

## SUSPENSÃO ATIVA: ESTUDOS DE MÉTODOS E MODELOS

**Autores:** Leonardo Cesar Diniz, Beatriz Fazio Ferreira, Danilo Fernando Boti, Leonardo Theodoro da Silva, Lívia Arantes Silva.

**Orientador:** Gustavo Caravita de Andrade

**RESUMO:** O trabalho a seguir apresentado visa o aprimoramento de um sistema de suspensão eletromagnética ativa criado pela companhia Bose nos anos 1980. Este tipo de suspensão veicular é destacado por sua incrível eficiência em termos de conforto e performance, porém fora considerado um insucesso em questões comerciais, de peso e aplicabilidade em termos de manutenção, desgaste etc. Dessa forma, o trabalho visa sua simplificação mecânica, mantendo suas características mais cobiçadas. Sendo assim, foram excluídos alguns componentes mecânicos pesados.

O sistema consiste em um eletroímã poderoso que interage com um ímã permanente que deve realizar o movimento do eixo principal do conjunto para que assim haja adequação do comprimento da suspensão, resultando em maior absorção dos desníveis da via.

**Palavras-chave:** Suspensão ativa, TCC, projeto, engenharia mecânica.

**ABSTRACT:** The work presented below aims at the improvement of an active electromagnetic suspension system created by the company Bose in the 1980s. This type of vehicle suspension is distinguished by its incredible efficiency in terms of comfort and performance, however it was considered a failure in commercial matters, weight and applicability in terms of maintenance, wear, etc. In this way, the work aims at its mechanical simplification, maintaining its most coveted characteristics. Therefore, some heavy mechanical components were excluded.

The system consists of a powerful electromagnet that interacts with a permanent magnet that must move the main axis of the set so that the length of the suspension is adapted, resulting in greater absorption of the unevenness of the track.

**Keywords:** Active suspension, TCC, design, mechanical engineering.

### 1. INTRODUÇÃO

Desde os primórdios da primeira revolução industrial e as nascentes primeiras indústrias de veículos busca-se o aprimoramento em questões de conforto “sobre quatro rodas” no que é, hoje em dia, não só um meio de locomoção eficiente e relativamente barato, mas também um símbolo de status, ferramenta de trabalho, lazer, esporte e um sinônimo de liberdade.

Dentre as disciplinas abordadas nessa busca pelo conforto e performance, um deles é amplamente estudado: as suspensões mecânicas.

Independente dos tipos (que serão posteriormente esmiuçados) os objetivos primários de todas elas são basicamente os mesmos: redução do desconforto (como náuseas ou choques mecânicos) provocado pelas imperfeições dos terrenos -sejam eles pavimentados ou não- e pela força G causada pela aceleração e desaceleração constante. É válido lembrar que de acordo com o LOGISPESA, a força G atua também na lateral dos veículos em curvas de médias e altas velocidades, o que torna o veículo muito suscetível ao desconforto dos passageiros. Portanto, aumenta-se a procura por sistemas capazes de prover conforto nos veículos em um mundo cada vez mais tecnológico, porém extremamente simples no que diz respeito a este assunto.

Podemos citar três, dentre as principais, soluções apresentadas pelo homem na tentativa de resolver estes problemas: suspensões passivas, ativas e semi-ativas. Porém, o que deve ser considerado o objetivo final com relação às suspensões mecânicas: as suspensões ativas.

De acordo com a PATROCAR, suspensões eletromagnéticas ativas como a criada em 1980 pela atual companhia de aparelhos de som e que fora (e ainda é) referência mundial em termos de tecnologia, a Bose, são capazes de manter as rodas do veículo em contato com o solo o tempo todo, prever as irregularidades do pavimento e, ainda mais, antecipar as reações dos eixos do veículo a praticamente qualquer obstáculo comum, praticamente anulando as ondulações, choques e impactos do asfalto, das acelerações provocadas pelo arranque de inércia ou curvas acentuadas. É basicamente projetada com sensores individuais dispostos em cada roda, onde leitores precisos mapeiam o pavimento e programam reações exatas em cada roda separadamente. Isso faz com que as rodas “desenhem um caminho” oposto aos das imperfeições. O resultado é a sensação máxima de estabilidade e conforto no interior do veículo, além de melhorias sobre performance em maiores velocidades.

Ou seja, suspensões ativas são aquelas que utilizam amortecedores controlados eletronicamente através de sistemas que leem os movimentos do pistão e é gerada força contrária ao movimento na medida exata para dissipar a energia da oscilação. Esse tipo de sistema consome energia do carro, sendo recomendado o uso apenas para utilitários, como SUV e veículos de carga. Com um sistema de regulação conectado ao computador de bordo do carro, é possível adequar a suspensão mais baixa quando se deseja estabilidade, e aumentar sua altura quando se deseja maior conforto em relação às irregularidades da pista.

## **1.1 JUSTIFICATIVA**

Ao observar a lacuna existente na exploração acadêmica da suspensão ativa, bem como a exploração limitada das suspensões eletromagnéticas, notou-se a viabilidade de elaborar um projeto de pesquisa com ênfase na disseminação do conhecimento sobre suspensões ativas e seu potencial de inspiração a diversas áreas do amortecimento e conforto de veículos, neste especificamente, a suspensão ativa.

Além destas lacunas que geraram a oportunidade do projeto, existe a motivação pessoal dos autores, estudantes de engenharia mecânica.

O projeto tem por foco, portanto, representar a melhoria no conceito de suspensão ativa Bose analisados durante a pesquisa e aplicá-la a uma suspensão ativa com eletroímã e imã de neodímio, visando à diminuição do peso total, quanto dos conceitos estabelecidos até o momento sobre suspensão ativa.

Como um incentivo a mais que ratifica a importância do projeto, observou-se que este é pioneiro a abordar características dos eletroímãs e imã aplicados a suspensão ativa na Universidade do São Judas Tadeu, o que pode incentivar outros alunos a explorarem mais o tema, assim como os demais ligados à engenharia mecânica.

## **1.2 OBJETIVO GERAL**

Pesquisar, estudar e através destes projetar e criar um modelo em escala reduzida de uma suspensão ativa tentando ao máximo contornar os principais problemas dela, como alto peso e consumo de energia.

## **1.3 OBJETIVO ESPECÍFICO**

O grupo visa:

- apresentar a dissertação em nome da evolução deste sistema na indústria de veículos, que é hoje cada vez mais essencial na vida e no cotidiano de milhões de pessoas não só no país, mas no mundo.

- apresentar um produto capaz de gerar conforto em dimensões sem precedentes e objetiva a abertura da possibilidade de comercialização do produto em larga escala para maior acessibilidade, tendo como alvo mesmo veículos SUV mais populares, simplificando-o a um nível que seu acesso o torne revolucionário no mercado, um marco ainda não atingido pelas empresas que uma vez o tentaram entre os anos 80 e 90 e fracassaram, seja por falta de recursos, tecnologia, avanço nos materiais utilizados ou capacidade de comercialização.

## **2. REVISÃO LITERÁRIA**

As carroças utilizadas amplamente até o início do século XX já haviam passado por certos desenvolvimentos em seus componentes para minimizar os impactos causados pela interação roda-solo, aos passageiros e cargas, mas a invenção do automóvel por Karl Benz, em 1886, gerou um novo mundo de necessidades e exigências para os veículos.

Desde então, pela constante evolução dos veículos, que se tornavam cada vez mais velozes, mais potentes e mais pesados, também se deu a evolução dos sistemas de suspensão.

### **2.1 SUSPENSÃO VEICULAR**

Um sistema de suspensão veicular é composto por molas, amortecedores, pneus e articulações e a configuração desses componentes depende do tipo de sistema.

