

**Jose Serruya El Mann**

**Plataforma para medições de parâmetros de  
modelos de suspensão automotiva em escala**

**Projeto de Graduação**

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Orientador: Ricardo Teixeira Neto

Rio de Janeiro  
Julho de 2018

## Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer a minha família pela motivação incondicional que me deram não só durante a minha graduação, mas em toda minha vida.

Aos meus pais, Alain e Jayne, por toda atenção e apoio ao longo dessa jornada.

Ao professor Ricardo Teixeira, pela orientação e pela amizade depositadas neste trabalho

À toda equipe do IME que se dedicou para a realização deste trabalho.

À todas as boas amizades feitas no ambiente acadêmico da PUC-Rio, que com certeza foram marcantes durante a graduação.

## **Resumo**

### **Plataforma para medições de parâmetros de modelos de suspensão automotiva em escala**

Este trabalho de fim de curso detalha todo o processo de criação e teste de uma suspensão automotiva em escala, desde seu desenvolvimento em CAD, até a sua fabricação. Diferentemente dos projetos de suspensão convencionais, este trabalho visa analisar a viabilidade da implementação do processo de fabricação de manufatura aditiva nas suspensões automotivas, possivelmente abrindo possibilidades para que esta indústria tire proveito do uso dessa tecnologia.

Sua grande vantagem se encontra na facilidade de efetuar iterações no projeto, e em seu mecanismo de teste, que é consideravelmente menos complexo e mais barato que uma bancada de testes convencional, tornando assim o processo mais fácil e barato de ser executado.

Além disso, modelos em escala, juntamente com a metodologia de similaridade, têm um emprego cada vez maior devido ao uso e à popularização de impressoras 3D de prototipagem rápida. Por meio da análise de parâmetros de um modelo em escala, é possível chegar aos valores de parâmetros e grandezas similares encontradas nos casos reais, ou 1:1.

### **Palavras-chave**

Suspensão automotiva; Impressão 3D; Prototipagem; CAD; CAM.

## **Abstract**

### **Design and creation of a test platform for car suspensions in scale**

This project details all the creation process, from sketch and prototyping, to manufacturing and testing a 3D printed car suspension in scale. Differently from other suspension projects, this work is intended to analyze the viability of 3d printing in this industry, eventually discovering and exploring new fields of action for this technology. It could lower the costs of design iterations and make the testing suspension process not only cheaper, but faster.

### **Keywords**

Car suspension; Prototyping; 3D Printing; CAD; CAM.

## Sumário

1	Introdução	<b>9</b>
1.1	Objetivo do Trabalho	9
1.2	Motivação do Trabalho	10
1.3	Posicionamento do Trabalho	11
2	Desenvolvimento do conjunto de suspensão	<b>12</b>
2.1	Funções e características gerais de uma suspensão	12
2.2	Tipos de Suspensão	13
2.3	Escolha da Suspensão	15
2.4	Características da suspensão de Braços Sobrepostos	15
2.5	Desenvolvimento em <i>Solidworks</i> da suspensão de braços sobrepostos	18
3	Desenvolvimento dos cames	<b>24</b>
3.1	Introdução aos cames	24
3.2	Funções exercidas	26
3.3	Cuidados no projeto do came	26
3.4	O projeto	28
4	Fabricação por manufatura aditiva	<b>32</b>
4.1	Materiais comumente utilizados	33
4.2	Configurações do processo de impressão 3D	36
4.3	Montagem da suspensão	39
5	Montagem da Bancada	<b>45</b>
5.1	Dificuldades encontradas	47
5.2	Instrumentação	49
6	Metodologia experimental	<b>53</b>
7	Resultados	<b>55</b>
8	Conclusões	<b>60</b>
9	Referências Bibliográficas	<b>61</b>
A	Apêndice	<b>63</b>

## Lista de figuras

2.1	Exemplo de suspensão dependente do tipo Eixo Rígido. Fonte: <a href="http://www.carrosinfoco.com.br">http://www.carrosinfoco.com.br</a> (2017)	13
2.2	Exemplo de suspensão independente do tipo Mac Pherson. Fonte: <a href="https://www.audi-technology-portal.de">https://www.audi-technology-portal.de</a> (2016)	14
2.3	Diferença entre o comportamento das suspensões dependente e independente. Fonte: <a href="http://www.pinsdaddy.com/">http://www.pinsdaddy.com/</a>	14
2.4	Exemplo dos braços sobrepostos. Fonte: <a href="https://medium.com/">https://medium.com/</a> (2008)	15
2.5	Exemplo das variações dos Braços Sobrepostos (Duygu GÜLER,2006)	16
2.6	Exemplo de Braços Sobrepostos (T. GILLESPIE, 1992)	16
2.7	Variação de cambagem devido à rolagem da carroceria (T. GILLESPIE, 1992)	17
2.8	Exemplo da aplicabilidade dos Braços Sobrepostos. Fonte: <a href="https://www.autocar.co.uk/">https://www.autocar.co.uk/</a>	18
2.9	Dados do conjunto mola amortecedor. Fonte: autoral	19
2.10	Vista superior do braço inferior. Fonte: autoral	20
2.11	Vista isométrica do braço inferior. Fonte: autoral	20
2.12	Vista superior do braço superior. Fonte: autoral	21
2.13	Vista isométrica do braço superior. Fonte: autoral	21
2.14	Vista frontal da montagem de 1/4 de carro. Fonte: autoral	22
2.15	Vista isométrica da montagem de 1/4 de carro. Fonte: autoral	22
2.16	Vista isométrica explodida da montagem de 1/4 de carro. Fonte: autoral	23
3.1	Aplicação dos cames na indústria automotiva. (FRANCISCO QUEIRÓS DE MELO,2008)	24
3.2	Exemplo de seguidor de face curva. (ROBERT NORTON, 2010)	25
3.3	Exemplo do diagrama $EVA P$ . (ROBERT NORTON, 2010)	27
3.4	Função de saída desejada para o seguidor. Fonte: autoral	28
3.5	Início do esboço do came. Fonte: autoral	28
3.6	Esboço definido do came. Fonte: autoral	29
3.7	Came extrudado com a metade da largura do pneu. Fonte: autoral	30
3.8	Diagramas $EVA P$ do came gerado. Fonte: autoral	31
4.1	Máquina utilizada para a fabricação dos componentes da suspensão. Fonte: <a href="https://www.gtmax3d.com.br/">https://www.gtmax3d.com.br/</a>	33
4.2	Influência da composição química nas propriedades do ABS. Fonte: SIMIELLI e SANTOS (2010)	34
4.3	Comparação dos materiais em ensaio de tração. Fonte: <a href="https://www.makebot.com/">https://www.makebot.com/</a>	35
4.4	Comparação entre os ângulos de orientação. Acima $45^\circ/-45^\circ$ , abaixo $0^\circ/90^\circ$ . Fonte: autoral	38
4.5	Processo de impressão. Fonte: autoral	39
4.6	Parafusos de cabeça retificada. Fonte: autoral	40
4.7	Cubo de roda da marca <i>Integy</i> . Fonte: autoral	41

4.8	Parafusos de cabeça esférica. Fonte: autoral	42
4.9	Comparação da montagem em Solidworks com o modelo físico. Fonte: autoral	43
4.10	Suspensão montada. Fonte: autoral	43
4.11	Braço inferior trincado. Fonte: autoral	44
5.1	Bancada da <i>Amatrol</i> . Fonte: autoral	46
5.2	Início de montagem da bancada de testes. Fonte: autoral	47
5.3	Alinhamento da suspensão. Fonte: autoral	48
5.4	Alinhamento da suspensão sob ângulo distinto. Fonte: autoral	49
5.5	Acelerômetro <i>MPU6050</i> . Fonte: <a href="https://www.makerlab-electronics.com/">https://www.makerlab-electronics.com/</a>	50
5.6	Placa micro controladora <i>Arduino Uno</i> . <a href="https://www.makerlab-electronics.com/">https://www.makerlab-electronics.com/</a>	51
5.7	Cabos de instalações elétricas de elevadores. Fonte: <a href="http://www.pan.com.br/">http://www.pan.com.br/</a>	51
5.8	Tacômetro digital <i>Extech</i> . Fonte: <a href="http://www.extech.com/">http://www.extech.com/</a>	52
6.1	Acelerômetro preso no braço inferior. Fonte: autoral	54
7.1	Gráfico experimental de aceleração por tempo a 190 RPM. Fonte: autoral	55
7.2	Gráfico experimental de aceleração por tempo a 190 RPM com janela reduzida. Fonte: autoral	56
7.3	Gráfico experimental de aceleração por tempo a 130 RPM. Fonte: autoral	57
7.4	Gráfico experimental de aceleração por tempo a 130 RPM com janela reduzida. Fonte: autoral	57
7.5	Gráfico experimental de aceleração por tempo a 110 RPM. Fonte: autoral	58
7.6	Gráfico experimental de aceleração por tempo a 110 RPM. Fonte: autoral	58
7.7	Gráfico experimental de aceleração por tempo a 110 RPM. Fonte: autoral	59

## Lista de tabelas

3.1 Especificações do came

27

# 1

## Introdução

### 1.1

#### Objetivo do Trabalho

O objetivo do trabalho é construir um modelo tridimensional, em escala, de uma suspensão independente automotiva do tipo Braços Sobrepostos, para ser usado em experimentos relacionados à Dinâmica Veicular. Nesse trabalho, é adotado um modelo em escala de uma suspensão veicular, usando elementos elásticos (pneus, molas e amortecedores) encontrados em carros de controle remoto.

Parte-se do desenho em *Solidworks* da suspensão real, que é reduzido a uma escala compatível com as dimensões da impressora e com o custo da matéria-prima. Depois, as peças serão produzidas em uma impressora 3D de prototipagem rápida, e montadas em uma base estática que representa o chassi. Tal sistema deve ser projetado para ser acoplado a um *shaker*, que produza excitação de base controlada. O modelo pode ser usado para estimar parâmetros, como por exemplo, os pertinentes ao amortecedor ou a rigidez do pneu; para estudar o efeito de equivalência para a rigidez e o amortecimento, proporcionado pela configuração do mecanismo da suspensão; para avaliar a transmissibilidade de esforços, que, produzidos pelos elementos elásticos, são transferidos aos pontos de ancoragem no chassi; para investigar a influência das buchas na rigidez equivalente do conjunto.

## 1.2

### Motivação do Trabalho

Conhecer as características de uma suspensão automotiva é com certeza um ponto de grande importância num projeto de automóvel. A fim de se medir suas características, além do intenso uso de *softwares* de simulação computacional, existe um campo da engenharia que se dedica especialmente a realização de ensaios de sistemas montados em bancadas, padronizados por normas técnicas, que permitem determinar seus valores e propriedades.

No caso particular de bancadas de testes para suspensões automotivas, o custo de compra combinado ao enorme tamanho associado faz com que o acesso de pequenos fabricantes como a própria PUC-Rio com suas equipes de Baja ou Fórmula, seja basicamente impossível. Assim sendo, percebeu-se que poderia ser mais vantajoso projetar e construir uma bancada própria do que comprar uma disponível no mercado. Embora seja um processo complexo que envolve diferentes áreas da engenharia, como programação, controle e instrumentação, sua construção não é inviável.

Vale lembrar que o eventual sucesso desse projeto proporciona grande valor à universidade. Ao ter a disponibilidade de testar experimentalmente seus carros de desenvolvimento próprio, numa bancada que seja confiável e não muito complexa de ser operada, a capacidade de refinamento e de ajuste fino destes projetos se eleva consideravelmente, juntamente com a qualidade e a previsibilidade do comportamento dos carros.

### 1.3

#### Posicionamento do Trabalho

Este trabalho está essencialmente dividido em 5 diferentes estágios que envolvem diferentes áreas da engenharia. Assim, se buscará mostrar onde e como o trabalho se insere numa linha de pesquisa e fabricação. Inicialmente são abordados assuntos importantes relativos ao desenvolvimento do conjunto, como todos os desenhos em CAD feitos no *SolidWorks*, simulações e montagem virtual dos conjuntos.

Em seguida entra em pauta o processo de fabricação do conjunto por manufatura aditiva, popularmente conhecida como prototipagem rápida ou impressão 3D. Nele são mostrados e explicados os parâmetros utilizados, assim como os materiais selecionados.

Posteriormente munido de todas as peças físicas necessárias, o conjunto será montado e avaliado se todas as funcionalidades estão condizentes com o esperado.

