



**Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Curso de Engenharia Automotiva**

**OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE UMA
SUSPENSÃO VEICULAR**

**Autor: Darlan Ferreira de Sousa
Orientador: Suzana Moreira Avila**

**Brasília, DF
2015**



Darlan Ferreira de Sousa

OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE UMA SUSPENSÃO VEICULAR

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Automotiva da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva.

Orientador: D.ra Suzana Moreira Avila.

**Brasília, DF
2015**

CIP – Catalogação Internacional da Publicação*

Sousa, Darlan.

Otimização dos parâmetros de uma suspensão veicular /
Darlan Ferreira de Sousa. Brasília: UnB, 2015.

Monografia (Graduação) – Universidade de Brasília
Faculdade do Gama, Brasília, 2015. Orientação: Suzana Avila
Moreira.

1. Palavra Chave. 2. Palavra chave. 3. Palavra chave3 I. Avila,
Suzana. II. Otimização dos parâmetros de uma suspensão
veicular.

CDU Classificação

- A ficha catalográfica oficial deverá ser solicitada à Biblioteca pelo aluno após a apresentação.



REGULAMENTO E NORMA PARA REDAÇÃO DE RELATÓRIOS DE PROJETOS DE GRADUAÇÃO FACULDADE DO GAMA - FGA

Darlan Ferreira de Sousa

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, em 03/11/2015 apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

Prof. D.ra: Suzana Moreira Avila, UnB/ FGA
Orientador

Prof. D.ra: Carla Mota Anflor, UnB/ FGA
Membro Convidado

Prof. D.ra: Maura Shzu, UnB/ FGA
Membro Convidado

Brasília, DF
2015

Esse trabalho é dedicado aos meus pais, meu irmão, minha namorada e principalmente meu sogro, que foi exemplo de perseverança e determinação.

RESUMO

A suspensão veicular é um sistema do veículo que está diretamente ligado ao conforto dos passageiros e a dirigibilidade do automóvel, ela é responsável pela transmissibilidade de vibrações para o chassi, essas vibrações são provenientes de irregularidades do terreno que muitas vezes podem causar problemas, como desconforto, perda de estabilidade e problemas de saúde bem como outros, para o motorista ou para o veículo, essas irregularidades nesse trabalho são simuladas através de funções pré-definidas. Esse trabalho visa o estudo da dinâmica vertical do veículo, por meio de um modelo de dois graus de liberdade, através das equações de movimento e das características do veículo, definindo alguns parâmetros iniciais, explorou-se o deslocamento correspondente à massa suspensa (carroceria). Analisou-se o comportamento do sistema, foi realizado um estudo paramétrico da suspensão em resposta a excitação degrau, e a fim de obter melhores resultados estuda-se uma proposta de otimização através de algoritmos genéticos (AG) ou enxame de partículas (PSO). O estudo visa um melhor desempenho da suspensão, escolhendo os melhores parâmetros para a suspensão de um veículo de passeio, proporcionando uma previsão do conforto da suspensão, auxiliando no seu projeto final.

Palavras-chave: Suspensão passiva, Otimização, Estudo Paramétrico, PSO, AG.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Configuração suspensão MacPherson, Fonte: Merling (2007).....	12
Figura 2. Mola semi-elíptica, Fonte: Manual Volkswagen (2007).....	13
Figura 3. Mola helicoidal, Fonte: Manual Volkswagen (2007).....	14
Figura 4. Análise mola helicoidal, Fonte: Shigley, (2011).....	15
Figura 5. Mola a ar ou pneumática, Fonte: Freitas, (2006).	16
Figura 6. Tipos de amortecedores telescópicos, Fonte: Gillespie, (1992).....	17
Figura 7. Esquemático funcionamento amortecedor hidráulico, Fonte: Rodrigues adaptada, (2005).....	18
Figura 8. Efeito do amortecimento na suspensão. Fonte: Gillespie, (1992).....	19
Figura 9. Sistema mecânico e vibrações verticais que afetam o corpo humano, Fonte: Ganzarolli, 2012.	20
Figura 10. Avaliação de conforto e estabilidade das molas, Fonte: Ganzarolli, (2012).	21
Figura 11. Problema clássico de otimização, Fonte: Castro, (2001).	23
Figura 12. Iteração Algoritmo Genético Típico, Fonte: Silva (2001).	26
Figura 13. Topologia da interação das partículas em PSO. Fonte: Modificada - Mello, (2012).....	27
Figura 14. Esquemático de uma suspensão, Fonte: Klava, (2003).	29
Figura 15. Modelo de 1/4 de veículo. Fonte: Ogata, (1998).....	31
Figura 16. Função Degrau.	32
Figura 17. Comparação da resposta da função de transferência e espaço de estados.	33
Figura 18. Análise Rigidez da Mola.	34
Figura 19. Análise Coeficiente de Amortecimento.	35
Figura 20. Estudo Paramétrico vista 1.	36
Figura 21. Estudo Paramétrico vista 2.	36
Figura 22. Estudo Paramétrico vista 3.	37
Figura 23. Estudo Paramétrico vista 4.	37

SUMÁRIO

RESUMO	5
LISTA DE FIGURAS	7
1. INTRODUÇÃO	9
2. REVISÃO TEÓRICA	10
2.1. SUSPENSÃO.....	10
2.2. MOLAS.....	12
2.3. AMORTECEDORES.....	16
2.4. PNEUS.....	19
2.5. CONFORTO EM SUSPENSÃO AUTOMOTIVA.....	20
2.6. OTIMIZAÇÃO.....	22
2.6.1. Algoritmos Genéticos	24
2.6.2. Otimização por Enxame de Partículas (PSO).....	26
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	28
4. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA	30
5. RESULTADOS PRELIMINARES	33
6. CONCLUSÕES PRELIMINARES	37
7. TRABALHOS FUTUROS	38
8. CRONOGRAMA DE TRABALHO	38
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38

1. INTRODUÇÃO

O setor automotivo vem sofrendo muitas modificações ao longo dos anos, devido a alguns fatores como os avanços tecnológicos e a concorrência do mercado, novos materiais vêm sendo desenvolvidos e novos projetos ganhando vida. A suspensão automotiva é um sistema do veículo que oferece um conjunto de problemas que ainda necessitam de estudos dos modelos matemáticos, análises numéricas e processos de otimização (Drehmer, 2012).

O sistema de suspensão automotiva possui alguns fatores que devemos considerar no seu estudo, quando o automóvel percorre um terreno irregular, essas trepidações são transmitidas para os ocupantes do veículo. Essas vibrações transmitidas pelo assento podem causar o desconforto dos passageiros e também danos que geralmente se concentram na região lombar, no quadril e no sistema digestivo. Outro fato importante relacionado a vibrações prolongadas do veículo é que elas podem contribuir para reduzir a vida útil dos componentes mecânicos, pois os mesmos podem sofrer o efeito da fadiga comprometendo a segurança do veículo, além de afetar a dirigibilidade e o comportamento do veículo em curvas por exemplo.

Muitos modelos veiculares são estudados e desenvolvidos para a análise numérica da suspensão, um deles é o modelo de um quarto de veículo, que simula a dinâmica vertical de um conjunto massa, mola e amortecedor, com dois graus de liberdade, esse modelo é capaz de representar o movimento dinâmico da suspensão, e também permite um estudo para a escolha dos parâmetros ideais para minimizar o desconforto dos passageiros. Esse estudo pode ser complementado por uma otimização desses parâmetros com o objetivo de obter melhores resultados. Entre diversos algoritmos de otimização nota-se a partir da análise de estudos na mesma área que, os algoritmos genéticos e o enxame de partículas se tornam interessantes para analisar a viabilidade da aplicação nesse sistema. A pista é a fonte de excitação do sistema estudado, e os parâmetros da suspensão são as variáveis a serem otimizadas pelo trabalho.

A justificativa desse estudo se firma na necessidade de entender e aprofundar a aplicação de algoritmos na otimização dos parâmetros da suspensão, a fim de melhorar o desempenho dos veículos de passeio, maximizando o conforto dos passageiros. A análise numérica do modelo de um quarto de veículo é um bom início para esse estudo, podemos analisar a resposta dinâmica devido a diversas excitações e propor uma melhora no comportamento desse sistema. Estudar esse tema então é justificado para inserir os resultados na indústria para auxílio de novos projetos visando minimizar os efeitos negativos das vibrações ao conforto e saúde humana, a segurança dos veículos e visa também uma demonstração do comportamento da suspensão auxiliando nas validações e análises de outros modelos do projeto.

O objetivo geral do trabalho é determinar os melhores parâmetros de uma suspensão automotiva passiva, com o objetivo de maximizar o conforto dos passageiros e minimizar os efeitos da vibração a saúde humana e aos componentes mecânicos, um modelo de um quarto de veículo é submetido a um perfil de irregularidades provenientes da pista, e analisa-se o desempenho dinâmico vertical do mesmo. Esse objetivo se divide nos seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver um modelo analítico e numérico capaz de representar (de dois graus de liberdade) um conjunto de roda, mola, amortecedor e um quarto da carroceria.
- Validar esse modelo através da análise por dois métodos diferentes (espaço de estados e função de transferência).

- Analisar o deslocamento da massa suspensa do veículo devido às excitações provenientes dos perfis de pista.
- Analisar a aceleração rms devido às excitações provenientes dos perfis de pista.
- Realizar um estudo paramétrico para propor parâmetros da suspensão visando o conforto dos passageiros.
- Propor um algoritmo de otimização utilizando uma das técnicas descritas no trabalho (Algoritmo Genético e Enxame de Partículas) a fim de obter parâmetros da suspensão que maximizem o conforto dos passageiros.
- Comparar os resultados obtidos no estudo paramétrico e no algoritmo de otimização.

2. REVISÃO TEÓRICA

2.1. SUSPENSÃO

A palavra suspensão é definida segundo Almeida, (2007) como o conjunto de componentes que conectam as rodas ao chassi do veículo. Um sistema de suspensão possui diversas funções primárias definidas por Gillespie, (1992) como, por exemplo:

- ✓ Fornecer resistência vertical de modo que as rodas possam seguir terrenos irregulares sem transmitir as vibrações para o chassi;
- ✓ Manter as rodas na direção e ângulo adequado de acordo com a superfície do terreno;
- ✓ Reagir às forças produzidas pelo pneu, mantendo o contato do pneu ao solo;
- ✓ Resistir aos carregamentos laterais do chassi;
- ✓ Suportar o peso estático do veículo;
- ✓ Acomodar o menor espaço de trabalho possível, garantindo conforto e estabilidade aos passageiros do veículo.

Analisando os conceitos pode-se definir que a suspensão atua como um filtro mecânico que através do comportamento dos seus componentes, atenua os efeitos de perturbação provocados pelo terreno.

Normalmente o projeto de suspensão é dividido em três categorias de acordo com seu princípio de funcionamento:

- ✓ Suspensão passiva, suspensões convencionais cujos parâmetros de rigidez e amortecimento não podem ser modificados em tempo real, ela é descrita a seguir com mais detalhes;
- ✓ Suspensão ativa - possui um atuador entre a massa suspensa e a massa não suspensa além da mola e do amortecedor, ou em substituição aos mesmos, esses atuadores são capazes de produzir uma força adequada a partir de algoritmos de controle específicos necessária em cada situação operante;
- ✓ Suspensão semi-ativa - possui amortecedores com parâmetros variáveis, capazes de variar as características de amortecimento de acordo com o terreno, são chamadas passivas controláveis.
- ✓ Suspensão Bose – motores eletromagnéticos são instalados na suspensão, um para cada roda. Eles possuem características lineares e são controlados através de algoritmos de controle apropriados.

A suspensão passiva, a configuração mais clássica e convencional, segundo Pereira (2013), é composta por três principais componentes que trabalham em conjunto para proporcionar a atenuação das vibrações.

- Um elemento elástico (usualmente molas helicoidais), o elemento que suporta a massa do veículo e também contribui com uma força oposta ao deslocamento vertical da suspensão.
- Um elemento dissipador de energia (amortecedor hidráulico telescópico, absorvedor de choques), que possui a função de dissipar a energia provocada pela velocidade do deslocamento vertical da suspensão, e estabilizar o mesmo.
- Um elemento viscoelástico responsável pelo atrito com o solo (pneu). Esses componentes serão detalhados em tópicos individuais no decorrer do estudo.