É através dos braços de comando da suspensão que a roda pode ser movida independentemente da carroceria, servindo também como mecanismo para isolar a carroceria das irregularidades do solo.

O amortecedor dissipa a carga dinâmica gerada pelas irregularidades e as molas fornecem amortecimento de fricção, bem como sua própria histerese, além de manipular a frequência das interferências da via. (DISHANT, ER.PARMINDER SINGH, ER.MOHIT SHARMA, 2017, p. 1377-1379 )

Se as estradas fossem planas e estivessem sempre em perfeitas condições, sem qualquer tipo de irregularidade, não seria necessária a instalação de um sistema de suspensão. No entanto, como isso não é uma realidade, qualquer buraco ou elevação em uma pista gera um movimento com força e sentido variado no corpo.

O uso da suspensão se faz necessário porque toda interação roda-solo gera um impacto, que pode afetar todo funcionamento, estabilidade e integridade de um veículo, além da segurança dos passageiros e/ou carga.

O sistema de suspensão tem como principais funções:

- Conectar o veículo às rodas e suportar o peso do veículo;
- Proporcionar maior estabilidade para o veículo, isolando a carroceria de impactos da via, absorvendo, em conjunto com os pneus, os choques causados pelas irregularidades do solo;
- Proteger o veículo contra desgastes e danos;
- Manter as rodas pressionadas ao chão;
- Transmitir as forças de condução e frenagem.

É imaginado como uma suspensão ideal um sistema que absorve os choques do contato com o solo, independentemente, e então retorna à sua posição original. Porém, esse sistema depende grandemente da rigidez da mola, se muito rígida pode causar desconforto e se muito macia pode permitir mais movimento do que é aceitável.

O conforto geral é assumido quando as condições são reduzidas para cinetose de 1 Hz e chacoalho ("head toss") entre 2 e 8 Hz. (RAKSHITH M, YATHIN KUMAR L, VIKAS S. G, 2014, p. 13)

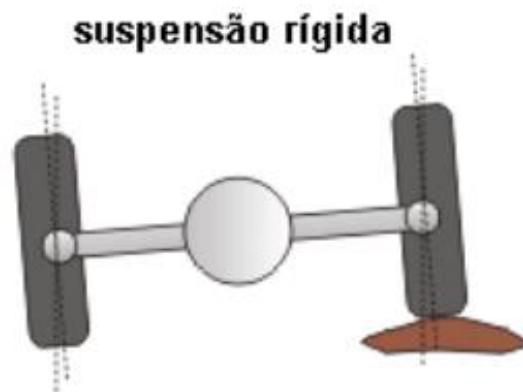
## 2.2 TIPOS DE SUSPENSÃO

As suspensões podem ser classificadas pela estrutura da seguinte maneira:

### 2.2.1 Suspensão Dependente

A suspensão dependente pode ser descrita como um sistema onde as rodas traseiras ou dianteiras são conectadas entre si em um mesmo eixo rígido transversal.

Figura 1. Suspensão Dependente.



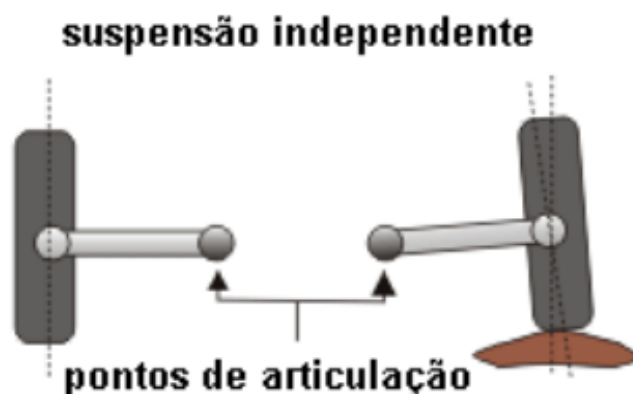
Fonte: SENAI-SP, 2006

Ela pode ser suspensa por uma combinação de feixe de molas com amortecedores ou molas helicoidais com amortecedores (SENAI-SP,2006).

### 2.2.2 Suspensão Independente

A suspensão independente pode ser descrita como um sistema onde as rodas não são conectadas entre si, em um mesmo eixo articulado para cada uma.

Figura 2. Suspensão independente.



Fonte: SENAI-SP, 2006

Ela também pode ser suspensa por uma combinação de feixe de molas com amortecedores ou molas helicoidais com amortecedores, além de barra de torção, feixe de torção e hidro-pneumática. (SENAI-SP, 2006, p. 55-56)

### **2.2.3 Suspensão Semi-Independente**

A suspensão semi-independente pode ser descrita como um sistema onde as rodas são conectadas entre si no mesmo eixo, porém consegue que os pneus reajam diferentemente porque possui a capacidade para movimentos de torção (SENAI-SP, 2006).

### **2.2.4 Suspensão Passiva**

A suspensão passiva compõe as suspensões tradicionais, presentes desde a motorização de veículos no século passado, compostos principalmente por molas helicoidais a até pistões hidráulicos de regulação mecânica, que estão presentes em 99% dos carros de hoje em dia.

O sistema parte de uma base teórica fundamental: a reação passiva às imperfeições do asfalto, ou seja, a não-reação ao piso, mas sim a amortização posterior ao choque. Este sistema convencional é razoável para seu fim, barato e de fácil manutenção, mas não é capaz de deter completamente a sensação de desconforto. Ele só é capaz de resolver o problema parcialmente, pois não garante estabilidade total ao veículo e não é capaz de prover regulação rápida e inteligente enquanto se dirige com o fim de melhorar a performance ou comodidade, o que levou muitas montadoras nos anos 80 a especular novas possibilidades em busca de soluções.

### **2.2.5 Suspensão Semi-Ativa**

A suspensão semi-ativa consiste basicamente em um fluido não newtoniano como uma substância ferromagnética embebida em um líquido capaz de alterar suas propriedades mecânicas de acordo com a quantidade de corrente elétrica presente em seu meio. Esse sistema já conta com inteligência artificial, uma vez que é controlado por um algoritmo capaz de mudar o coeficiente de amortecimento de acordo com as frequências de oscilação do terreno. Este sistema é relativamente acessível, mas possui ainda o mesmo problema fundamental das suspensões passivas: não reagem instantaneamente às imperfeições do asfalto, sendo insuficiente no que diz respeito ao ultimato sobre conforto e dirigibilidade na indústria de veículos.

### **2.2.6 Suspensão Ativa**

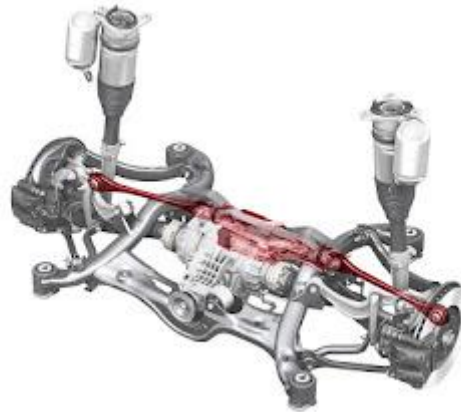
Conforme dito por Matheus Rogério em seu estudo ANÁLISE COMPUTACIONAL DE UM CONTROLADOR PID APLICADO A UMA SUSPENSÃO ATIVA VEICULAR, o objetivo primordial de qualquer suspensão é o conforto, isolando a carroceria das excitações dos terrenos em contato com os pneus, em qualquer veículo. Deve-se atenuar as vibrações provocadas pelo pavimento, carregamentos laterais, além de acelerações de arrancada ou movimentos de arfagem. A suspensão deve manter a massa suspensa com zero (ou mínima possível) aceleração a cada movimento vertical, lateral, etc. e a maioria das suspensões de fato fazem isso, porém de maneira passiva, onde a energia de oscilação é dissipada e o grau de aceleração é reduzido à níveis toleráveis, porém nem de longe são a maestria em questões de conforto, uma vez que essa energia de oscilação ainda é muito perceptível e, dependendo dos terrenos e condições enfrentadas pelo veículo, o desconforto será ainda sentido.