Com a montagem da suspensão pronta, inicia-se o processo de montagem da bancada de testes. Esta conta com instrumentos que são aqui esclarecidos posteriormente.

Por fim, os dados coletados servem para análise tanto do comportamento da suspensão como um todo quanto de cada um de seus elementos. Nesse trabalho é feita a coleta de dados de um acelerômetro triaxial montado em um dos braços da suspensão, mostrando uma das possibilidades de uso da plataforma.

## 2

### Desenvolvimento do conjunto de suspensão

#### 2.1

##### Funções e características gerais de uma suspensão

Sua função principal consiste em isolar a estrutura e os ocupantes de vibrações e impactos com as imperfeições da superfície do terreno, ao mesmo tempo mantendo todas as rodas do veículo em contato com o solo.

A suspensão automotiva por definição consiste em todos elementos responsáveis pela conexão do automóvel às rodas. São eles os pneus, molas, amortecedores e buchas. Eles são responsáveis por satisfazer alguns requisitos como:

- conforto
- capacidade de carga
- dirigibilidade

As duas principais formas de excitação num veículo são as imperfeições do solo e variações de carga. Tais imperfeições costumam se dividir em outros dois tipos. Primeiramente os de alta frequência e baixa magnitude, como terrenos irregulares, ou baixa frequência e alta magnitude, como morros. Já com relação à variação de carga, são incluídas as variações induzidas por acelerações, tanto positivas quanto negativas, e induzidas por diferença de massa, como de um a cinco ocupantes.

Assim, um bom projeto tem que ser capaz de lidar com todos as perturbações mencionadas. Ou seja, ela tem que ser "macia" para isolar a cabine de imperfeições, e "rígida" para trabalhar contra variações de carga. Por isso, o design de uma suspensão é uma complexa arte de compromisso entre estes dois objetivos

## 2.2

### Tipos de Suspensão

As suspensões podem ser classificadas em duas grandes categorias: as dependentes e as independentes. Há vantagens e desvantagens em de cada uma delas. Suas construções são consideravelmente diferentes, e em cada projeto leva-se em consideração o custo, peso, espaço disponível, facilidade de fabricação e de montagem. As suspensões dependentes costumam ter design e construção razoavelmente mais simples.

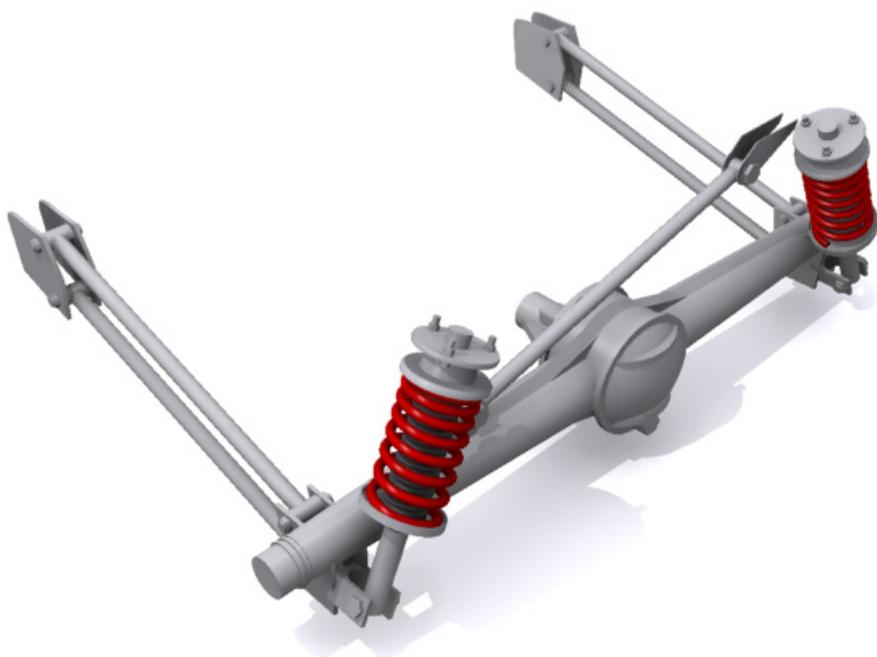


Figura 2.1: Exemplo de suspensão dependente do tipo Eixo Rígido. Fonte: <http://www.carrosinfoco.com.br> (2017)

Nelas as rodas opostas axialmente se movem sempre juntas. Não existe a possibilidade de uma roda se mover sem que a outra também se mova, por isso o nome. Logicamente as suspensões independentes permitem esse comportamento.

**Audi TT**  
 Vorderachse  
 Front axle  
 06/06

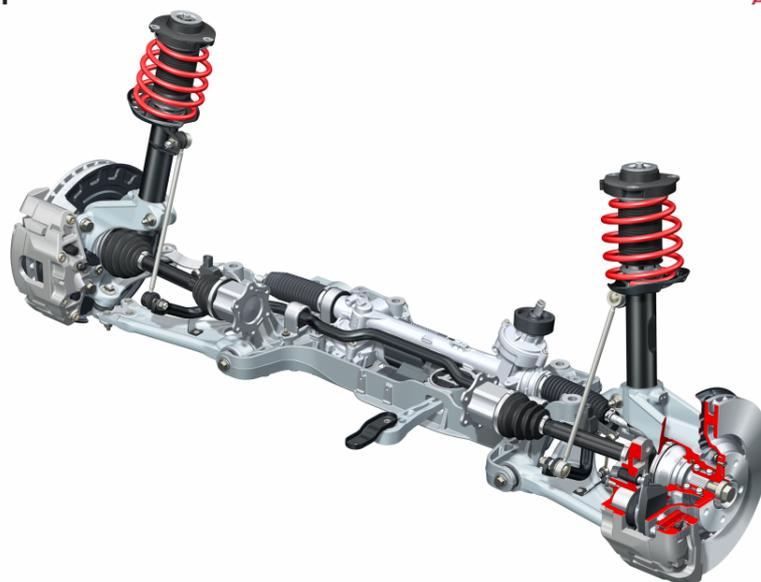


Figura 2.2: Exemplo de suspensão independente do tipo Mac Pherson. Fonte: <https://www.audi-technology-portal.de> (2016)

De acordo com a figura 2.3, fica explícita a diferença básica no comportamento das suspensões dependente e independente.

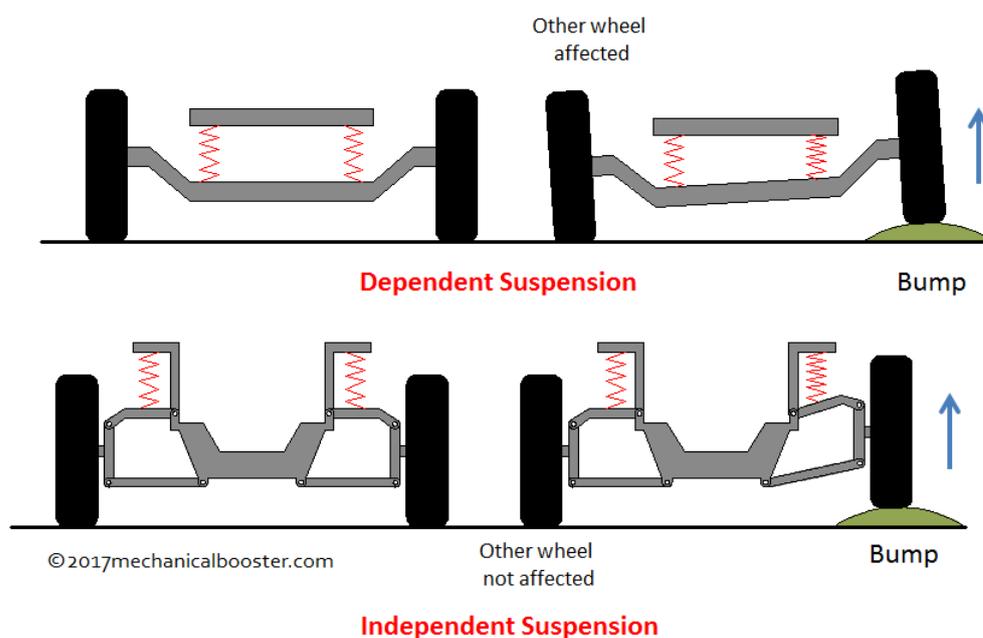


Figura 2.3: Diferença entre o comportamento das suspensões dependente e independente. Fonte: <http://www.pinsdaddy.com/>

Existem diversos modelos de suspensão dentro de cada categoria mencionada acima, mas explicá-los e justificá-los foge do escopo do trabalho.

### 2.3

#### Escolha da Suspensão

A parte inicial do projeto se resumiu em selecionar uma suspensão que ao mesmo tempo proporcionasse simplicidade e funcionalidade. Um desenho demasiadamente complexo dificultaria muito não só a modelagem quanto a fabricação, além de ter uma disposição de peças cujo funcionamento seria naturalmente menos intuitivo. Já um desenho simples demais não permitiria ajustes finos, e conseqüentemente, sua análise seria de pouco valor. Não suficiente, considerou-se selecionar um modelo razoavelmente comum na indústria automotiva, para que haja uma boa gama de informações disponível para o auxílio do desenvolvimento do projeto. Uma suspensão que atende a todos esses requisitos é do tipo Braços Sobrepostos, ou Duplo A, mundialmente conhecida como *Double Wishbone*.

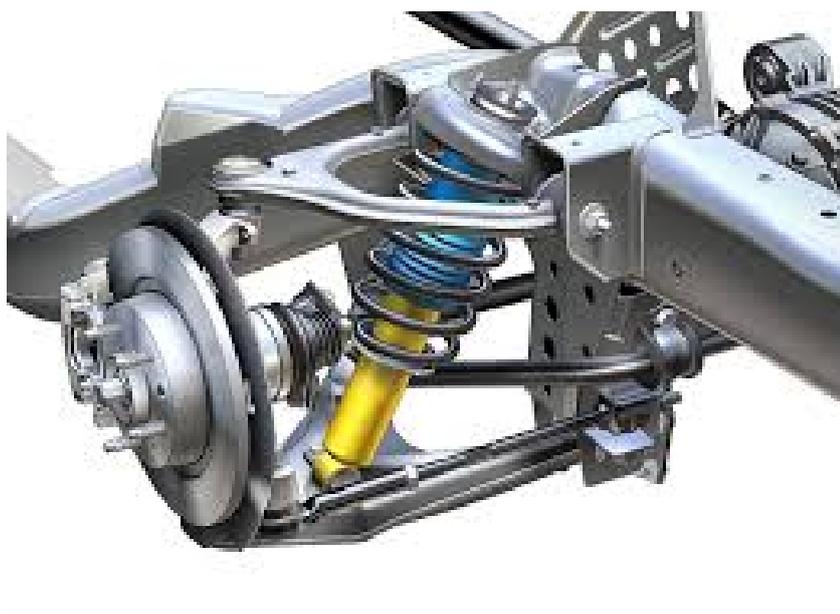


Figura 2.4: Exemplo dos braços sobrepostos. Fonte: <https://medium.com/> (2008)

### 2.4

#### Características da suspensão de Braços Sobrepostos

Amplamente utilizada desde a Segunda Guerra Mundial, a suspensão do tipo Duplo A consiste em dois braços transversais sobrepostos que se conectam ao

cubo de cada roda. Em geral, há divergência de comprimento entre o braço superior e o inferior, por isso, um acrônimo referente à ela se dá por SLA, do inglês *short-long arm*. Na figura 2.5, pode-se ver da esquerda para a direita, respectivamente, braços iguais e paralelos; paralelos e desiguais; não paralelos e desiguais.