Um exemplo de suspensão passiva é a suspensão MacPherson, um dos sistemas mais utilizados na indústria para o eixo dianteiro. As principais vantagens de sua aplicação segundo Gillespie (1992) são:

- ✓ A pequena quantidade de componentes no sistema e a boa distribuição de carga da suspensão;
- ✓ A facilidade de montagem e a economia de espaço utilizado pelo sistema quando o motor possui a configuração transversal;
- ✓ Simplicidade para produzir e dar manutenção nos componentes;
- ✓ Uma boa resposta ao uso urbano.

A ancoragem dos componentes é feita através da manga de eixo, que está conectada a roda e ao suporte inferior do amortecedor, o amortecedor por sua vez, que é responsável pela dissipação de energia do sistema, é acoplado ao chassi por meio de uma bucha de borracha com rolamento. Usa-se uma mola helicoidal que encaixa nos pratos de fixação da mesma, envolvendo o amortecedor de forma que o percurso dos dois componentes seja semelhante. A parte inferior do sistema é acoplada a bandeja que é ligada a carroceria (Merling, 2007). Um diagrama esquemático da montagem deste tipo de sistema pode ser observado na Figura 1.

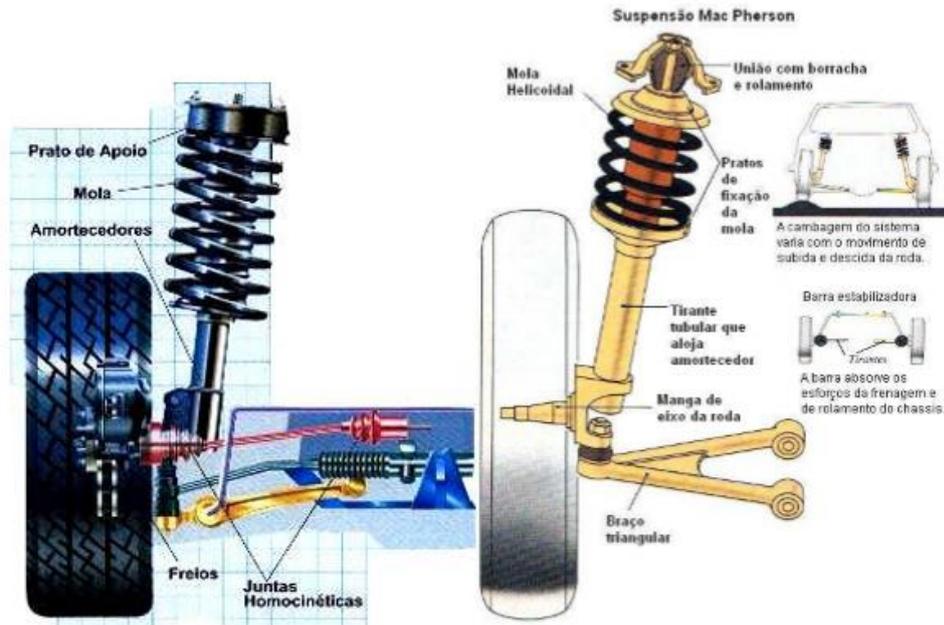


Figura 1. Configuração suspensão MacPherson, Fonte: Merling (2007).

O projeto da suspensão gira em torno de dois objetivos principais, conforto e estabilidade. A suspensão deve ser macia o suficiente para garantir conforto aos passageiros, reduzindo a aceleração sobre a carroceria devido às irregularidades do terreno, e rígida o bastante para assegurar o contato contínuo da roda ao terreno, aumentando a estabilidade. É difícil conseguir um equilíbrio entre esses dois parâmetros, pois eles são conflitantes (Merling, 2007).

Analisando o comportamento da mola, pode-se perceber que as molas de baixa rigidez são melhores para isolar as vibrações do veículo e como consequência proporciona maior conforto, mas quanto à dirigibilidade uma mola mais rígida obtém melhores resultados (Pereira, 2013).

A frequência natural do sistema é a tendência natural que o corpo tem a vibrar, de acordo com a sua massa e rigidez, a redução da amplitude de vibração quando o sistema está perto de sua frequência natural é obtida através da alta razão de amortecimento, já em altas frequências prefere-se uma baixa razão de amortecimento. Para obter uma boa dirigibilidade em alta frequência, necessita de uma alta razão de amortecimento, isso se deve ao fato do comportamento do gráfico da transmissibilidade e do fator de frequência, esse ponto será mais bem explicado no tópico de amortecedores (Pereira, 2013).

Quando um fator é priorizado, sacrifica-se o outro, então para uma boa configuração da suspensão é necessário um estudo de caso quanto às necessidades do projeto e aplicações do mesmo, analisando dinamicamente quanto ao perfil de pista característico que o veículo é submetido, bem como o perfil do comportamento do carro (Merling, 2007). É necessário balancear os parâmetros da suspensão para obter resultados satisfatórios.

2.2. MOLAS

Um elemento mecânico, de material metálico ou não, pode ser considerado uma mola, mas com uma premissa, todos esses elementos devem possuir alguma elasticidade e responder elasticamente em algum intervalo de tempo quando solicitado. A resposta elástica depende das propriedades do material que o elemento

é fabricado (Santos, 2001). A função da mola dentro do sistema automotivo é armazenar a energia mecânica que se origina da excitação induzida ao veículo pelas irregularidades do terreno.

Segundo Paula, (2013) os materiais usados para a fabricação de molas de suspensão devem apresentar as seguintes características:

- ✓ Alto limite de tensão de escoamento, para suportar as solicitações de carga do projeto sem chegar à faixa de deformação permanente.
- ✓ Resistência à fadiga, pois um dos grandes problemas na indústria automobilística é a falha das molas por fadiga e rompimento em algum concentrador de tensão do projeto, destaca-se que o concentrador de tensão é o ponto crítico do projeto, onde as tensões nesse ponto são elevadas, um exemplo de local crítico é em descontinuidades geométricas.
- ✓ Resistência ao choque;
- ✓ Baixo módulo de elasticidade, gerando deformações elásticas.

Existem molas em vários formatos e tipos de aplicação, mas segundo Freitas (2006) as molas usadas na aplicação automotiva são divididas em:

- ✓ Semi-elípticas (feixe de molas);
- ✓ Helicoidais;
- ✓ Pneumáticas.

Entre essas a helicoidal é a mais utilizada. Elas são acopladas aos amortecedores de carros de passeio, em veículos ferroviários, em suportes de máquinas, entre diversas outras aplicações.

As molas semi-elípticas convencionais são constituídas por lâminas de material rígido, são sobrepostas como se pode observar na Figura 2.

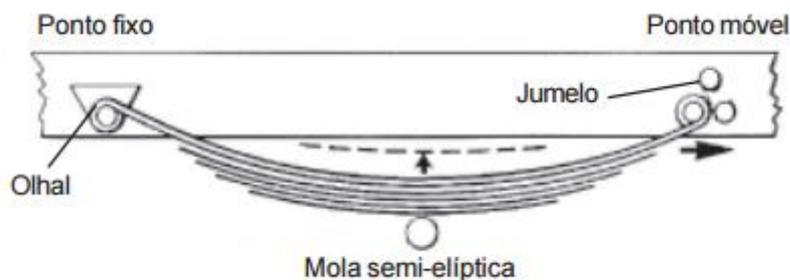


Figura 2. Mola semi-elíptica, Fonte: Manual Volkswagen (2007).

A alta rigidez dos componentes resulta em uma alta transmissibilidade de vibrações, devido à histerese. Esse fenômeno ocorre quando ela é submetida a oscilações de pequena amplitude e alta frequência, afetando diretamente o conforto dos passageiros (Freitas, 2006). Segundo Gillespie (1992) outra característica dessas molas é a diminuição da rigidez sob carga lateral, esse fato causa menor estabilidade lateral.

O grande desafio do projeto das molas semi-elípticas é o menor atrito entre os componentes, diminuindo esse efeito da histerese. Para suprir essa necessidade, foram criadas as molas com pastilhas redutoras de atrito entre as lâminas e molas do tipo parabólica, que devido ao seu projeto, diminui o número de lâminas e conseqüentemente o atrito interno dessas lâminas.

As molas helicoidais, o foco desse estudo, são fabricadas enrolando-se um fio de arame no formato helicoidal, elas apresentam seção transversal circular, conforme a Figura 3. Na aplicação automotiva utilizam-se molas de compressão, e quando o veículo é carregado ocorre à diminuição da altura do veículo. Uma das vantagens da aplicação dessa mola é o baixo custo, e elas também possuem histerese desprezível, ou seja, a perda de energia durante um ciclo de deformação e recuperação do material é desprezível. A desvantagem da utilização dessa mola é porque ela necessita de um grande espaço no curso da suspensão para ser instalada, dificultando a manutenção em alguns projetos (Freitas, 2006).



Figura 3. Mola helicoidal, Fonte: Manual Volkswagen (2007).

As propriedades da mola estão diretamente ligadas às propriedades mecânicas do fio usado para fabricação, assim como o número de espiras ativas que também influencia no comportamento do componente. A curva de rigidez característica de uma mola helicoidal é definida pela Lei de Hooke: “As forças deformantes são proporcionais às deformações elásticas produzidas” (Gillespie, 1992). Gerando a seguinte relação:

$$F = ks \cdot x$$

Onde ‘F’ é a força resultante devido a uma componente torcional e uma componente de cisalhamento, x é o deslocamento resultante da mola. Segundo Shigley, (2011) podem-se obter facilmente as relações de deflexão-força através da análise do teorema de Castigliano, que afirma que a energia total de deformação para uma mola helicoidal é composta das duas componentes da força resultante, a torcional e a de cisalhamento. Aplicando o teorema consegue-se definir a constante ks da mola, ou seja, a relação da força resultante e deslocamento da mola (x), $ks = \frac{F}{x}$:

$$ks = \frac{d^4 G}{8D^3 N a}$$

Onde d corresponde ao diâmetro do fio usado na fabricação da mola, D corresponde ao diâmetro externo da espira ao centro da mola, G é definido pelo módulo de cisalhamento, fator característico do material utilizado para a fabricação e

Na é o número de espiras ativas, ou seja, espiras solicitadas no projeto que varia de acordo com o projeto das extremidades da mola, a Figura 4 ilustra os parâmetros geométricos da mola.

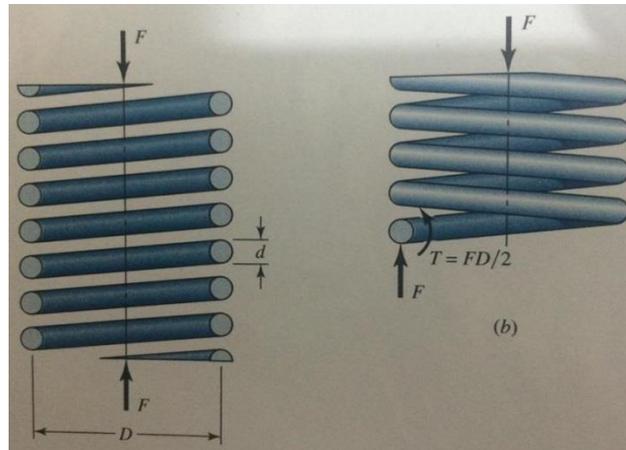


Figura 4. Análise mola helicoidal, Fonte: Shigley, (2011).

A análise da relação dos parâmetros que constitui a constante da mola auxilia na tomada de decisão do projeto de construção da mesma. Como as molas automotivas geralmente falham por fadiga em algum concentrador de tensão, entender a relação da origem da constante da mola, um dos parâmetros que será analisado na simulação numérica desse estudo, é interessante visto que, quando analisar numericamente a influência desse fator de rigidez no comportamento da suspensão, se necessário fazer ajustes nesse parâmetro, precisa levar em conta as constantes que definem a propriedade da mola, pois elas vão influenciar diretamente no comportamento da mesma.

As molas pneumáticas possuem a configuração que oferece melhores características dinâmicas quando solicitada por diversas cargas. Quando associada a um sistema de controle, que ajusta a altura da suspensão detêm respostas dinâmicas e de conforto melhores que as molas helicoidais. São empregadas geralmente em veículos que necessitam manter a sua altura constante, ônibus e alguns veículos de carga, SUV's com sistemas de controle eletrônico (Freitas, 2006). Uma desvantagem dessa mola é o alto custo para manutenção, visto que geralmente ela está associada a um sistema de controle eletrônico, e também o alto risco de perda de estabilidade quando ocorre uma falha no sistema.

