

CENTRO PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
FATEC SANTO ANDRÉ
Tecnologia em Mecânica Automotiva

ALEXANDRE CARLOS DA SILVA
JONATHAN KENJI KODAMA

ESTUDO DE SUSPENSÃO VEICULAR

Santo André – São Paulo
2018

CENTRO PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
FATEC SANTO ANDRÉ
Tecnologia em Mecânica Automotiva

ALEXANDRE CARLOS DA SILVA
JONATHAN KENJI KODAMA

ESTUDO DE SUSPENSÃO VEICULAR

*Monografia apresentada ao Curso de
Tecnologia em Mecânica Automotiva da FATEC Santo
André, como requisito parcial para conclusão do curso
em Tecnologia em Mecânica Automotiva.*

Orientador: Prof. Alexandre Pazian

Santo André – São Paulo
2018

FICHA CATALOGRÁFICA

K769e

Kodama, Jonathan Kenji
Estudo de suspensão veicular / Jonathan Kenji Kodama,
Alexandre Carlos da Silva. - Santo André, 2018. – 53f: il.

Trabalho de Conclusão de Curso – FATEC Santo André.
Curso de Tecnologia em Mecânica Automobilística, 2018.

Orientador: Prof. Alexandre Pazian

1. Mecânica. 2. Veículos. 3. Estudo. 4. Sistema de
suspensão. 5. Segurança. 6. Desempenho. 7. Software
matemático. 8. Simulação. 9. Tecnologia. I. Silva, Alexandre
Carlos da. II. Estudo de suspensão veicular.

629.2

LISTA DE PRESENÇA

Santo André, 03 de Julho de 2018

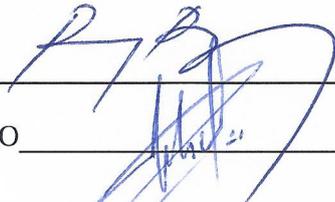
LISTA DE PRESENÇA REFERENTE À APRESENTAÇÃO DO
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO COM O TEMA: “ESTUDO
DE SUSPENSÃO ATIVA VEICULAR” DOS ALUNOS DO 6º SEMESTRE
DESTA U.E.

BANCA

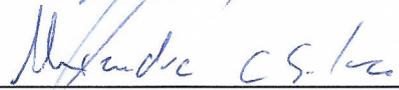
PRESIDENTE:

PROF. ALEXANDRE PAZIAN 

MEMBROS:

PROF. ROBERTO BORTOLUSSI PROF. FERNANDO GARUP DALBO 

ALUNOS:

ALEXANDRE CARLOS DA SILVA JONATHAN KENJI KODAMA 

RESUMO

A suspensão é um dos componentes mais importantes em um veículo, ela que faz a ligação da carroceria, onde fica o habitáculo e os passageiros, com o solo, portanto ela é crucial para a segurança, dirigibilidade e conforto do veículo. Assim, com o passar do tempo, constantemente novas tecnologias são desenvolvidas para alcançar melhorias do sistema.

O foco deste trabalho é realizar um estudo com base em simulações, utilizando software matemático para modelar suspensões, variando entre conforto e desempenho, para isto será utilizado um modelo de um quarto de veículo e condições de teste baseadas em veículos comuns. Mudando parâmetros do sistema, notam-se diferentes comportamentos, tanto do sistema de suspensão (chamado de massa não-suspensa), como da carroceria do veículo (chamado de massa suspensa). E então a conclusão se dá com uma comparação entre os resultados das características desses dois tipos de configurações.

Palavras chave: segurança, dirigibilidade, conforto, tecnologia, simulação, massa não-suspensa, massa suspensa, carroceria.

ABSTRACT

The suspension is one of the most important components in a vehicle because it connects the body, where the passenger compartment and the passengers are, with the ground. Therefore it is crucial for the safety, drivability and comfort of the vehicle. Thus, with the passing of time, constantly new technologies are developed for the improvement of the system.

The focus of this project is to conduct a study based on software simulations of models of suspensions focused on comfort and performance. For that was used a model of forth of a vehicle and test conditions that can be found commonly in the day to day. Changing system parameters we can see different behaviors of both the suspension system (which we call the non-suspended mass) and the vehicle body (which we call the suspended mass). And then it will be concluded with a comparison between the results of the characteristics of these two types of configurations.

Key words: safety, drivability, comfort, technology, simulation, non-suspended mass, suspended mass, vehicle body.

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer ao Professor Roberto Bortolussi, com a ajuda no uso do software e com dúvidas técnicas, e aos Professores Alexandre Pazian e Fernando Garup Dalbo, pela orientação, paciência e apoio para finalizar este trabalho.

Obrigado.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Feixe de molas com polaina de couro | 6 |
| Figura 2 - Massa suspensa e massa não-suspensa | 7 |
| Figura 3 - Pesos da Massa Suspensa e não-suspensa..... | 8 |
| Figura 4 - Modelo suspensão dependente com mola helicoidal..... | 9 |
| Figura 5 - Suspensão semi-independente..... | 10 |
| Figura 6 - Modelo suspensão independente | 11 |
| Figura 7 – Tipos de Suspensão Independente..... | 11 |
| Figura 8 - Feixe de molas..... | 13 |
| Figura 9 - “Enrolamento” das molas semielípticas quando submetidas à torque..... | 13 |
| Figura 10 - Instalação braço tensor..... | 14 |
| Figura 11 - Posicionamento das pastilhas redutores de atrito..... | 14 |
| Figura 12 - Feixe de mola tipo parabólica..... | 14 |
| Figura 13 - Mola helicoidal..... | 15 |
| Figura 14 - Características dinâmicas do veículo com mola helicoidal linear..... | 16 |
| Figura 15 - Características dinâmicas do veículo com mola helicoidal progressiva.... | 16 |
| Figura 16 - Mola pneumática..... | 17 |
| Figura 17 - Barra estabilizadora..... | 18 |
| Figura 18 - Pontos de fixação barra estabilizadora..... | 18 |
| Figura 20 - Amortecedor monotubo a gás..... | 21 |
| Figura 21 - Esquema de um Amortecedor com Orifício Variável..... | 23 |
| Figura 22 - Amortecedor Magneto-Reológico..... | 23 |
| Figura 23 - Arquitetura SDC | 24 |
| Figura 24 - Suspensão hidroativa Citroen | 26 |
| Figura 25 - Suspensão Ativa Eletromagnética Bose | 27 |
| Figura 26 - Mercedes-bens Active Body Control | 27 |
| Figura 27 - Magic Body Control..... | 28 |
| Figura 28 - Gráfico da dureza do conjunto | 30 |
| Figura 29 - Área de uso de uma suspensão comum..... | 31 |
| Figura 30 - Comparação ativo x passivo..... | 32 |

| | |
|--|----|
| Figura 31 - Sensibilidade do corpo humano às vibrações..... | 33 |
| Figura 32 -Representação do corpo humano sujeito a vibração vertical..... | 34 |
| Figura 33 - Modelo de $\frac{1}{4}$ de veículo para suspensão passiva..... | 35 |
| Figura 34 - Construção do modelo em software..... | 36 |
| Figura 35 - Obstáculo criado para simulação..... | 37 |
| Figura 36 - Gráfico do sistema sem amortecedor | 38 |
| Figura 37 - Gráfico do sistema em equilíbrio..... | 38 |
| Figura 38 - Gráfico mola esportiva e mola comum | 39 |
| Figura 39 - Gráfico conjunto esportivo..... | 40 |

Sumário

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 | JUSTIFICATIVA..... | 1 |
| 1.2 | OBJETIVO GERAL..... | 2 |
| 1.3 | OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 2 |
| 1.4 | METODOLOGIA..... | 2 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 3 |
| 2.1 | MHS (MOVIMENTO HARMÔNICO SIMPLES)..... | 3 |
| 2.2 | MHA (MOVIMENTO AMORTECIDO)..... | 4 |
| 2.3 | INTRODUÇÃO AO SISTEMA DE SUSPENSÃO..... | 6 |
| 2.4 | SUSPENSÃO..... | 7 |
| 2.4.1 | Tipos de Suspensão..... | 8 |
| 2.5 | SUSPENSÃO PASSIVA..... | 12 |
| 2.5.1 | Tipos de molas..... | 12 |
| 2.5.2 | Amortecedores..... | 19 |
| 2.6 | AMORTECEDOR SEMI-ATIVO..... | 22 |
| 2.7 | SUSPENSÃO ATIVA..... | 24 |
| 2.7.1 | Hidroativa – CITROËN..... | 25 |
| 2.7.2 | Eletromagnéticos – BOSE..... | 26 |
| 2.7.3 | Active Body Control (ABC) – MERCEDES-BENZ..... | 27 |
| 2.7.4 | Magic Body Control (MBC) – MERCEDES-BENZ..... | 28 |
| 3 | ESTUDO DO SISTEMA ATIVO | 29 |
| 4 | ESTUDO DINÂMICO | 33 |
| 4.1 | CONFORTO..... | 33 |
| 4.2 | MODELAGEM..... | 34 |
| 4.2.1 | Protótipo virtual..... | 36 |

| | | |
|----------|---------------------------------|-----------|
| 5 | RESULTADOS..... | 37 |
| 5.1 | RESPOSTA EM CONFORTO..... | 38 |
| 5.2 | RESPOSTA EM DIRIGIBILIDADE..... | 39 |
| 5.3 | CONCLUSÃO DO SISTEMA ATIVO..... | 40 |
| 6 | CONCLUSÃO..... | 41 |
| 7 | REFERÊNCIAS..... | 42 |

1 INTRODUÇÃO

Segundo Freitas, (2006), a predição da eficiência de um sistema de suspensão em isolar vibrações, manter o contato do pneu com o solo e garantir conforto aos passageiros, pode ser realizada de forma experimental ou teórica, utilizando um modelo dinâmico. O modelo dinâmico simula o desempenho de um sistema antes dele ser construído, podendo trazer resultados teóricos muito próximos da realidade, e permitindo a otimização dos componentes com precisão, minimizando os custos decorrentes da produção de protótipos.

Além disso, conforme Drehmer, (2012), sistemas dinâmicos, por exemplo, veículos em movimento, são estudados para minimizar ou evitar acidentes e a melhorar os diversos componentes, como os sistemas de suspensão, que permitem ter resultados tão significativos como aquelas obtidas em projetos de estruturas. Os fenômenos vibratórios estão fortemente presentes em sistemas veiculares, como ônibus, automóveis, motos e máquinas agrícolas, por esse motivo, deve aprofundar-se sobre esse assunto através da análise teórica e numérica desses fenômenos.

Este trabalho busca demonstrar o comportamento de suspensão veicular, em meio à diferentes configurações do sistema ao ser excitado por uma influência externa ao sistema, estudar e comparar esses dados chegando à uma conclusão concreta e baseada nas simulações em software e conhecimentos adquiridos através de estudos, materiais e pesquisas.

1.1 Justificativa

Este trabalho foi realizado com o intuito de agregar conhecimento à instituição e aos alunos, mostrar possibilidades e estudos, novas e já alcançadas, sobre suspensões veiculares e aprofundar conhecimentos em tecnologias de suspensão ativa veicular.

1.2 Objetivo Geral

Adquirir conhecimentos nos assuntos referentes aos sistemas de amortecimento em suspensões veiculares, a partir do estudo de sistemas de suspensão em veículos e comparações entre resultados de simulações.

1.3 Objetivos Específicos

Estudar os sistemas de amortecimento veicular, modificar parâmetros de simulação, afim de obter diferentes tipos de dados com diferentes configurações de sistemas de suspensão.

1.4 Metodologia

Este estudo foi baseado em pesquisas e dados colhidos de fontes tecnológicas, e com profissionais do ramo automobilístico e acadêmico, além de materiais como livros didáticos e artigos tecnológicos e técnicos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Conceitos Físicos sobre Movimentos Harmônicos Simples (MHS) e amortecidos (MHA), que são utilizados em estudos de sistemas de vibrações e amortecimento, isso inclui os sistemas de suspensão veicular, que é o assunto deste trabalho. Para entender um pouco melhor sobre os aspectos físicos por trás dos sistemas de suspensões e amortecedores, deve-se recapitular brevemente alguns de seus conceitos:

2.1 MHS (Movimento Harmônico Simples)

Segundo Halliday, (2008), os conceitos básicos de oscilações envolvem os movimentos harmônicos simples, que são considerados sistemas ideais, ou seja, isolados de perdas de energia e rendimento. O MHS ocorre quando uma mola é fixada à um ponto estático em uma ponta e à um corpo móvel de massa maior que zero na outra ponta e este sistema é deslocado do equilíbrio e liberado. A mola então exercerá uma força chamada de restauradora, em newtons, dada pela lei de Hooke:

$$F(x) = -k \cdot x \quad [1]$$

Onde k é a constante de força elástica da mola. O sinal negativo indica que ela é oposta ao deslocamento relativo ao ponto de equilíbrio. Combinando esta equação com a segunda lei de Newton ($F = m \cdot a$, onde F = força, m = massa e a = aceleração), tem-se a equação da aceleração do corpo:

$$-k \cdot x = m \cdot a \quad [2] \quad \text{ou} \quad a(x) = \frac{-k \cdot x}{m} \quad [3]$$

A partir disto pode-se concluir que a Força, portanto também a aceleração, são proporcionais e opostas ao deslocamento do corpo. O tempo de um ciclo completo do sistema oscilatório (partindo de um ponto até alcançar este mesmo ponto), é chamado de período T , que é o inverso da frequência f (número de ciclos por unidade de tempo):

$$f = \frac{1}{T} \quad [4]$$

Sua unidade de medida é o hertz (Hz), ciclos por segundo (ciclo/s).

Assim chegamos à equação geral da posição de um sistema oscilatório de MHS:

$$x = A \cos(\omega t + g) \quad [5]$$

Onde A , ω e g são constantes. A amplitude do movimento (deslocamento máximo), é a amplitude A . O argumento da função cosseno é a fase do movimento e g é a constante de fase.

Pode-se mostrar que derivando a equação de posição em relação ao tempo tem-se a equação da aceleração do corpo em relação ao tempo:

$$V(x) = -\omega \cdot A \cdot \sin(\omega t + g) \quad [6]$$

E por sua vez, derivando a Equação da Velocidade em relação ao tempo, obtém-se a equação da aceleração do corpo em relação ao tempo:

$$a(x) = -\omega^2 \cdot A \cdot \cos(\omega t + g) \quad [7] \quad \text{ou} \quad a(x) = -\omega^2 \cdot x \quad [8]$$

Assim concluímos que:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad [9]$$

A frequência aumenta com o aumento da rigidez da mola (k) e diminui com o aumento da massa do corpo (m).