Como o próprio nome já diz, a suspensão ativa tem como principal função reagir ativamente a essas oscilações provocadas pelo pavimento. Para cada aceleração em um determinado sentido provocada pelo terreno, haverá no movimento exato uma mesma aceleração no sentido oposto, imposto de maneira ativa pela suspensão, mantendo o pneu em contato com o solo o tempo todo e a carroceria completamente estável. Para isso, são utilizados poderosos atuadores (em substituição ou em paralelo às molas e amortecedores) capazes de prover energia cinética no sentido oposto em precisão, além de um conjunto de sensores dispostos à carroceria capazes de fornecer informações precisas, “mapeando” as condições à frente do veículo. Estes dados, por sua vez, são processados pela ECU (“Electronic Control Unit”) que calcula, em tempo real, a força necessária que o atuador deve aplicar no sistema, a fim de isolar a carroceria.

É claro que, dado as devidas proporções, os sistemas de suspensão ativa possuem suas desvantagens. Algumas delas são: custos elevados dos componentes hidráulicos e dos circuitos para trabalhar em alta pressão; Altos custos de produção; Sistema extremamente pesado, aumentando o consumo de combustível do veículo; Complexidade do sistema, exigindo manutenção constante, além de vulnerabilidade em função de seus diversos componentes;

Porém estes problemas são contornáveis se o sistema for devidamente simplificado, questão que será trabalhada mais adiante nesta dissertação.

Figura 3. Exemplo suspensão ativa Audi “A8”.

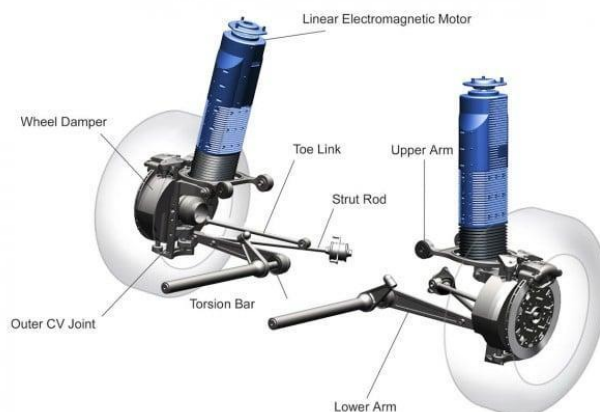


Fonte: <https://www.conexaoautomotivabr.com/2017/07/nova-geracao-do-audi-a8-tem-mais.html>

## 2.3 SUSPENSÃO BOSE

No início da década de 80, a Bose (uma empresa de áudio) deu início ao “Project Sound”, um projeto de suspensão ativa. (RAZÃO AUTOMÓVEL, 2018). O sistema (Figura 3) é composto de motores eletromagnéticos lineares trabalhando semelhante a alto-falantes, que se movimentam em dois sentidos opostos em uma mesma direção, sendo submetidos a um campo elétrico de uma bobina, gerado por uma corrente elétrica. Os motores elétricos de cada um dos quatro cantos do carro têm amplificadores de potência, e são regenerativos. Logo, absorvem energia quando as forças da roda agem na torre, armazenando energia para a reação, para o motor empurrar a roda para baixo. Sendo assim, sensores em várias posições leem o solo à frente do carro e enviam informações para uma central eletrônica. (JUVENAL JORGE, 2009)

Figura 4. Sistema da Suspensão Bose



Fonte: FLATOT, 2016

O resultado (figura 3) é que a suspensão conseguia fazer um trabalho antecipado, isolando quase toda a massa suspensa (carroceria) do trabalho da não-suspensa, acompanhando todos os obstáculos em vez de reagir ao impacto deles. No processo de compressão (começo até a metade de uma lombada), os motores ficam passivos na dose exata, fazendo as rodas acompanharem a lombada sem repassar esta força à carroceria, que “flutua” sobre os obstáculos, sem ser influenciada por eles. Da metade para o fim da lombada, os motores se estendem com precisão total. Com funcionalidade tão complexa, conter a rolagem da carroceria em curvas e mergulhos e empinadas em frenagens e acelerações bruscas era brincadeira de criança. (FLATOT, 2016)

Figura 5. Exemplo de um veículo sem/com suspensão



Fonte: FLATOT, 2016

O maior benefício desta suspensão é reduzir todos os movimentos da carroçaria, acelerar, curvar ou até mesmo no passar por cima de qualquer irregularidade. (RAZÃO AUTOMÓVEL, 2018), porém, essa ideia não deu certo pois o custo de fabricação é caro e muito pesado para ser aplicado imediatamente nos carros de passeio. Teria que ser adicionado 90 kg ao veículo, uma taxa de quase 10% no peso dos carros menores, o que altera a quantidade de combustível utilizado, algo acima do preço nos dias de hoje e um fator muito importante para a economia. Como os veículos menores representam boa parte do mercado mundial, o barateamento do componente por meio da liquidez de produção, seria inviável. (TURBUWAY, 2022).



## 2.4 CONTROLE

Controle é o processo de fazer com que uma variável do sistema assuma um determinado valor, chamado de valor de referência (FRANKLIN; POWELL; EMAMI-NAEINI, 2013). Um sistema de controle é composto por um controlador e uma planta que influencia em uma ou mais variáveis deste processo.

Sendo assim, existem dois tipos básicos de controle: malha aberta e malha fechada. No controle em malha aberta (Figura 4), o sistema não contém um sensor para medição de saída, ou seja, não há uma ação de correção para garantir que a saída seja igual ao sinal de referência.

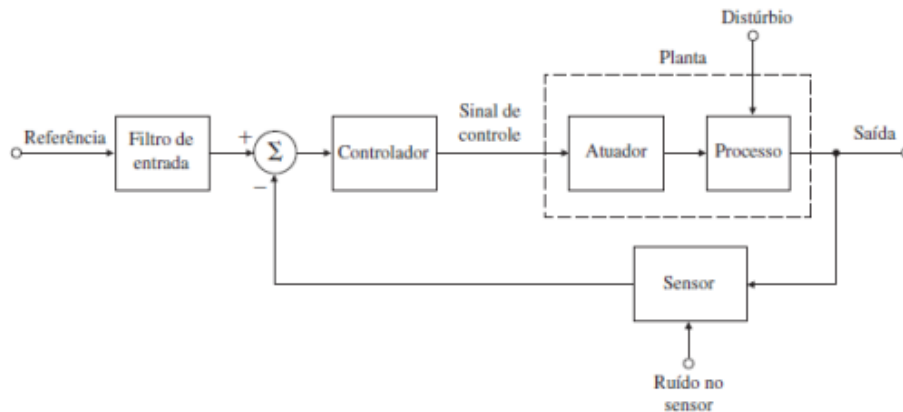
Figura 6 – Diagrama de blocos de um sistema de controle em malha aberta



Fonte: Dorf e Bishop (2009)

No controle em malha fechada (Figura 5), o sistema inclui um sensor para medir o sinal de saída. Os dados adquiridos pelo sensor são realimentados ao controlador que faz uma comparação com a referência; o resultado desta comparação é o erro da planta. A partir do erro, o controlador envia um sinal de esforço de controle para atuar na variável de controle do processo. Uma característica de ambos os tipos de sistema é a presença do atuador. O atuador é um dispositivo que de alguma forma influencia na variável de controle do processo, e recebe o sinal de esforço de controle diretamente do controlador.