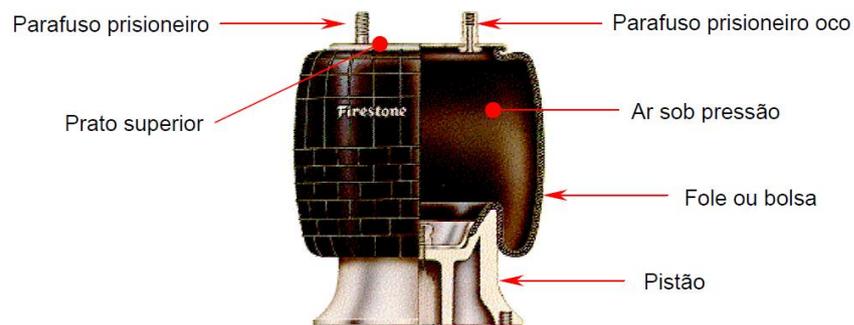


Figura 5. Mola a ar ou pneumática, Fonte: Freitas, (2006).

2.3. AMORTECEDORES

Os amortecedores empregados na indústria automotiva possuem principalmente duas funções, a primeira é dissipar a energia proveniente dos movimentos verticais devido à excitação do solo, que são induzidos pelas molas, depois da excitação inicial de um obstáculo da pista. A outra função é diminuir a amplitude das vibrações causadas pela interação da suspensão com o terreno, isso acontece porque o amortecedor é capaz de transformar a energia cinética proveniente da excitação em calor, ou seja, o fluido hidráulico é responsável por dissipar a energia (Rodrigues, 2005).

Os amortecedores hidráulicos com elementos fluídicos usados na indústria automotiva são basicamente de dois tipos, o amortecedor com alavanca e o telescópico, sendo esse último o mais utilizado. Como atualmente os mais comuns são os telescópicos, o foco será neles. Eles são divididos em dois tipos segundo a acomodação do volume inserido na haste, o de tubo simples e o de tubo duplo, cada um tem suas próprias vantagens, mas o funcionamento deles é similar (Gillespie, 1992).

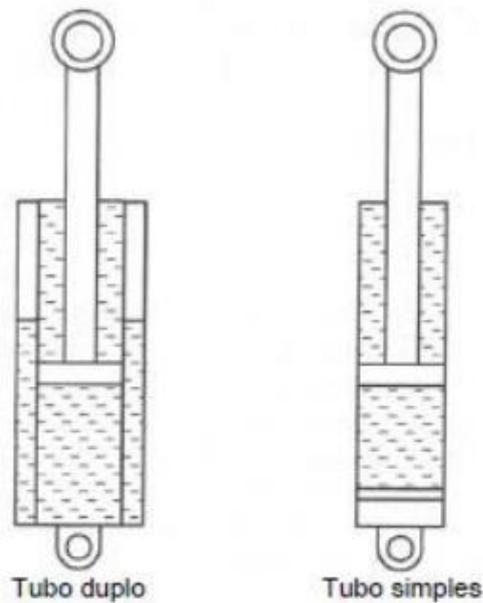


Figura 6. Tipos de amortecedores telescópicos, Fonte: Gillespie, (1992).

Quando é submetido à compressão e extensão, o pistão se move e o fluido passa dentro de pequenos orifícios localizados na parte inferior do pistão, as válvulas do pistão restringem o fluxo do fluido, e a energia absorvida pelo fluido é convertida em calor e então dissipada, pelo ar que passa na suspensão ou pelo efeito de condução por estar acoplado à suspensão. O volume e viscosidade do fluido estão diretamente relacionados com a quantidade de energia absorvida e dissipada pelo amortecedor (Rodrigues, 2005). Essa relação determina a força de amortecimento criada pelo pistão, caracterizando o coeficiente de amortecimento (C_s) de cada amortecedor.

No caso do amortecedor de tubo duplo, uma restrição adicional de válvulas na base do tubo pode ser usada para ajustar o comportamento do coeficiente de amortecimento. Vale ressaltar que o amortecedor de tubo duplo pode conter gás em baixa pressão em vez de ar para ajudar no amortecimento e no comportamento do amortecedor. Já o amortecedor de tubo simples ou monotubo, possui em um extremo uma pequena quantidade de gás sob alta pressão, quando a haste do pistão desloca o óleo durante a compressão, este comprime o gás, e o gás por sua vez sofre variações de volume, atuando como uma mola para o amortecedor (Gillespie, 1992).

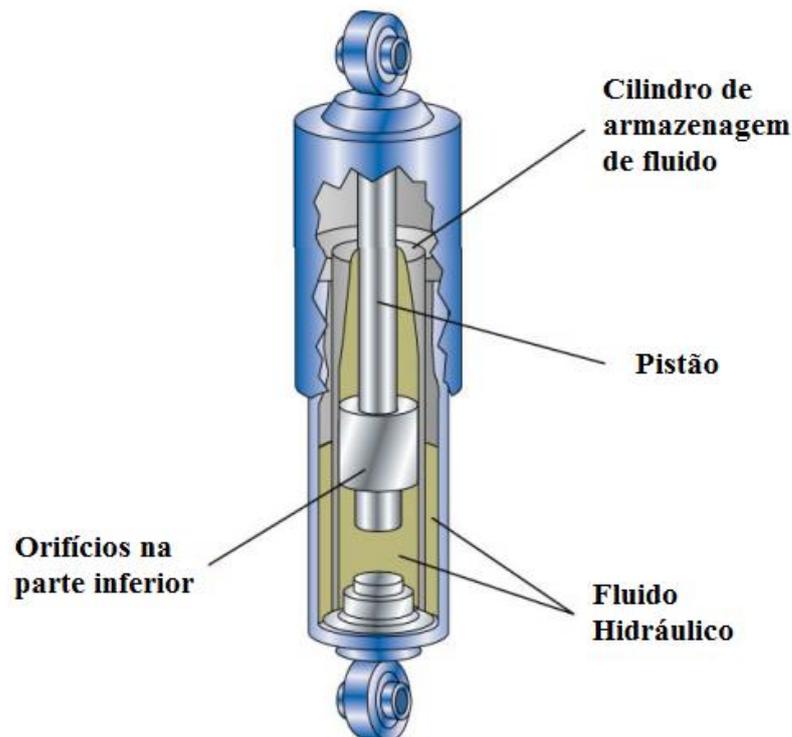


Figura 7. Esquemático funcionamento amortecedor hidráulico, Fonte: Rodrigues adaptada, (2005).

Segundo Gillespie, (1992) uma análise pertinente para a escolha do coeficiente de amortecimento é identificar qual a frequência natural do sistema, no caso analisa-se a massa suspensa do veículo, ou seja, o foco é na vibração da carroceria, ponto de maior transmissibilidade para os ocupantes.

A razão de amortecimento ou “*damping ratio*” é um coeficiente que influencia no ganho de resposta da suspensão quando é excitado por uma faixa de frequência, é definido segundo Gillespie, (1992) por:

$$\zeta_s = \frac{bs}{\sqrt{4 ks \cdot Ms}}$$

O parâmetro bs é o coeficiente de amortecimento explicado anteriormente, ks é a constante de rigidez da mola definida no tópico de molas e Ms é massa suspensa do veículo dada em quilos, ou seja, da carroceria do veículo analisado.

Analisando a Figura 8, observa-se que para baixas frequências (1 Hz) a massa suspensa amplifica as ondulações do terreno, por isso é recomendável razão de amortecimento maior, já para altas frequências essa razão de amortecimento obtém uma boa resposta. Razões de amortecimento maiores obtém melhores resultados em baixas frequências, mas também amplificam a vibração em frequências mais altas. A maioria dos veículos segundo Gillespie, (1992) utilizam razões de amortecimento em torno de 40%, região que obtém uma resposta aceitável a baixa frequência e obtém bons resultados a alta frequência.

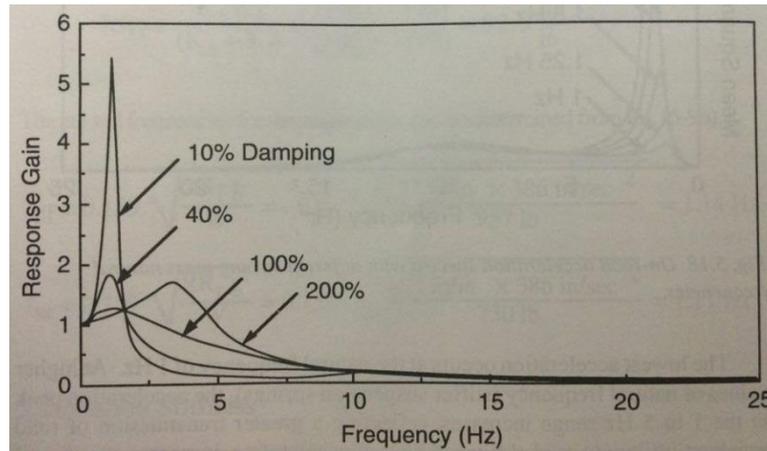


Figura 8. Efeito do amortecimento na suspensão. Fonte: Gillespie, (1992).

2.4. PNEUS

O pneu outro componente importante na análise de uma suspensão é responsável pelo contato com o solo, a maioria das forças resultantes analisadas no veículo possui sua origem na interação pneu solo. Como o atrito produzido pela interação do pneu com a pista depende das características dele, o projeto de uma suspensão veicular devem começar definindo quais as características do terreno que o automóvel vai ser utilizado, quais circunstâncias ele vai trabalhar, a quantidade de carga destinada ao veículo, entre outros fatores, para a escolha efetiva de um pneu para o projeto.

Segundo Merling, (2007) um pneu pode ser definido por um elemento não rígido, composto de varias camadas de borracha associadas a cordões de aço e lonas esticadas, o resultado é um componente flexível resistente à tração e suficientemente rígido para aguentar o acoplamento com as rodas, promovendo a vedação necessária para aplicar a calibragem de trabalho do mesmo.

Gillespie, (1992) ainda fala que as principais funções do pneu são:

- ✓ Suportar as cargas verticais do veículo, quando a suspensão recebe algum choque proveniente do terreno.
- ✓ Desenvolver as forças laterais ligadas à dirigibilidade e estabilidade.
- ✓ Desenvolver também as forças de frenagem e aceleração do veículo.

Existem dois principais tipos de pneus, os pneus radiais e os diagonais. Hoje em dia os pneus radiais são os mais utilizados, devido ao seu comportamento uniforme em toda a banda de rodagem, resistência às cargas e melhor dirigibilidade e estabilidade. Eles são pneus usados sem câmara de ar e suas lonas são dispostas em paralelo.

Na análise numérica da suspensão define-se que a contribuição de rigidez do pneu é determinada através de uma constante (kt), ou seja, ele é representado por uma mola simples, não considerando o amortecimento inerente a propriedade visco-elástica do pneu. Essa propriedade está associada à rigidez resultante do pneu, devido à interação de seus componentes.

2.5. CONFORTO EM SUSPENSÃO AUTOMOTIVA

A descrição de conforto em um projeto de suspensão é relativamente subjetiva, uma vez que esse parâmetro é definido pela interação dos passageiros com o veículo e o terreno. Segundo Merling, (2007) para fins de pesquisa o conforto possui relação com a massa suspensa, ou seja, com a carroceria do veículo e com seu ambiente interno. Já a dirigibilidade relaciona-se com o perfil da pista e a massa não suspensa.

As vibrações geradas nos automóveis são provenientes de vários subsistemas acoplados ao veículo, como motor, suspensão, chassi, transmissão, frenagem, dentre outros caracterizando um problema que não depende somente da interação de um corpo, porém os mais representativos em um automóvel de passeio acabam sendo as molas e os amortecedores, pois eles ficam responsáveis pelo controle da transmissão de vibração ao veículo.

Segundo Ganzarolli, 2012 o corpo humano pode ser definido como um sistema massa mola amortecedor, onde as vibrações originadas no veículo excitam diretamente uma determinada parte do corpo, causando como consequência desconforto ou até mesmo fadiga. A Figura 9 mostra a associação das frequências ao desconforto humano.