2.2 MHA (Movimento Amortecido)

Ainda conforme Halliday, (2008), quando o movimento de um sistema oscilatório sofre influência de uma força externa e perde energia chama-se de sistema amortecido, um exemplo de um sistema amortecido são as suspensões veiculares, pois possuem molas e amortecedores. Quando o Sistema oscilante tem um amortecimento em que não há ciclos de oscilação no sistema, ele é chamado de superamortecido, este é utilizado em suspensões automotivas. Quando o sistema oscila com uma amplitude que diminui lentamente a cada ciclo de oscilação, o sistema é chamado de sub-amortecido. O sistema criticamente amortecido é aquele que possui o mínimo de amortecimento para ser superamortecido, ou seja, ele dissipa a energia do sistema em exatamente uma oscilação.

Nos sistemas sub-amortecidos a força de amortecimento do sistema é dada pela seguinte equação:

$$F_a = -b.V \quad [10]$$

Onde b é uma constante de amortecimento que depende das características do amortecedor do sistema. O Sinal negativo significa q a força é oposta ao movimento e sua intensidade é proporcional à velocidade do corpo.

Se a força exercida pela mola, de acordo com a lei de Hooke, é $F = -k.x$, então chegamos à expressão:

$$m.a = -k.x - b.V \quad [11]$$

Substituindo V (velocidade) pela derivada de x em função do tempo e a aceleração pela derivada segunda de x , resolvendo a equação para um sistema sub-amortecido, tem-se que:

$$x(t) = A_0.e^{-bt/2m}.\cos(w.t + g) \quad [12]$$

Onde A_0 é a amplitude inicial e w é a frequência natural do oscilador amortecido que é dada pela expressão:

$$W' = w.\sqrt{1 - \left(\frac{b^2}{2.m.w}\right)^2} \quad [13]$$

Quando não há amortecimento no sistema, $b = 0$ e a equação se reduz à mesma de sistemas de MHS.

Neste caso o valor da amplitude instantânea é dado por:

$$A = A_0.e^{-b.t/2.m} \quad [14]$$

Além disso, conforme Tipler, (2012) verificamos a energia de um sistema oscilatório que é proporcional ao quadrado de sua amplitude e também diminui exponencialmente com o tempo:

$$E = \frac{1}{2}m.w^2.A^2 = \frac{1}{2}m.w^2.(A_0.e^{-(b/2.m)t})^2 = \frac{1}{2}m.w^2.A_0^2.e^{-(b/m).t} = E_0.e^{-t/\tau} \quad [15]$$

Onde:

$$E_0 = \frac{1}{2}m.w^2.A_0^2 \quad [16]$$

$$e \quad \tau = m/b \quad [17]$$

2.3 Introdução ao Sistema de Suspensão

Para começar a falar de suspensões, iniciamos com a invenção da roda alguns milhares de anos atrás, pois sem ela não teríamos conhecido nenhum tipo de transporte terrestre. Na história conta-se que sua invenção ocorreu na Mesopotâmia, e a partir daí iniciou-se uma série de descobertas, como por exemplo, alguém desconhecido pela história teve a ideia de unir duas rodas em um eixo rígido, criando assim o primeiro veículo de transporte terrestre, esse tipo de construção não prevaleceu por muito tempo por demonstrar fragilidade. Foi então que vieram os Celtas e criaram a roda raiada, que tornava o sistema mais leve e funcional.

Conta-se que isso ocorreu por volta de 4000 anos atrás, e os primeiros transportes puxados por cavalos da história, que só foi superado com o surgimento da máquina a vapor. Conforme ocorria o avanço da metalurgia, surgiram eixos e suportes de metal, que garantiam maior praticidade e confiabilidade, mas não se pode esquecer que todo esse material possuía ligações rígidas, o que dificultava suas viagens, afinal, não existiam estradas, e a cada sobe e desce dos terrenos era um desafio. Foi devido à necessidade de um elemento elástico entre o eixo e a estrutura que surgiu o primeiro sistema de feixes de mola, isso em 1660, e dessa forma foi possível adicionar mais conforto às viagens.

Apesar de melhorar o conforto, o uso de molas mostrou-se também ser primordial à segurança, pois a cada ondulação no terreno ocorriam saltos e solavancos, o que diminuía o contato das rodas com o solo. Na figura 1 existe um sistema feixe de molas com polaina de couro, um dos sistemas de amortecimento mais antigos que se conhece:

Figura 1 - Feixe de molas com polaina de couro



(Volkswagen – guia do aluno, dez. 2001)

Desde então, a evolução dos sistemas de rodagem passou a ser constante, e um ponto importante a se ressaltar, foi a criação do primeiro pneumático, criado por Boyd Dunlop. Após sua criação, os irmãos Michelin utilizaram os pneumáticos em um veículo construído para a corrida de Paris-Rouen, isso em 1894.

Com a constante evolução dos veículos, eles ficaram cada vez mais potentes e velozes, com necessidade de maior conforto e segurança, então houve uma carência de pneus e suspensões cada vez mais eficientes. Seguindo esse caminho, hoje há a aplicação de sistemas ativos que através de controle eletrônico, é capaz de manter um nível de conforto máximo e ainda assim assegurar o contato dos pneus no solo, certificando a segurança dos passageiros. Ainda hoje, os pneus evoluem para diminuir a resistência à rolagem, melhorar o conforto e garantir o coeficiente de tração e frenagens em diferentes tipos de circunstâncias.

2.4 Suspensão

O sistema de suspensão apresenta três funções no veículo, conectar a carroceria às rodas e sustentá-la com rigidez adequada e ainda manter sua relação geométrica com as rodas, durante a rodagem deve absorver e amortecer juntamente com o pneu os choques gerados pela irregularidade do solo com conforto e segurança, e ainda garantir a transmissão das forças de condução e frenagem.

Toda carroceria e seus componentes são sustentados pela suspensão, e todo esse conjunto chama-se de massa suspensa, ou seja, é tudo aquilo sustentado pelas molas do veículo, já os órgãos de rodagem (suspensão e pneus) chama-se de massa não-suspensa, pois não é sustentada pelas molas, na figura 2 pode-se verificar essa divisão.

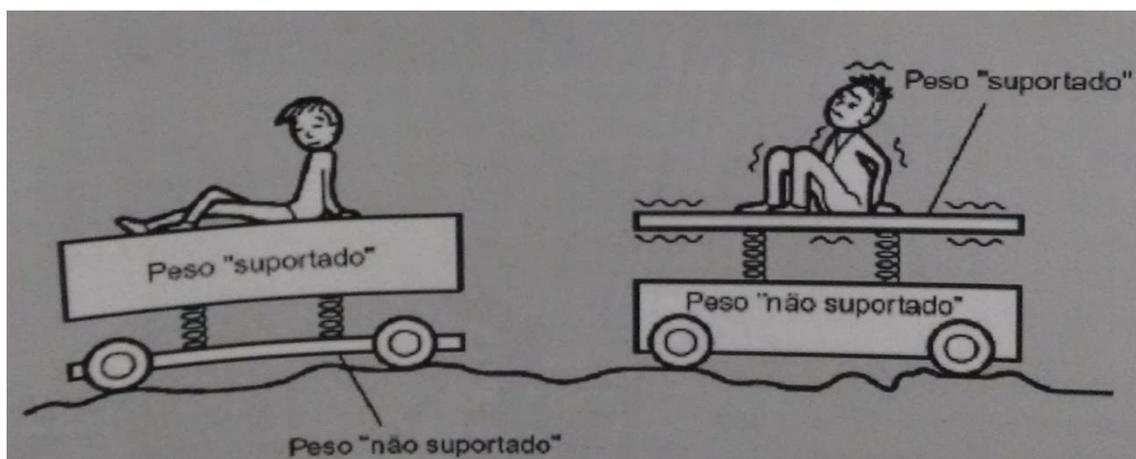
Figura 2 - Massa suspensa e massa não-suspensa



(Curso de mecânica básica de automóveis Honda, 2010)

Geralmente, quanto maior a massa suspensa, maior será o conforto ao dirigir, pois isso diminuirá a tendência de balanço da carroceria, mas se a massa suspensa for pequena a carroceria terá uma tendência a balançar, conforme mostra figura 3. As oscilações e os choques na massa suspensa têm ligação direta com o conforto na condução, e podem ser classificados em inclinação, balanço, guinada e tranco.

Figura 3 – Pesos da massa suspensa e não-suspensa



(curso de mecânica básica de automóveis Honda, 2010)

Um sistema de suspensão é constituído por molas, amortecedores e sistemas de braços e articuladores. As molas podem ser helicoidais, feixes, barras de torção e até pneumáticas, e sua construção pode variar em materiais e formato. Os amortecedores possuem diversas configurações e variam conforme o tipo de amortecimento (passivo, semi-ativo e ativo). Já os articuladores podem ser braços oscilantes (bandejas), terminais de suspensão (pivô), batentes (limitadores de curso), barra estabilizadora e braço tensor. Sua construção e configuração dependem do tipo de sistema de suspensão utilizado.

2.4.1 Tipos de Suspensão

As suspensões podem ser separadas em três sistemas: independente, semi-dependente e dependente.

2.4.1.1 Suspensão dependente

A suspensão dependente possui as rodas do mesmo eixo conectadas entre si, ou seja, o movimento em uma das rodas afeta a outra roda do mesmo eixo.

Esse sistema possui construção simples e geralmente é utilizado em veículos comerciais, que possuem uma alta capacidade de carga. Ela é constituída geralmente de feixe de molas e amortecedores, mas também pode ser encontrada na traseira de veículos de passeio, além de uso de molas helicoidais no conjunto. A figura 4 mostra um modelo com molas helicoidais e seus componentes:

Figura 4 - Modelo suspensão dependente com mola helicoidal



(circulaseguro.pt, ac. agosto, 2015)

O eixo rígido tem como vantagem o fato da cambagem não ser afetada pelo movimento da rolagem da carroceria, exceto pela roda externa da curva que recebe maior pressão, porém o alinhamento é bem mantido, o que minimiza o desgaste irregular dos pneus. Sua maior desvantagem é que ele está suscetível as vibrações em curvas.

2.4.1.2 Suspensão Semi-independente

A suspensão semi-dependente tem as rodas conectadas por um eixo, porém esse eixo é capaz de efetuar movimentos de torção, o que faz com que os pneus reajam de forma diferenciada entre eles. Esse sistema é muito utilizado no eixo traseiro dos veículos, consiste de um eixo de aparência rígida, porém tem a capacidade de torcer em movimentos, e possui também um sistema mola-amortecedor fixado entre o eixo e a carroceria. A tecnologia empregada nesse sistema é tão eficiente, que nos dias de hoje seu comportamento pode ser comparado com um sistema independente. Na figura 5 há um exemplo visual do sistema semi-independente:

Figura 5 - Suspensão semi-independente



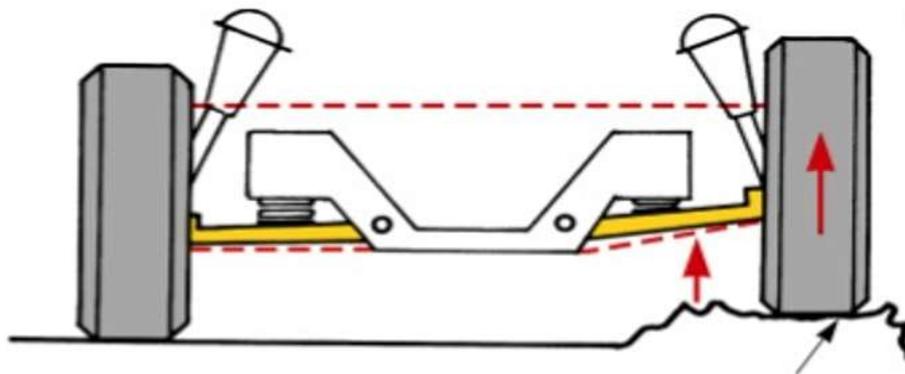
(quatorrodas.abril.com.br, ac. Dezembro, 2016)

Esse sistema é vantajoso para aplicação em grande parte dos veículos, pois é mais barato e leve que um sistema independente, e possui melhor desempenho comparado a um sistema rígido, além de ser um sistema que necessita de pouco espaço para seu alojamento, é robusto e de fácil manutenção, além de muitas outras coisas.

2.4.1.3 Suspensão Independente

A figura 6 mostra a suspensão independente, que é quando as rodas do mesmo eixo possuem movimentos independentes entre elas.

Figura 6 - Modelo suspensão independente



(educacaoautomotiva.com, a.c. maio, 2018)

Este é o sistema mais usado nos dias de hoje, principalmente na dianteira, tem capacidade de garantir a aderência dos pneus à pista, mantendo o conforto e a dirigibilidade. Os tipos mais utilizados de montagem são Macpherson, que possui basicamente um braço inferior e um conjunto mola-amortecedor, Double-wishbone que possui dois braços, um inferior e outro superior além do conjunto mola-amortecedor, e o sistema Multi-link que utiliza diversos braços interligados (mais utilizado na traseira dos veículos). Estes estão exemplificados na figura 7 a seguir:

Figura 7 - Tipos de suspensão independente



(quatrorodas.abril.com.br, ac. Janeiro, 2016)

Algumas de suas vantagens incluem a o projeto da posição do centro de rolagem pela escolha da geometria dos braços de controle, a capacidade de controlar a troca de linha de centro com ressalto e rebote, maiores deflexões da suspensão e maior rigidez de rolagem para uma dada taxa vertical de suspensão.

2.5 Suspensão passiva

No sistema de suspensão passiva, o conjunto roda pneu tem seu movimento estipulado pelas irregularidades do solo, a energia gerada nesse movimento é armazenada pela mola e logo dissipada pelo amortecedor, ou seja, quando a energia resultante do movimento é armazenada pela mola, devido à sua compressão ou tensionamento, ela tenderá a voltar ao equilíbrio, liberando a energia. Este fato produzirá movimentos do chassi que desestabilizarão o veículo e o tornarão extremamente desconfortável e pouco seguro. O amortecedor é instalado para controlar a reação da mola, esse sistema tem como objetivo elevar ao máximo o atrito entre solo e pneus, garantindo estabilidade na direção, segurança e conforto aos usuários. No entanto, seu desempenho é limitado em particular nas altas frequências. Os parâmetros desse sistema são fixos, tendo como base de cálculo o melhor desempenho obtido, considerando peso, carga, habilidade para executar manobras e qualidade de condução, consideramos suspensão passiva todos os sistemas de suspensão convencionais ou tradicionais utilizados nos veículos atuais.