Figura 7 – Diagrama de blocos de um sistema de controle em malha fechada



Fonte: Franklin, Powell e Emami-Naeini (2013)

Há também na parte teórica e técnica do projeto de controle, que são divididas em duas categorias: controle clássico e controle moderno. Sendo que o controle clássico é baseado nas transformadas de Laplace e transformadas Z, que foram métodos dominantes na área de controle até a década de 1960. Já o controle moderno baseia-se em equações diferenciais na forma de espaço de estados, sendo introduzido à área de controle a partir da década de 1960 (OGATA, 2011). O projeto de um controlador para um sistema dinâmico requer um modelo matemático que represente a resposta dinâmica do sistema. A maioria dos sistemas físicos são complexos e não lineares e geralmente o projeto precisa ser baseado numa versão simplificada, porém robusta, do modelo, a fim de que o controle atenda aos requisitos de desempenho quando aplicado ao dispositivo real (FRANKLIN; POWELL; EMAMI-NAEINI, 2013). Dentro do controle moderno existem diversos ramos de estudo. Um



deles é o controle inteligente. Conforme Shaw e Simoes (1999), um sistema com controle inteligente consegue fornecer respostas que solucionam problemas. As pessoas têm a capacidade de raciocinar de forma incerta, difusa ou nebulosa, ao passo que as máquinas são movidas pelo raciocínio preciso e binário. A proposta de um sistema inteligente é justamente eliminar esta restrição, fazendo com que as máquinas possam raciocinar de forma parecida com a do ser humano, atribuindo a elas inteligência artificial.

### **3.METODOLOGIA**

Foi utilizado o método de pesquisa descritiva com a finalidade de analisar os resultados através de um estudo profundo da suspensão ativa, partindo de uma revisão bibliográfica composta pelo principal desenvolvimento da área. A finalidade é traçar um “padrão” que possa ser trabalhado como exemplo e aplicado junto aos objetos empíricos.

Para isso, a pesquisa será baseada em desenvolvimentos das principais empresas, como por exemplo: Bose, ClearMotion, Vibracoustin e Audi entre outros desenvolvimentos que elaboraram trabalhos pertinentes ao assunto.

Entretanto, é importante salientar que o corpus de autores tende a aumentar na medida em que a leitura vier sendo desenvolvida.

Ambas foram escolhidas por estarem enquadradas como núcleos atuantes e com constante trabalho dentro do setor automotivo, participando anualmente de feiras nacionais e internacionais, além de promoverem uma extensa gama de exposições e publicações.

Partindo dos conceitos apresentados pelas empresas, o trabalho analisará o perfil destes objetos empíricos, compreendendo todo o trabalho que as automotivas já realizaram, assim como a importância que possuem para o avanço do mercado de suspensões ativas.

Para isso, será necessária uma pesquisa documental dos principais responsáveis pelos desenvolvimentos dessas suspensões ativas.

O estudo terá caráter essencialmente qualitativo, com ênfase na observação e estudo documental, ao mesmo tempo que será necessário o cruzamento dos levantamentos com toda a pesquisa bibliográfica já feita.

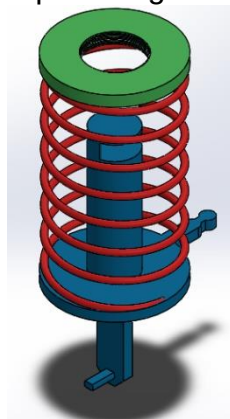
### **3. PROJETO**

O projeto apresentado para uma suspensão ativa consiste em uma haste com ímãs de neodímio em suas extremidades contraposta com um eletroímã ligado por uma mola. Dessa forma, a atração ou repulsão do conjunto ocorrerá de acordo com o sentido da corrente elétrica que passa por ele, uma vez que a grandeza do campo elétrico é diretamente proporcional à corrente, fazendo assim com que haja atração ou distensão da mola, que também atua como elemento dissipativo do conjunto.

O protótipo é constituído pelo suporte inferior, suporte superior, mola de ligação, eletroímã, base para o eletroímã, base fixa, roda e componentes elétricos.

Todas as peças, com exceção do eletroímã, mola, roda e ímãs foram confeccionados através de impressão 3D em PLA, tanto por ser o material mais utilizado quanto a sua resistência mecânica alta e durabilidade.

Figura 8. Suportes ligados pela mola



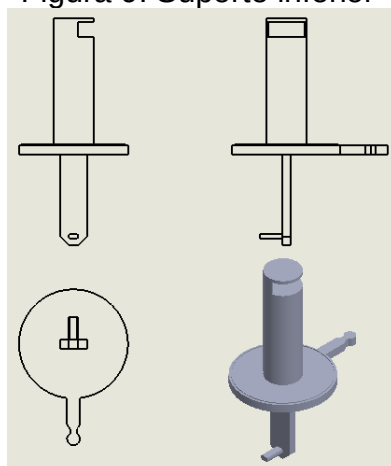
Fonte: Autor, 2022

### 3.1 SUPORTE INFERIOR

O suporte inferior é uma das partes mais importantes do protótipo, pois nela está alocado o ímã de neodímio que será a força constante do protótipo, além de estar ligada também à roda que fará contato com a superfície e o suporte do conjunto que, nesse caso, servirá somente como demonstração do protótipo.

Como já dito o conjunto inteiro foi produzido através de manufatura aditiva, usando uma impressora 3D pelo método fusão e deposição de material por camadas. A peça consiste em uma base com 60mm de diâmetro com uma espessura de 5mm e com 3 hastes juntas a ela, sendo uma perpendicular e as outras duas paralelas à base, sendo cada uma em uma face. A haste perpendicular tem a função de encaixe para a base fixa tendo um comprimento de 26 mm com uma largura de 3.5mm, com uma ponta arredondada e seguido por estreitamento para que assim ele possa se encaixar e mover livremente na base fixa. A haste superior a base de 60mm tem a função de comportar os ímãs de neodímio, portanto responsável por transmitir a força da interação dos campos elétricos para o conjunto. Ela é composta por um cilindro no centro da base com 22mm de diâmetro e com 70mm de altura. Na ponta superior deste cilindro há uma cavidade para abrigar os ímãs com 20mm de diâmetro por 8mm de altura, assim com paredes de 1mm em ambos os lados para que haja o mínimo de perda de força magnética devido a barreira criada entre o eletroímã e os ímãs de neodímio. Já na outra face a haste é composta por um retângulo de 15mm por 5mm com altura de 50mm, esta haste servirá de conexão da roda com o protótipo.

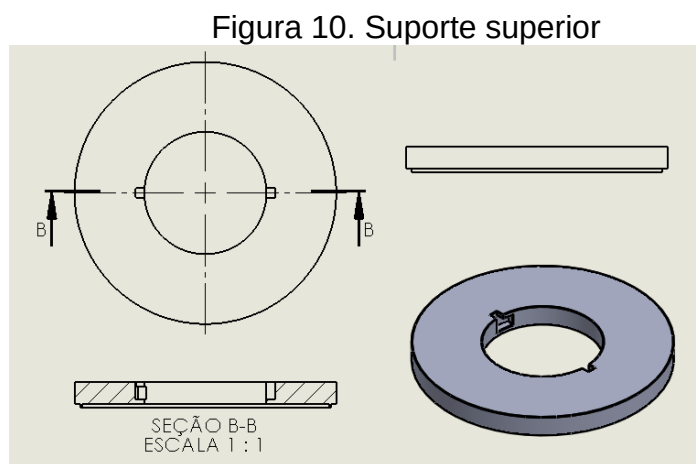
Figura 9. Suporte inferior



Fonte: Autor, 2022

### 3.2 SUPORTE SUPERIOR

Já o suporte superior, Figura 10, tem a função de alojar o eletroímã e sustentar a carga que será aplicada ao conjunto, porém como o protótipo não será submetido a nenhuma carga sua função principal será somente o eletroímã. Com um diâmetro de 60mm e espessura de 5mm, no centro da peça há um furo de 28mm de diâmetro com dois canais para uma trava e 2mm de cada lado para encaixe da base do eletroímã, será através deste orifício que será possível colocar e retirar o eletroímã sem a necessidade de desmontar todo o conjunto, caso haja alguma falha com ele.