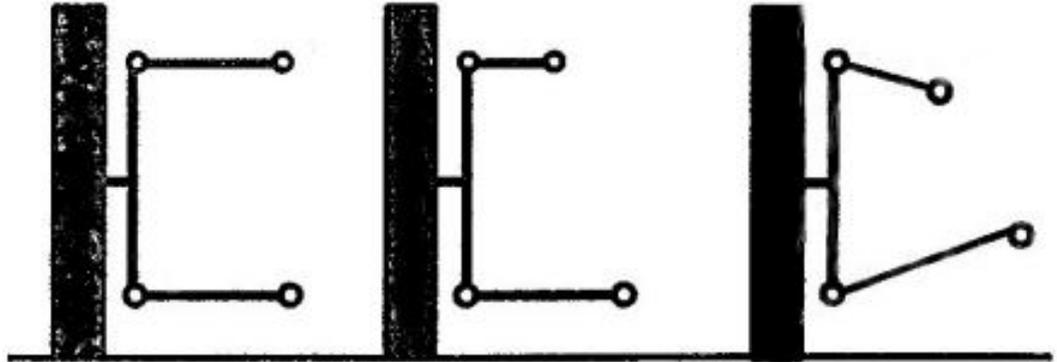


Figura 2.5: Exemplo das variações dos Braços Sobrepostos (Duygu GÜLLER, 2006)

Quanto maior for a distância  $c$  (figura 2.6) entre os pontos de apoio dos braços transversais, menor será a força resultante neles e em seus pontos de fixação no chassi, ou seja, nas buchas. Desta forma a deformação destes componentes é menor, e conseqüentemente o controle da roda torna-se ainda mais preciso.

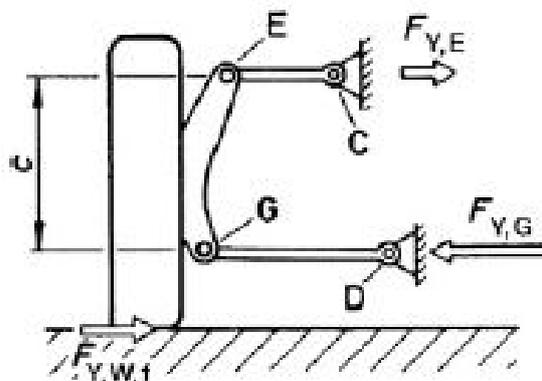


Figura 2.6: Exemplo de Braços Sobrepostos (T. GILLESPIE, 1992)

Uma das maiores vantagens dos braços sobrepostos se dá por conta de sua versatilidade. A posição de um braço relativa ao outro consegue determinar tanto a altura do centro de rolagem do veículo quanto o centro de pitch, ou *pitch pole*. Além disso, como citado anteriormente, os diferentes comprimentos dos braços influenciam fortemente os ângulos referentes à movimentação das rodas axialmente opostas. Numa tomada de curva à esquerda por exemplo, a suspensão do lado externo à curva sofre compressão ao passo que a interna, distensão. Com uma suspensão cujo braço superior é menor que o inferior, as rodas em compressão tem cambagem induzida à valores negativos, uma vez que seu movimento vertical passa a percorrer um arco de circunferência. Já as em distensão são induzidas à valores positivos. Isto contraria as mudanças de cambagem naturais causadas pela rolagem da carroceria (vide figura 2.7) e torna o comportamento do veículo muito mais progressivo, previsível, e consequentemente mais seguro.

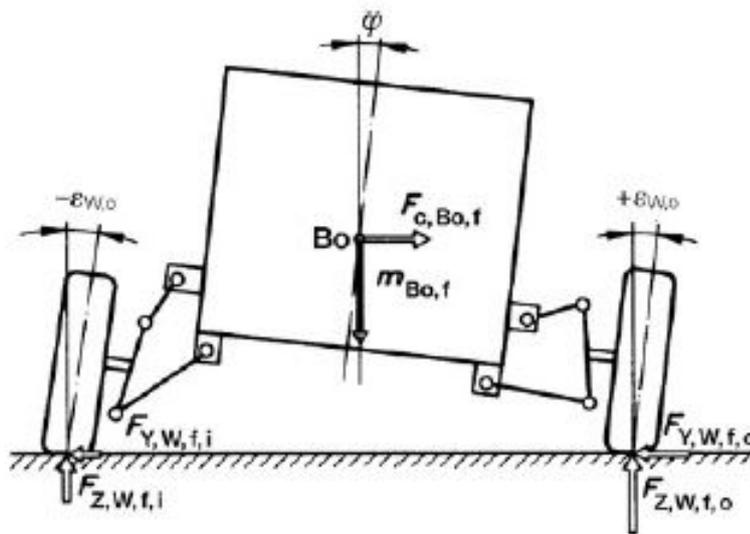


Figura 2.7: Variação de cambagem devido à rolagem da carroceria (T. GILLESPIE, 1992)

Esta geometria é facilmente adaptável para configurações de motor dianteiro e tração traseira. Seu tamanho compacto permite amplo espaço no cofre do motor, facilitando o uso de motores longitudinais. Por isso ela é utilizada nas mais variadas aplicações dentro da indústria automotiva, desde carros de alto desempenho voltados unicamente para asfalto, até veículos militares capazes de enfrentar a esmagadora maioria de terrenos fora de estrada.



Figura 2.8: Exemplo da aplicabilidade dos Braços Sobrepostos. Fonte: <https://www.autocar.co.uk/>

## 2.5

### Desenvolvimento em *Solidworks* da suspensão de braços sobrepostos

O primeiro passo a ser definido antes de iniciar o trabalho de modelagem é selecionar a escala que será usada no trabalho. Para isso, sabendo que após a modelagem o modelo será fabricado por impressão 3D, a primeira limitação é o volume máximo com que a máquina é capaz de trabalhar. Portando um volume de 27 l igualmente dividido entre cada eixo, tem-se 300 mm para de comprimento útil em cada eixo.

Em segundo lugar, como o conjunto de rodas, pneus, molas e amortecedores serão adquiridos e não fabricados, faz-se necessário avaliar a disponibilidade dos modelos existentes no mercado, assim como suas escalas e seus preços. Tendo em vista esses fatores, a escala que apresentou melhor relação custo benefício foi a 1/8. Ela é suficientemente compacta para que as peças caibam na impressora, além de tornar a instrumentação viável e ter ampla variedade de peças disponíveis para venda.

Assim, um pneu em escala 1/8 possui em média de 100 a 120 mm de diâmetro externo, ao passo que o conjunto mola amortecedor tem cerca de 30 mm de curso e 112 mm de distância entre os furos. A partir destes dados optou-se pela relação de proporção de 1/2 entre o diâmetro externo do pneu e o comprimento dos braços da suspensão. Munido de todos estes dados e do comprimento da mola de 75 mm, deu-se início ao desenho.



Figura 2.9: Dados do conjunto mola amortecedor. Fonte: autoral

Este então foi inspirado por um modelo disponível no site *GrabCAD*, e teve suas dimensões modificadas inúmeras vezes até que fosse encontrada uma solução que cumprisse com a demanda do projeto. Procurou-se evitar ao máximo os possíveis cantos vivos através do uso de filetes, e otimizar o design para que não houvesse dificuldades futuras na impressão das peças.

Desta forma o comprimento final de cada braço ficou definido, e resultou em 67 mm. Os braços superior e inferior tem seus pontos de fixação numa peça que representa parte do chassi, e é simétrica no lado axialmente oposto. Para efeitos de padronização, todos os parafusos usados na montagem são M5.

As figuras 2.10 a 2.16 mostram os braços da suspensão, assim como o conjunto de 1/4 de veículo e sua vista explodida.

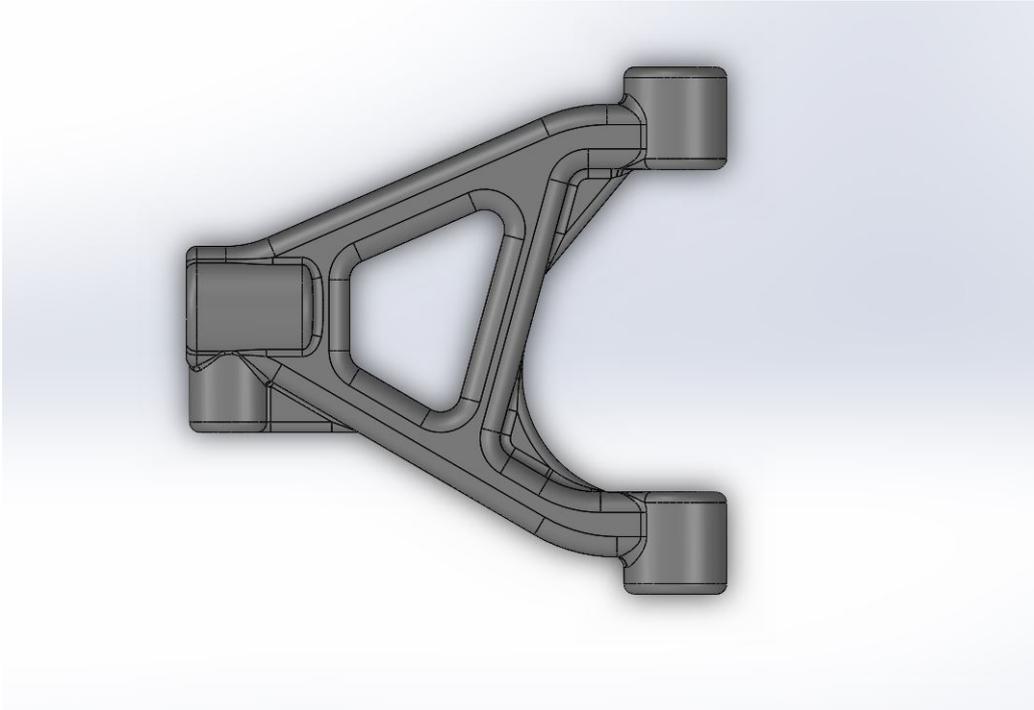


Figura 2.10: Vista superior do braço inferior. Fonte: autoral



Figura 2.11: Vista isométrica do braço inferior. Fonte: autoral

Com o intuito de simplificar o projeto e o mecanismo de funcionamento, optou-se por usar um braço superior de comprimento igual ao inferior.