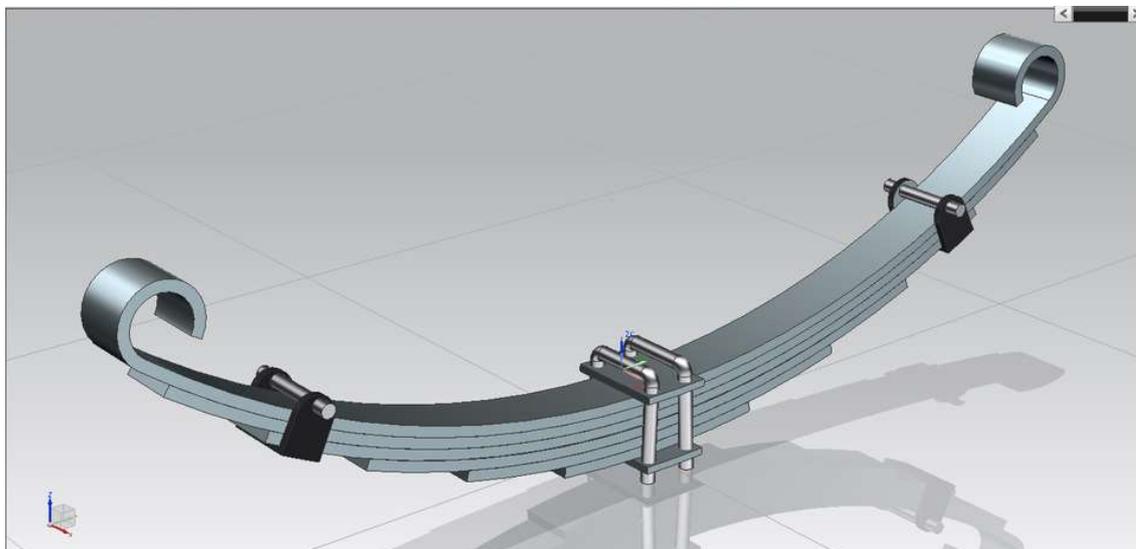
2.5.1 Tipos de molas

Segundo Freitas, (2006), as molas são elementos elásticos, ou seja, que armazenam energia no sistema. Elas são utilizadas em vários formatos e materiais diferentes, mas nos sistemas automotivos elas são feitas de metal e geralmente assumem a forma helicoidal ou feixes. São utilizadas para que a carroceria não fique diretamente ligada às oscilações transmitidas do solo, dando mobilidade ao sistema de suspensão do veículo.

2.5.1.1 Feixes de molas (semielíptica)

O feixe de molas convencional é composto por várias lâminas sobrepostas conforme figura 8.

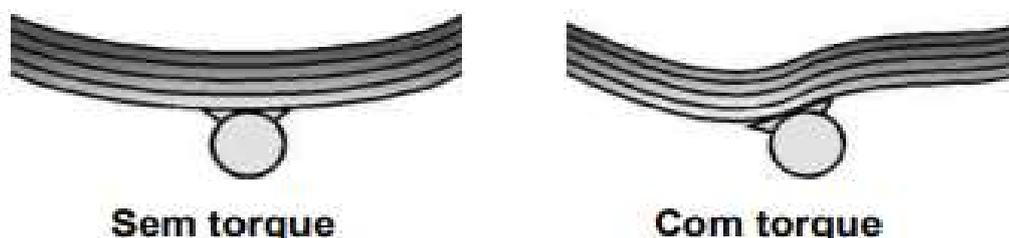
Figura 8 - Feixe de molas



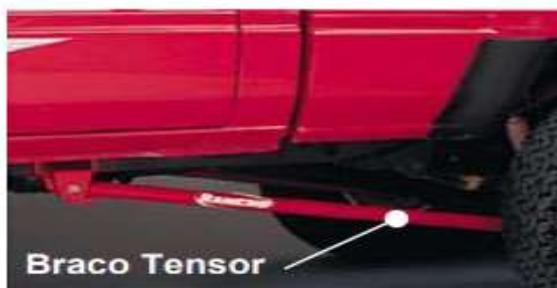
(carrosinfoco.com.br, ac. Março, 2017)

Suas vantagens são robustez, simplicidade de construção e baixo custo, porém tem como característica o atrito interno gerado pelo escorregamento das lâminas, porém quando são fabricados feixes mais longos afim de evitar menor rigidez vertical, gera-se uma diminuição da rigidez sob carga lateral, ou seja, menor estabilidade lateral. O uso de molas mais longas também gera o efeito de enrolamento das molas, quando submetida aos torques de frenagem e torções de aceleração como mostra a figura 9. Para minimizar esse efeito é utilizado um braço tensor conforme figura 10.

Figura 9 - "Enrolamento" das molas semielípticas quando submetidas à torque



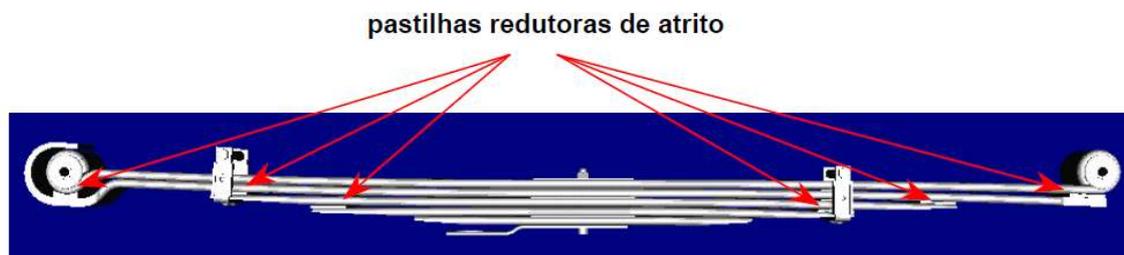
(FREITAS, 2006)



(FREITAS, 2006)

Outro problema que pode ocorrer nesse sistema são os atritos internos das molas, e para solucionar o problema, nos pontos de contato das lâminas foram introduzidas pastilhas redutoras de atrito conforme figura 11.

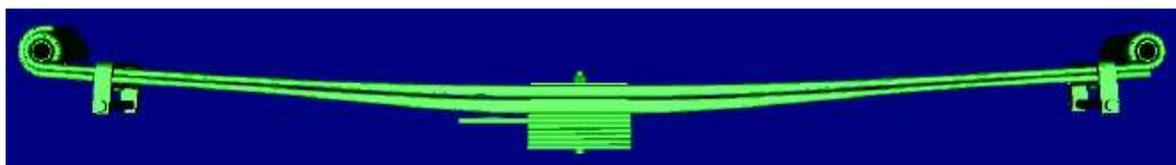
Figura 11 - Posicionamento das pastilhas redutoras de atrito



(FREITAS, 2006)

Dentro do sistema de mola semielíptica existe uma variação denominada de parabólica, que tem esse nome devido ao seu formato conforme figura 12.

Figura 12 - Feixe de mola tipo parabólica



(FREITAS, 2006)

Esse tipo de construção traz vantagens como menor atrito interno, devido ao número reduzido de lâminas, o sistema também pode ter menor rigidez vertical sem comprometimento da rigidez lateral e do “enrolamento”.

2.5.1.2 Mola Helicoidal

Este tipo de mola é o mais utilizado, devido ao alto índice de conforto, perdendo apenas para sistemas pneumáticos e sistemas ativos, além de baixo custo de produção, a mola é feita enrolando-se um arame de forma helicoidal conforme figura 13.

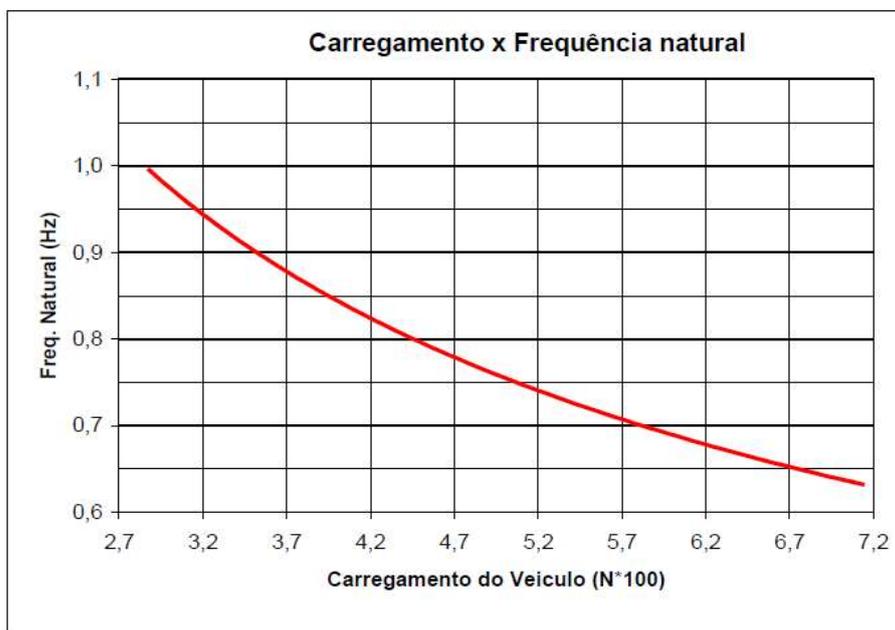
Figura 13 - Mola helicoidal



(próprio autor)

A mola helicoidal possui histerese desprezível, sendo assim seu amortecimento é feito totalmente pelo componente amortecedor, este tipo de sistema pode ter sua altura alterada conforme o veículo é carregado, com isso têm-se também uma variação na frequência natural de ressonância da mola conforme visto na figura 14.

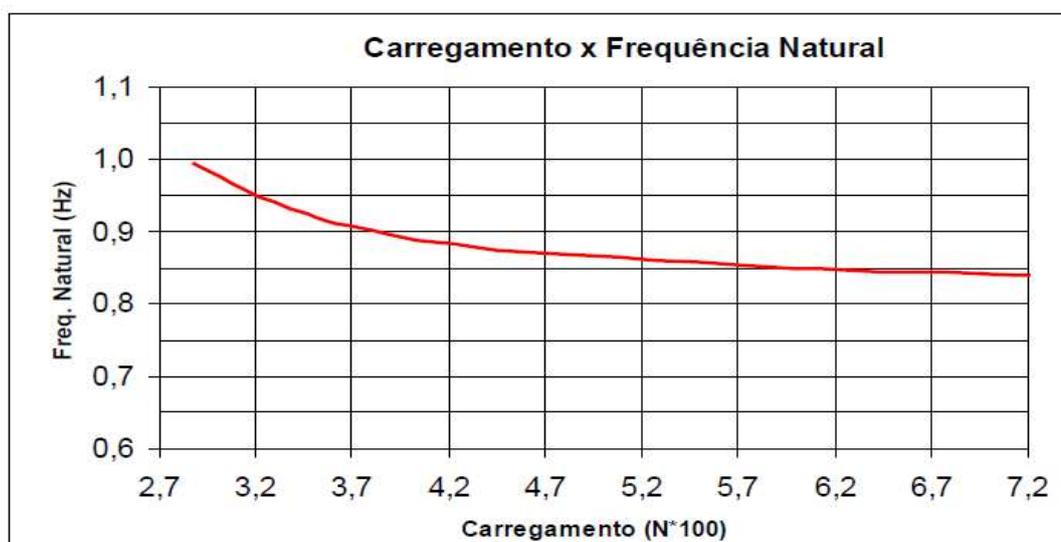
Figura 14 - Características dinâmicas do veículo com mola helicoidal linear



(FREITAS, 2006)

A variação notada na figura 14 é indesejada, pois dessa forma é difícil obter-se um bom equilíbrio entre conforto e dirigibilidade em todos os níveis de carga, para se obter melhores respostas, utilizam-se molas cilíndricas progressivas que são fabricadas à partir de um arame cônico, nesse tipo de mola a altura do veículo não apresenta grande variação ao ser carregado, conforme visto na figura 15.

Figura 15 - Características dinâmicas do veículo com mola helicoidal progressiva



(FREITAS, 2006)

2.5.1.3 Mola Pneumática

O sistema de mola a ar, como o da figura 16, é o que oferece melhor equilíbrio em todas as condições de carga, quando se tem um sistema de controle de altura é possível manter o conjunto sempre próximo da condição ideal, o sistema a ar é a melhor opção quando se tem uma grande diferença de carga entre o vazio e o carregado, pois pode se manter a altura desejada e também o conforto.

Figura 16 - Mola pneumática

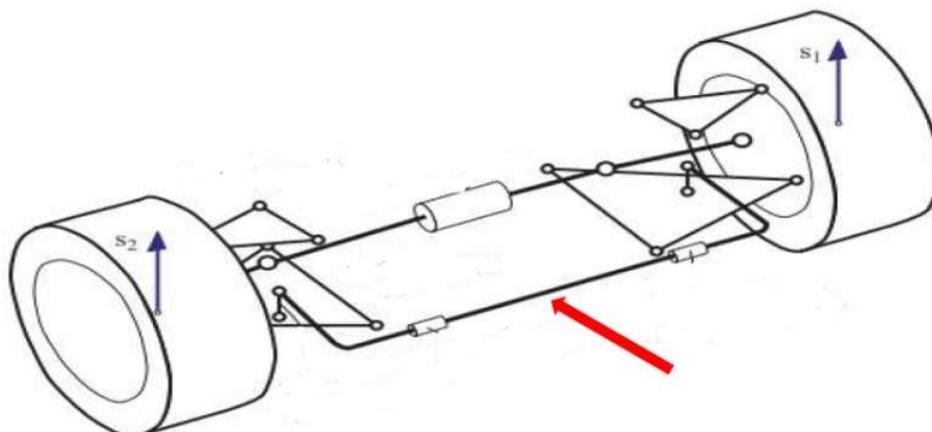


(mercedes-benz.com.br, ac. Maio, 2013)

2.5.1.4 Barra Estabilizadora

Segundo Rill, (2003), a barra estabilizadora (anti-roll bar) é usada para diminuir o ângulo de rolagem durante curvas e prover mais estabilidade. Geralmente, é uma barra metálica em forma de U, conectada aos dois braços inferiores dos dois lados do eixo conforme figura 17.