Fonte: Autor, 2022

### 3.3 MOLA

A mola neste conjunto tem a função mais importante, manter todas as peças conectadas, paralelas e servir tanto de resistência para compressão quanto para extensão. Independente de qual movimento que os campos eletromagnéticos irão exercer sobre o conjunto será a mola que será contraposta a esta força para equilibrá-la, sendo seu coeficiente dependente da carga que será aplicada ao sistema. Devido a alto custo tanto do imã de neodímio e eletroímã capazes de gerar campos fortes o suficiente, portanto capaz de levantar maiores cargas, o protótipo apresentado foi realizado em escala reduzida com uma e projetado com uma mola de PLA impressa juntamente com o resto dos componentes, porém após testes realizados ela se mostrou muito maleável e, portanto, foi substituída por uma mola de aço carbono de 37.6 mm de diâmetro e 82.5mm de comprimento e com um diâmetro de fio de 1.9mm, conforme visto na Figura 11.

Figura 11. Mola de compressão

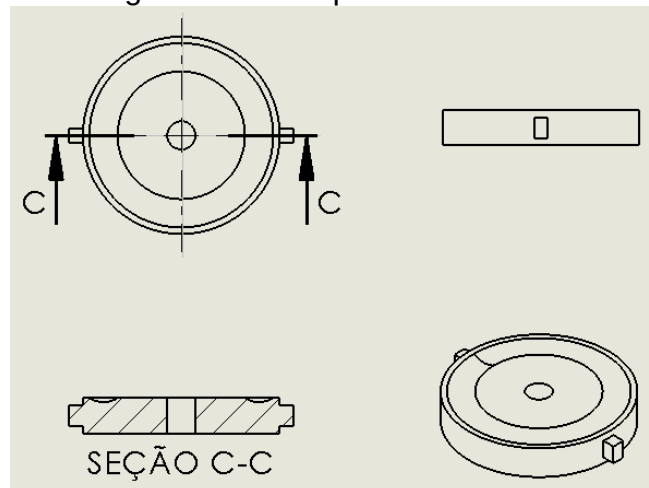


Fonte: Autor, 2022

### 3.4 BASE PARA O ELETROÍMÃ

Essa peça serve de encaixe para o eletroímã, com um diâmetro externo de 28mm, um furo em seu centro de 4mm de diâmetro para a passagem de um parafuso M4, duas hastes (que servirão de trava) de 2mm além do diâmetro externo e um canal circular na face superior que servirá para facilitar a rotação da peça e o encaixe da mesma. Essa peça é encaixada no suporte superior do protótipo, ela é necessária porque apesar de todas as peças serem impressas separadamente, para evitar quaisquer falhas de encaixe entre elas, todas serão coladas no projeto final, assim não possibilitando a troca do eletroímã caso seja necessário.

Figura 12. Base para o eletroímã

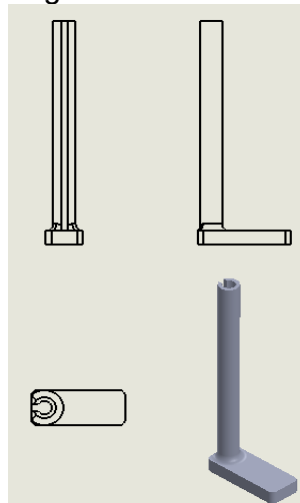


Fonte: Autor, 2022

### 3.5 BASE FIXA

Esta peça tem função somente durante a apresentação do protótipo, uma vez que ela serve de apoio para que o conjunto fique na vertical para a apresentação. Ela possui uma base retangular de 50mm por 20mm sendo que em uma das extremidades da face superior há um canal de diâmetro 7,6mm para o encaixe da haste do suporte inferior com uma altura de 120mm garantindo boa liberdade de movimento para o conjunto.

Figura 13. Base fixa



Fonte: Autor, 2022

### 3.6 ELETROÍMÃ

Para a apresentação do protótipo fora escolhido um eletroímã de contato solenoide de modelo BR-P30/22 de 100N de sucção e 24Vcc de entrada e 10W de potência. Ele tem diâmetro externo de 25mm com 20mm de altura. Este, por sua vez, foi escolhido pensando num balanço entre forças do campo elétrico gerado pelo eletroímã e o ímã permanente. O eletroímã é mais forte, possui um dimensionamento maior além de um campo mais forte, o que exige em uma estrutura maior para o protótipo, evitando a quebra em algum ponto, o que obviamente não é o ideal.

Figura 14. Eletroímã



Fonte: Baú da eletrônica, 2022

### 3.7 IMÃ PERMANENTE

Para o protótipo fora escolhido ímãs de neodímio N35, com 20mm de diâmetro por 2mm de espessura. Cada ímã tem uma indução magnética de 1800 Gaus, porém no protótipo foi escolhido 4 destes ímãs em conjunto, fazendo assim um campo equivalente a 4 vezes este valor garantindo uma boa interação com o campo gerado pelo eletroímã.

Figura 15. Ímã Permanente



Fonte: Mercado livre, 2022

### 3.8 FONTE DE 24VCC

Para alimentação do eletroímã foi escolhido uma fonte de 24Vcc de modelo S-75-24 e 75W de potência, o que é mais que o necessário para alimentar o protótipo.

Figura 16. Fonte de 24Vcc



Fonte: Tec Controll , 2022

### 3.9 COMPONENTES ELÉTRICOS EM GERAL

Para construção da ativação do protótipo serão utilizados alguns componentes elétricos como resistores, protoboard, jumpers e um potenciômetro para que assim se possa variar a tensão se assim diminuir a tensão gerada pelo eletroímã, portanto controlando a distância de atração ou repulsão dos ímãs.

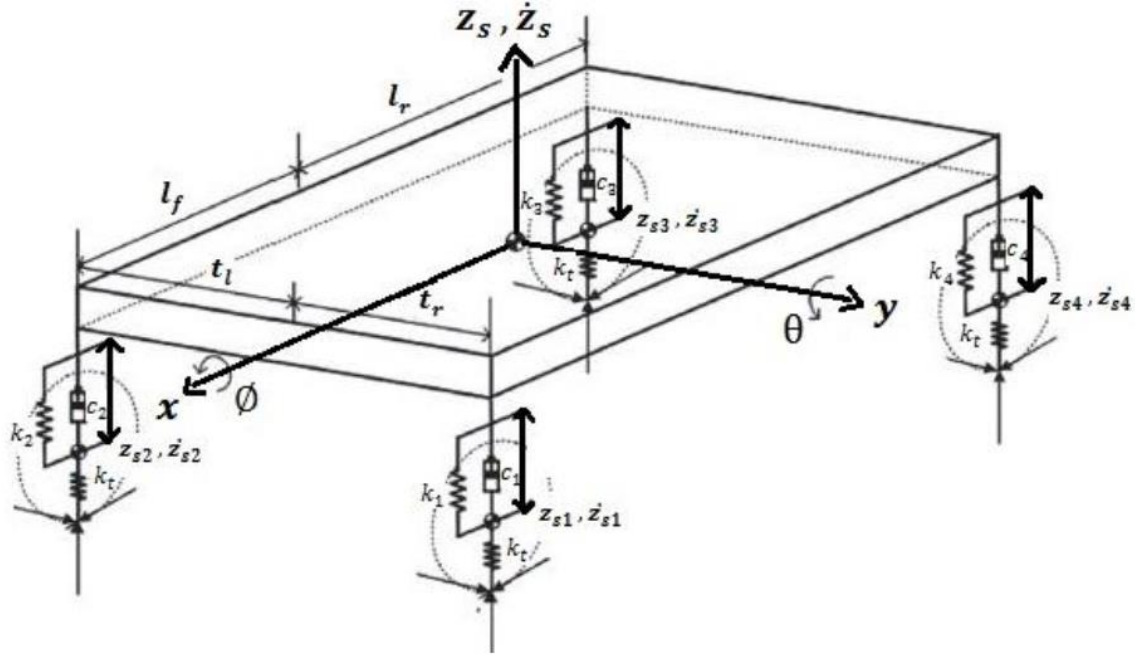
## 4. DESENVOLVIMENTO TEÓRICO

Nesta parte iremos abordar os conceitos físicos que englobam os sistemas de suspensão, também iremos desenvolver e explicar as diferenças dos sistemas convencionais (suspensão passiva) para o sistema desenvolvido pelo grupo durante esse estudo.