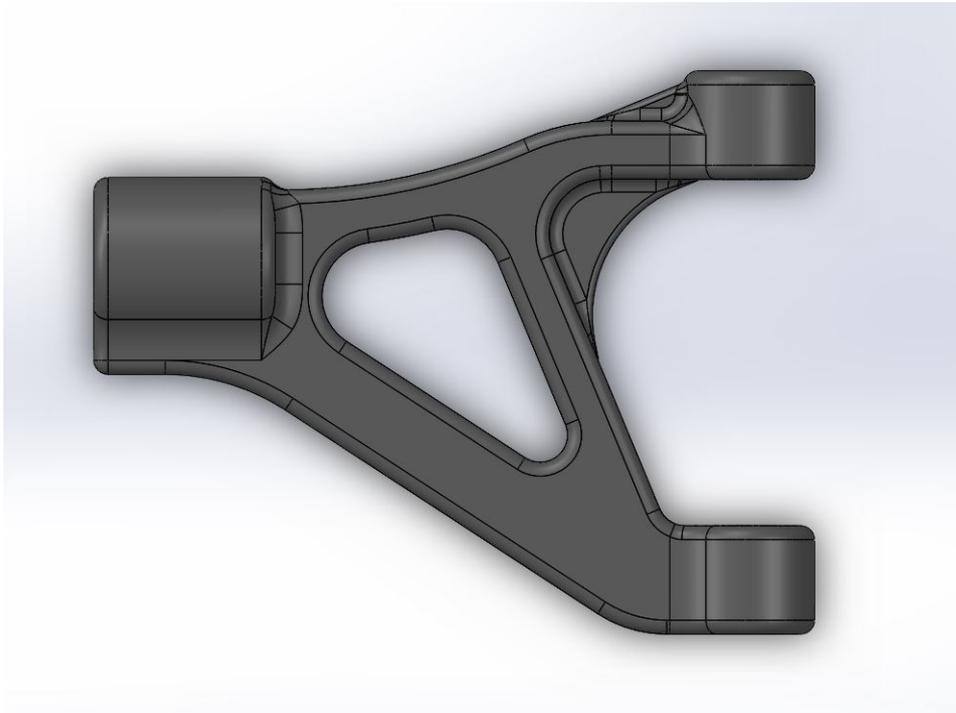


Figura 2.12: Vista superior do braço superior. Fonte: autoral

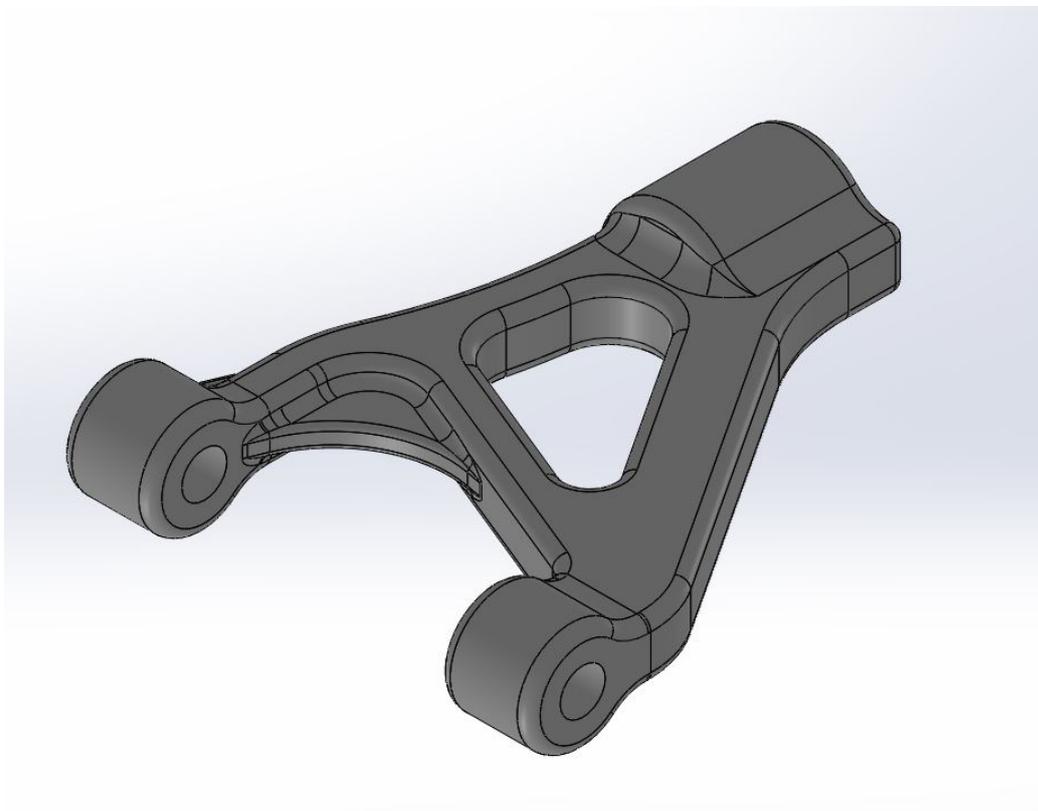


Figura 2.13: Vista isométrica do braço superior. Fonte: autoral

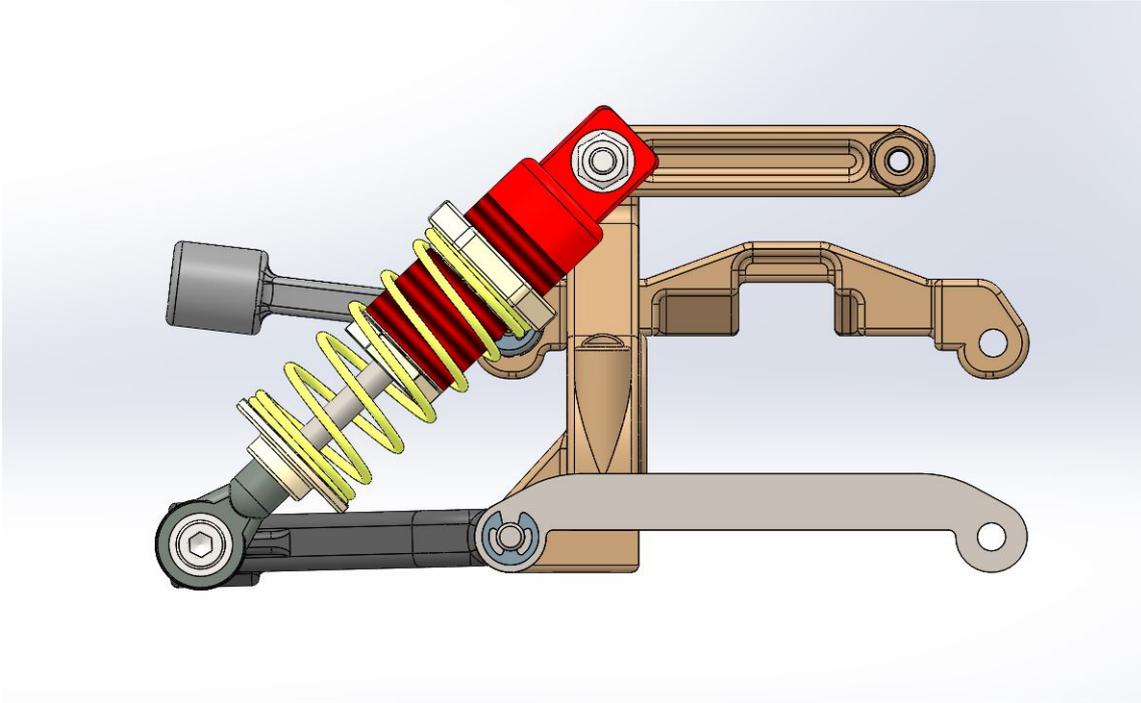


Figura 2.14: Vista frontal da montagem de 1/4 de carro. Fonte: autoral

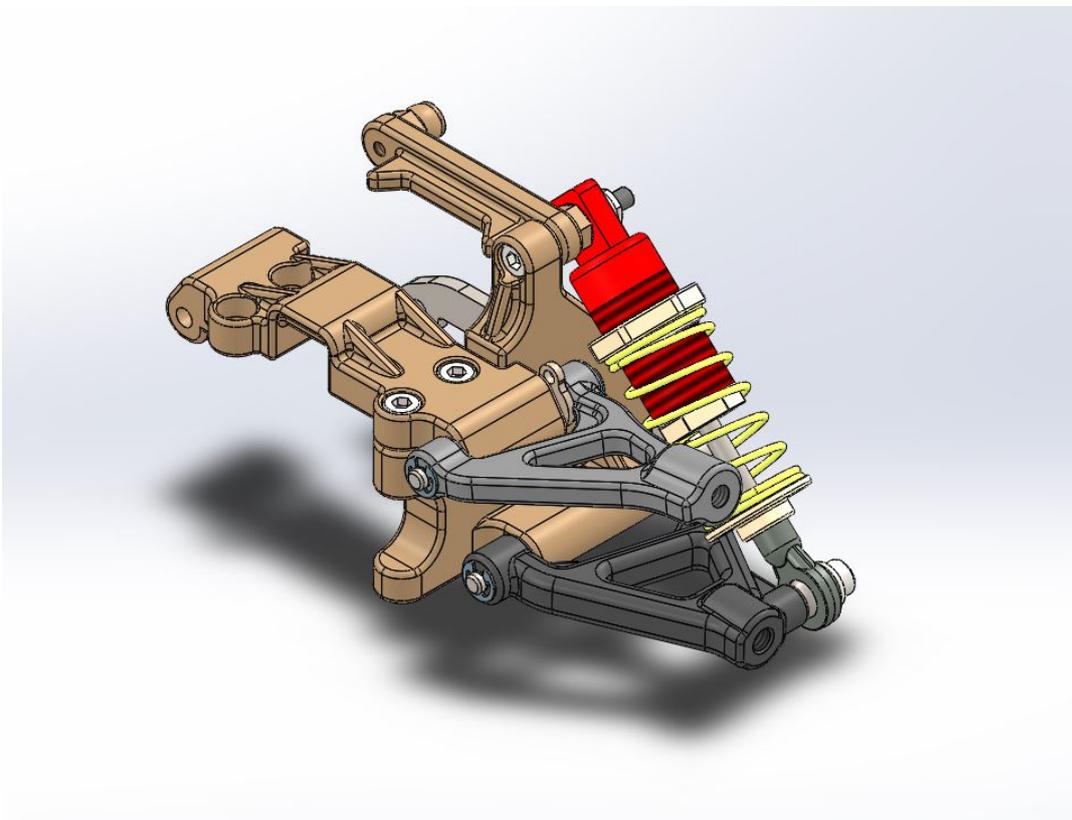


Figura 2.15: Vista isométrica da montagem de 1/4 de carro. Fonte: autoral



## 3

### Desenvolvimento dos cames

#### 3.1

##### Introdução aos cames

Os cames são acessórios mecânicos destinados a transformar movimentos de rotação pura em movimentos retilíneos periódicos. Sistemas de cames são frequentemente usados em quase todos os tipos de máquinas. As válvulas de admissão e exaustão de um motor de quatro tempos à combustão interna são operadas por cames. Máquinas usadas na indústria têxtil e na manufatura são, por exemplo, repletas de cames.

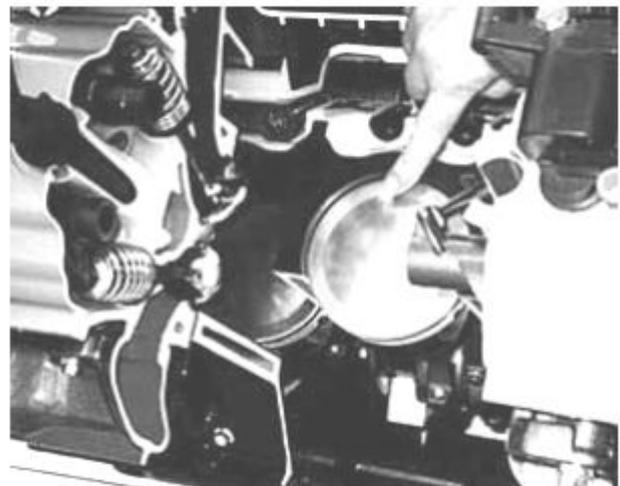
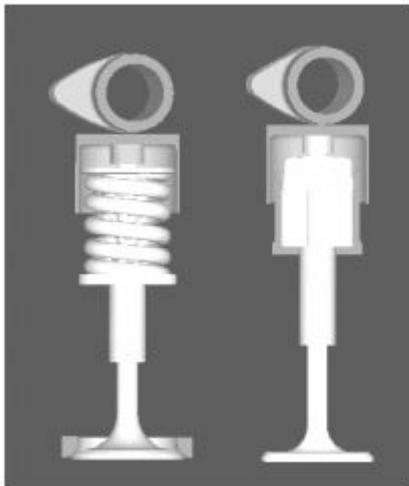


Figura 3.1: Aplicação dos cames na indústria automotiva. (FRANCISCO QUEIRÓS DE MELO,2008)

A vantagem de utilizar esses mecanismos se dá por serem relativamente simples de projetar para uma dada função de saída, porém são difíceis e caros para serem fabricados. Pode-se basicamente criar qualquer função de saída e criar uma superfície curva no cames para gerar essa função ao se movimentar. Por isso, o cames é um dispositivo amplamente utilizado na engenharia, sem ele algumas tarefas mecânicas que soam razoavelmente fáceis seriam conside-

ravelmente mais complexas.

Para entender seu princípio básico de funcionamento, é necessário compreender melhor seus principais elementos. São eles:

- Tipo de fechamento da junta
- Tipo de seguidor

Em primeiro lugar, um dos mais utilizados tipos de fechamento da junta é a junta de força. Esta requer que uma força externa seja aplicada na junta para manter os dois elos, came e seguidor, em contato físico um com o outro. Essa força na grande maioria dos casos provém do uso de uma mola, como pode-se ver na figura 3.2.

Em segundo lugar, o seguidor refere-se à parte do elo seguidor que mantém contato com o came. Dentre os tipos de arranjo mais comuns estão: os de rolete, os de face plana e os de face curva. No caso deste projeto, o elemento do conjunto que faz o papel de seguidor é o pneu, e pode ser considerado como um rolete.

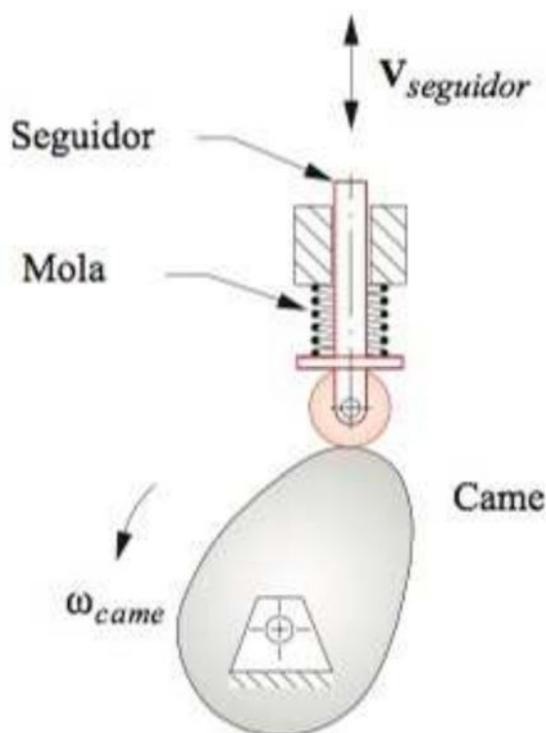


Figura 3.2: Exemplo de seguidor de face curva. (ROBERT NORTON, 2010)

### 3.2

#### Funções exercidas

A próxima etapa do desenvolvimento do projeto é o desenvolvimento dos cames. Estes cames são os responsáveis por causar excitações controladas na base da suspensão, para que dessa forma seja possível analisar sua resposta ao estímulo dado.