Figura 17 - Barra estabilizadora



(Rill, 2003)

Assim, as duas rodas estarão interconectadas por uma barra de torção, isso afeta cada rolagem. Quanto mais forte o estabilizador, mais propenso ele está a quebrar, afim de reduzir a rolagem lateral. A definição da rigidez de uma barra estabilizadora depende de sua geometria e do material que será utilizado. Esse tipo de barra pode ser utilizado tanto na dianteira, como na traseira dos veículos, e sua fixação normalmente é feita através de dois pontos fixos na carroceria, e suas extremidades fixadas na suspensão como na figura 18.

Figura 18 - Pontos de fixação barra estabilizadora



(autos.culturamix.com, ac. julho, 2018)

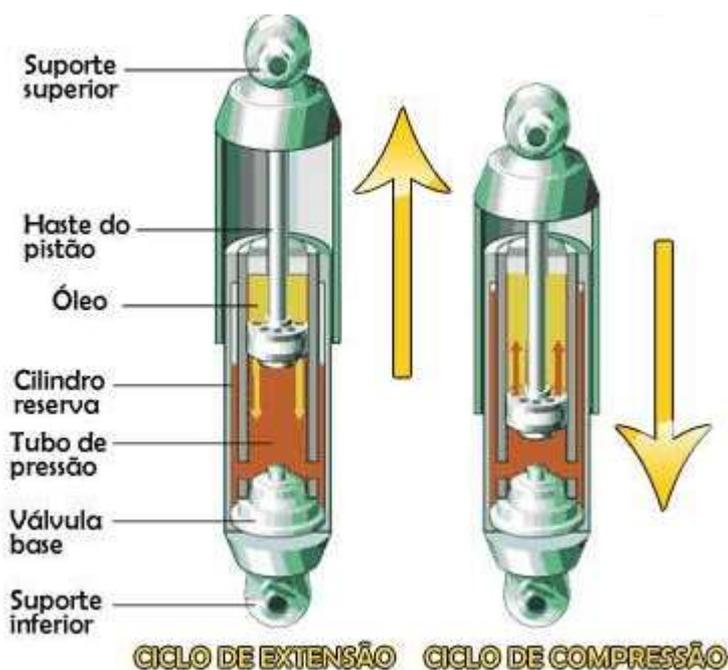
2.5.2 Amortecedores

Segundo lezzo, (2010), os amortecedores são os elementos que, em um movimento qualquer, geram uma força contrária ao sentido do movimento, isso causa uma desaceleração do sistema e diminui o tempo com que o sistema atinge o seu equilíbrio, ou seja, os amortecedores permitem que um movimento dure menos tempo do que se ele não estivesse atuando.

Para as suspensões automotivas este é um elemento crucial, pois reduzindo o tempo de movimento do conjunto de suspensão, pode-se reduzir o tempo em que o pneu fica sem contato com o solo, assim o sistema torna-se mais seguro e confiável.

2.5.2.1 Tubo duplo – amortecedor hidráulico

Figura 19 - Amortecedor tubo duplo



(jocar.com.br, ac. Janeiro, 2014)

Pela figura 19 podemos observar que quando o amortecedor se encontra num percurso de compressão, o óleo contido na câmara de trabalho inferior é transferido pelo pistão através da válvula de entrada ligeiramente carregada. O óleo restante (correspondente ao volume da haste do pistão que entra no tubo interior), é forçado a passar por um sistema de válvula na base, passando depois para o reservatório exterior de óleo, também chamado câmara de compensação. A velocidade do

movimento da haste e da válvula da base determina a força resistiva gerada pelo amortecedor na compressão. Quando o amortecedor se encontra num percurso de retorno, a válvula de entrada do pistão se fecha e o óleo presente na câmara de trabalho superior, é forçado a passar por um sistema de válvulas do pistão. Para compensar o volume da haste que abandona o tubo interior, o óleo passa do reservatório de óleo exterior através de uma válvula de entrada na base ligeiramente carregada para a câmara de trabalho inferior, mantendo assim o tubo interior permanentemente cheio de óleo. A velocidade da haste e do movimento das válvulas do pistão determina a força resistiva gerada pelo amortecedor no percurso de retorno, os amortecedores hidráulicos são muito eficazes.

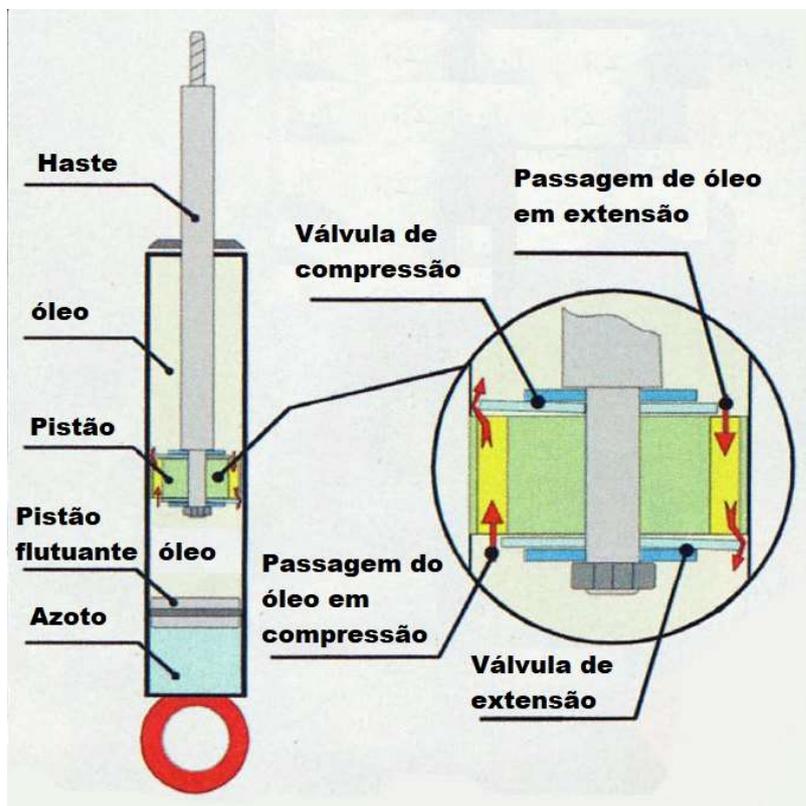
Todavia, quando o óleo é forçado a passar de uma área de alta pressão para uma outra de baixa pressão, como acontece nos percursos de compressão e de retorno, a súbita queda da pressão provoca a formação de bolhas no óleo. Este processo é conhecido como cavitação e arejamento. As bolhas de ar, ao contrário do óleo, são compressíveis. Como tal, o movimento inicial do pistão de cada percurso comprime as bolhas antes que o óleo seja forçado a passar pela válvula. Isto produz uma defasagem no controle do amortecimento, um problema que resulta na deterioração da eficácia do amortecedor. A adição de N_2 sob pressão limita o efeito da formação de espuma de forma a conceder ao amortecedor uma maior eficácia.

2.5.2.2 Tubo duplo - Amortecedores a gás

Amortecedor a gás de baixa pressão de tubo duplo, é semelhante a um amortecedor convencional, apenas dois elementos essenciais são completamente diferentes. Na parte superior do tubo de reserva, o ar é substituído por azoto (um gás inerte) com uma pressão entre dois e oito bar, introduzido durante a fabricação. O vedante do óleo que rodeia a haste do pistão na parte superior do corpo do amortecedor possui um desenho muito especial. Apresenta um lábio que impede a entrada de sujeira e dois lábios vedantes que evitam o vazamento de óleo. A base deste vedante tem a forma de uma faixa circular flexível que funciona como uma válvula de retenção. A flexibilidade destas faixas permite que o óleo regresse ao tubo de reserva e mantém a pressão do gás apenas no óleo do reservatório. Estes amortecedores produzem uma condução muito confortável e uma direção muito precisa.

2.5.2.3 Amortecedor a gás de alta pressão – monotubo

Figura 20 - Amortecedor monotubo a gás



(carrosinfoco.com.br, ac. Fevereiro, 2017)

Os amortecedores de monotubo, exemplificado na figura 20, funcionam segundo o mesmo princípio básico (movimento alternativo de um pistão em um tubo cheio de óleo), mas possuem em um extremo uma pequena quantidade de azoto sob alta pressão (25 a 30 bar). Um pistão flutuante separa este gás do óleo evitando a mistura, quando a haste do pistão desloca o óleo durante a compressão, este óleo comprime mais um pouco o azoto, o gás é assim sujeito a variações de volume, atuando como uma mola, a pressão contínua exercida no óleo pelo gás, garante uma resposta instantânea e também um funcionamento mais silencioso das válvulas do pistão. Além disso, esta pressão elimina os fenômenos de cavitação e arejamento que podem tornar o amortecimento momentaneamente ineficaz.

2.6 Amortecedor Semi-ativo

Conforme Iezzo, (2010), em uma suspensão semi-ativa ou adaptativa é possível variar o fator de amortecimento, ou seja, é possível mudar a forma como o sistema mola-amortecedor reage às irregularidades do solo e aos movimentos da massa suspensa, como aceleração, frenagens e curvas.

O conceito de suspensão ativa foi criado por volta dos anos 70 como um tipo de amortecimento variável e controlado, porém o primeiro amortecedor semi-ativo para fins comerciais foi criado por volta dos 80. Ele apresentava um sistema de variação de seu coeficiente entre níveis baixos e altos, porém eram ajustados lentamente, e suas melhorias eram praticamente imperceptíveis.

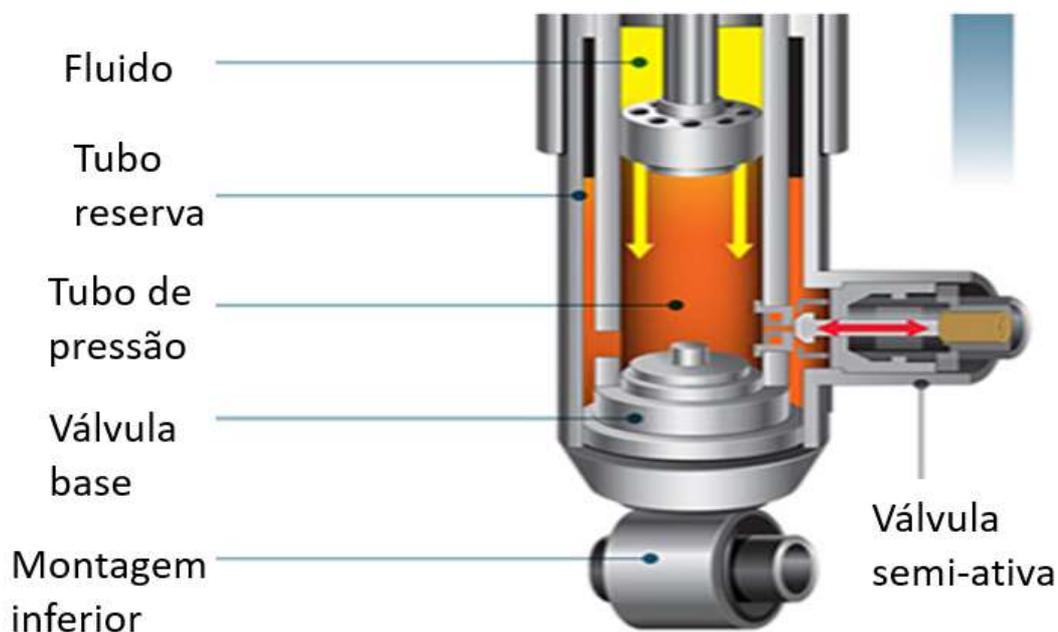
No fim da década de 80 passou-se a utilizar um sistema “on-off”, no qual o amortecedor permanecia desligado com forças pequenas e quando as massas suspensa e não-suspensa se moviam em mesma direção, e a massa não-suspensa estivesse com maior velocidade, qualquer outro tipo de situação o amortecedor ligava e atuava com forças próximas ao máximo, esse conceito apresentava significativa melhora na condução do veículo.

Logo após surgiu o conceito de “clipped” que quando necessário, o amortecedor deveria se manter com forças de um sistema ativo, e quando não necessário o sistema era desligado, esse sistema foi estudado por muitos anos e apresentaram-se algumas variações, porém nada muito conclusivo, no meio desses estudos surgiram os amortecedores com orifício variável, e no início dos anos 90 foi apresentado o uso de atuadores de fluido eletro-reológico(ER) e magneto-reológicos(MR) para amortecedores hidráulicos e com orifício variável, desde então o conceito MR têm sido muito estudados para aplicação veicular.

Hoje são utilizados três tipos diferentes de amortecedores semi-ativos, através de válvula solenoide, por fluido de viscosidade variável (MR) e sistema de suspensão semi-ativo com amortecedor tritubular e válvula solenoide eletromagnética.

A Figura 21 mostra o funcionamento de um amortecedor do tipo tubo duplo com orifício variável em que o diâmetro do orifício pode ser variado com controle eletrônico. À medida que o pistão se move dentro do cilindro, o fluxo de óleo flui através do orifício. Um orifício maior oferece menos resistência ao fluido, enquanto um orifício menor oferece maior resistência.

Figura 21 - Esquema de um Amortecedor com Orifício Variável

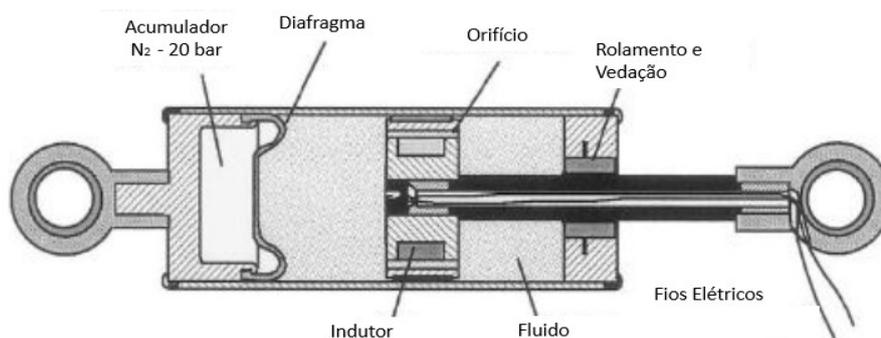


(motor.com, 2018)

Para utilizar o amortecedor de orifício variável como um atuador semi-ativo, a abertura do orifício é determinada por controle eletrônico, ativando uma válvula que no caso da figura 21, trata-se de uma válvula solenóide. Assim, o amortecimento proporcionado pelo sistema pode ser variado com configurações distintas.