### 4.1 MODELO DE 4 EIXOS

A suspensão veicular convencional é consistido por 4 eixos, podendo ser modelado fisicamente por massas e elementos de molas em conjunto com a amortecedor. Sendo ilustrado pela Figura 17

Figura 17. Modelo suspensão veicular completo



Fonte: Tchamna et al., 2015 apud: Matheus Rogério, 2017

Este modelo ilustrado na figura 17, é um modelo de veicular. Neste sistema temos a presença de sete graus de liberdade (GDL). Sendo quatro relacionados ao deslocamento vertical das massas não suspensas, ou seja, peso das rodas, eixo dianteiro, cardan, componentes do próprio sistema de suspensão e direção. Essa massa é representada fisicamente como localizada em cada respectiva roda do veículo.

Os outros três GDL restantes são relacionadas na massa suspensa, que consiste na carroceria do veículo (chassi) com o peso dos passageiros e bagagem (estimativa para projeto do sistema). Essa massa movimenta-se verticalmente no eixo z e rotaciona no eixo x e y.

Utilizando a 2ª Lei de Newton ( $\Sigma \vec{F} = m \cdot a$ ) podemos descrever a equação cinemática de forças e deslocamentos lineares geral do sistema, descrita na equação (1), considerando a posição inicial do modelo da figura 17 em equilíbrio estático:

$$-k_1 \cdot (z_{s1} - z_{m1}) - c_1 \cdot (\dot{z}_{s1} - \dot{z}_{m1}) - k_2 \cdot (z_{s2} - z_{m2}) - c_2 \cdot (\dot{z}_{s2} - \dot{z}_{m2}) - k_3 \cdot (z_{s3} - z_{m3}) - c_3 \cdot (\dot{z}_{s3} - \dot{z}_{m3}) - k_4 \cdot (z_{s4} - z_{m4}) - c_4 \cdot (\dot{z}_{s4} - \dot{z}_{m4}) = m_s \cdot \ddot{z}_s \quad (1)$$

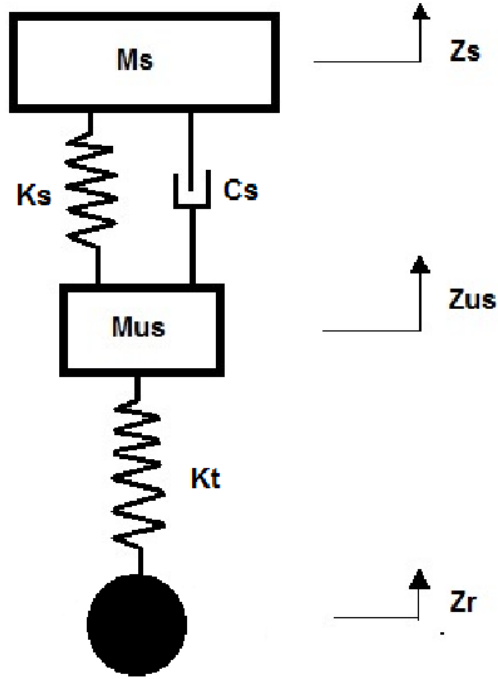
E dessa equação (1) percebemos que a soma das forças geradas pelos conjuntos de molas e os amortecedores deve ser igual a força que a massa sustentada  $m_s$ . Assim se igualando e resultando na não movimentação do sistema verticalmente. Nela as variáveis  $z_{m1}, z_{m2}, z_{m3}$  e  $z_{m4}$  e  $\dot{z}_{m1}, \dot{z}_{m2}, \dot{z}_{m3}$  e  $\dot{z}_{m4}$  representam o deslocamento e velocidade das massas não suspensas, já as variáveis  $z_{s1}, z_{s2}, z_{s3}$  e  $z_{s4}$  correspondem ao deslocamentos da massa suspensas por cada ponto do sistema. Todos essas variáveis são calculadas individualmente.

#### 4.2 MODELO SIMPLIFICADO 1/4

Para melhor entendimento sobre o projeto abordado neste TCC, iremos abandonar o sistema de 4 eixos completo e focar nas forças envolvidas em somente um conjunto, assim facilitando o desenvolvimento de equações e diminuindo os GDL de 7 para somente 2. Para continuar o nosso estudo até chegarmos no modelo mais fiel do utilizado no protótipo utilizaremos a figura 18.



Figura 18. Modelo  $1/4$  suspensão veicular convencional



Fonte: Matheus Sabka, 2017.

Com este modelo verificamos que as variáveis de interesse, as quais influenciam no deslocamento no eixo  $z$  da massa de ambas as massas, sendo  $k_t$  o coeficiente de elástico do pneu e  $z_r$  o desnivelamento da pista. Portanto da mesma forma do modelo anterior, aplicando a 2ª Lei de Newton é possível obter as equações (2) e (3) de forças do sistema:

$$k_s \cdot (z_s - z_{us}) + c_s \cdot (\dot{z}_s - \dot{z}_{us}) - k_t \cdot (\dot{z}_{us} - \dot{z}_r) = m_{us} \cdot \ddot{z}_{us} \quad (2)$$

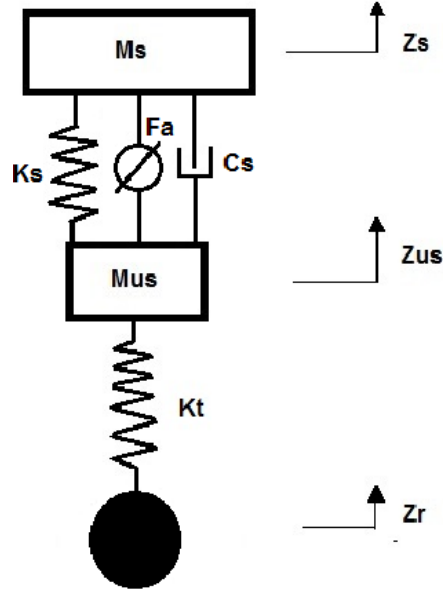
e

$$k_s \cdot (z_s - z_{us}) + c_s \cdot (\dot{z}_s - \dot{z}_{us}) = m_s \cdot \ddot{z}_s \quad (3)$$

Ao analisarmos ambas as equações percebemos que elas estão relacionadas entre si, é possível perceber que o desnivelamento da pista  $z_r$  é a variável que causa uma perturbação no sistema. E para uma suspensão focada em conforto do passageiro a mesma deve de forma objetiva minimizar ao máximo o deslocamento da massa suspensa, ou a variável  $z_s$ , assim passando o mínimo de imperfeições do trajeto para o passageiro.