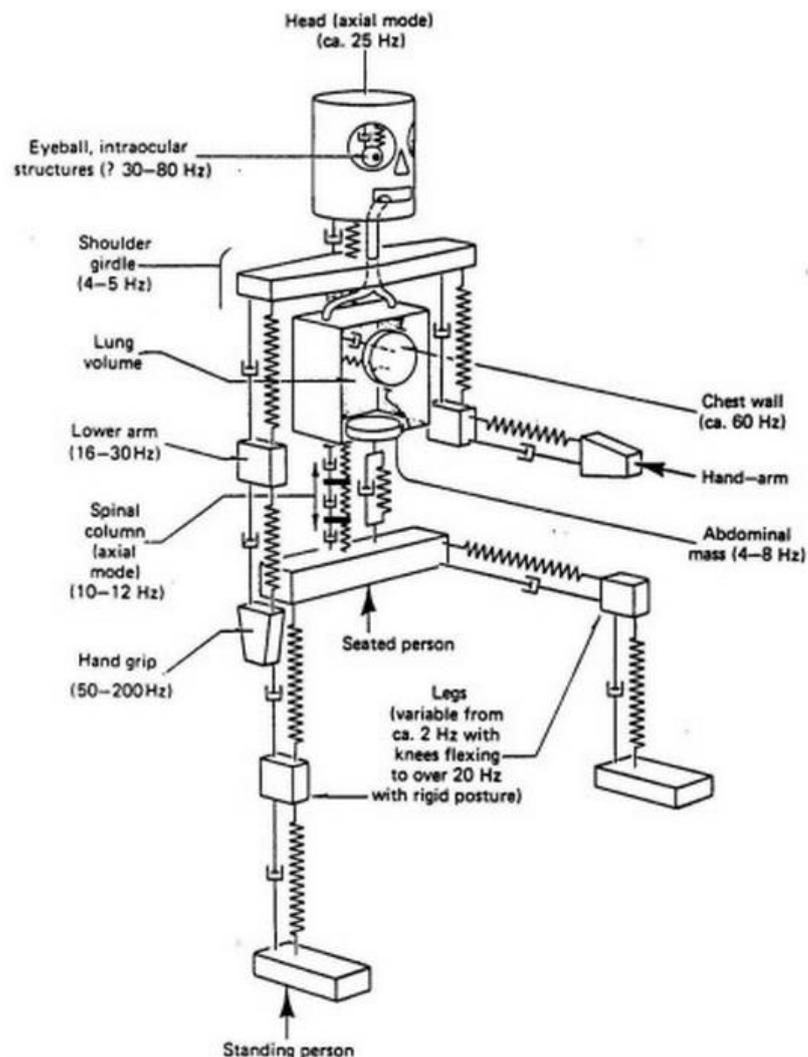


Figura 9. Sistema mecânico e vibrações verticais que afetam o corpo humano, Fonte: Ganzarolli, 2012.

O autor ainda mostra um estudo em uma análise subjetiva relacionando à percepção de conforto e estabilidade de duas configurações de molas diferentes, uma mola para conforto, com a frequência natural de 1 Hz, e outra mola para estabilidade com a frequência natural de 1,5 Hz. Analisando a Figura 10 percebe-se que existe uma faixa da frequência natural da mola que maximiza o conforto (relacionado com a aceleração vertical) e outra que maximiza a estabilidade (relacionado com a estabilidade da carroceria), esse estudo confirma o fato mencionado no item da suspensão, que os dois fatores são conflitantes.

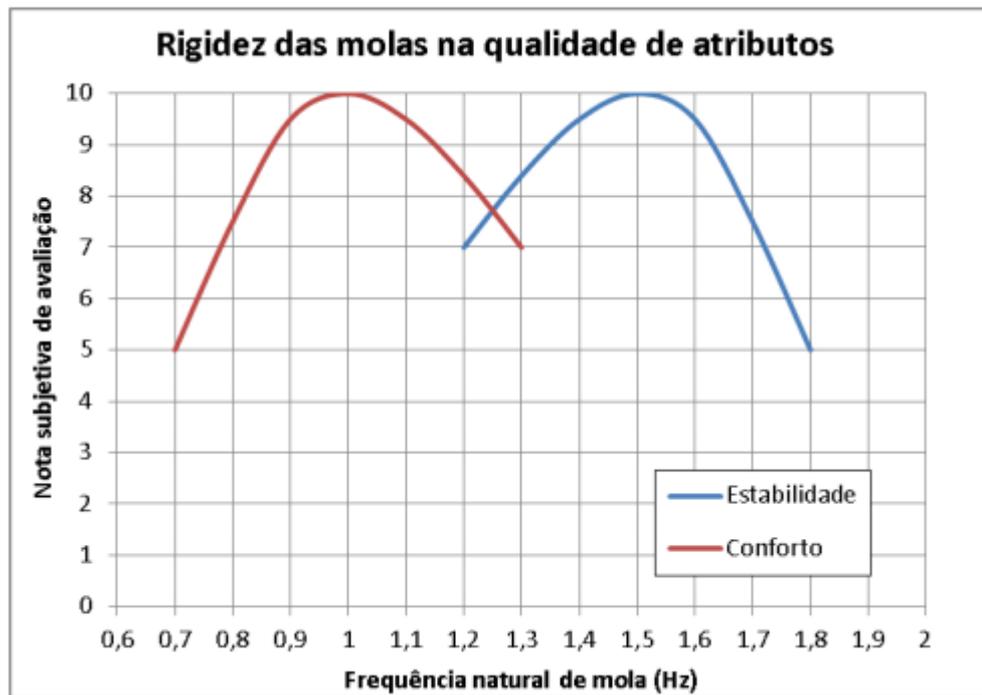


Figura 10. Avaliação de conforto e estabilidade das molas, Fonte: Ganzarolli, (2012).

Segundo Drehmer, (2012) a aceleração vertical e deslocamento vertical da massa suspensa são dois fatores provenientes da interação do veículo com os perfis de pista e estão diretamente relacionados com a percepção de conforto do passageiro, esses fatores são quantificados e usados pelas normas como um indicador de conforto. A norma britânica BS 6841 de 1987, por exemplo, utiliza critérios numéricos de aceleração vertical rms para definir uma escala de conforto, a Tabela 1 mostra essa relação.

Tabela 1 – Parâmetros de conforto de acordo com a norma europeia.

Índice de Desconforto	Escala
Menor do que 0,315 m/s ²	Confortável
Entre 0,315 m/s ² a 0,63 m/s ²	Levemente confortável
Entre 0,5 m/s ² a 1,0 m/s ²	Pouco confortável
Entre 0,8 m/s ² a 1,6 m/s ²	Desconfortável
Entre 1,25 m/s ² a 2,5 m/s ²	Muito desconfortável
Maior do que 2,5 m/s ²	Extremamente desconfortável

Fonte: BS 6841 (1987, p. 21, adaptado).

2.6. OTIMIZAÇÃO

O conceito de otimização de um determinado problema está associado ao modo de sua realização, para que aconteça de forma mais eficiente possível. O processo de otimização está associado à minimização ou maximização de alguma grandeza, como um parâmetro de projeto, ou a distribuição de massa em uma determinada viga, por exemplo, dependendo da necessidade do estudo (Castro, 2001). Então essa ciência está sempre em demanda, pois está diretamente dependente do capital investido e do tempo disponível para execução. Esse estudo é aplicado em diversos campos como: engenharia mecânica, civil, eletrônica, química, aeronáutica, automotiva, etc.

Na engenharia automotiva esse estudo vem sendo aplicado em diversas áreas como na otimização estrutural do chassi e carroceria, otimização do controle dos sistemas eletrônicos do veículo, bem como na otimização dos parâmetros da suspensão, tema desse estudo.

Quando se necessita otimizar um problema, primeiro define-se uma função objetivo que precisa ser minimizada ou maximizada sujeita a restrições de projeto. De acordo com as características do problema matemático aplica-se um algoritmo de otimização que vai trabalhar na busca de uma solução ótima para o problema, ou seja, ele vai buscar dentro das restrições do trabalho uma combinação das variáveis que resultará no melhor desempenho do projeto.

Segundo Silva, (2001) o termo otimização é corretamente utilizado quando se utiliza um método matemático para convergir para a solução ótima e não simplesmente aplicando os parâmetros empiricamente e verificando os resultados do projeto baseados na tentativa e erro. Quando se obtém resultados através da tentativa e erro, pode ser que uma melhora no desempenho seja observada, mas isso fere o conceito da ciência, que define que o resultado seja da maneira mais eficiente possível.

O problema clássico de otimização é primeiramente definido por uma função objetivo, que deve ser minimizada ou maximizada (depende da necessidade do projeto), essa função está sujeita a restrições de comportamento e restrições laterais nas variáveis do projeto (Castro, 2001).

<u>Problema Clássico de Otimização</u>		
Max. ou Min.	$f(x_1, x_2, \dots, x_N)$	(função objetivo)
sujeito a		
	$g_j(\mathbf{x}) \geq 0$	$j = 1, 2, \dots, J$ (restrições de)
	$h_k(\mathbf{x}) = 0$	$k = 1, 2, \dots, K$ (comportamento)
	$x_i^{(L)} \leq x_i \leq x_i^{(U)}$	$i = 1, 2, \dots, N$ (restrições laterais)
		(nas variáveis)
		(de projeto x_i)

Figura 11. Problema clássico de otimização, Fonte: Castro, (2001).

As variáveis de projeto são aqueles parâmetros que se alteram durante o processo, elas podem ser contínuas (reais), inteiras ou discretas (valores dentro de uma faixa). Alguns exemplos do ponto de vista físico são apresentados a seguir:

- ✓ A forma geométrica da estrutura;
- ✓ As dimensões utilizadas nas seções transversais ou comprimentos de um elemento;
- ✓ Propriedades mecânicas ou físicas do material.

As restrições do projeto são funções que descrevem situações indesejáveis do projeto, podem ser funções de igualdade ou desigualdade. Como mencionado existem dois tipos de restrições:

- ✓ Restrições de Comportamento – condições desejáveis do projeto, como limite de deslocamento, de vibrações ou de tensões por exemplo.
- ✓ Restrições Laterais – são aplicadas diretamente sobre as variáveis do projeto, onde se limita seus valores ou define uma faixa de operação da variável.

Existe também um espaço de busca ou região viável da aplicação do problema clássico, onde se define as soluções possíveis ou viáveis do trabalho a ser realizado, esse conceito é caracterizado pelas funções das restrições, as quais definem os requisitos para realização do projeto.

A função objetivo é o foco do trabalho, ou seja, a função que se quer otimizar, ela pode conter uma ou mais variáveis. O ponto ótimo é definido por um vetor que satisfaça às restrições e leve a função objetivo ao seu limite, ou seja, definem o máximo ou mínimo da função. O valor ótimo é definido pelo valor da função no ponto ótimo.

Associando o par compreendido pelo valor ótimo e o ponto ótimo obtém-se a solução ótima, essa solução segundo Castro, (2001) pode ser:

- ✓ Local – quando valor ótimo é localizado;
- ✓ Global – quando o valor ótimo é global na região viável;
- ✓ Restrita – quando atende a todas as restrições;

- ✓ Não restrita – quando não atende a alguma das restrições.

Os métodos matemáticos citados na teoria clássica da otimização apresentam teoremas que comprovam sua convergência, mas nenhum deles garante que a solução obtida seja uma solução efetiva, porque geralmente esse resultado depende do ponto de partida fornecido.

Pode-se classificar os problemas de otimização em subáreas de acordo com as características que possui a sua função objetivo, e das restrições presentes nela. Silva, (2001) classifica os problemas de otimização que são definidos por:

- ✓ Programação Linear – possui a particularidade de que todas as relações entre as suas variáveis são lineares, na função objetivo e também nas restrições definidas do projeto;
- ✓ Programação Não Linear – quando existe pelo menos uma relação não linear entre as variáveis do projeto e a função objetivo ou as restrições do projeto;
- ✓ Programação Quadrática – nasce da necessidade de maior especialização nos problemas a serem resolvidos, e determina que a função objetivo seja quadrática e as restrições sejam funções lineares das variáveis de projeto.

2.6.1. Algoritmos Genéticos

A evolução humana é um fato discutido há milhares de anos, como se define e de onde vêm as características presentes no ser humano é discutido e analisado pela ciência por diversas teorias. No século XIX, surgiu uma teoria importante nesse campo da ciência, a evolução da vida pela “Seleção Natural de Darwin” que define que os seres vivos que possuem melhores características, são mais adaptáveis, tendem a sobreviver mais que os demais (Silva, 2001). O Algoritmo Genético (AG) é um algoritmo de busca que tem a sua definição com base nessa teoria do processo de seleção natural de Charles Darwin, ele foi inicialmente proposto pelo pesquisador John Holland em 1975.