Outro exemplo de dissipador semi-ativo são os amortecedores tubo simples magneto-reológicos (MR) que utilizam fluido MR. Fluidos (MR) são materiais que respondem a um campo magnético aplicado, com uma mudança no comportamento reológico. Normalmente, esta mudança se manifesta pelo desenvolvimento de uma tensão de escoamento que aumenta monotonicamente com o campo magnético aplicado. A força dissipativa fornecida pelo amortecedor pode ser controlada através da variação do campo eletromagnético. A Figura 22 apresenta um amortecedor tubo simples (MR).

Figura 22 - Amortecedor Magneto-Reológico

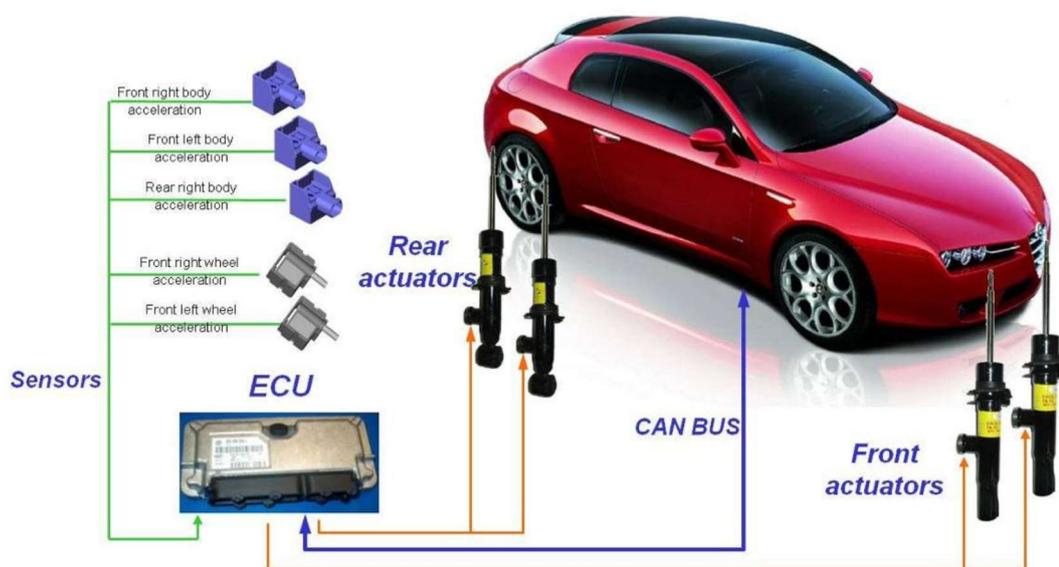


(Rajamani, 2006)

Um terceiro tipo de suspensão semi-ativa, e talvez aquela com a melhor relação custo benefício atualmente em comercialização, é o sistema de suspensão semi-ativo com amortecedor tritubular e válvula solenoide eletromagnética. O sistema é adequado para controlar a dinâmica vertical do veículo e a movimentação da carroceria, causados pelas irregularidades da superfície de rodagem e pela ação do condutor (esterçamento, aceleração, frenagem, mudanças de marcha, etc.), através de amortecedores ajustáveis.

O sistema é composto dos seguintes subsistemas: amortecedores controláveis eletronicamente, sensores, central eletrônica de controle (ECU). A figura 23 mostra um sistema criado pela Magneti Marelli denominado SDC (SynapticDampingControl).

Figura 23 - Arquitetura SDC (Synaptic Damping Control)



(Magneti Marelli Cofap, 2010)

Este sistema possui os amortecedores eletronicamente ajustáveis por intermédio de uma válvula solenoide eletromagnética, comandada por um sinal de corrente proveniente da ECU. Os amortecedores são capazes de mudar as características de amortecimento de um valor mínimo até um máximo, entretanto, ele não faz isso em tempo real como nos sistemas de suspensão ativa.

2.7 Suspensão Ativa

Ainda conforme lezzo, (2010), a suspensão ativa pode ser definida como uma tecnologia que controla os movimentos verticais das rodas através de controles de bordo eletrônicos em tempo real, ou seja, o movimento da suspensão já não é mais

diretamente refletido pelo solo e suas imperfeições. Uma suspensão ativa tem a habilidade de armazenar, dissipar e introduzir energia no sistema, este é seu grande diferencial. Os seus parâmetros variam conforme as condições de operação. Esse modelo de sistema foi o primeiro a utilizar um conjunto de atuadores separados que podem exercer movimentos independentes e aguentar cargas variadas de força.

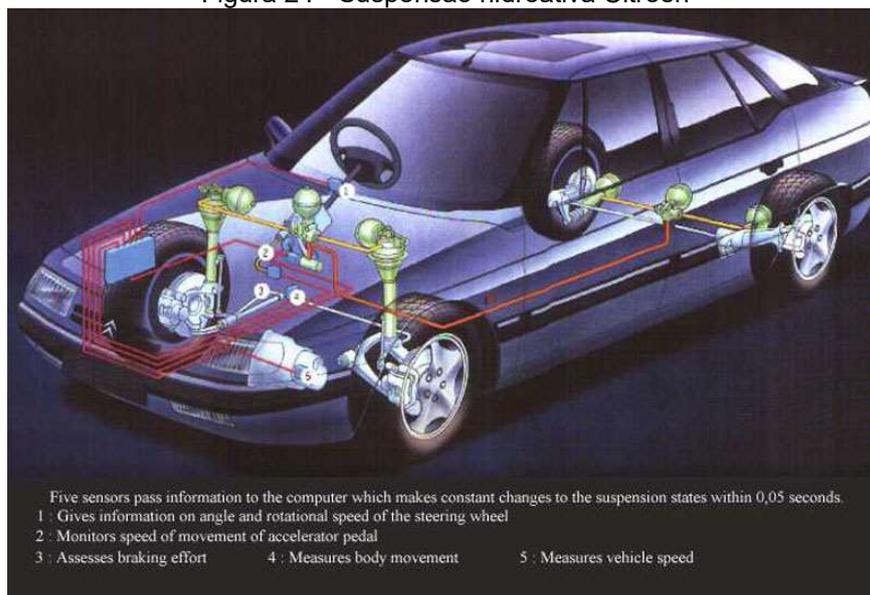
O benefício desse tipo de suspensão está em manter o nível do corpo do veículo o mais constante possível, além de melhorar a aderência dos pneus em superfícies irregulares, já que a força normal sobre o pneu pode ser mantida muito mais constante em relação ao solo.

A suspensão ativa começou a ser utilizada em veículos de corrida da categoria formula 1 em 1987 na equipe Lotus com os pilotos Ayrton Senna e Satoru Nakajima, e na equipe Williams-Renault de Alain Prost e Damon Hill. Esta suspensão Ativa era do tipo hidráulica e seus dados técnicos não foram divulgados. Mas sua história foi curta nas competições de formula 1, pois foi banida em 1993 pela federação internacional de automobilismo (FIA). Entretanto há notícias de que elas podem voltar a ser usadas nas corridas.

2.7.1 Hidroativa – CITROËN

Antes da Formula 1, montadoras como a Citroën haviam introduzido uma versão semelhante em alguns modelos como XM e Xantia, conhecido como Hydractive, de acordo com Marsh (1999), o sistema de suspensão convencional era completamente substituído pelo sistema ativo, isso para eliminar variáveis como molas, substituindo-as por um mecanismo que utiliza gás nitrogênio para absorver os impactos na suspensão. A figura 24 ilustra esquematicamente os componentes desta suspensão.

Figura 24 - Suspensão hidroativa Citroen



(citroenet.org.uk, ac. Maio, 2016)

Neste modelo, foram utilizados 5 sensores diferentes: o primeiro se situa no volante e serve para monitorar o ângulo e velocidade de rotação do volante. Com isso, o sistema pode prever a intenção de manobra do motorista, o segundo é o sensor do pedal do acelerador, ele prevê movimentos de empino e mergulho da carroceria, o terceiro sensor se situa no sistema de freios, e capta suas atividades e atuações, velocidades de rodas e sistema ABS, além dos sensores de movimento da carroceria, que são acelerômetros que servem para monitorar o comportamento da massa suspensa do veículo, e por último são os sensores de velocidade do veículo, ele pode prever como e quão rápido o sistema deve atuar para manter o veículo estável.

2.7.2 Eletromagnéticos – BOSE

Segundo Howard (2016), em 2004 uma empresa especializada em sistemas de áudio lançou um projeto de suspensão ativa com moto-atuadores lineares eletromagnéticos, que somados à amplificadores de potência e a unidade de comando eletrônico, faziam o papel da suspensão ativa no veículo utilizando a eletricidade como meio de controle de rigidez do sistema, o que elimina a necessidade do uso de óleos para manipular o sistema, tornando as respostas muito mais rápidas, a figura 25 mostra o sistema instalado em um veículo.

Figura 25 - Suspensão Ativa Eletromagnética Bose

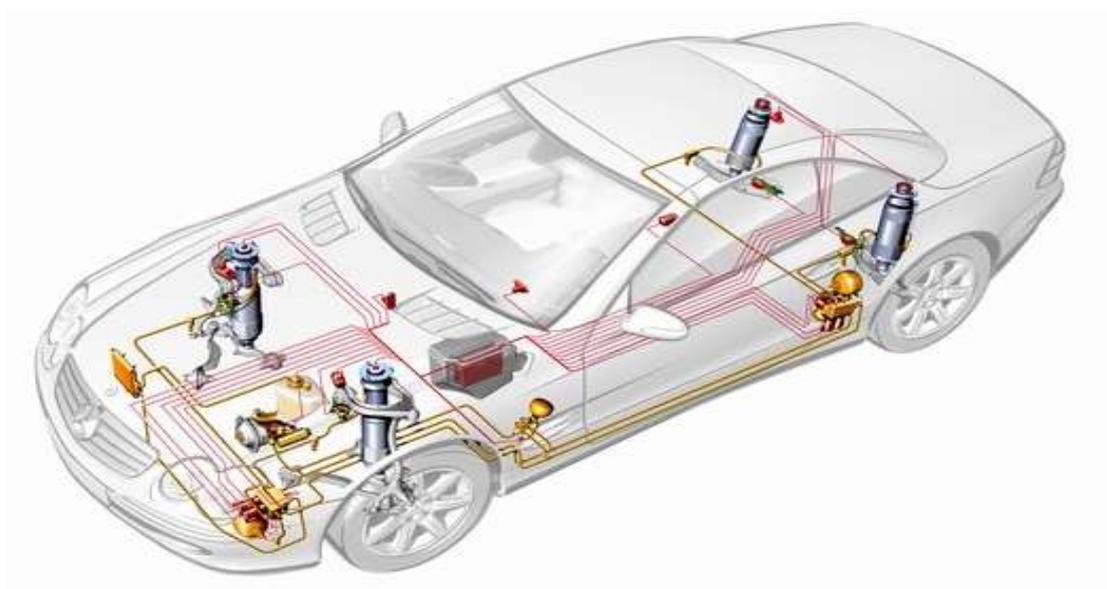


(Bose.com, ac. Maio, 2010)

2.7.3 Active Body Control (ABC) – MERCEDES-BENZ

De acordo com Peter (2017), atualmente, a Mercedes-Benz aplica um sistema primeiramente lançado em 1999 denominado Active BodyControl, ou ABC. Este sistema utiliza servo-hidráulicos para variar a pressão no sistema de suspensão e é monitorado por inúmeros sensores de altura e aceleração do veículo, conforme figura 26.

Figura 26- Mercedes-bens Active Body Control



(500sec.com, ac. Maio, 2016)

Este sistema já é item de série em todos os modelos Mercedes-Benz SL e CL e em alguns Classe S.

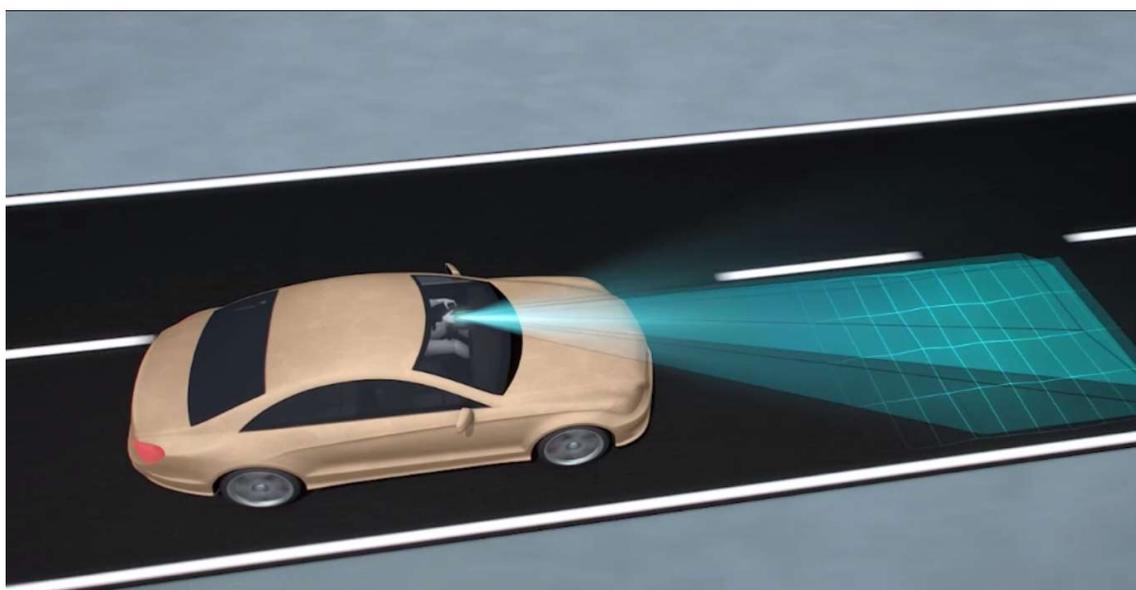
Pela ação da válvula, comandada por um sinal de corrente proveniente do comando da ECU, os amortecedores são capazes de mudar as características de amortecimento de um valor mínimo até um máximo, modificando a resistência com que o fluido interno do amortecedor passa de uma câmara para outra do amortecedor, ou seja, a válvula atua abrindo a passagem do fluido, ocasionando menor amortecimento para o sistema, e fechando a passagem do fluido para maior resistência o que gera maior amortecimento para o sistema.