Os principais parâmetros envolvidos no desenvolvimento dos cames são de restrição de movimento. Existe a posição extrema crítica (PEC) e o percurso de movimento crítico (PMC). A posição extrema crítica faz referência às posições finais e iniciais do seguidor, ao passo que o percurso de movimento crítico, como sugerido pelo próprio nome, faz referência ao movimento do came.

Estes parâmetros governam a geometria do came e assim são responsáveis por controlar o comportamento de subida, descida e do seguidor, assim como o tempo de espera, que pode ser definido como ausência de movimento de saída em um tempo específico do movimento. Esta última ferramenta permite criar esperas controladas no mecanismo de oscilação. Para este trabalho, ela determinará com qual frequência a suspensão receberá o estímulo, e qual será a sua duração.

### 3.3

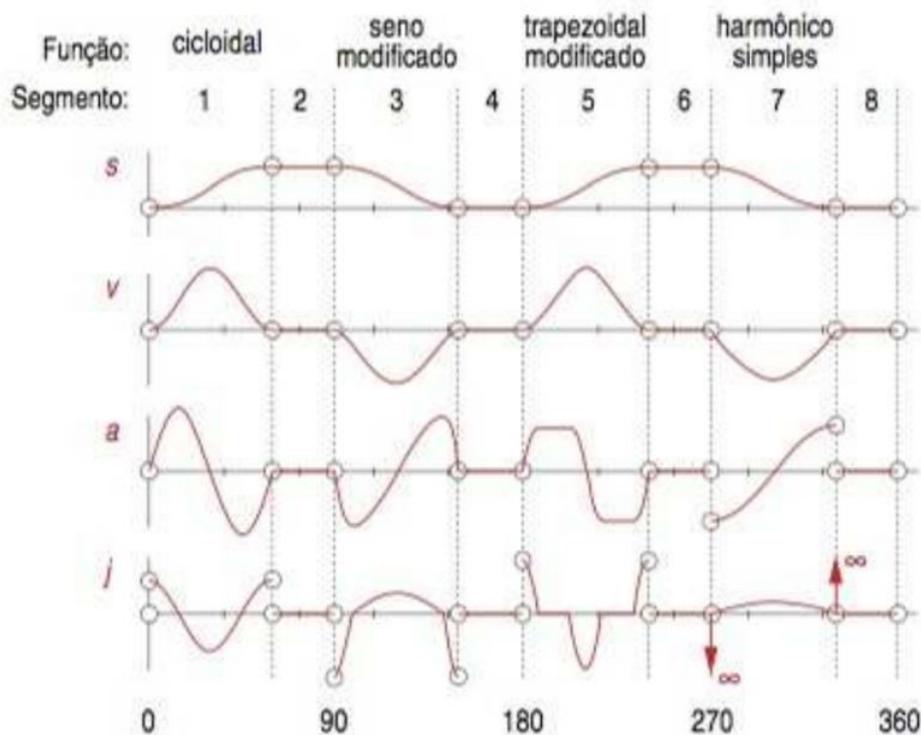
#### Cuidados no projeto do came

Geralmente, define-se uma função matemática a ser usada para regir o movimento do seguidor. Para tal, ao traçar esta função, define-se primeiramente o deslocamento  $e$ . Sua primeira derivada rege a velocidade  $v$ , sua segunda derivada rege a aceleração  $a$  e por fim, sua quarta derivada rege os pulsos  $p$ . Costuma-se referir à estas funções através de diagramas que as representem, em Português chama-se diagramas  $E V A P$  e em Inglês chama-se diagramas  $S V A J$ .

Para uma melhor compreensão destes dados, para um caso genérico, a figura 3.3 mostra esses gráficos. Para complementar e tornar a análise mais rica, a tabela 1 mostra as especificações para este mesmo came.

Número do segmento	Função usada	Ângulo inicial	Ângulo final	Delta do ângulo
1	Subida cicloidal	0°	60°	60°
2	Espera	60°	90°	30°
3	Descida seno	90°	150°	60°
4	Espera	150°	180°	30°
5	Subida trapezoidal	180°	240°	60°
6	Espera	240°	270°	30°
7	Descida harmônica	270°	330°	60°
8	Espera	330°	360°	30°

Tabela 3.1: Especificações do came

Figura 3.3: Exemplo do diagrama *E V A P*. (ROBERT NORTON, 2010)

Um erro comum que deve ser evitado a todo custo, é o de desconsiderar os efeitos das derivadas superiores. Ao usar uma função de deslocamento cuja terceira derivada seja nula, chegar-se-ia no resultado de uma aceleração igual a zero. Aceleração nula significa força dinâmica nula, e pode-se induzir à interpretação de errônea de que não há forças sobre o came.

Como a velocidade possui além de variações descontínuas, variação de módulo no tempo, a aceleração pode de fato ser nula em determinados momentos. O problema é nas discontinuidades, pois seus efeitos criariam uma inclinação infinita com duração zero. Ou seja, infinitos picos de aceleração. Na prática, isso

não pode acontecer pois requer força infinita. Um came projetado desta forma seria submetido à forças dinâmicas extremamente altas, conseqüentemente altíssimas tensões e, por fim, não menos esperado, um desgaste prematuro e alta probabilidade de falha catastrófica por fadiga.

### 3.4

#### O projeto

Para o desenvolvimento do came, considerou-se a seguinte função de saída da figura 3.4

Função	Valor	Ângulo i	Ângulo f
Subida	20 mm	0	120
Espera	0	120	150
Descida	20 mm	150	210
Espera	0	210	360

Figura 3.4: Função de saída desejada para o seguidor. Fonte: autoral

Conhecendo a função de saída, a distância entre os centros do seguidor e do motor elétrico, o diâmetro do seguidor, o diâmetro do eixo do motor elétrico, assim como as dimensões de sua chaveta, deu-se início ao desenvolvimento do came.

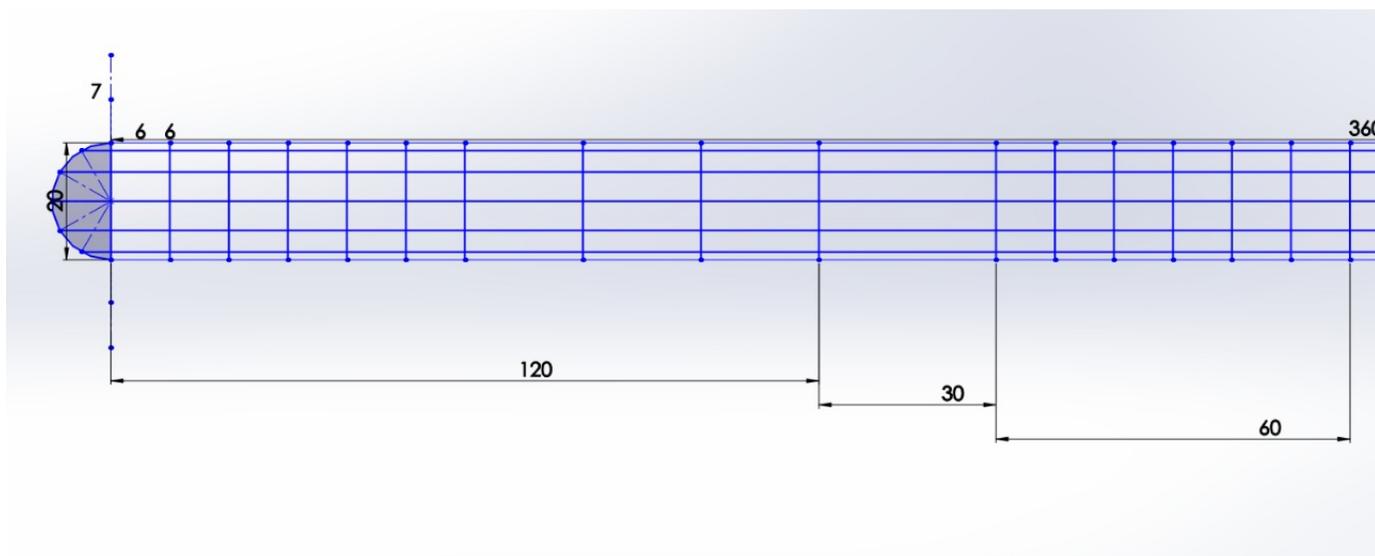


Figura 3.5: Início do esboço do came. Fonte: autoral

O início do esboço do came se dá da seguinte forma: é desenhado um semi-círculo com o diâmetro igual ao valor de subida desejado. A partir deste semi-círculo, traça-se 7 linhas paralelas de igual comprimento, de 360 mm simbolizando os 360° de rotação do came. Mede-se então a distância entre estas linhas. Cada distância é igual à diferença de comprimento entre a parte excêntrica e a parte circular do came. Por último faz-se o furo central e o rasgo da chave. Todas as dimensões referentes ao sistema criado foram obtidas experimentalmente com um paquímetro.

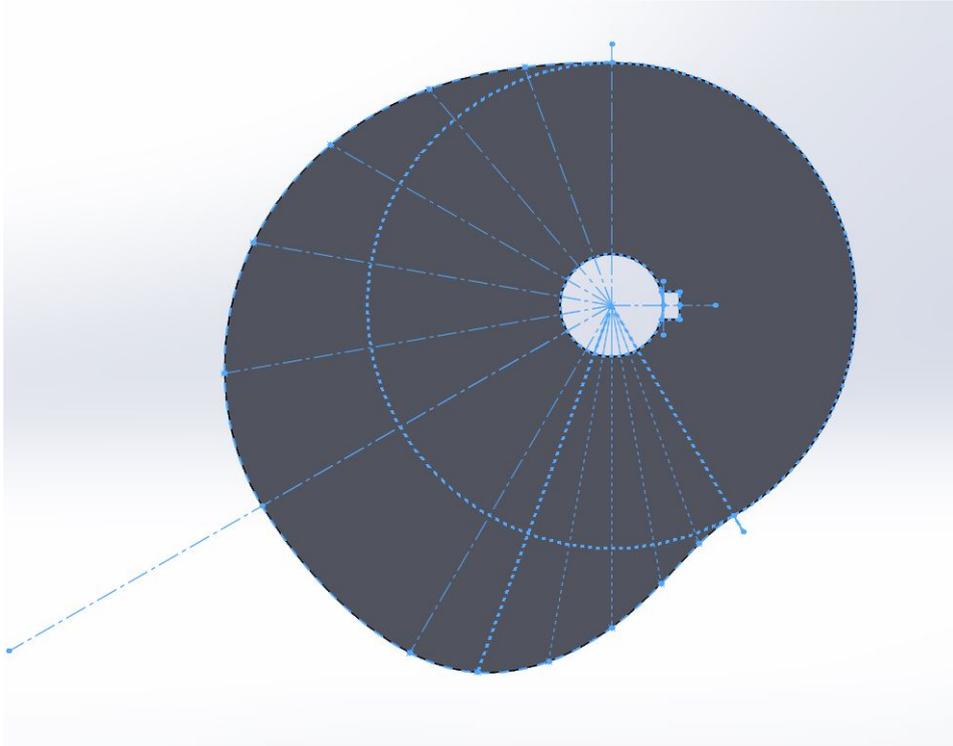


Figura 3.6: Esboço definido do came. Fonte: autoral

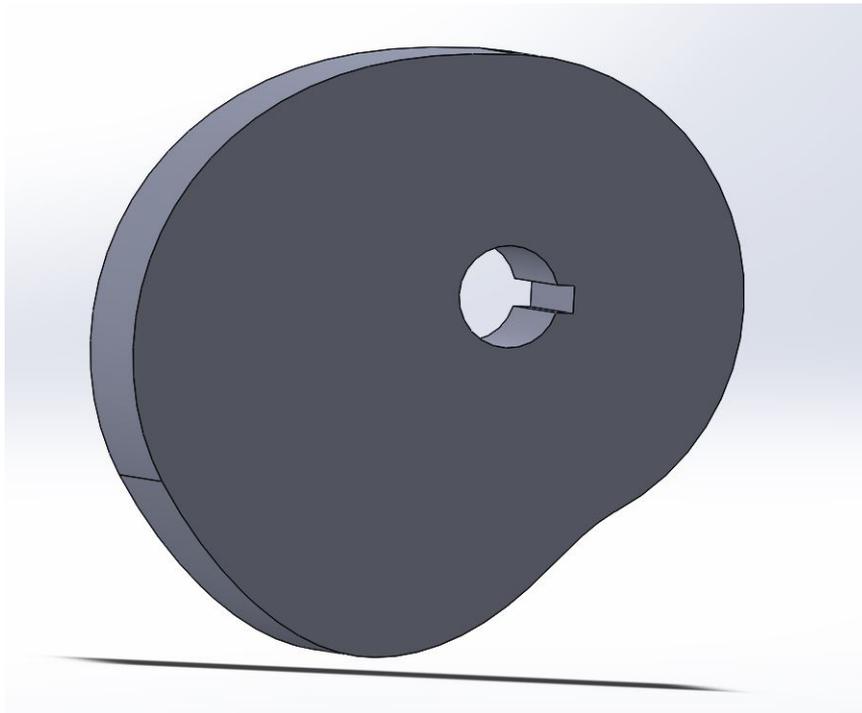


Figura 3.7: Came extrudado com a metade da largura do pneu. Fonte: autoral

Para validar a sua geometria, foi feito o estudo dos seus gráficos  $E V A P$ , através de um software chamado *Analytix Cams*. Por meio deste é possível entrar com os valores de saída e obter tais gráficos, para assim averiguar a eficiência do processo de dimensionamento e design.