A aplicabilidade do algoritmo é adequada onde exista um conjunto de elementos ou “indivíduos” (podem ser definidos como diversos parâmetros), e deseja-se encontrar aqueles que atendam de melhor maneira a uma condição inicial especificada (Silva, 2001).

Então a partir dessa necessidade define-se o grupo de indivíduos a serem selecionados, cada um com sua característica definida ou adaptabilidade (no código define-se como aptidão), esse grupo se desenvolve, através da programação de operações genéticas, essas operações significam que os indivíduos sofram cruzamentos e mutações, gerando um novo grupo de indivíduos que passaram pelos princípios Darwinianos de reprodução e sobrevivências dos mais aptos, causando a seleção natural. O papel do algoritmo é procurar o indivíduo que melhor se encaixa na solução de forma a otimizar a função objetivo.

O método destaca-se por não ser afetado por perturbações no problema original trazendo pouco prejuízo aos AG's, mas também segundo a literatura pode não ser o método mais eficiente do que aquele método projetado especificamente para um determinado problema (Silva, 2001).

Dentro do método dos AG's, algumas definições usadas na biologia são importantes para entender a lógica de iteração do método, segundo Silva, (2001) essas definições são:

- ✓ Cromossomo e Genoma: genoma é o conjunto completo de genes de um organismo, onde em um genoma pode ter vários cromossomos. Eles representam o conjunto de dados que codifica uma solução para um problema, ou seja, um cromossomo ou genoma seria usado em uma iteração do método.
- ✓ População: Conjunto de cromossomos ou soluções.
- ✓ Geração: A quantidade de iterações que o método executa.
- ✓ Operações Genéticas: operações que o método realiza em cada uma das características do indivíduo.
- ✓ Gen ou Gene: é a informação que é transmitida pelo cromossomo que influencia nas características do indivíduo, ou seja, um elemento do vetor que representa o cromossomo.
- ✓ Alelo: é a característica dessa informação.
- ✓ Indivíduo: Um membro no conjunto definido, ele é formado pelo cromossomo e sua aptidão.
- ✓ Fenótipo e Genótipo: O genótipo é a característica genética que está no Genoma, ou seja, informação que está no cromossomo. O Fenótipo é a construção a partir dessas informações.
- ✓ Região Viável: são os parâmetros que possibilitam ou viabiliza a solução do problema a ser otimizado.
- ✓ Função Objetivo: Como já definida, é a função que se quer otimizar, para os AG's, ela é calculada para cada cromossomo da população.

Para entender o papel de cada definição no processo de otimização aplicado a um sistema geral, como nos parâmetros da suspensão, objeto desse estudo, o algoritmo define uma cadeia de procedimentos, onde o AG processa as populações de cromossomos. O cromossomo por sua vez é uma estrutura de dados que representa a possível solução que você busca, ou seja, um conjunto de parâmetros da função objetivo os quais se desejam maximizar ou minimizar. Todas essas configurações representam o espaço de busca, como se fosse à dimensão de busca do algoritmo. Cada cromossomo recebe uma aptidão, ou seja, o quanto aquela informação é importante na solução do problema que se baseia na função objetivo.

Silva, 2001 define três principais métodos de convergência dos resultados, o método de gerar e testar, método analítico e o subida de encosta. O método gerar e testar é o mais comum, onde emprega-se um módulo de geração, gerando as soluções possíveis do sistema e um módulo de teste, que avalia as soluções geradas. Esses dois módulos são intercalados e o método é encerrado quando se obtém uma solução satisfatória ou que todas as soluções possíveis são obtidas. Quanto ao método analítico esse é baseado nas técnicas do cálculo diferencial identificando os pontos de mínimo e máximo da função objetivo, mas possui algumas desvantagens como ele requer funções com derivadas e quando tem número grande de parâmetros torna-se difícil a convergência e por último o teste de subida de encosta que investiga os pontos iguais do espaço de busca e caminha na direção que melhore o valor da função objetivo. O método de iteração do algoritmo genético típico é ilustrado na Figura 12.

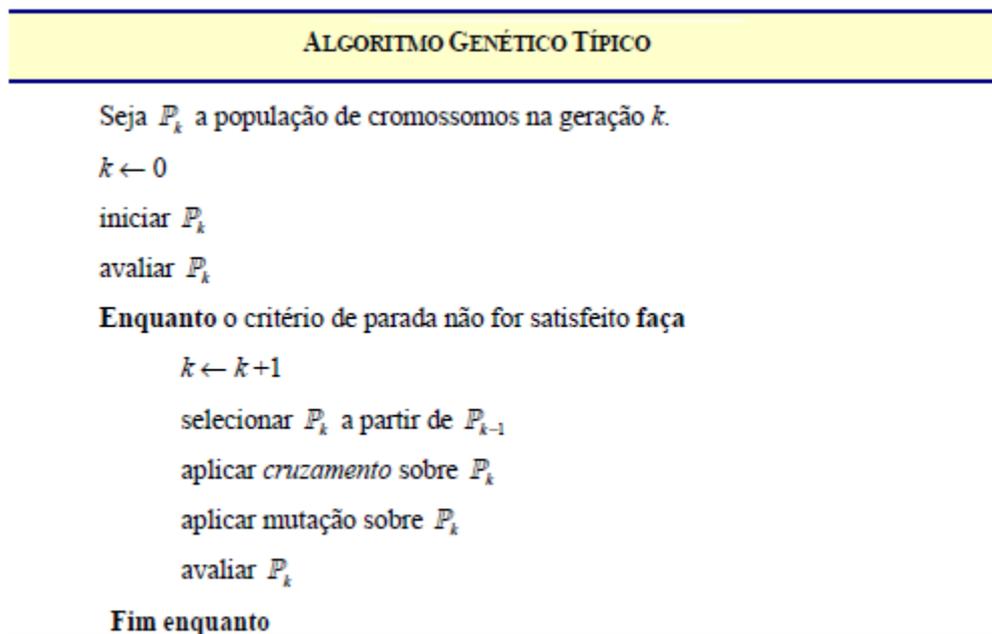


Figura 12. Iteração Algoritmo Genético Típico, Fonte: Silva (2001).

2.6.2. Otimização por Enxame de Partículas (PSO)

O método de otimização, definido por Otimização por Enxame de Partículas (PSO), é um algoritmo proposto por Kennedy e Eberhart (1995) baseado em estudos feitos por Edward Osborne Wilson, um sócio-biologista. O PSO é um algoritmo que possui uma técnica baseada em uma população de soluções, é um método que simula um comportamento de algum sistema, comparando com o estudo de comportamentos sociais (Esmín, 2005).

O algoritmo PSO inicia com uma população de partículas, cada partícula dessa população pode representar uma solução possível para um problema de otimização. Considera uma constante como sendo o tamanho da população ou espaço de análise e começa a definir as propriedades das partículas. Cada partícula pode ser representada segundo Esmín, (2005) com algumas propriedades que influenciará na solução. Essas características são definidas por:

- ✓ A posição atual da partícula;
- ✓ A velocidade atual da partícula;
- ✓ A melhor posição individual alcançada pela partícula.

As partículas (soluções potenciais do problema) são movimentadas nesse espaço de busca do problema. Elas guardam o seu melhor valor enquanto se movimentam pelo espaço de busca, esse valor é definido por pbest (versão local). Elas também guardam um valor que é o melhor valor considerando todo espaço de busca e interagindo com as outras, melhor experiência coletiva da população. Então cada partícula tem seu melhor pbest e todas as partículas tem um único gbest (Esmín, 2005). Esse conceito pode ser observado pela topologia na Figura 13.

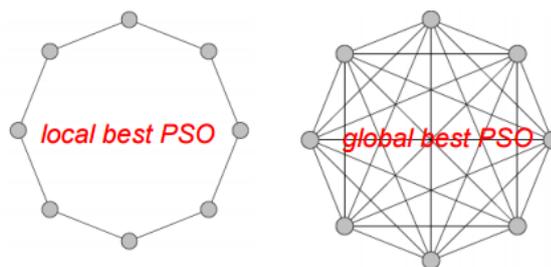


Figura 13. Topologia da interação das partículas em PSO. Fonte: Modificada - Mello, (2012)

Coelho e Weihmann, 2007 pode-se definir a aplicação do método do enxame em partículas em etapas, são as seguintes:

- Primeiro se inicia o problema definindo uma população (matriz) “TOTAL” de partículas, em um espaço de trabalho determinado. Para cada partícula determina a posição e velocidade delas, de forma aleatória com distribuição uniforme.
- Para cada partícula deve-se avaliar a função objetivo definida do problema.
- Compara a avaliação da função objetivo da partícula com o valor definido pbest, se esse valor calculado é melhor que o pbest, então ele armazena o valor e o torna o novo pbest da partícula, e a partícula guarda a localização no espaço de trabalho determinado.
- Outra iteração é feita comparando a avaliação da função objetivo com o prévio melhor valor de aptidão da população. Se o valor observado atual é melhor que o gbest, atualiza-se o valor atual gbest para essa partícula.
- Modifica-se a velocidade e a posição das partículas de acordo com a seguinte iteração:

$$v_i(t+1) = w \cdot v_i(t) + c_1 \cdot ud \cdot [p_i(t) - x_i(t)] + c_2 \cdot Ud \cdot [p_g(t) - x_i(t)]$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + \Delta t \cdot v_i(t+1)$$

Onde Δt é igual a 1, t é a geração atual e $i = 1, \dots, TOTAL$, tal que o tamanho da população é TOTAL, x_i armazena a posição da i -ésima partícula, v_i armazena a velocidade da i -ésima partícula, p_i representa a posição do melhor valor de aptidão da i -ésima partícula, g representa o índice da melhor partícula entre todas do grupo, a variável w está associada a inércia da partícula, as constantes c_1 e c_2 são chamadas de constantes de aceleração e são positivas, elas definem qual o tamanho do passo que a partícula pode dar em uma iteração, ud e Ud está associado a geração dos números aleatórios para a iteração, com uma distribuição uniforme em um intervalo definido $[0,1]$.

- Fazer um “loop” voltando à segunda etapa até que um critério de parada da função objetivo seja encontrado, geralmente uma função aptidão que seja satisfatória ou um número máximo de iterações.

Analisando o algoritmo conclui-se que as velocidades das partículas no espaço de trabalho definido são limitadas por um valor máximo. Esse valor está associado à região na qual a solução é procurada, ou seja, para valores altos de velocidade o algoritmo facilita uma busca global, já para valores baixos ele se concentra em buscas locais.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O estudo dos parâmetros da suspensão e a influência desses parâmetros para o comportamento do sistema vêm sendo discutido por diversos autores, tanto pela ligação desses componentes com o conforto da suspensão tanto para a dirigibilidade.

Em 2010, Cavalheiro e Ávila realizaram um estudo paramétrico de sistemas de suspensão veicular com a configuração passiva, dois sistemas foram enfatizados, um modelo de um quarto de veículo e o modelo de meio veículo. Os modelos foram discretizados, excitados por uma perturbação equivalente a do terreno e foram analisados utilizando a ferramenta SIMULINK do MATLAB. Analisou-se o valor em rms da amplitude do deslocamento da massa suspensa para ambos os modelos em diferentes tipos de terreno, partindo de propriedades do veículo pré-definidas (rigidez da mola e coeficiente de amortecimento do amortecedor) e variando essas propriedades verificando o comportamento da suspensão. Concluíram que o sistema passivo possui alta sensibilidade, pois quando os parâmetros da mola e do amortecedor foram mudados, verificou-se modificações consideráveis no desempenho do sistema.

O desempenho do sistema de suspensão influencia diretamente nas vibrações da massa suspensa do veículo, Ganzarolli, 2012 estuda exatamente essa influência, considerando dois parâmetros principais, conforto e dirigibilidade. Nesse estudo ele determina que a energia do evento de transmissão das oscilações provenientes das irregularidades do terreno é transmitida para os passageiros através da vibração do sistema, e que como a suspensão absorve essas vibrações determina o conforto veicular. Verificou-se o comportamento do veículo em uma faixa linear, ou seja, o veículo apresenta um comportamento dinâmico como se estivesse em uma reta e notou-se que é possível obter resultados do sistema estáveis do veículo para níveis de conforto adequado.