A ECU (Central Eletrônica) que comanda o sistema, recebe as informações sobre o solo e a carroceria do veículo, através de sensores de movimento e posição, colocados na carroceria e na massa não suspensa do veículo. Assim, com esses dados ela pode calcular a melhor taxa de amortecimento para o modo de direção atuante, seja ele esportivo ou confortável.

2.7.4 Magic Body Control (MBC) – MERCEDES-BENZ

Segundo Peter (2017), MAGIC BODY CONTROL combina as vantagens de um sistema de suspensão ativa com a globalmente e inovadora função ROAD SURFACE SCAN (Mapeamento de Superfícies de Estrada) – uma câmera estéreo que faz varreduras da pista à frente e registra suas condições.

Figura 27 - Magic Body Control



(500sec.com, ac. Agosto, 2017)

A figura 27 representa o funcionamento do sensor óptico do sistema. O responsável pelo projeto do MBC, Stefan Cytrynski declarou sobre o sistema: "É como se você pairasse sobre a rua, como se estivesse em um tapete mágico." Atualmente, dois modelos de veículos utilizam esse sistema, são Mercedes-Benz Classe S e Rolls-Royce Ghost.

Na ECU (central eletrônica de controle): se encontra todos os códigos de funcionamento do sistema, e onde são processadas as informações recebidas pelos sensores do sistema. Sensor óptico estéreo (câmera): capta a situação do solo a frente do veículo até 15 metros de distância. Reservatórios: armazenam óleo e cobrem a demanda de fluido para o servomecanismo. Sensores de nível: monitora a altura do veículo acima das 4 rodas a cada 10 milissegundos. Sensores de aceleração: 3 sensores verticais que detectam levantamento da carroceria por conta do movimento do carro, mergulho que é o movimento de frenagem quando a frente do carro descende e/ou a traseira do carro ascende, e rolagem, o movimento lateral da carroceria. Sensor longitudinal: que detecta aceleração e desaceleração do veículo e, sensor lateral que detecta movimentos transversais do veículo. Servomecanismos hidráulico: são os atuadores do sistema que corrigem a trajetória da carroceria do veículo através de adição ou retirada de volume de fluido de dentro do mecanismo, que pode deixar o veículo mais ou menos distante do solo. Eles atuam junto à suspensão do carro, ou seja, com as molas e amortecedores.

O sistema opera em 2 diferentes modos: Conforto e Sport. O primeiro atua para que a carroceria se mova mais suavemente e ajuste a altura de veículo conforme a sua velocidade, enquanto o segundo prioriza o desempenho, endurecendo a suspensão e deixando o carro mais baixo.

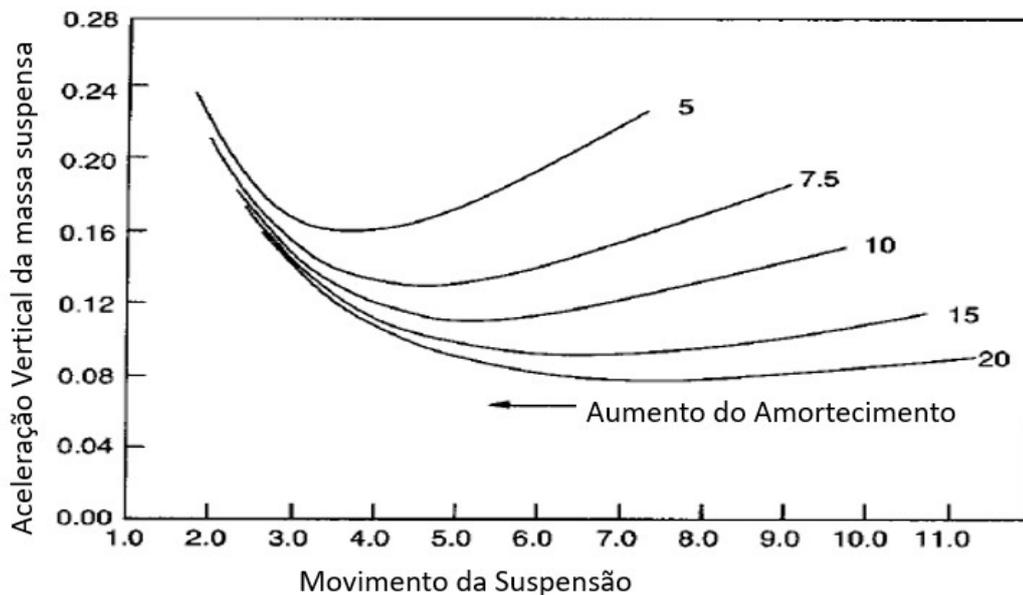
Além disso, ainda é possível configurar o sistema para que o carro fique 30 milímetros mais alto.

3 ESTUDO DO SISTEMA ATIVO

Segundo Gillespie (1992), o sistema ativo trabalha sempre na melhor condição entre todas as situações que foram exemplificados anteriormente, deve-se lembrar que existem diversos parâmetros, porém somente é possível projetar a dureza e os valores de amortecimento. A influência desses parâmetros, no qual pode-se notar

diferentes valores obtidos de dureza e amortecimento, em função da aceleração vertical é exemplificado na figura 28.

Figura 28 – gráfico da dureza do conjunto



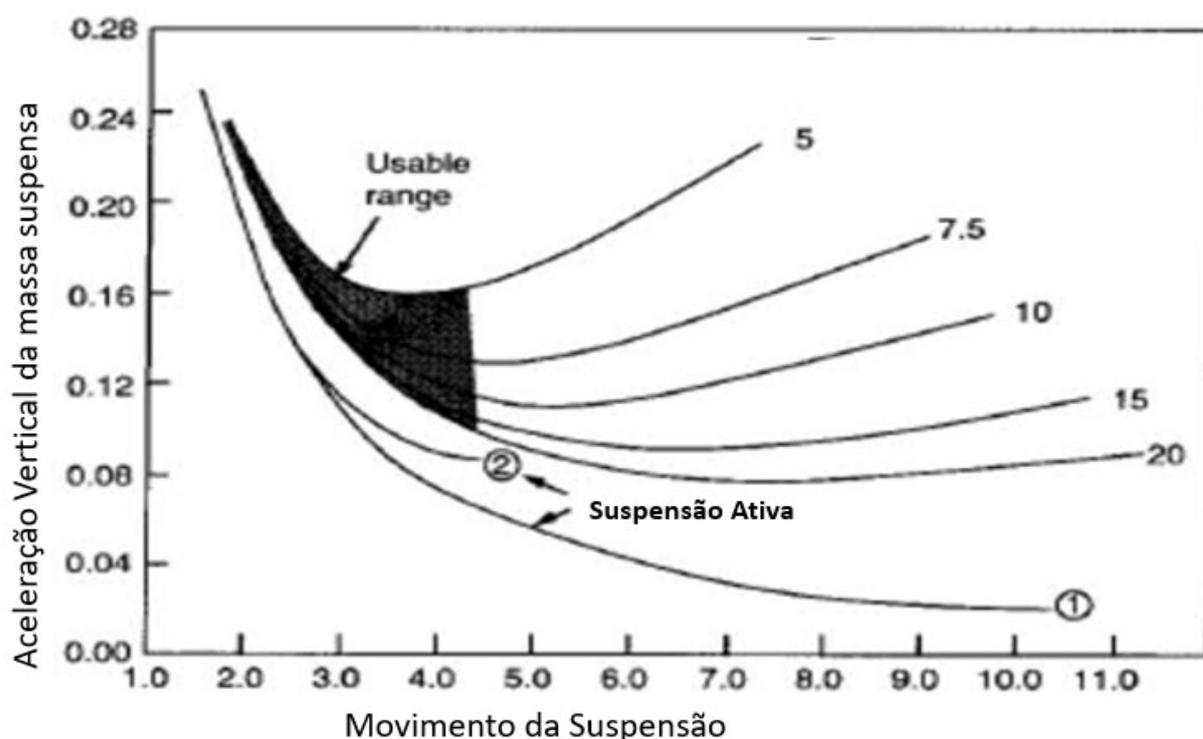
(Gillespie, 1992)

Sabe-se que as taxas de durezas mostradas na figura 28 são utilizadas em grande parte dos veículos de produção em massa, sendo que a suspensão mais dura representa os veículos esportivos e de alto desempenho, já as menos rígidas, representam veículos de luxo que utilizam suspensão a ar. Pode-se notar que para qualquer variação de rigidez da suspensão, a taxa de aceleração vertical varia com o amortecimento e tem um ponto de menor aceleração RMS, que seria o ponto ideal. As altas taxas de amortecimento reduzem o movimento RMS da suspensão, mas permitem maior aceleração (quanto maiores as forças de amortecimento, maiores serão as influências que o solo transmite para a massa não suspensa). Já os baixos níveis de amortecimento permitem grandes variações de posição da suspensão, porém aumentam a aceleração RMS por causa dos movimentos não controlados nas frequências de ressonância das molas.

Em termos práticos, é impossível atingir os níveis de desempenho mostrados na figura 28, veículos de passageiros utilizam suspensões que vão além do alcance do gráfico, isso para os que utilizam suspensões de baixo amortecimento e que podem comprometer a estabilidade do veículo, pois seria insuficiente para controlar as oscilações da roda, na figura 29 demonstra a área utilizada em veículos de suspensão convencional.

Para simular uma suspensão ativa em modelo de $\frac{1}{4}$ do veículo, deve-se substituir o amortecedor e mola por um gerador de força, que seria um cilindro hidráulico controlado eletronicamente, sendo capaz de aplicar forças de compressão e descompressão, alterar o posicionamento da suspensão, controlar a carga (raio do pneu), e ainda variar a força linearmente para qualquer combinação destas variáveis. O algoritmo de controle para otimização das suspensões ativas pode ser determinado analiticamente, porém utiliza-se um modelo pré-definido afim de exemplificar e comparar os sistemas.

Figura 29 – Área de uso de uma suspensão comum



(Gillespie, 1992)

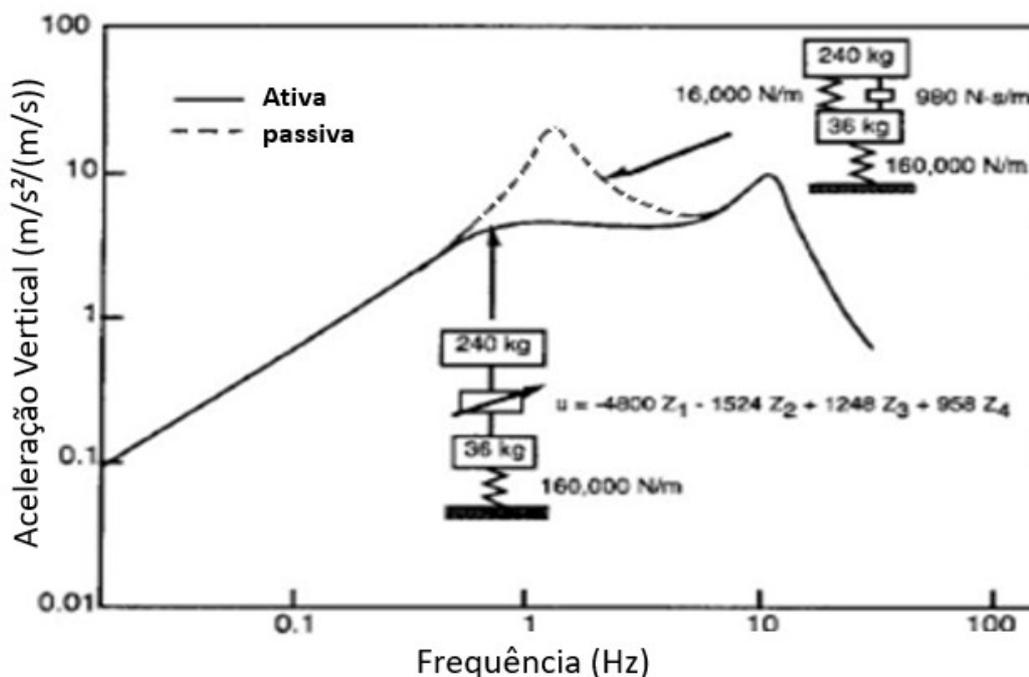
A otimização da aceleração vertical da suspensão resulta na curva 1 mostrada na figura 29. Para qualquer limite de oscilação da suspensão o sistema ativo sempre obtém melhores resultados de desempenho. No limite superior da faixa utilizável para suspensões passivas (área sombreada), pode-se obter um melhoramento de 30% na redução da aceleração RMS com a utilização de suspensão ativa. A otimização indicada na curva 1 não deve ser aplicada em veículos de rua pois não há amortecimento suficiente para as ressonâncias da roda.

A melhor performance para suspensões ativas seria a mostrada na curva ativa da figura 30, que ao invés de 30% de redução de aceleração mostrada na curva

passiva, seria 20% de taxa de amortecimento, o que tornaria o amortecimento mais razoável.

Os benefícios da suspensão ativa são maiores com o controle dos movimentos da massa suspensa próximos de sua frequência de ressonância. A resposta da aceleração vertical dos dois sistemas está comparada na figura 30.

Figura 30 – Comparação ativo x passivo



(Gillespie, 1992)

Na frequência de ressonância da massa suspensa, a suspensão ativa reduz a amplitude da resposta que ocorreria com a suspensão passiva. Como a suspensão ativa é capaz de aplicar as acelerações da massa suspensa e exercer forças para minimizar sua amplitude, o sistema atinge um amortecimento muito efetivo neste modo. Na frequência de ressonância da massa não suspensa, a suspensão ativa atua com o mesmo comportamento da suspensão passiva. Isto ocorre porque as forças necessárias para controlar os movimentos verticais das rodas são reações relativas à massa suspensa, e necessariamente iriam aumentar suas acelerações.

4 ESTUDO DINÂMICO

A dinâmica veicular aborda o comportamento do veículo e de seus ocupantes quando submetidos a oscilações e vibrações que podem ser gerados pelo solo, agente externo, ou pelos próprios componentes do veículo.

O sistema de suspensão possui três funções no veículo, conectar a carroceria às rodas e sustentá-la com rigidez adequada e ainda manter sua relação geométrica com as rodas, durante a rodagem deve absorver e amortecer juntamente com o pneu os choques gerados pela irregularidade do solo com conforto e segurança, e ainda garantir a transmissão das forças de condução e frenagem.