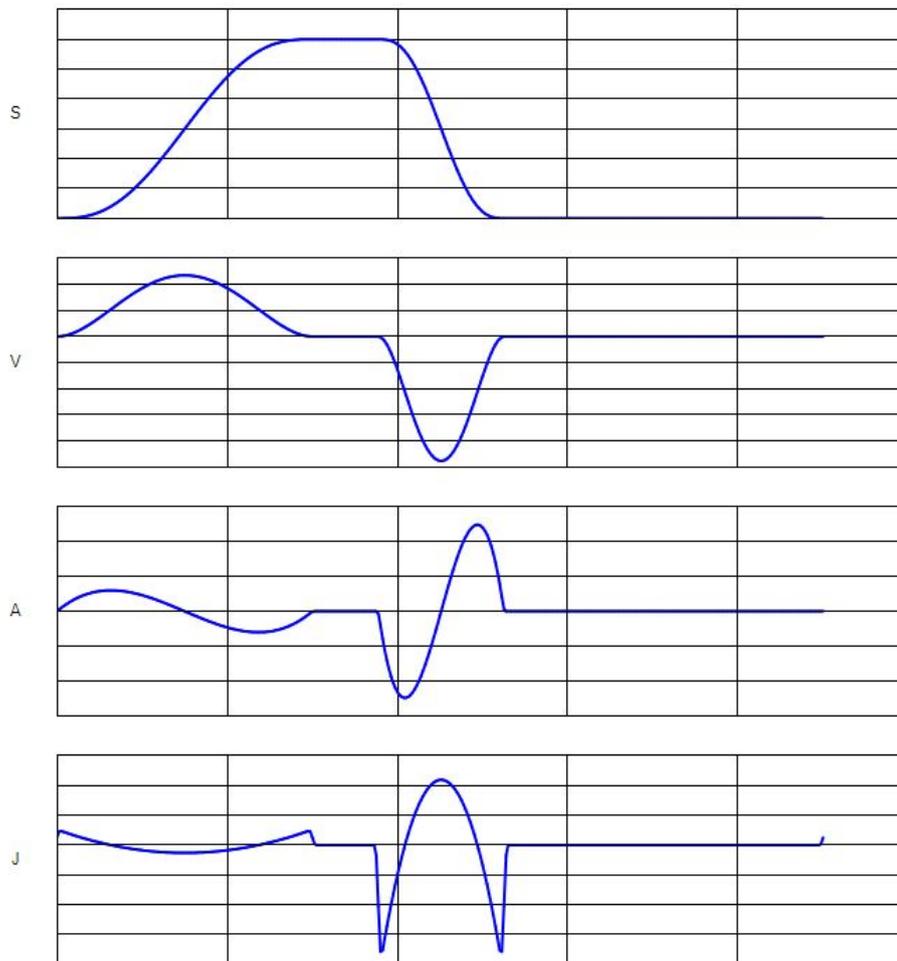


Figura 3.8: Diagramas  $E V A P$  do came gerado. Fonte: autoral

Como não há descontinuidade alguma, o processo de design de fato foi bem feito e encontra-se consolidado. Parte-se para a próxima etapa.

## 4

### Fabricação por manufatura aditiva

Seguido da finalização do desenvolvimento e dimensionamento dos componentes da suspensão, deu-se o início da fabricação por manufatura aditiva dos mesmos. Vale ressaltar que, num processo de usinagem tradicional, a fabricação de uma peça consiste na retirada progressiva do cavaco de grandes peças metálicas, até que o produto final seja alcançado.

Em contrapartida, na manufatura aditiva, a partir de um desenho digital as impressoras 3D constroem uma peça sobrepondo finas camadas de polímeros ou resinas, reduzindo drasticamente o desperdício de material e consequentemente sendo um processo de eficiência maior. Outra vantagem se dá pela necessidade de apenas uma máquina, que é responsável por todas as etapas da fabricação da peça, desde a furação, até as últimas camadas responsáveis pelo acabamento, todas estas com precisão na segunda casa de milímetro. Portanto, este processo, foi utilizada uma impressora 3D de fabricação nacional, cuja marca chama-se Gtmax 3D, modelo A3.



Figura 4.1: Máquina utilizada para a fabricação dos componentes da suspensão.  
Fonte: <https://www.gtmax3d.com.br/>

Além da máquina, outro ponto de grande importância foi a escolha do material. Dentre os dois termoplásticos mais comumente utilizados nessa indústria, estão o Poli Ácido Lático (PLA) e o Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS). Naturalmente, suas diferentes composições químicas exigem diferentes configurações de extrusão para que haja sucesso na impressão dos mesmos. Assim, as peças impressas com cada um dos materiais obviamente tem características distintas e serão explicadas a seguir.

#### 4.1 Materiais comumente utilizados

- ABS:

O ABS é um termoplástico amorfo derivado do petróleo, formado por três monômeros: acrilonitrila, butadieno, e estireno. O material é conhecido por ser um plástico de engenharia com boas propriedades mecânicas que o fazem ter aplicações em diversas áreas da indústria e no uso doméstico. A Figura 4.2 apresenta a influência dos monômeros do ABS em suas propriedades. O ABS

foi o primeiro material utilizado extensivamente pelas impressoras antes de se popularizarem.

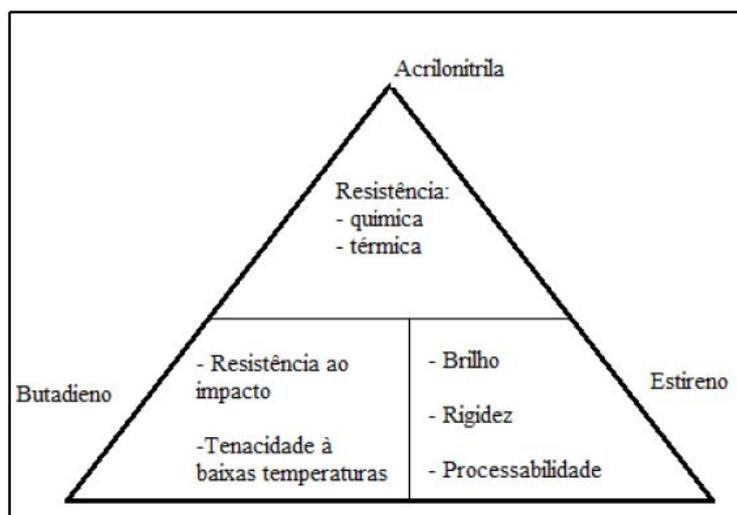


Figura 4.2: Influência da composição química nas propriedades do ABS. Fonte: SIMIELLI e SANTOS (2010)

Os filamentos de ABS são flexíveis e resistentes, ideais para a fabricação de componentes mecânicos. As peças fabricadas podem ser facilmente lixadas, coladas, e pintadas. No entanto, o aquecimento do filamento ABS libera monóxido de carbono e cianeto de hidrogênio, que são prejudiciais à saúde. A temperatura de extrusão média para impressão 3D se encontra em torno de 225 °C. O ABS tem outro aspecto negativo o fato de apresentar uma tendência de empenamento durante a impressão, exigindo uma base de impressão aquecida, e uma espécie de cola para auxiliar a fixação da peça na base.

- PLA:

O PLA consiste em um biopolímero pertencente à família dos poliésteres alifáticos, do tipo poli(hidróxi-ácido), produzido a partir da síntese química do ácido lático obtido de fontes renováveis como milho, trigo, arroz entre outros. Caracteriza-se também por ser um termoplástico, semicristalino ou amorfo, biocompatível e biodegradável, não tóxico e com boa processabilidade térmica (LIM et al., 2008; SANTOS, 2011; BRITO et al., 2012; KAEZMAREK e KWIATKOWSKA, 2012).

As características citadas anteriormente aliadas às boas propriedades mecânicas e a capacidade de ser altamente hidrolisável no corpo humano, fazem

do PLA um importante material em aplicações biomédicas (SATO, 2011). Na medicina costuma ser aplicado em produtos de fixação ortopédicas (pinos, hastes, ligamentos, etc.), aplicações cardiovasculares e intestinais, odontológicas e suturas. Além de também estar presente na indústria alimentícia em embalagens de cereais, doces, produtos lácteos entre outros (MUTHUI et al., 2014). Com relação a suas propriedades mecânicas, exibe um comportamento semelhante ao politereftalato de etileno (PET) e ao polietileno (PE) (BIJARIMI et al., 2012; SOARES 2012). No entanto o PLA possui elevada fragilidade, com menos de 10% de alongamento na ruptura, o que limita em alguns casos a sua aplicação (BRITO et al., 2012; RASAL et al., 2010).

Um estudo realizado por uma das maiores fabricantes americanas tanto de filamento quanto de impressoras 3D *MakerBot*, demonstra tais características de forma experimental, comparando os materiais mencionados e uma versão especialmente resistente do PLA, cuja disponibilidade no Brasil é inexistente.

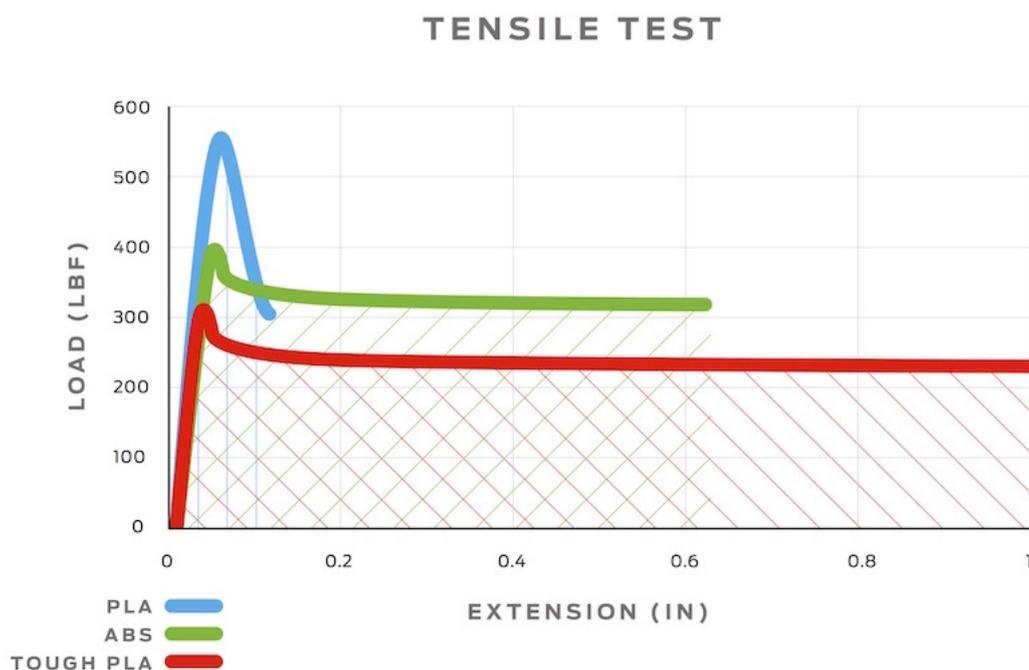


Figura 4.3: Comparação dos materiais em ensaio de tração. Fonte: <https://www.makerbot.com/>

Desta forma, fica explícito o comportamento dos materiais quando submetidos a tensões compressivas. A reação individual de cada um sob as mesmas condições de teste mostram como as composições químicas afetam não só as

propriedades mecânicas, mas também o comportamento destes diferentes materiais.