Em 2006, Freitas mostrou que a análise numérica dos parâmetros da suspensão automotiva auxilia no dimensionamento prévio dos componentes para suspensão, diminuindo os custos e verificando problemas que poderiam acontecer no projeto. O seu estudo análise o comportamento de um modelo de um quarto de veículo representado pela função de transferência do sistema comparando com um protótipo virtual simplificado e equivalente ao modelo matemático. Foram analisadas as respostas dinâmicas no domínio do tempo e da frequência, a utilização do modelo matemático teve um comportamento satisfatório comparado aos resultados do protótipo, validando a análise numérica da suspensão, com uma restrição, o protótipo foi excitado apenas em uma situação particular, havendo a necessidade de uma análise de situações aleatórias para a consolidação do estudo.

Para um melhor desempenho dos sistemas em um modo geral, busca-se aplicar as técnicas de otimização, Klava 2003, baseado nesse conceito ele aplica a otimização estrutural em um componente da suspensão, a manga de eixo. O papel da manga de eixo na suspensão é ilustrado na Figura 14. Para esse estudo ele determina o tipo de otimização como sendo a de forma, nela ele define as variáveis do projeto e a tensão limite de escoamento associada a um fator de segurança, esse fator garante que os resultados da peça estejam dentro de uma faixa esperada. Após a otimização, um novo dimensionamento foi obtido melhorando o desempenho do componente e garantindo a vida infinita no teste de fadiga.



Figura 14. Esquemático de uma suspensão, Fonte: Klava, (2003).

Também no mesmo tema da utilização da otimização em estruturas, Silva, 2001, fala sobre a utilização do algoritmo genético para convergir os resultados em uma análise de concreto armado, ele descreve o algoritmo e fala da importância da análise dele em trabalhos futuros abrangendo uma gama de aplicações, no estudo ele mostra uma comparação entre o método clássico de otimização e os algoritmos genéticos, usando um exemplo de um trecho de pilar dimensionado a uma flexão composta, a convergência do algoritmo foi satisfatória, atingindo o mínimo da função rapidamente, chegando à conclusão que a otimização das estruturas de concreto armado pode apresentar uma economia de até 22,7%.

Löfberg, 2004 faz um estudo interessante sobre uma ferramenta que já está implementada no Simulink MATLAB, YALMIP e pode ser usada para o problema de otimização típico, no artigo ele ensina a usar a ferramenta e fala de alguns exemplos simples de controle aplicando o método definindo a função objetivo e suas restrições.

Ebbesen et al., 2012 define uma função genérica com o método PSO para o MATLAB, o estudo nesse artigo consiste em quatro fases, na primeira eles definem o algoritmo PSO explicando sobre o método e demonstrando suas particularidades, depois ele define a função genérica para o MATLAB, falando sobre suas variáveis e a sintaxe. Na terceira fase ele demonstra a função através de dois exemplos e conclui que a função usa uma sintaxe parecida com a de algoritmo genético e sua aplicação é satisfatória.

Outro estudo interessante na área da otimização dos parâmetros da suspensão é feito por Leal e Borges, (2003) a partir de um veículo modelo, eles conseguem desenvolver um modelo CAD multicorpos de referência. Foi realizado ensaios de compressão nos componentes reais do veículo modelo. A partir desses dados foi traçado um comparativo entre a simulação numérica e o comportamento

experimental validando o modelo CAD para a aplicação. Um planejamento fatorial para otimização dos parâmetros foi aplicado, ele se mostrou capaz de representar as respostas de interesse.

Kuznetsov et al., 2010 faz uma análise diferente dos demais autores, ele analisa o modelo de um quarto de veículo através de equações no domínio da frequência, determinando as equações de movimento do sistema ele define a aceleração da massa suspensa e não suspensa do sistema, de acordo com a ISO 2631 ele sugere um algoritmo clássico de otimização de uma função objetivo a fim de definir os parâmetros da suspensão mais eficientes para o conforto do passageiro, o método consiste em analisar as equações diferenciais do sistema analiticamente, propondo uma excitação de entrada, numérica prescrita, como perturbação inicial para o sistema. O objetivo é revelar informações sobre como os diferentes parâmetros afetam o nível de conforto de um veículo rodoviário.

Drehmer, 2012 dissertou também sobre os parâmetros da suspensão passiva, mas agora no âmbito da otimização desses coeficientes, nesse estudo ele considerou a importância de minimizar a aceleração vertical rms amparado pelas normas europeias: BS 6841 (1987), ISO 8608 (1995) e ISO 2631 (1997) as quais determinam que a aceleração rms seja um fator considerável na percepção de conforto e também determinam às faixas de aceleração que causam algum dano a saúde. Ele analisa dois modelos veiculares, o modelo clássico de dois graus de liberdade, ou um quarto de veículo, e um modelo de oito graus de liberdade, ou veículo completo. Foi utilizado um algoritmo heurístico de enxame de partículas para a convergência dos parâmetros e notou-se uma melhora em até 35% da transmissão da aceleração vertical rms ao motorista.

Al-Mutar e Abdalla, 2015 analisam o comportamento de uma suspensão ativa com um atuador hidráulico não-linear e de uma suspensão passiva com parâmetros pré-definidos em um modelo de um quarto de veículo, o objetivo do estudo é proporcionar uma melhor dirigibilidade e conforto aos passageiros em relação as vibrações ocasionadas por terrenos diversos. A força de controle utilizada para simular o atuador, é feita por um controlador PID (Proporcional Integral Derivativo), onde de acordo com cada perfil de terreno é utilizada uma técnica de otimização, a "*The Particles Swarm Optimization*" mais conhecida como PSO, desenvolve-se um esquema de iteração onde objetiva-se otimizar os parâmetros do controlador, observa-se um resultado satisfatório na resposta do deslocamento vertical do modelo da suspensão ativa em relação a passiva.

Selemat e Bilong, 2013 apresentam um estudo de controle de suspensão ativa em um veículo ferroviário de dois eixos usando um regulador linear quadrático otimizado pelo método PSO, o método é utilizado para otimizar as matrizes de ponderação do controlador substituindo o método da tentativa e erro. Os resultados para a suspensão ativa otimizada pelo PSO é superior a suspensão passiva e ao método empírico de escolha das matrizes de ponderação.

4. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

O modelo clássico de um quarto de veículo se baseia em um sistema massa-mola-amortecedor capaz de estudar a resposta às excitações de um perfil de terreno causadas em uma roda do veículo, o modelo fornece a resposta da dinâmica vertical do sistema, desprezando os efeitos rolagem e carregamento ocasionado pela interação das demais rodas com a pista. O modelo baseia-se em um sistema de dois graus de liberdade, onde considera o pneu como um elemento elástico,

influenciando na resposta do sistema, a Figura 15 representa o sistema estudado. No modelo proposto M_s representa a massa suspensa, M_u a massa não suspensa, k_s representa a rigidez da mola, b_s o coeficiente de amortecimento do amortecedor, k_t a rigidez do pneu, w a excitação de entrada e x_1 e x_2 são os deslocamentos das massas.

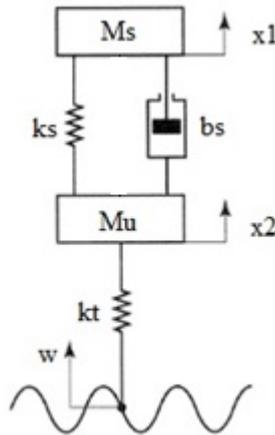


Figura 15. Modelo de 1/4 de veículo. Fonte: Ogata, (1998).

Aplicando a Segunda Lei de Newton ao sistema obtemos as equações de movimento da dinâmica vertical do sistema, representados pelas “Eq. 1 e 2”.

$$M_u \ddot{x}_2 = k_s(x_1 - x_2) + b_s(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - k_t(x_2 - w) \quad (1)$$

$$M_s \ddot{x}_1 = -k_s(x_1 - x_2) - b_s(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) \quad (2)$$

Para esse modelo podemos analisar a resposta a uma excitação inicial de duas formas diferentes, utilizando o conceito de função de transferência e o conceito de espaço de estado, utilizando as equações de estado. Isso se faz necessário, pois para cada tipo de análise, seja de otimização ou de análise paramétrica, se torna mais fácil usando um modelo ou o outro, devido a facilidade de analisar suas saídas em alguns casos ou devido ao algoritmo que o sistema utiliza para resolver as equações, facilitando o estudo do sistema e análise da resposta. Outro fato importante em analisar com dois conceitos é o fato que se podem validar as respostas, comparando as duas aplicações.

Para esse sistema, considerando as condições iniciais nulas, podemos descrever uma função de transferência em função da saída e entrada do sistema, a função de transferência de malha aberta $G(s)$, ela representa a saída correspondente ao deslocamento da massa suspensa, e é descrita pela Equação 3.

$$G(s) = \frac{k_t(b_s s + k_s)}{M_u M_s s^4 + (M_u + M_s) b_s s^3 + [k_t M_s + (M_u + M_s) k_s] s^2 + k_t b_s s + k_t k_s} \quad (3)$$

A análise no espaço de estados envolve três tipos de variáveis que estão presentes na modelagem de sistemas dinâmicos e podem ser aplicadas no modelo

de suspensão analisado, variáveis de entrada, variáveis de saída e variáveis de estado (Ogata, 1998). A relação dessas variáveis é representada pelas “Eq. 4 e 5”.

$$\dot{\mathbf{Z}} = \mathbf{A}\mathbf{z} + \mathbf{B}u \quad (4)$$

$$\mathbf{Y} = \mathbf{C}\mathbf{z} + \mathbf{D}u \quad (5)$$

A = matriz de estado, **B** = matriz de entrada, **C** = matriz de saída, **D** = matriz de transmissão direta, u = entrada do sistema.

As variáveis de estado de um sistema dinâmico são definidas a fim de constituir o menor conjunto de variáveis capaz de representar o estado desse sistema (Ogata, 1998). Para análise do modelo definiu-se as variáveis, $\dot{x}_1 = v_1$, $\dot{x}_2 = v_2$, $\ddot{x}_1 = \dot{v}_1$ e $\ddot{x}_2 = \dot{v}_2$, obteve-se quatro variáveis que representa o estado da suspensão analisada. Simplificando as “Eq. 1 e 2” e colocando na forma matricial em função das “Eq. 4 e 5” de estado, obtemos as matrizes A e B.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{ks}{ms} & \frac{ks}{ms} & -\frac{b_s}{ms} & \frac{b_s}{ms} \\ \frac{ks}{mu} & -\frac{kt+ks}{mu} & \frac{b_s}{mu} & -\frac{b_s}{mu} \end{bmatrix} \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{kt}{mu} \end{bmatrix} \quad (6)$$

A função escolhida para simular as perturbações do terreno e analisar a resposta do sistema foi a Função Degrau, essa função tem a característica de causar uma amplitude inicial proposta de 0,1 m, constante no tempo, essa função é representada pela Figura 16. O software MATLAB® foi utilizado para o auxílio da análise numérica, também foi utilizada a ferramenta SIMULINK para auxiliar na análise numérica do modelo.

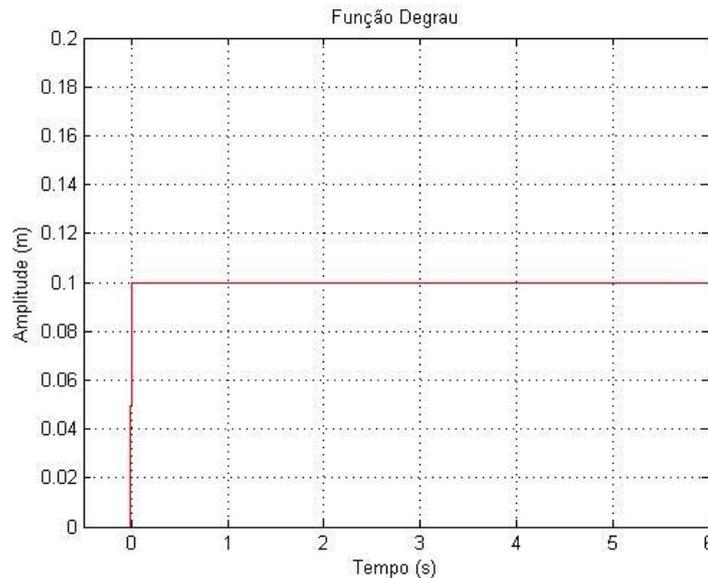


Figura 16. Função Degrau.