4.1 Conforto

Por definição, conforto é o ato de confortar-se, com comodidade física satisfeita, algo fundamental durante a condução de um veículo de passeio, muitos são os motivos responsáveis pelo desconforto, assim a suspensão deve trabalhar afim de minimiza-los. Ao longo dos anos diversos estudos foram desenvolvidos nessa área, para analisar a influência das vibrações na saúde e no conforto, no entanto, em um veículo de passeio não existe a preocupação com a saúde, devido aos baixos níveis de vibrações.

“O corpo humano é uma sofisticada estrutura biomecânica, e a sensibilidade à vibração, pode envolver diversos fatores, tais como, postura, tensão muscular, frequência, amplitude e direção da vibração, além da duração e tempo de exposição.” (BALBINOT, 2001)

Segundo Ganzarolli (2012), a vibração em diferentes frequências ou em diferentes eixos podem produzir diferentes sensações em diferentes partes do corpo. A figura 31 apresenta uma comparação de regiões sensíveis às vibrações e suas fontes causadoras.

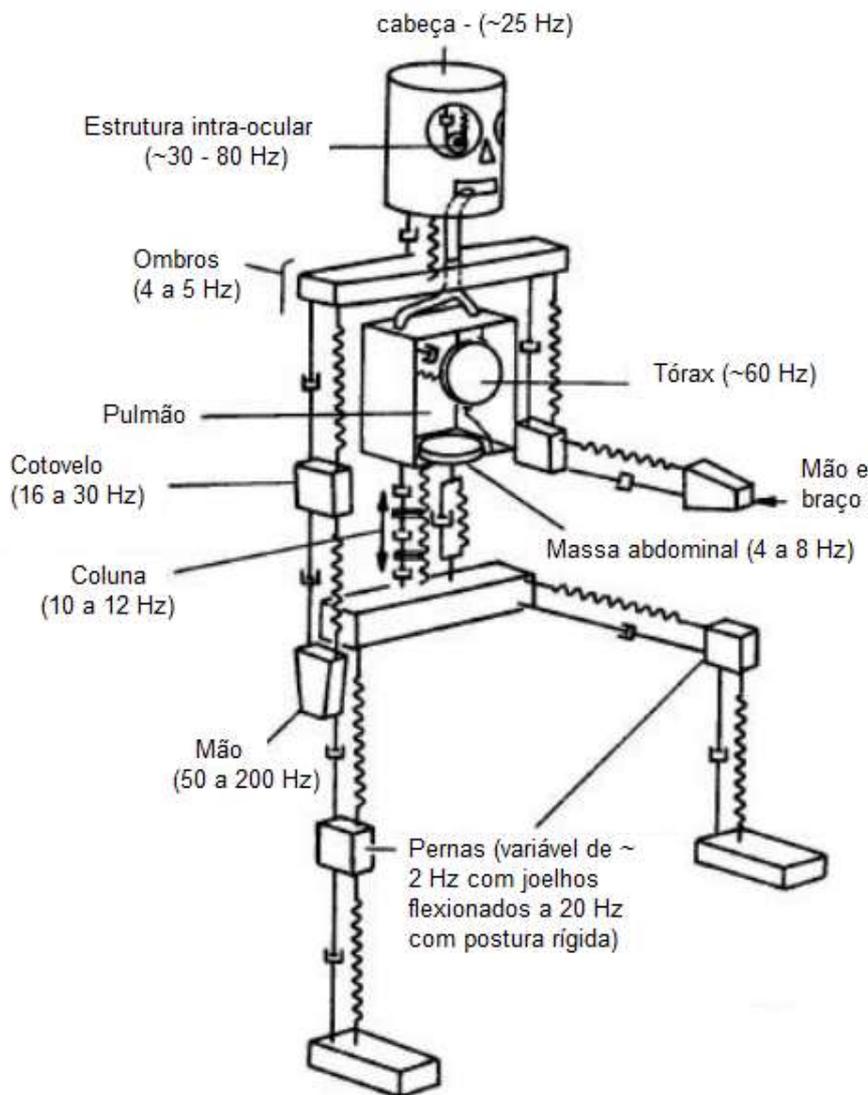
Figura 31 – Sensibilidade do corpo humano às vibrações

| <i>Frequência [Hz]</i> | <i>Sensibilidade</i> | <i>Fontes de vibração</i> |
|------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| 0 a 2 | Sistema vestibular | Barcos, veículos, aeronaves |
| 2 a 30 | Biomecânica: ressonância do corpo | Veículos, aeronaves, guindastes |
| >20 | Músculos, tendões e pele | Ferramentas e máquinas |

(Ganzarolli, 2012)

Seguindo nessa linha de desconforto, a figura 32 detalha como cada frequência durante a condução do veículo, pode afetar o corpo humano causando desconforto e até mesmo fadiga.

Figura 32 – Sistema mecânico representando o corpo humano sujeito a vibração vertical



(Ganzarolli, 2012, p32)

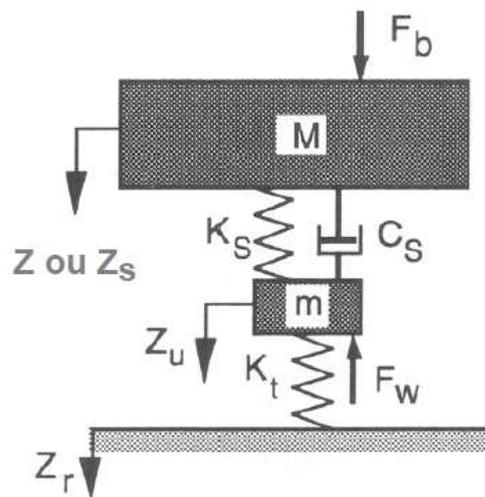
4.2 Modelagem

Para se analisar o desempenho de um sistema de suspensão, existem dois métodos. Um deles consiste na construção de um protótipo físico e o outro em um modelo dinâmico, que avalia de forma teórica sua eficiência. Através do estudo teórico é possível analisar antes mesmo de se construir, diminuindo assim os custos de produção e de possíveis ajustes e trocas de peças para solução de problemas, além

da otimização do tempo de projeto. Para se desenvolver uma análise dinâmica são necessários diversos fatores, que podem variar de acordo com o tipo de suspensão utilizada, até o tipo de solo e obstáculo utilizado. Para nosso estudo foi utilizado um modelo de $\frac{1}{4}$ de um veículo de passeio, foi utilizado ainda o software Matlab 2017 com a ferramenta simulink para desenvolver o sistema, e atingir as respostas no domínio da frequência, utilizando os resultados do sistema de suspensão passiva para demonstrar as faixas de trabalho de um sistema ativo.

Para iniciar a modelagem, levamos em consideração um sistema de suspensão com dois graus de liberdade que pode ser visto na figura 33.

Figura 33 - Modelo de $\frac{1}{4}$ de veículo para suspensão passiva



(Gillespie, 1992)

No qual:

F_b = Força atuante na massa suspensa "M";

F_w = Força atuante na massa não suspensa "m";

Z ou Z_s = Deslocamento da massa suspensa "M" ou "Ms";

Z_u = Deslocamento da massa não suspensa "m" ou "Mu"

Z_r = Deslocamento do solo ou pista

K_s = Rigidez da mola principal da suspensão

C_s = Coeficiente de amortecimento do amortecedor

K_t = Rigidez do pneu

As funções a serem obtidas são:

$(z's)/(z'r) =$ Transmissibilidade entre pista e massa suspensa (GILLESPIE, 1992)

e

$(z'u)/(z'r) =$ Transmissibilidade entre pista e massa não-suspensa (GILLESPIE, 1992)

Aplicando a lei de Newton às duas massas, considerando que as massas são iguais a zero, obtém-se as seguintes equações (GILLESPIE, 1992):

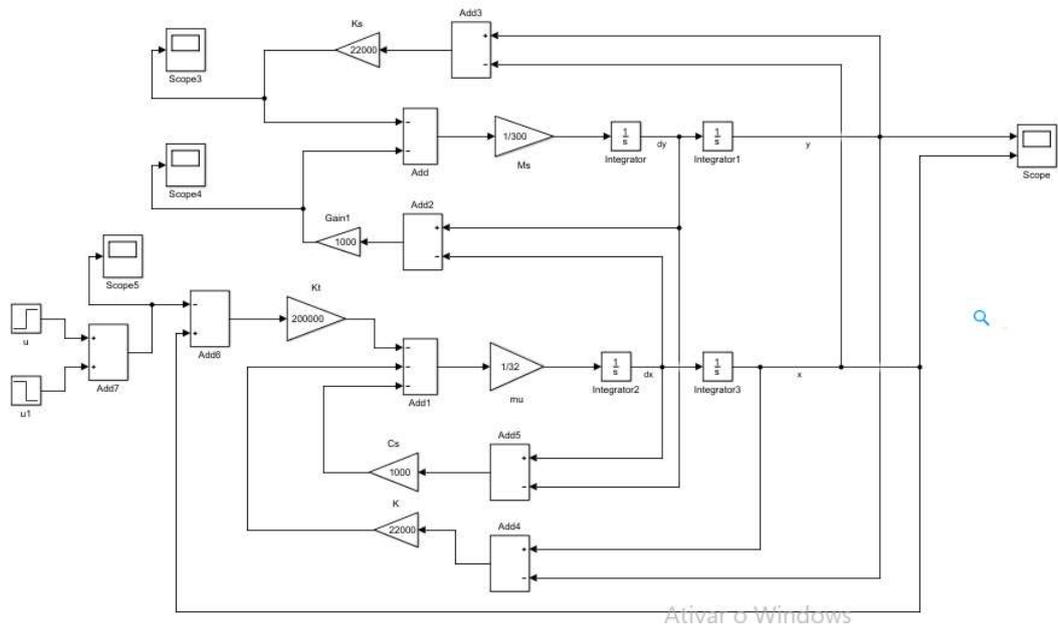
$$M_S \cdot \ddot{Z}_S + K_S \cdot (Z_S - Z_U) + C_S \cdot (\dot{Z}_S - \dot{Z}_U) = 0 \quad [18]$$

$$M_U \cdot \ddot{Z}_U + K_S \cdot (Z_U - Z_S) + C_S \cdot (\dot{Z}_U - \dot{Z}_S) + K_T \cdot (Z_U - Z_R) = 0$$

4.2.1 Protótipo virtual

- Para a construção do protótipo, utilizamos a ferramenta SimuLink do software MatLab 2017, e simulação com modelo de $\frac{1}{4}$ de veículo (figura 34).

Figura 34 – Construção do modelo em software

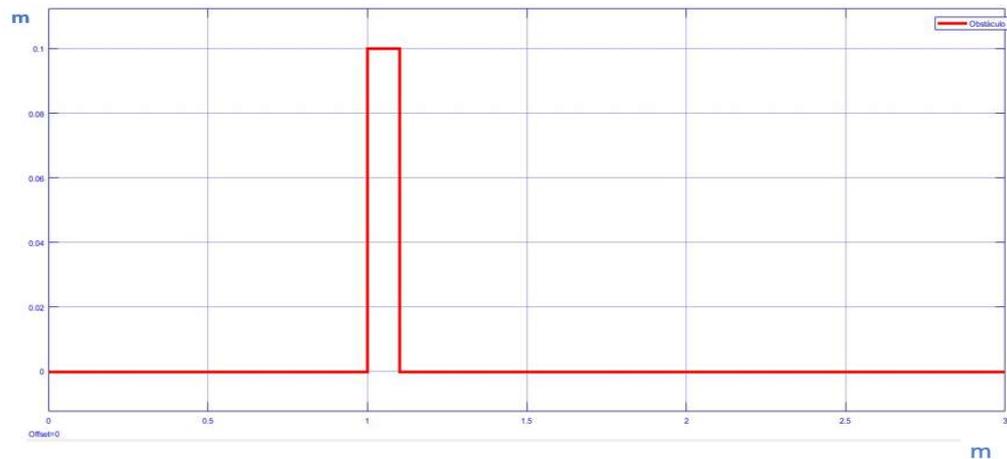


(Roberto Bertolussi, 2018)

Para o sinal de entrada ou sinal de excitação, foi utilizado um obstáculo simples, para facilitar a modelagem e os cálculos, simulamos um obstáculo com dimensões de 0,1 metros por 0,1 metros, conforme figura 35, com isso pode-se analisar como se comporta o sistema, e ver a reação da massa suspensa e não suspensa, assim

exemplificando como se modifica o comportamento da suspensão ao se alterar valores, baseados em conforto e esportividade (dirigibilidade).

Figura 35 - Obstáculo criado para simulação



(próprio autor, Matlab)

5 RESULTADOS

Para prosseguir com a simulação, são utilizadas grandezas próximas aos valores reais de veículo de passeio comum:

$M_s = 300$ kg massa suspensa

$M_u = 32$ kg massa não suspensa

$K_s = 22000$ N/m Rigidez mola principal

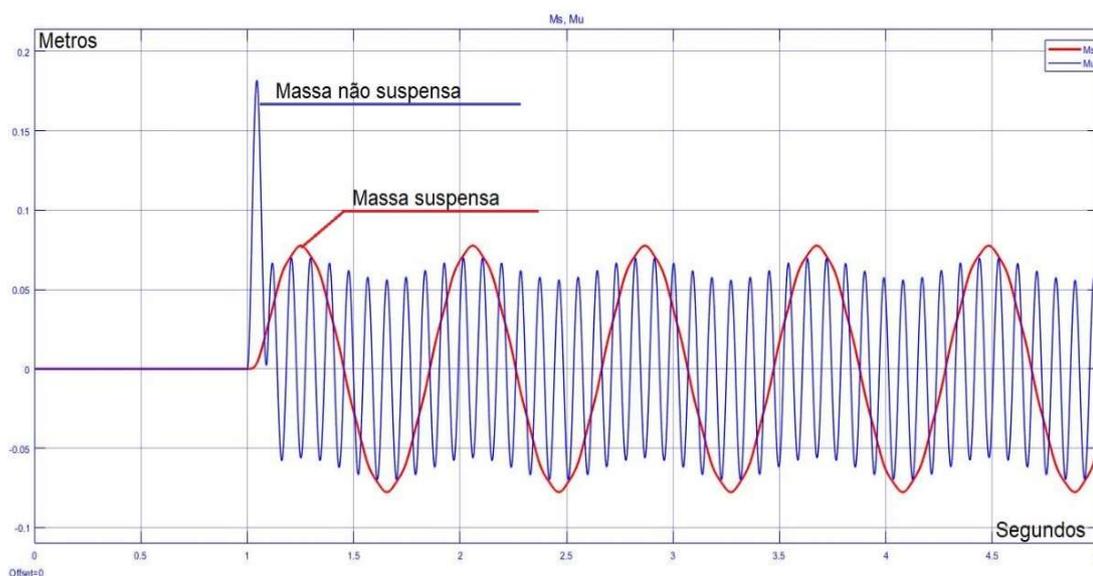
$K_t = 200000$ N/m Rigidez pneu

$C_s = 1000$ Ns/m constante de amortecimento

5.1 Resposta em conforto

Antes de iniciar as simulações, será mostrado graficamente a importância do amortecedor no sistema, utilizando valores reais de um veículo comum, sem a presença de um amortecedor.

