Conceitos / Funções.** Disponível em: < <https://www.rassini-nhk.com.br/produtos-fabrini-molas-helicoidais/>. Acessado em: 16 de outubro 2019.

SMITH, C., **Tune to Win**. Fallbrook, CA: AEROPUBLISHERS, Inc. 1978.

SHARP, R. S.; PILBEAM, C., **Achievability and value of passive suspension designs for minimum pitch response**, Proceedings I.Mech.E., Conference on Vehicle Ride and Handling, 1993.