5. RESULTADOS PRELIMINARES

As propriedades iniciais do sistema de $\frac{1}{4}$ de veículo foram determinadas admitindo-se tratar de um veículo de passeio popular, segundo Gillespie, (1992) um veículo com uma boa resposta as perturbações possui a frequência natural em torno de 1 Hz, de acordo com essas informações estimam-se os parâmetros iniciais mostrados na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros para análise numérica $\frac{1}{4}$ de veículo

Parâmetro	Símbolo	Valor
Massa suspensa (Kg)	M_s	203.0
Massa não-suspensa (Kg)	M_u	26.0
Rigidez da mola (N/m)	K_s	23000
Rigidez do pneu (N/m)	K_t	200000
Coefficiente de amortecimento (Ns.m)	B_s	1200

A Figura 17 representa a resposta no tempo da suspensão com os parâmetros iniciais definidos na Tabela 2, a resposta em azul corresponde à análise pelas equações de estado, a resposta em vermelho corresponde análise pela função de transferência. Percebe-se que o sistema entrou em estabilidade depois de 2,5 segundos e que o deslocamento máximo da suspensão foi de aproximadamente 0,15 metros.

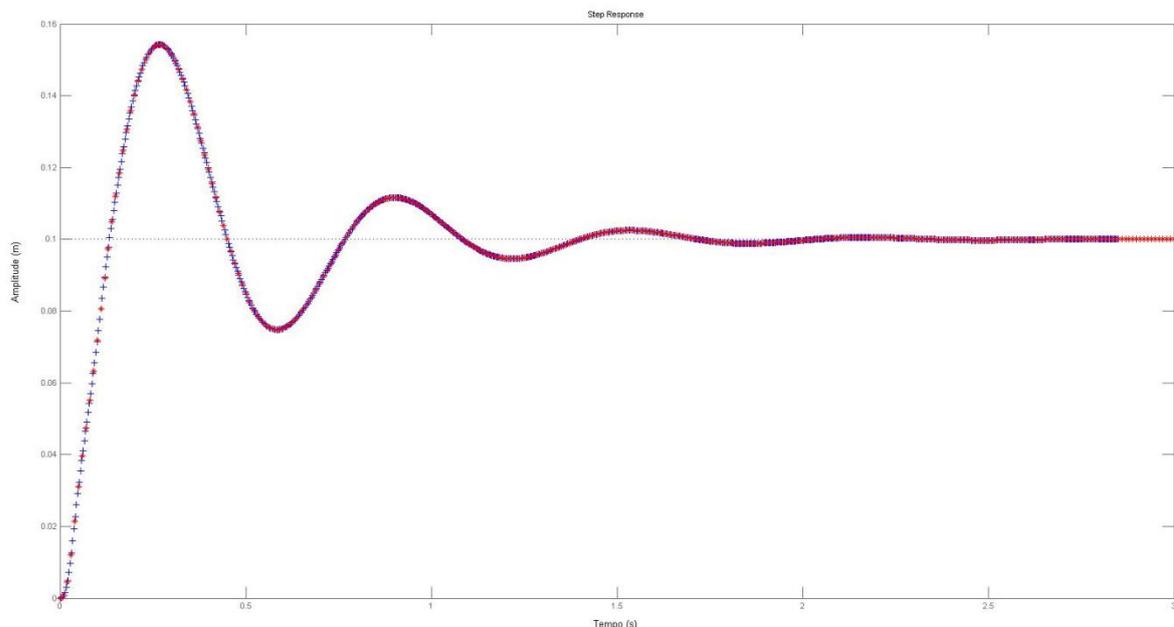


Figura 17. Comparação da resposta da função de transferência e espaço de estados.

Uma análise do comportamento da suspensão devido à rigidez da mola é feita na Figura 18, analisando os trabalhos realizados nessa área pelos autores citados

nesse estudo, define-se uma faixa de estudo em torno da proposta inicial, a fim de analisar a influência desse componente na resposta dinâmica para a função degrau, varia-se o parâmetro K_s , e analisam-se três desempenhos, um com a rigidez da mola a 16000 N/m (vermelho), um a 23000 N/m (azul) e por último a 28000 N/m (verde). Nota-se um pico de deslocamento de aproximadamente 160 mm na mola mais rígida, e de aproximadamente 145 mm na menos rígida. O desempenho pode ser verificado na Figura 19.

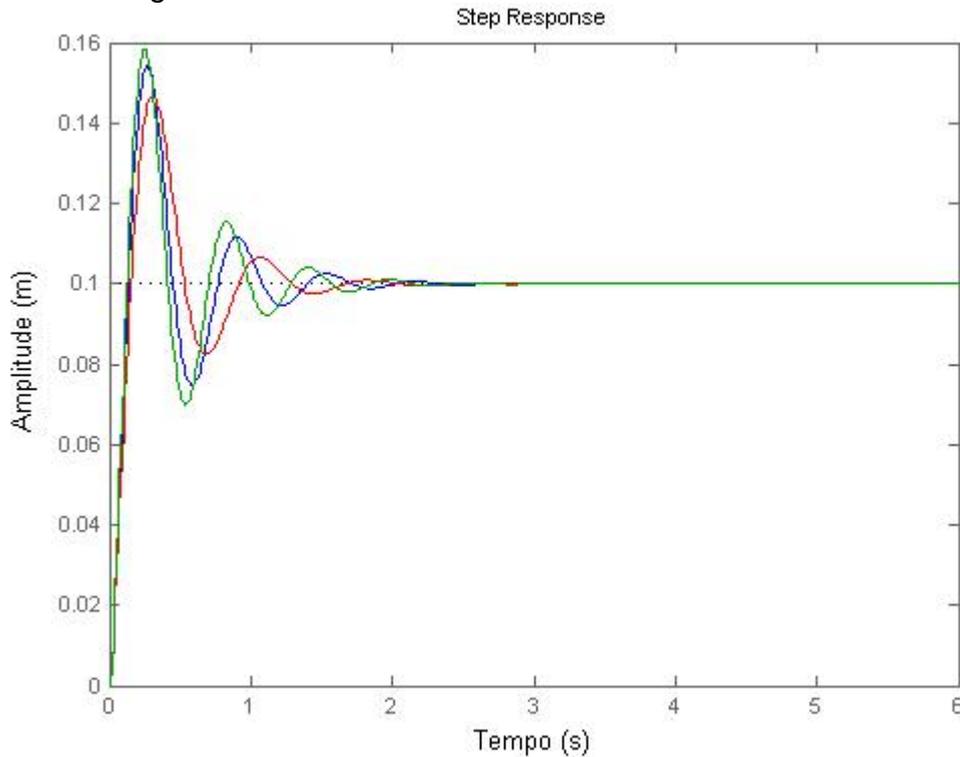


Figura 18. Análise Rigidez da Mola.

Outra análise semelhante foi realizada variando-se o coeficiente de amortecimento b_s , novamente a escolha da faixa de trabalho foi fomentada por trabalhos semelhantes realizados por autores citados, eles utilizam características semelhantes para o tipo de veículo proposto para o estudo. Analisaram-se também três respostas dinâmicas excitadas pela função degrau, uma com coeficiente 500 Ns.m (vermelho), outra com o proposto inicial de 1200 Ns.m (azul) e a última utilizando o limiar do estudo de 1700 Ns.m (verde). Nota-se que a resposta do coeficiente menor, estabiliza-se em aproximadamente 5 segundos e possui um pico de deslocamento de aproximadamente 180 mm, enquanto o com maior coeficiente em aproximadamente 1,5 segundos e o pico de aproximadamente 150 mm. O desempenho pode ser verificado na Figura 19.

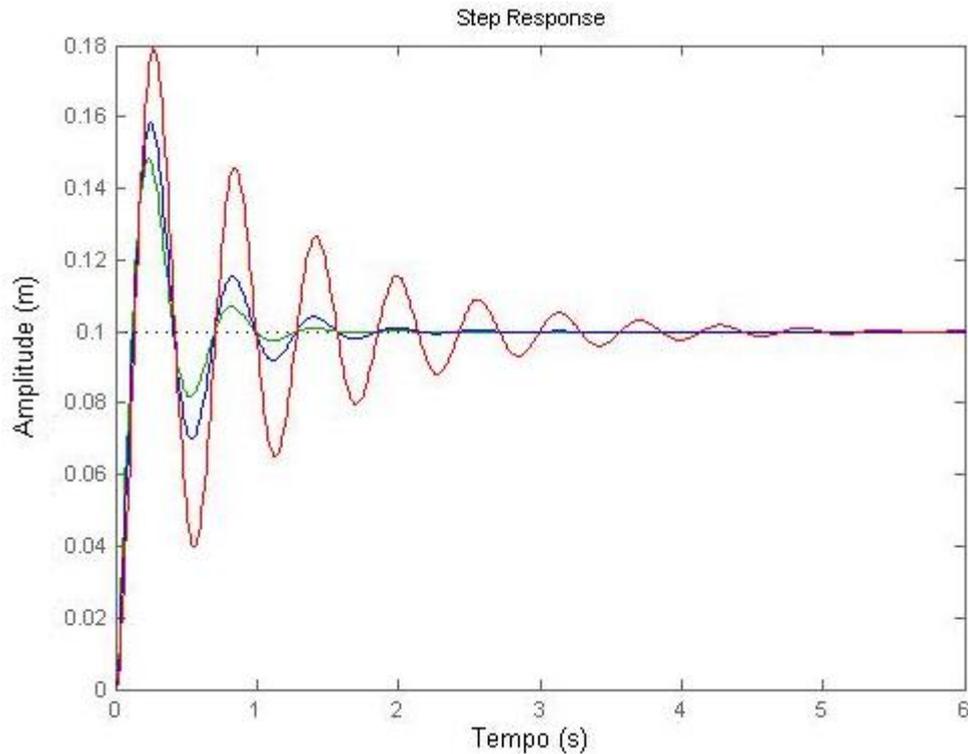


Figura 19. Análise Coeficiente de Amortecimento.

Um estudo paramétrico foi realizado utilizando as faixas de estudo propostas anteriormente, analisou-se o coeficiente de amortecimento na faixa de $500 \leq b_s \leq 1700$ Ns.m e também analisou-se a rigidez da mola na faixa de $16000 \leq k_s \leq 24000$ N/m. Foi considerado o deslocamento (RMS) associado ao desempenho dinâmico vertical para a excitação a mesma função degrau proposta. Realizou-se a iteração dos parâmetros gerando 360 mil respostas dinâmicas dentro das faixas analisadas, uma superfície de desempenho foi gerada para visualização do comportamento de acordo com as diferentes combinações dos parâmetros. Podemos verificar tal estudo nas Figuras 20, 21, 22 e 23 as quais mostram a superfície em diferentes vistas.

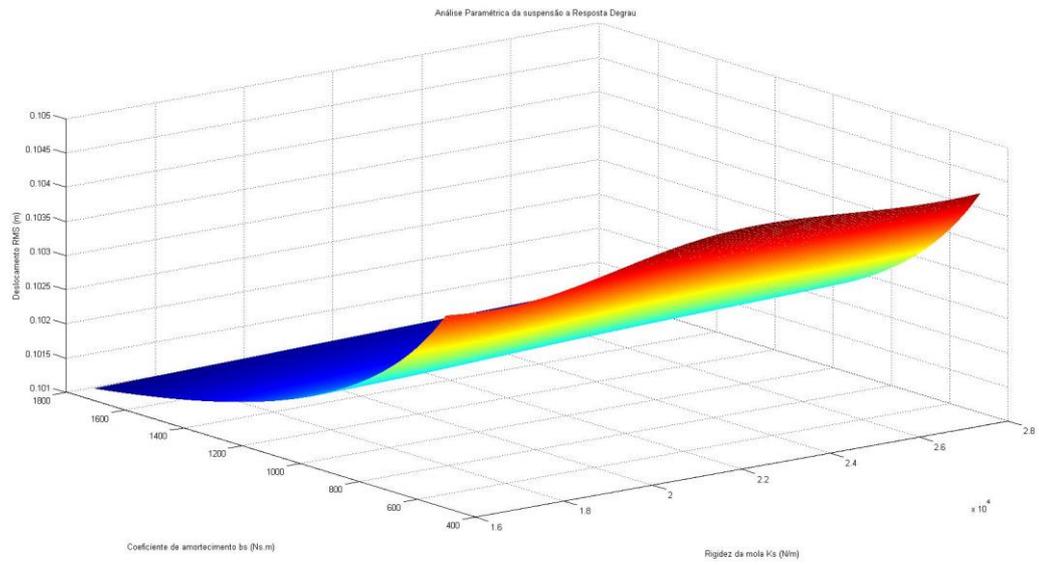


Figura 20. Estudo Paramétrico vista 1.