Figura 36 - gráfico do sistema sem amortecedor

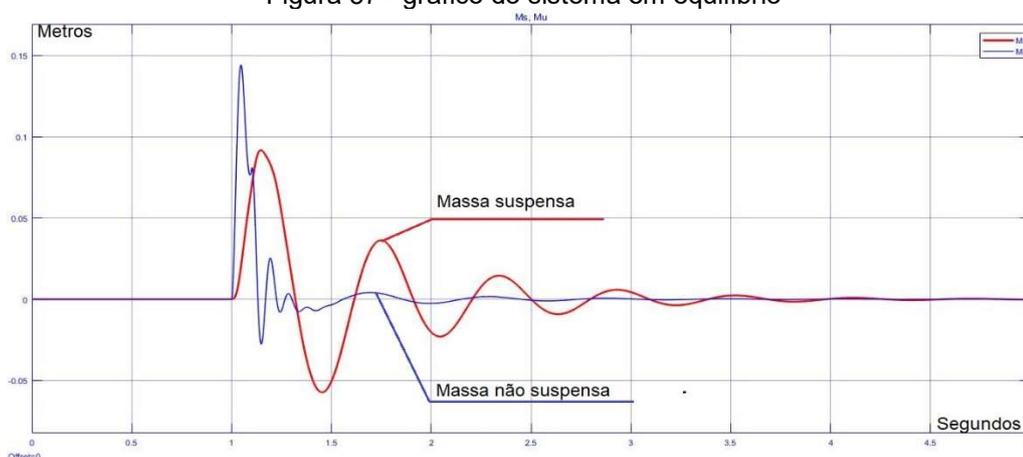


(próprio autor, Matlab)

Na figura 36 pode-se visualizar o que ocorre com sistema sem amortecimento. A mola vai oscilar durante longo período, e isso representa desconforto para os ocupantes do veículo e falta de estabilidade durante a condução.

Utilizando as grandezas e equações do capítulo anterior aplicados ao software, iniciamos a simulação, o primeiro valor de resposta simboliza o sistema em equilíbrio entre conforto e dirigibilidade, como em um veículo de passeio comum.

Figura 37 - gráfico do sistema em equilíbrio



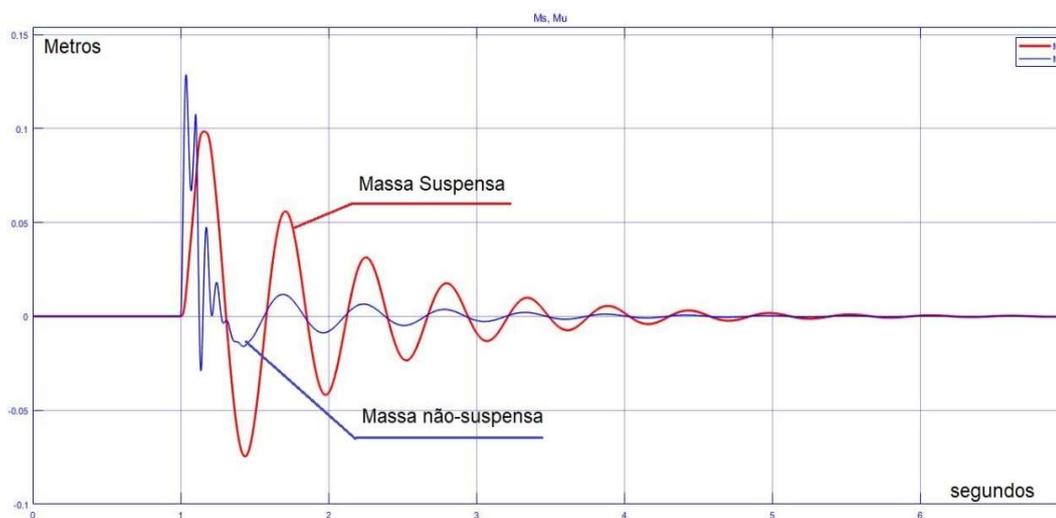
(próprio autor, Matlab)

O gráfico da figura 37 representa a resposta de Ms e Mu, nota-se a diferença de amplitude entre as duas massas e a diferença das oscilações, enquanto a Mu sofre impactos mais bruscos, garantindo o contato do pneu com o solo, a Ms trabalha de forma mais limpa, com oscilações controladas para garantir o conforto dos ocupantes.

5.2 Resposta em dirigibilidade

Ao se falar em dirigibilidade, pode-se fazer uma interligação com carros esportivos, que necessitam de um sistema de suspensão capaz de manter o contato do carro com o solo nas situações mais críticas, vamos simular esse tipo de comportamento através de um aumento na rigidez da mola, e isso fará com que todo sistema se altere. A primeira simulação consiste em aumentar a rigidez da mola para $K_s = 50000 \text{ N/m}$, que é um valor próximo ao utilizado por veículos esportivos, nesse primeiro caso não foi alterado o amortecimento, conforme figura 38.

Figura 38 – gráfico mola esportiva e amortecimento comum

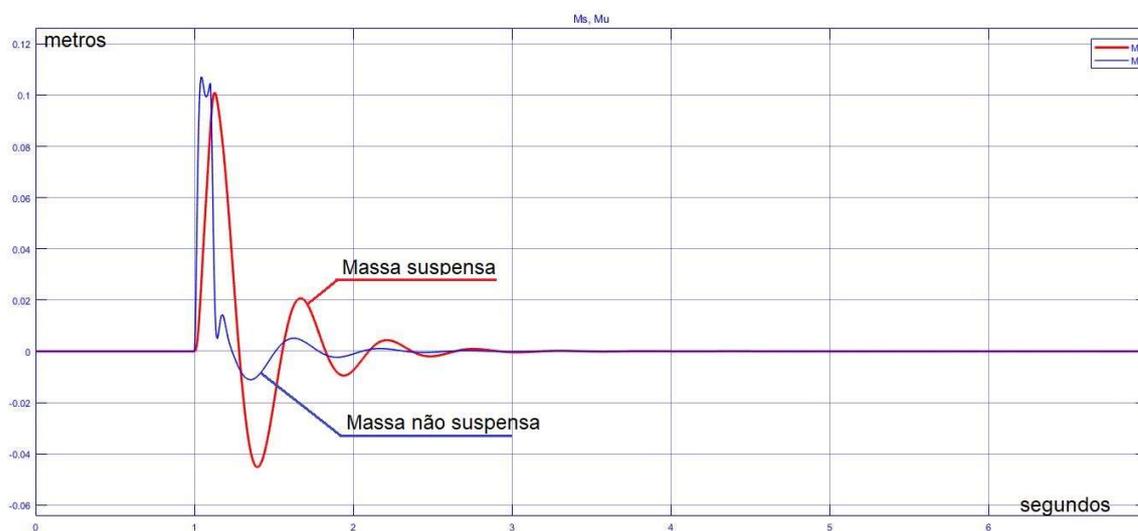


(próprio autor, Matlab)

Ao analisar o gráfico da figura 38 e comparar com o anterior, notamos uma diminuição na amplitude da Mu e um aumento no tempo necessário para que o sistema entre em equilíbrio, já na Ms notamos um aumento significativo na amplitude e no tempo, ou seja, só aumentar a rigidez da mola não trouxe bons resultados, pois o tempo para equilibrar o sistema e o movimento da Ms deixam o veículo em péssimas condições de condução.

Para corrigir esse problema, na simulação da figura 39 está sendo utilizado um valor de amortecimento de $C_s = 2600$ Ns/m, valor próximo dos utilizados por veículos esportivos.

Figura 39 – gráfico conjunto esportivo



(próprio autor, Matlab)

Inserindo o amortecimento “esportivo” nota-se claramente que as amplitudes estão bem próximas, o que mostra que o conforto já não é primordial, pode-se ver também que o tempo para equilibrar o sistema diminui, melhorando assim a dirigibilidade, pois a M_u estará sempre em contato com o solo, oscilando o mínimo possível.

5.3 Conclusão do Sistema Ativo

Através das simulações do sistema passivo abordados acima, identificamos a área de trabalho de um amortecedor ativo, pois, para manter o conforto e a dirigibilidade, os valores de amortecimento serão alterados em questão de milésimos de segundos para que o sistema trabalhe sempre na melhor condição possível, independente do tipo de uso do veículo, ou seja, ele é capaz de garantir conforto e dirigibilidade.

6 CONCLUSÃO

Realizando os testes com parâmetros configurados para conforto, conseguimos obter um mínimo contato com o solo necessário para que o veículo não perca totalmente sua dirigibilidade, e a carroceria do veículo se movimenta da forma mais suave possível. Entretanto, ao configurarmos os parâmetros na simulação para um comportamento de desempenho, ou seja, maior tempo de contato do pneu com o solo e melhores respostas dinâmicas oriundas de excitações externas, a carroceria passa a ter um comportamento mais hostil. Isso se dá pelo fator de que a taxa de amortecimento tem um valor maior em comparação à configuração da suspensão com maior foco em conforto, pois as acelerações geradas pelas forças provenientes de oscilações do solo são transmitidas para a carroceria com mais intensidade causando, assim, maiores acelerações à carroceria do veículo.

Os resultados dos estudos e dos testes mostram que em questão de dinâmica, desempenho, conforto, segurança e durabilidade, o sistema de suspensão ativa é superior ao convencional. Com o tempo esse sistema será mais aproveitado pelos veículos de rua e será aprimorado com avanços tecnológicos, ficando ainda mais preciso, confiável e acessível.

Por proporcionar mais conforto e segurança, o sistema de suspensão ativa também melhora o bem-estar, conseqüentemente melhora as condições de vida do homem, e isso fica mais evidente com uma pior qualidade de pavimento.

7 REFERÊNCIAS

Autor desconhecido. **Apostila de mecânica básica Centro de treinamentos de serviços.** Honda automóveis do Brasil Ltda. Ano desconhecido.

BALBINOT, Alexandre. **Caracterização dos Níveis de Vibração em Motoristas de Ônibus: um Enfoque no Conforto e na Saúde.** Tese de Doutorado – UFRS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

Barra Estabilizadora: O Que é? 2014. Disponível em: <autos.culturamix.com>. Acessado em Julho de 2018.

BOSCH, Robert G. **Manual de Tecnologia Automotiva.** Tradução da 25ª edição Alemã pela Editora Edgar Blücher Ltda, 2005.

CHABOT, Bob. **The Eyes Have It.** Motor magazine, 10 de outubro de 2013. Disponível em: <motor.com>. Acessado em Maio de 2018).

Cinco tipos de Suspensão mais Comuns. 28 de fev. 2018. Disponível em: <educacaoautomotiva.com>. Acessado em Maio de 2018.

Curso Mecânica Volkswagen para Amadores. Ed. 12/01. Volkswagen, 2002.

DIAS, Anderson. **Funcionamento e detalhes das molas de suspensão.** 06 de março de 2017. Disponível em: <carrosinfoco.com.br>. Acessado em Março de 2017.

DREHMER, L. R. C. **Otimização de Parâmetros Concentrados de Suspensão para Conforto e Segurança Veicular.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

Entenda a Ficha Técnica do seu veículo – Suspensão. Disponível em <circulaseguro.pt>. Acessado em agosto, 2015)

FREITAS, Luis M. Pereira. **Estudo da dinâmica vertical de uma suspensão veicular do tipo Mcpherson**. Dissertação (Mestrado) – USP – Universidade de São Paulo, 2006.

GANZAROLLI, Francisco. **Influência das Frequências de *Ride* no Conforto e Dirigibilidade Veiculares na Faixa Linear de Uso do Veículo**. Dissertação (Mestrado) – UFSCAR – Universidade Federal de São Carlos, 2012.

GILLESPIE, T. D. **Fundamental of Vehicles Dynamics**. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers, 1992.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de física**. 8ª ed. Rio de Janeiro, RJ, 2008.

HENRIQUE, Danilo. **Como Funcionam as Suspensões Eletrônicas**. Artigo Técnico, Fórmula UFSCAR – Universidade Federal de São Carlos, 05 de maio de 2018.

HOWARD, B. **Bose Sells Off Its Revolutionary Electromagnetic Suspension**. ExtremeTech. Disponível em <Bose.com>. Acessado em Maio de 2016.

IEZZO, Robson. **Desenvolvimento de um Sistema de Suspensão com Amortecimento Semi-ativo “Slow-active” com Custo Competitivo**. Dissertação (Mestrado) – FEM – Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas, 2010.

Já verificou o amortecedor do seu carro. Disponível em <jocar.com.br>. Acessado em julho de 2018.

MANASHKIN, L.; MYAMLIN, S.; PRIKHODKO, V. **Oscillation Dampers and Shock Absorbers in Railway Vehicles**. Dissertação – Universidade Nacional de Dnipropetrovsk de Ferrovia e Transporte, Ucrânia, 2009.

MARSH, J. **Hydropneumatique - Citroën Hydraulic System**. Artigo Técnico, Citroënët – Citroën, 1999.

MOURA, Exdras D. A. **Estudo de Suspensões Passiva, Semi-ativa MR e Ativa**. 2003.

PETER, H. **ABC Active Body Control / MBC Magic Body Control**.

Mercedes 500SEC. Disponível em <techcenter.mercedes-benz.com>. Acesso em Agosto de 2017 – Mercedes-benz, 2009.

Qual a diferença entre suspensão multilink e por eixo de torção. 13 de dez. 2016
Disponível em: <quatorrodas.abril.com.br>. Acessado em Dezembro de 2016.

RAJAMANI, Rajesh. **Vehicle Dynamics and Control. Mechanical Engineering Series**. Springer Science and Business Media B.V., Nova York, EUA, 2006.

RILL, Georg. **Vehicle Dynamics**. 2003

TIPLER, Paul A. **Física para Cientistas e Engenheiros**. 2012