Apesar do PLA possuir a mais alta tensão de escoamento, seu ponto de fratura se dá com o mais baixo alongamento. O ABS então se demonstra um material que pondera melhor o escoamento com a capacidade de se alongar para absorver a energia oriunda das deformações. Enquanto isso, a versão especial do PLA se mostra como a mais capaz em termos de absorção de tensões. Curiosamente, os três materiais possuem módulo de elasticidade extremamente parecidos.

Como não há disponibilidade da compra deste PLA, optou-se por utilizar o ABS. Fatores como o preço e facilidade de compra com fornecedores nacionais foram também considerados, e por fim, o ABS novamente demonstrou-se como o mais razoável para esta aplicação.

## 4.2

### Configurações do processo de impressão 3D

Com o intuito de otimizar a fabricação e o desempenho das peças impressas da suspensão, procurou-se estudar e entender ao máximo a influência de cada parâmetro de impressão nas propriedades mecânicas resultantes das peças. Desta forma foi possível configurar a máquina para que a produção não fosse lenta em demasia, e para que as peças tivessem as propriedades mecânicas julgadas necessárias para a aplicação. Para que a compreensão dos parâmetros seja possível, será explicado brevemente como os principais parâmetros afetam as propriedades finais das peças, de acordo com estudos experimentais já realizados e documentados.

Sabe-se que as propriedades mecânicas de componentes fabricados por FDM são governadas por sua macroestrutura, esta, por sua vez, é controlada pelos parâmetros do processo de impressão anteriormente citados. Dentre os mais importantes estão por exemplo: diâmetro do filamento, espessura de camada, ângulo de varredura, e percentual de preenchimento.

Segundo Bellini e Güçeri (2003), peças produzidas em um processo de adição de camadas apresentam estruturas com propriedades anisotrópicas. Isso significa que a peça fabricada apresenta diferentes propriedades mecânicas para cada eixo de construção. Segundo estes mesmos autores, as propriedades

mecânicas dependem fortemente de dois importantes fatores: orientação de construção das camadas e a estratégia de preenchimento em cada camada.

Já em outro estudo, realizado por Lužanin (2014), foi investigada a influência dos seguintes parâmetros: espessura de camada, ângulo de varredura e a porcentagem de preenchimento, sobre a resistência máxima à flexão. De acordo com este autor, a espessura de camada foi o parâmetro mais significativo sobre o efeito analisado. Detectou-se que apesar de o ângulo de varredura e a quantidade de material no preenchimento não serem tão relevantes quando analisados individualmente, ao serem analisados em conjunto, a interação entre eles foi bastante influente na resistência máxima à flexão.

Com relação à espessura de camada, segundo estes autores, os maiores valores de resistência obtidos estavam relacionados às situações onde o valor mínimo de espessura foi aplicado. À medida que a espessura de camada aumentou do nível baixo para o alto, a resistência máxima à flexão diminuiu cerca de três vezes.

Com relação à orientação das camadas, segundo um terceiro estudo realizado por: B.M. Tymrak a, M. Kreiger b, J.M. Pearce (2013), através de um ensaio de tração analisou-se o efeito de dois diferentes padrões de ângulos de orientação, o de  $45^\circ/-45^\circ$  e o de  $0^\circ/90^\circ$ . Através dele foi possível concluir que a orientação que mais otimiza a resistência da peça é a  $45^\circ/45^\circ$ . A figura 4.4 mostra com maiores detalhes como cada padrão orienta a construção de um dos braços da suspensão.

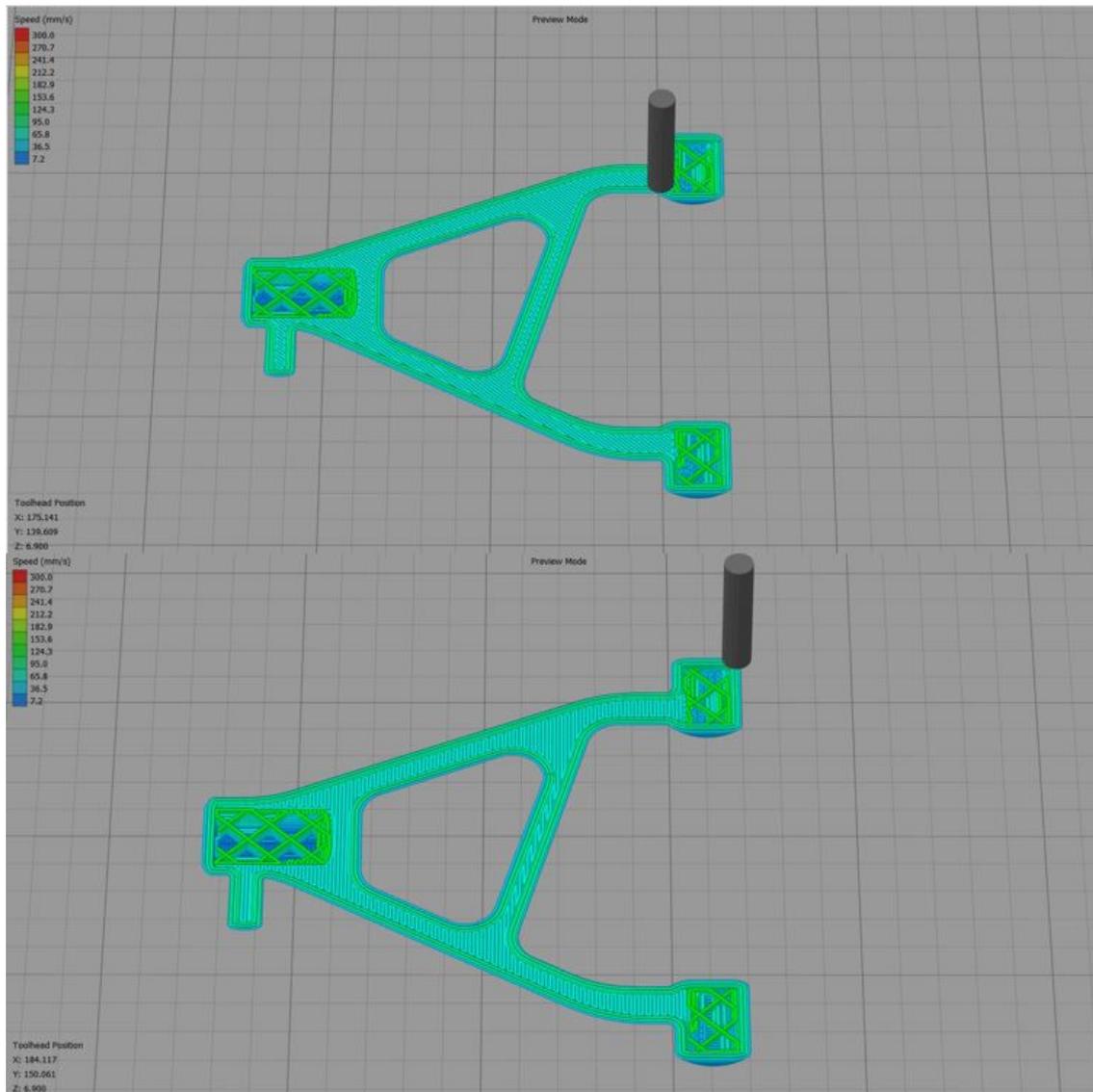


Figura 4.4: Comparação entre os ângulos de orientação. Acima  $45^\circ/-45^\circ$ , abaixo  $0^\circ/90^\circ$ . Fonte: autoral

Desta forma, os parâmetros mais importantes foram escolhidos em função de diversos embasamentos experimentais, e assim obteve-se a configuração ótima.

Configurações de impressão	
Parâmetros de impressão	Valores
Espessura de camada	0,15 mm
Número de camadas inferiores	4
Número de camadas superiores	6
Número de perímetros	4
Padrão de preenchimento	45°/-45°
Percentual de preenchimento	25%
Velocidade de impressão	120mm/s

Configurações de impressão

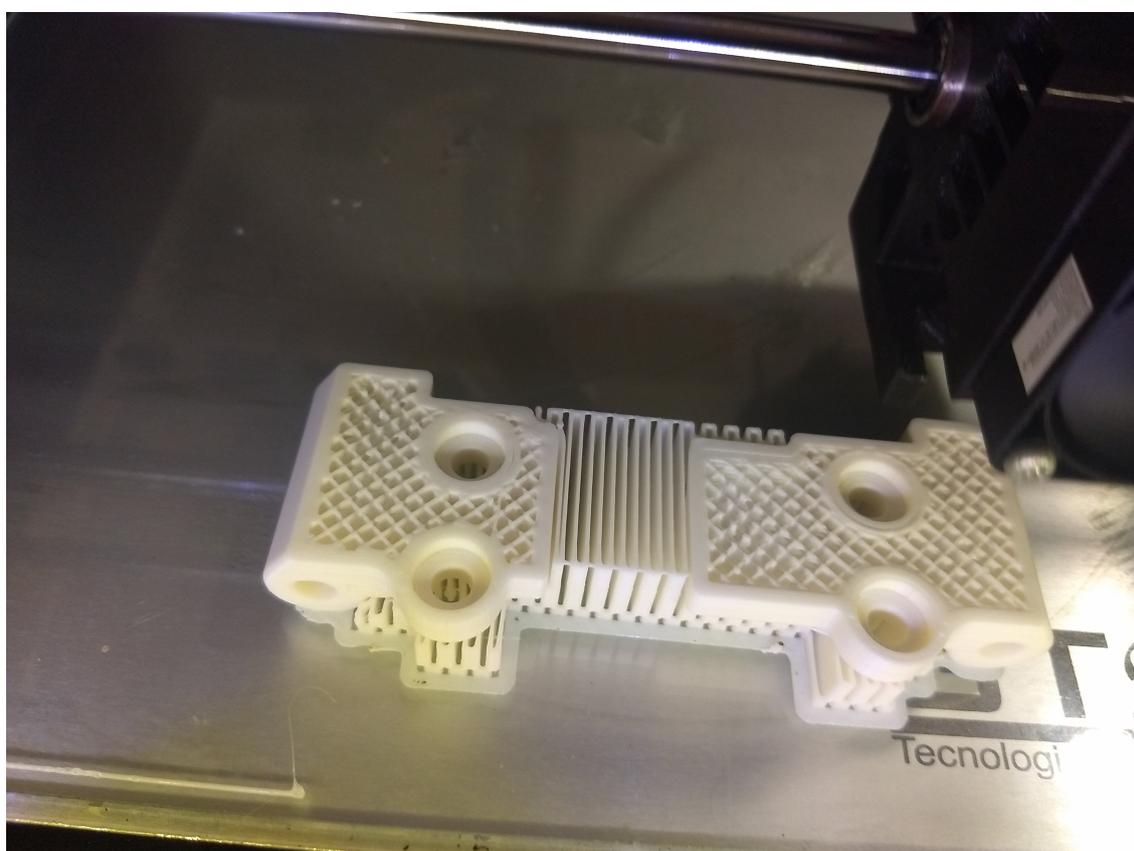


Figura 4.5: Processo de impressão. Fonte: autoral

### 4.3 Montagem da suspensão

Munido de todas as peças impressas fabricadas, deu-se início a montagem do sistema de suspensão.

Na articulação dos braços com o subchassi, com o objetivo de permitir um movimento relativo entre eles de mínimo atrito e menos resistivo possível, foram usados parafusos de corpo retificado com rosca interna.



Figura 4.6: Parafusos de cabeça retificada. Fonte: autoral

Exercendo a função de cubo de roda, foi usado uma peça fabricada em série, em alumínio e já com rolamentos embutidos, diferentemente do restante que foi impresso. Esta peça pertence ao carro de controle remoto *Traxxas* de escala também 1/8.