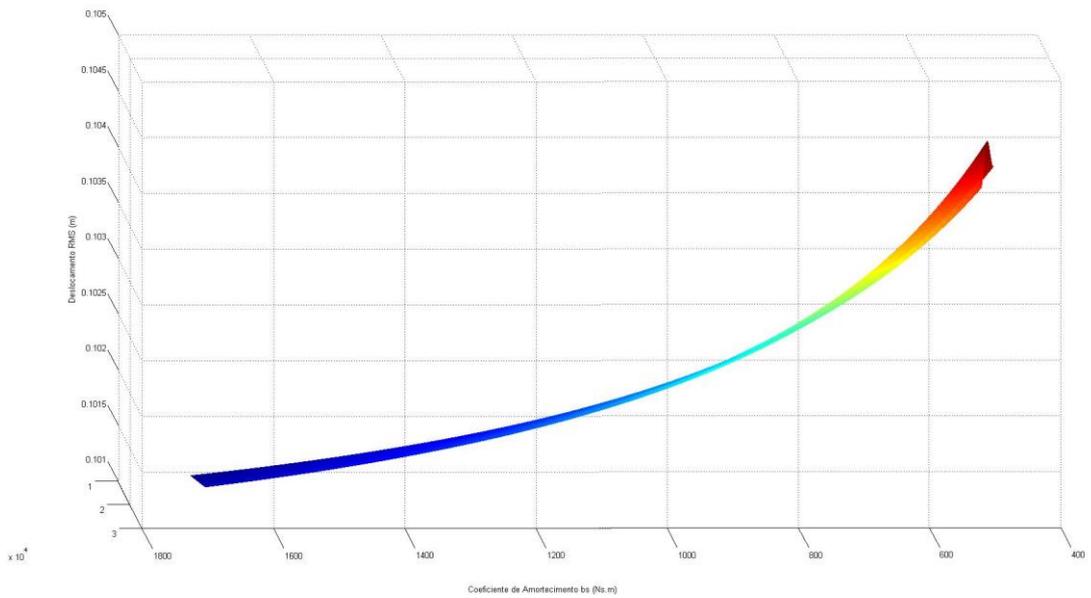


Figura 21. Estudo Paramétrico vista 2.

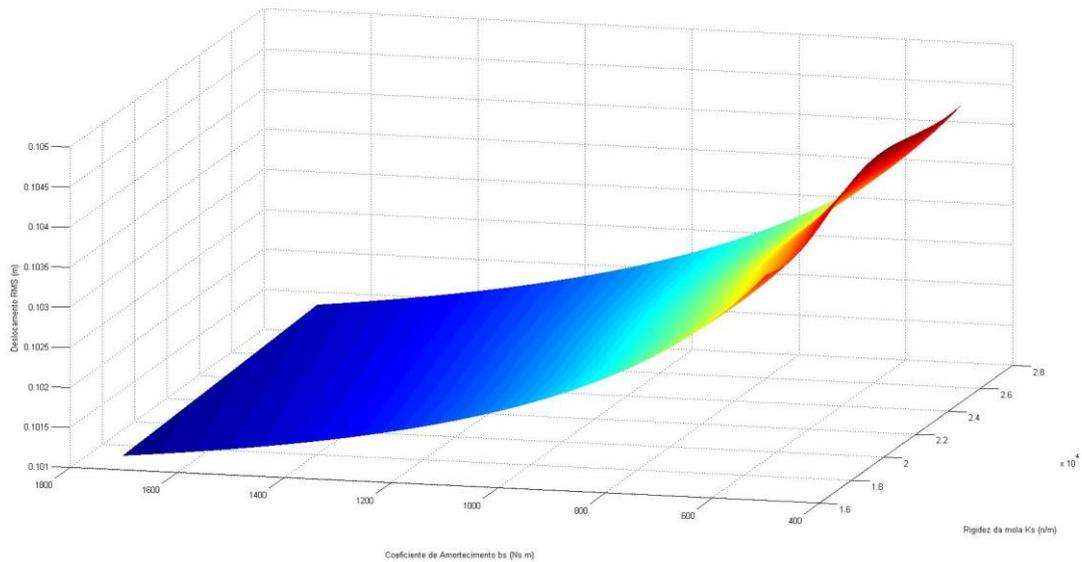


Figura 22. Estudo Paramétrico vista 3.

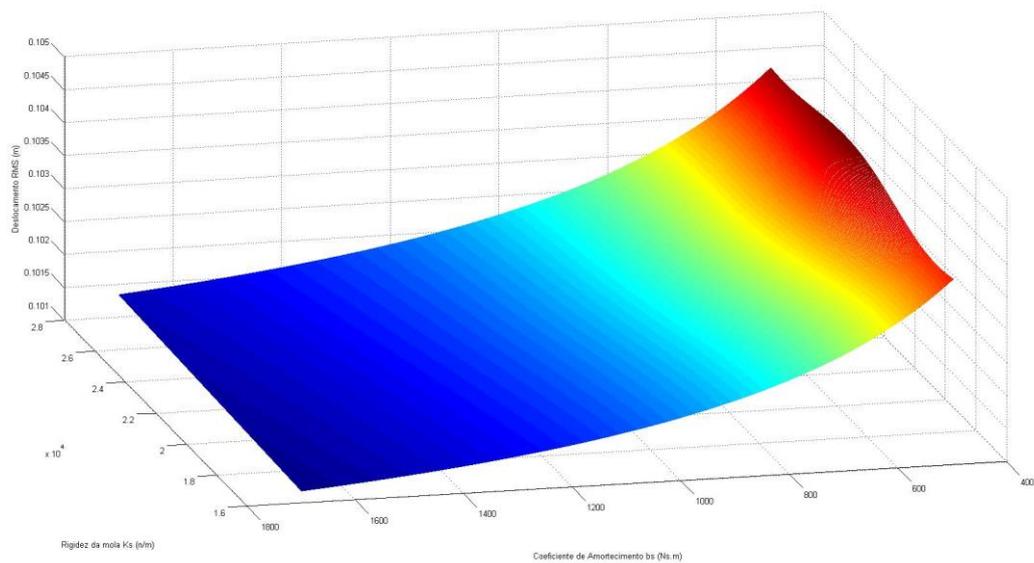


Figura 23. Estudo Paramétrico vista 4.

6. CONCLUSÕES PRELIMINARES

- ✓ Foi possível validar o modelo proposto de um quarto de veículo utilizando as duas análises propostas, a no espaço de estados e a com função de transferência, percebe-se pela Figura 17 que as respostas são bem próximas, validando a resposta do modelo e as análises.
- ✓ Percebe-se pela Figura 18 que o pico de deslocamento está associado à rigidez da mola, verifica-se que um sistema de suspensão com uma mola mais rígida tende a passar para a carroceria vibrações com amplitudes maiores, prejudicando o conforto do passageiro.

- ✓ O coeficiente de amortecimento também está ligado ao desempenho do sistema, isso pode ser verificado na Figura 19, onde o sistema com maior coeficiente obteve um pico de deslocamento menor e voltou à estabilidade em menor tempo. Nota-se que para um coeficiente menor o sistema obteve a estabilidade em um tempo elevado, comparado com o melhor desempenho.
- ✓ Analisando as respostas dinâmicas da suspensão passiva, verifica-se que há a possibilidade de uma proposta de um estudo paramétrico para escolher dentre uma faixa estudada, os parâmetros da mola e do amortecedor que possam obter os melhores resultados quanto ao deslocamento da massa suspensa do veículo.
- ✓ Verificou-se pelo estudo paramétrico realizado na Figura 20 que, quanto maior o coeficiente de amortecimento, menor é o deslocamento rms a função degrau. Notou-se também que de acordo com o coeficiente de amortecimento existe um coeficiente de rigidez que obtém um melhor desempenho, o fato é caracterizado pela curva na superfície de acordo com que aumenta a rigidez da mola.
- ✓ É necessário realizar um filtro nessa superfície, focando as regiões de melhor desempenho para propor os parâmetros de melhor desempenho para o veículo estudado, de acordo com o estudo paramétrico.
- ✓ Analisando o problema como um todo, nota-se que é possível propor uma otimização do sistema de suspensão, utilizando o algoritmo genético ou o algoritmo PSO, obtendo a convergência dos parâmetros com o objetivo de obter melhores resultados do desempenho da suspensão.

7. TRABALHOS FUTUROS

- 1) Realizar o filtro da superfície e propor os melhores parâmetros para o deslocamento da massa suspensa, a excitação da função degrau.
- 2) Analisar a aceleração vertical da massa suspensa, a excitação da função degrau.
- 3) Verificar a resposta do sistema de suspensão utilizando outras excitações.
- 4) Propor para o sistema a otimização dos parâmetros, através dos algoritmos propostos na literatura, o algoritmo genético ou o algoritmo (PSO).
- 5) Comparar a resposta dinâmica do sistema com os parâmetros iniciais, os propostos pelo estudo paramétrico e os propostos pela otimização.

8. CRONOGRAMA DE TRABALHO

Dezembro	Janeiro	Fevereiro	
Atividade 1	Atividades 2 e 3	Atividade 4	Junho
Março	Abril	Maio	Escrita e Apresentação
Atividade 4	Atividade 4	Atividade 5	

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almeida, V., 2007, "Parametrização dos Valores de Geometria do Sistema de Suspensão de Veículos de Passageiros", Dissertação de Mestrado em Engenharia Automotiva – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

- Castro, R., 2001, "Otimização de estruturas com multi-objetivos via algoritmos genéticos", Tese de Doutorado em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Coelho, L., Weihmann, L., 2007, "Abordagem de enxame de partículas inspirada em algoritmo cultural aplicada em um problema de otimização não-linear com restrições", Laboratório de Automação e Sistemas, Grupo Produtônica – PUCPR / PPGEPS.
- Drehmer, L., 2012, "Otimização de parâmetros concentrados de suspensão para conforto e segurança veicular", Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Ebbesen, S., Kiwitez P. e Guzzella, L., 2012, "A Generic Particle Swarm Optimization Matlab Function" publicado na IEEE American Control Conference Fairmont Queen Elizabeth, Montréal, Canada June 27-June 29.
- Freitas, L., 2006, "Estudo da dinâmica vertical de uma suspensão veicular do tipo macpherson", Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- Ganzarolli, F., 2012, "Influência das frequências de ride no conforto e dirigibilidade veiculares na faixa linear de uso do veículo", Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.
- Gillespie, T. D., 1992, "Fundamentals of Vehicle Dynamics", Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA.
- Kuznetsov A., Mammadov, M., Sultan, I., Hajilarov, E., 2010, "Optimization of improved suspension system with inerter device of the quarter-car model in vibration analysis" Published online: 24 December 2010 © Springer-Verlag 2010.
- Löfberg, J., 2004, "YALMIP : A toolbox for modeling and optimization in MATLAB", *IEEE International Symposium on Computer Aided Control Systems Design Taipei, Taiwan, September 24.*
- Merling, M., 2007, "Uma abordagem gerencial para o procedimento de projeto de suspensões de veículos terrestres", Dissertação de Mestrado – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- Ogata, K., 1998, "Engenharia de Controle Moderno", Ed. LTC, 3ª ed, Rio de Janeiro, Brasil, 96 p.
- Paula, R., 2013, "Fadiga de molas helicoidais de suspensão de automóveis", Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual Paulista.
- Pereira, L., 2013, "Análise dinâmica e otimização do controle de vibrações pelo algoritmo do regulador quadrático linear em um modelo veicular completo sob a ação de perfis de pista", Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Rodrigues, J., 2005, "Cálculo e avaliação dos parâmetros da rigidez auxiliar à rolagem de uma suspensão dianteira mecânica", Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- Santos, A., 2001, "Apostila Elementos de Máquinas I", Faculdade de Engenharia Mecânica – Universidade Estadual de Campinas.
- Silva, E., 2001, "Otimização de estruturas de concreto armado utilizando algoritmos genéticos", Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- Shigley, J., 2011, "Elementos de Máquinas de Shigley", Ed. AMGH Editora Ltda, 8ª ed, São Paulo, Brasil, 528 p.

- Selemat, H., 2013, Bilong, S., "*Optimal Controller Design for a Railway Vehicle Suspension System Using Particle Swarm Optimization*", foi publicado em IEEE (978-1-4673-5769-2/13).
- Volkswagen, 2007, "Manual de Treinamento – Componentes da Suspensão, Direção e Freio, Linha 320 e 370 cavalos – Linha Caminhão e Onibus Volkswagen Constellation.