Porém no modelo de suspensão ativa é diferente se comparado ao modelo anterior, nele existe em paralelo a mola e ao amortecedor uma força eletromagnética que auxilia no equilíbrio das forças, mas como essa força é gerada de forma ativa, através de um controlador ou um atuador eletrônico, e não passiva, o sistema pode através de sensores prever as deformações da via e já as antecipar e gerando assim ainda mais conforto. Como no modelo da figura 19:

Figura 19. Modelo  $1/4$  suspensão ativa veicular



Fonte: Matheus Sabka, 2017

Já este modelo fornece duas equações (4) e (5):

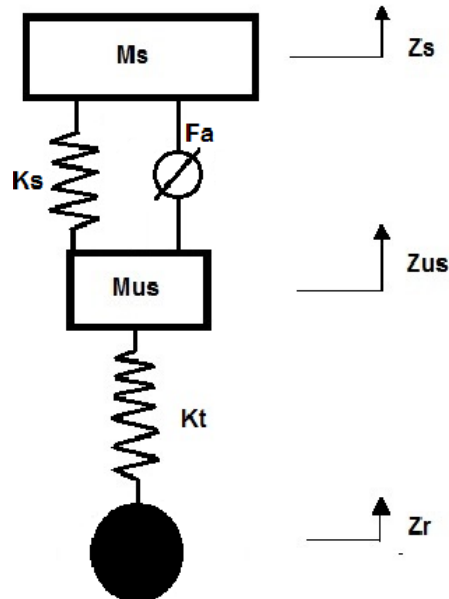
$$k_s \cdot (z_s - z_{us}) + c_s \cdot (\dot{z}_s - \dot{z}_{us}) - k_t \cdot (\dot{z}_{us} - \dot{z}_r) - F_a = m_{us} \cdot \ddot{z}_{us} \quad (4)$$

e

$$k_s \cdot (z_s - z_{us}) + c_s \cdot (\dot{z}_s - \dot{z}_{us}) - F_a = m_s \cdot \ddot{z}_s \quad (5)$$

Mas nosso modelo de suspensão ativa não possui um amortecedor, portanto depende unicamente na interação entre a sustentação da mola e a força magnética proporcionada pelo eletroímã. Portanto o modelo que mais representa o modelo trabalhado neste documento é o da Figura 20.

Figura 20. Modelo  $1/4$  suspensão ativa protótipo



Fonte: Autor, 2022

Assim partindo das equações (4) e (5) do modelo da figura 20, temos que:

$$k_s \cdot (z_s - z_{us}) + c_s \cdot (\dot{z}_s - \dot{z}_{us}) - k_t \cdot (\dot{z}_{us} - \dot{z}_r) - F_a = m_{us} \cdot \ddot{z}_{us} \quad (6)$$

e

$$k_s \cdot (z_s - z_{us}) + c_s \cdot (\dot{z}_s - \dot{z}_{us}) - F_a = m_s \cdot \ddot{z}_s \quad (7)$$

Porém como o sistema não possui mais o amortecedor, podemos retirar sua função das equações e obter (8) e (9):

$$k_s \cdot (z_s - z_{us}) - k_t \cdot (\dot{z}_{us} - \dot{z}_r) - F_a = m_{us} \cdot \ddot{z}_{us} \quad (8)$$

e

$$k_s \cdot (z_s - z_{us}) - F_a = m_s \cdot \ddot{z}_s \quad (9)$$

Restando assim as equações que serão responsáveis pelo equilíbrio de forças no sistema.

E já que nosso projeto consiste na interação entre um eletroímã e um ímã permanente, podemos calcular a força eletromagnética entre os dois polos desses elementos através da equação de polos magnéticos de Gauss:

$$F = \frac{K \cdot p_{\text{eletroímã}} \cdot p_{\text{ímã}}}{r^2} \quad (10)$$

Sendo:

- $K$  – A constante de proporcionalidade do meio ( $\mu_0/4\pi$  no SI);
- $p_{\text{eletroímã}}$  – O polo magnético do eletroímã;
- $p_{\text{ímã}}$  – O polo magnético do ímã;
- $r$  – A distância entre os dois polos.

Porém, podemos dizer que a distância  $r$  é a distância útil que a suspensão tem para se movimentar, portanto  $r$  é igual a  $z_s - z_{us}$ . Assim substituindo nas equações do sistema simplificado temos que:

$$k_s \cdot (z_s - z_{us}) - k_t \cdot (\dot{z}_{us} - \dot{z}_r) - \frac{K \cdot p_{\text{eletroímã}} \cdot p_{\text{ímã}}}{(z_s - z_{us})^2} = m_{us} \cdot \ddot{z}_{us} \quad (11)$$

e

$$k_s \cdot (z_s - z_{us}) - \frac{K \cdot p_{\text{eletroímã}} \cdot p_{\text{ímã}}}{(z_s - z_{us})^2} = m_s \cdot \ddot{z}_s \quad (12)$$

## 5. PROTÓTIPO, TESTES, CONTROLE E RESULTADOS

### 5.1. PROTÓTIPO

A montagem do protótipo foi feita de forma bem simples, todas as partes impressas foram projetadas com encaixes para facilitar na hora da montagem, como pode ser visto na Seção B-B da Figura 10, e todos foram colados com adesivo instantâneo de contato, com exceção da base fixa e a roda que se encaixavam no suporte inferior mecanicamente. Como pode ser visto na Figura 21.

Figura 21. Conjunto montado com antiga mola



Fonte: Autor (2022)

## 5.2. TESTES E CONTROLE.

Durante os testes de funcionamento do conjunto foi notado que a primeira mola dimensionada, a qual foi também impressa em PLA, era muito flexível para sustentar o conjunto e assim que o eletroímã era energizado na posição de repelir o ímã, o que aumentaria a distância entre os elementos, ao se distanciar do ímã a mola sedia a força lateral dos campos se deformando tal forma que não possibilitava o funcionamento do protótipo. O que pode ser observado na Figura 22.

Figura 22. Deformação da mola



Fonte: Autor (2022)

Portanto foi necessário um substituto à mola, e assim foi encontrado uma mola menos maleável porém não rígida o suficiente para impedir a movimentação do conjunto, foi utilizada uma mola de ao carbono (Figura 11), de constante elástica de 0,051kgf/mm. Já que ela atende os parâmetros do projeto.

Após montagem dos componentes do projeto, foi utilizado uma fonte de 24Vcc de 2A, para alimentação do eletroímã, e em série um potenciômetro de 10k $\Omega$ , para limitarmos a corrente no circuito e assim termos variações da distância entre os elementos, todos conectados por fios 1.5mm de bitola.

Devido a alteração da mola de um comprimento de 110mm para uma de 82.5mm, a distância entre o eletroímã e o ímã permanente se tornou zero (Figura 23), portanto sobrando somente o ato de repulsão entre eles para movimentar o conjunto.

Figura 22. Nova montagem

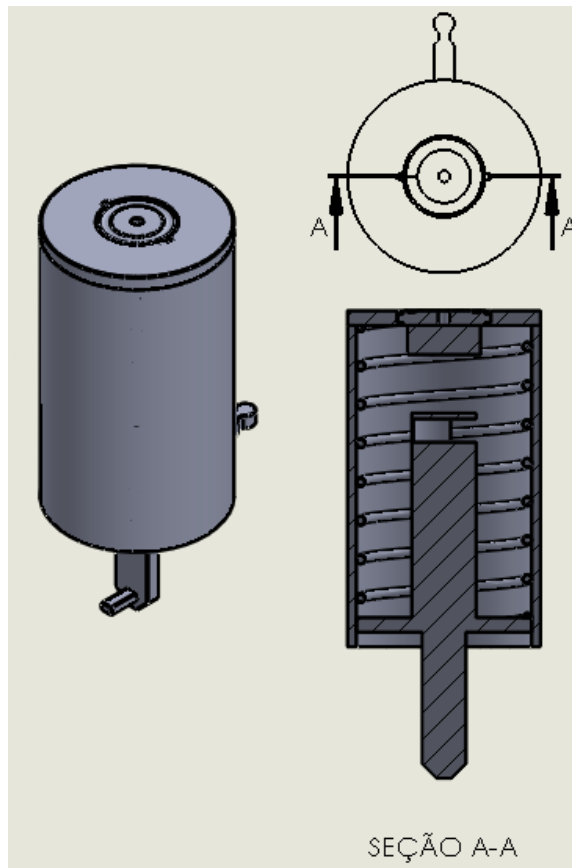


Com a parte elétrica conectada e o protótipo com a nova mola posicionada, foram realizados os principais testes de funcionamento, que seriam aplicação e variação de corrente que criassem a repulsão do eletroímã, com polo igual ao polo do ímã de neodímio, durante os testes verificamos que mesmo com a nova mola que suportasse o campo é muito difícil manter o ímã em somente repulsão, pois como se trata somente da interação entre dois campos mantê-los em perfeito equilíbrio de repulsão exige um alinhamento de alta precisão ou um elemento mecânico limitando a movimentação do eletroímã horizontalmente, já que assim que o eletroímã se movimenta os sentidos dos polos se torna diferente e eles se atraem, desalinhando o conjunto e o tornando inutilizável. Porém guiando o eletroímã manualmente foi possível obter uma repulsão máxima de aproximadamente 8mm entre os dois elementos. Fazendo assim o conjunto funcional com limitações de projeto.

### 5.3. RESULTADOS

O objetivo de realizar um projeto de suspensão ativa que fosse mais leve e com menor consumo de energia foi alcançado, porém com algumas ressalvas, o projeto tem problemas graves, como a extrema necessidade do paralelismo entre o ímã permanente e o eletroímã o qual caso haja algum defeito com a mola, como demonstrado na primeira versão do protótipo, ocasionará no conjunto não ficar retilíneo e assim o não funcionamento da suspensão, um problema notado foi o alto custo para a montagem do sistema, ímã permanentes capazes de gerar um campo forte o suficiente para repelir uma carga de 4000N, o que é em um valor de peso por eixo de um carro popular é extremamente caro e de difícil manuseio, outro problema que poderia ter sido contornado na fase de projeto é a criação de um limitador de movimento horizontal do suporte superior, como guias ou camisa que cobrisse todo o conjunto o tornando paralelo, o que foi projetado após a falha ser notada e modelado na Figura 24, e por fim o último problema notado durante o projeto deste protótipo é a falta de precisão absoluta do curso da suspensão. Claro, em um ambiente ideal o sistema funcionará perfeitamente, porém na realidade o conjunto será submetido a várias forças em ângulos diferentes e como citado o problema em potencial do paralelismo, depender de somente a interação entre dois campos deixa o sistema muito frágil.

Figura 24. Montagem com camisa limitadora



Fonte: Autor (2022)

## 6. CONCLUSÃO

Diante do exposto acima e de todo o estudo em relação à componentes, materiais, técnicas, aplicabilidade e pontos positivos e negativos a respeito de suspensões ativas, conclui-se que há necessidade de simplificação mecânica e aplicação dos sistemas de suspensão ativa na indústria. O protótipo exemplifica uma maneira de reduzir o peso de excesso de componentes, assim tornando a suspensão eficiente para seu fim, excluindo-se a complexidade geral, reduzindo custos de manutenção e produção, porém demonstra que a maior complexidade do sistema original de suspensão ativa tem a função de trazer maior confiabilidade e durabilidade ao projeto, o tornando mais robusto e com menor chances de falhar ao ser subjugado a estresse e condições adversas. O sistema ainda conta com sensores e a necessidade de um controlador, uma vez que esses componentes são indispensáveis nas suspensões ativas, porém inova em questões de versatilidade e aplicabilidade na indústria.

Pode ser dito que o projeto abordado pelo trabalho está longe de ser ideal, porém demonstra que é possível obter resultados sólidos com simplicidade e por esse meio tornar a suspensão ativa mais comercialmente viável.



## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bacharelado em Engenharia Automotiva, **ANÁLISE COMPARATIVA DE ESTRATÉGIAS PARA SUSPENSÃO SEMIATIVA EM UM MODELO DE ¼ DE VEÍCULO**, FACULDADE UNB DA GAMA – FGA, MATHEUS ALVES MELO, 2017

Bacharelado em Engenharia Automotiva, **ANÁLISE COMPUTACIONAL DE UM CONTROLADOR PID APLICADO A UMA SUSPENSÃO ATIVA VEICULAR**, UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, MATHEUS ROGÉRIO ROESLER SABKA, 2017

Bacharelado em Engenharia Eletrônica, **MODELAGEM, SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE DESEMPENHO DO CONTROLE FUZZY PARA UMA SUSPENSÃO VEICULAR ATIVA**, UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ, ANDRÉ FERRAZ DE SOUZA, 2017.

BARATA, J. **O que era e que fim levou a misteriosa suspensão ativa da Bose?**. Disponível em: <https://flatout.com.br/o-que-era-e-que-fim-levou-a-misteriosa-suspensao-ativa-da-bose/>. Acesso em: 26 Nov. 2022.

DISHANT, ER.PARMINDER SINGH, ER.MOHIT SHARMA. **Suspension Systems: A Review**. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 2017, p. 1377-1379.

FRANKLIN, G.F.; POWELL, J.D.; EMAMI-NAEINI, A. **Sistemas de Controle para Engenharia** - 6ed. Bookman Editora, 2013. ISBN 9788582600689. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=WB84AgAAQBA>>.

GOMES, F. **Após 30 anos, suspensão “mágica” da Bose a caminho da produção?**. Disponível em: <https://www.razaoautomovel.com/2018/05/suspensao-magica-bose-producao>. Acesso em: 26 Nov. 2022.

JORGE, J. **SUSPENSÃO BOSE ENTRARÁ EM PRODUÇÃO EM 2019**. Disponível em: <https://autoentusiastas.com.br/2018/05/suspensao-bose-entrara-em-producao-em-2019/>. Acesso em: 26 Nov. 2022.

LOGISPESA. **Por que caminhões e carretas tombam com facilidade?**

Disponível em:

<https://logispesa.com.br/noticia/35025#:~:text=Essa%20%E2%80%9Cfor%C3%A7a%20g%E2%80%9D%20%C3%A9%20na,autom%C3%B3vel%20durante%20curvas%20em%20velocidade>. Acesso em: 29 Nov. 2022

NOAL, L. **Nova geração do Audi A8 tem mais detalhes revelados sobre a suspensão ativa em novo teaser**.

Disponível em: <https://www.conexaoautomotivabr.com/2017/07/nova-geracao-do-audi-a8-tem-mais.html>. Acesso em: 28 Nov. 2022.

OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. Pearson Prentice Hall, 2011. ISBN 9788576058106. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=iL3FYgEACAAJ>>.

PATROCAR SERVICE. **O que é suspensão ativa, semiativa e passiva?**

Disponível em: <https://patrocar.com.br/o-que-e-suspensao-ativa-semiativa-e-passiva/>. Acesso em: 28 Nov. 2022.

RAKSHITH M, YATHIN KUMAR L, VIKAS S. G. **Bose Automotive Suspension**. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 2014, p. 13.

SENAI-SP. **SISTEMA DE SUSPENSÃO**. São Paulo, 2006, p. 55-56.

TIPLER, P. A.; MOSCA, G. **Física para Cientistas e Engenheiros Vol. 2 – Eletricidade e Magnetismo, Óptica** – 6ed. LTC Editora, 2009. ISBN 9788521617112.

TURBO MAGAZINE. **Suspensão Bose: a peça do futuro que jamais saiu do papel.**

Disponível em: <https://www.turboway.com.br/suspensao-bose-a-peca-do-futuro-que-jamais-saiu-do-papel/>. Acesso em: 26 Nov. 2022.