Figura 4.7: Cubo de roda da marca *Integy*. Fonte: autoral

Para unir esta peça aos braços superior e inferior da suspensão e permitir movimento também articulado sem variação de ângulo de cambagem, foram utilizados parafusos de cabeças esféricas.

Para amenizar as folgas e simular o efeito das buchas, foi necessário optar por um material barato, fácil de encontrar e que associasse alta flexibilidade à boa resistência mecânica. Para isso optou-se por usar mangueiras de tubulação de água de 10mm de diâmetro, comumente encontradas em filtros de água residenciais.

O conjunto mola amortecedor foi comprado pronto. Considerando o material da mola como aço ferramenta, por elementos de máquinas é possível ter uma estimativa teórica de sua constante, que se dá por:

$$\begin{aligned} K &= dG \frac{1}{8C^3Na} \\ &= 26 \text{ N} / \text{mm} \end{aligned} \quad (4-1)$$

onde:

– d é o diâmetro do arame

- $G$  é o módulo de elasticidade à torção
- $C$  é índice da mola, dado pela razão entre os diâmetros externo e do arame
- $N_a$  é o número de espiras ativas

Por meio das figuras 4.8 e 4.9, é possível ver a montagem do modelo físico com os itens acima mencionados, assim como a comparação com o modelo digital.



Figura 4.8: Parafusos de cabeça esférica. Fonte: autoral

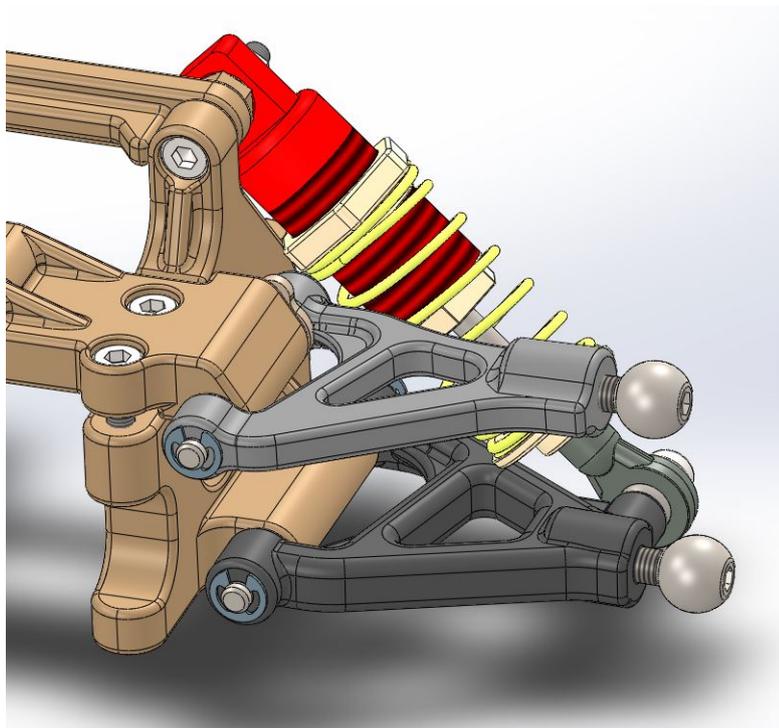


Figura 4.9: Comparação da montagem em Solidworks com o modelo físico.  
 Fonte: autoral

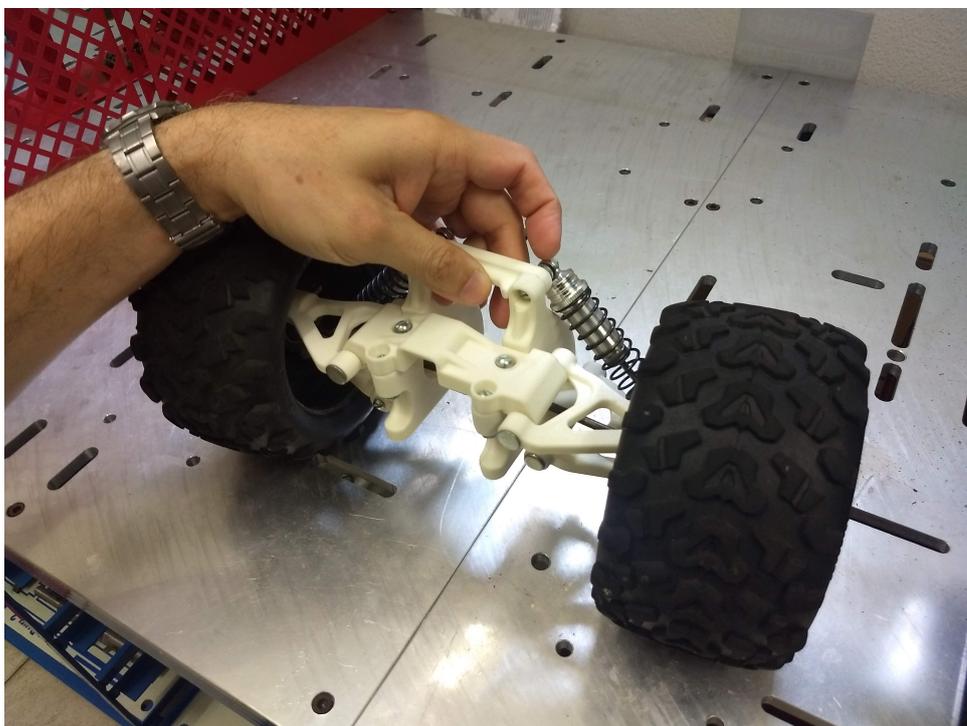


Figura 4.10: Suspensão montada. Fonte: autoral

Com o modelo montado, previamente à análise dinâmica na bancada de testes, foram feitos testes manuais para avaliar a rigidez do conjunto e se a

montagem estava firme, sem folgas muito pronunciadas.

Por meio destes testes, foi possível perceber que o ponto de fixação do conjunto mola amortecedor no braço inferior da suspensão estava com folga crescente, até que eventualmente o parafuso se soltava. Uma análise mais profunda revelou que uma trinca havia se formado e propagado, causando a fratura da peça.



Figura 4.11: Braço inferior trincado. Fonte: autoral

O diagnóstico inicial foi de que a espessura da parede havia ficado demasiadamente fina, causando uma elevada concentração de tensões e finalmente vindo à falha. Para contornar o problema, optou-se por usar um conjunto parafuso e porca de menor diâmetro. Desta forma a espessura da parede ficou cerca de 2 mm maior. Este incremento foi suficientemente grande para que esta peça não mais apresentasse trincas.

## 5

### Montagem da Bancada

Com o modelo físico em mãos, a fim de se verificar a qualidade do sistema, é necessário realizar uma série de testes que representam e simulam situações reais de trabalho. Desta forma é possível também, comparar as respostas do modelo em escala com o modelo de tamanho original. Isso dará noção do quão confiável é o projeto, e quão eficaz é a bancada montada.

Assim, deu-se início ao processo de configuração e montagem da bancada de testes. Esta consiste basicamente na montagem da suspensão numa base estática, onde apenas uma das rodas terá contato com um came, cuja geometria representa características de imperfeições e obstáculos no solo. Este came então é acoplado num motor elétrico, cuja velocidade angular é conhecida, e eventualmente variada para simular a variação de velocidade do carro.

A bancada de testes foi montada no laboratório de Motores, no Instituto Militar de Engenharia (IME). Lá foi disponibilizado todo o aparato necessário para a avaliação, como os acelerômetros, motores elétricos e a bancada em si. A bancada utilizada foi da marca americana *Amatrol* modelo *Mechanical Drive Systems 950-ME*



Figura 5.1: Bancada da *Amatrol*. Fonte: autoral

Os motores elétricos disponíveis foram os de corrente alternada, da marca *Dayton* modelo 1LPZ4A.

O alinhamento da suspensão com os eixos do motor se deu pelos espaçadores que o fabricante da bancada disponibiliza. Na figura 5.2 pode-se ver a relação de proporção entre o modelo em escala e o porte do motor elétrico.

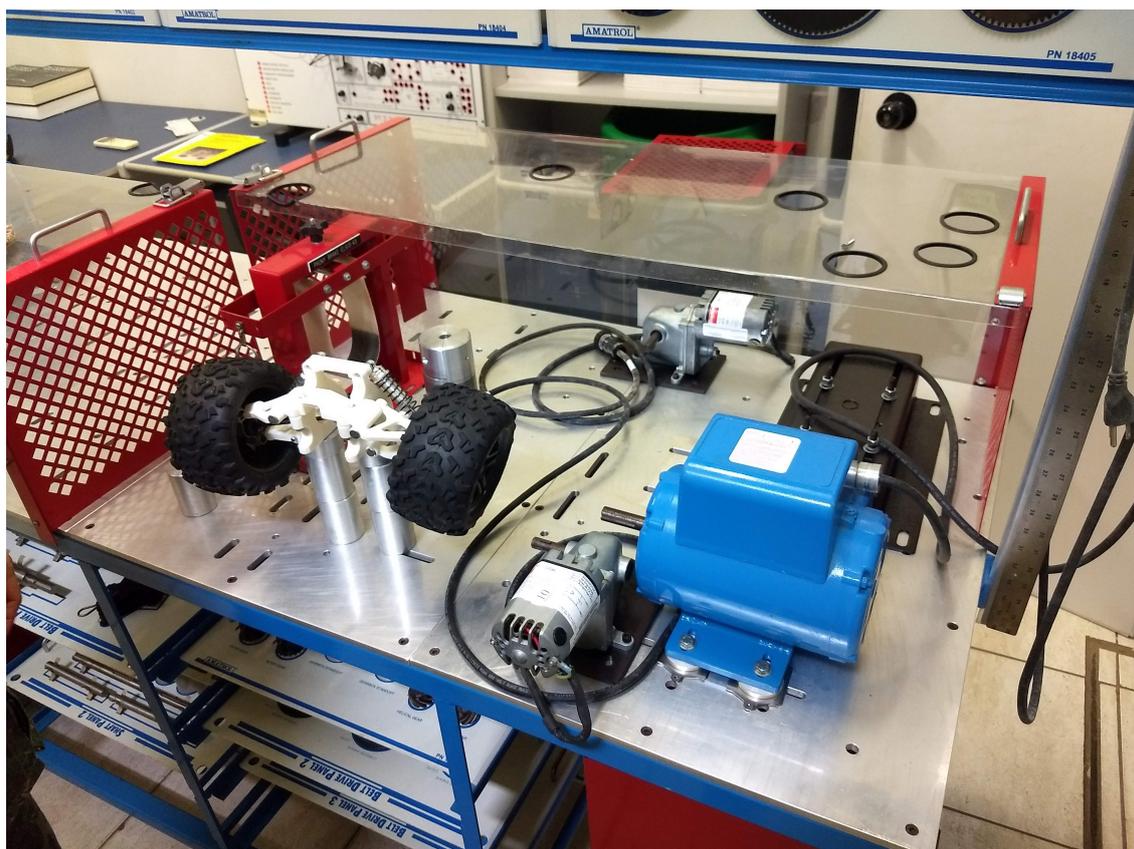


Figura 5.2: Início de montagem da bancada de testes. Fonte: autoral

## 5.1 Dificuldades encontradas

A dificuldade inicial encontrada na montagem da bancada foi como fixar a suspensão de forma alinhada com eixo do motor elétrico, tanto na distância horizontal quanto vertical. Os espaçadores disponíveis pelo fabricante por razões óbvias de facilidade de fabricação, possuem dimensões padronizadas, cabendo ao projeto se adaptar à estas, e não o inverso. Além dos espaçadores, os rasgos na bancada seguem o mesmo raciocínio.

Assim, montando o sistema próximo demais ao motor não haveria espaço para o trabalho do came, e montando muito acima o came ficaria longo o suficiente para colidir com a base do motor. Sabendo disso, chegou-se no posicionamento ideal através de um espaçador de 65mm e mais outros dois de 22 mm. No topo de tudo isso, foi acoplada uma base de madeira.

Para uma melhor e mais limpa medição e captura de dados dos sensores usados, precisou-se montar um sistema de montagem rígido o suficiente para

que não vibrasse excessivamente, e para que não sofresse movimentos flexão ou torção. Por isso optou-se por uma placa da madeira medindo 300 x 80 x 20 mm , cujo material foi não só o de menor elasticidade, como também o de maior dureza encontrada.

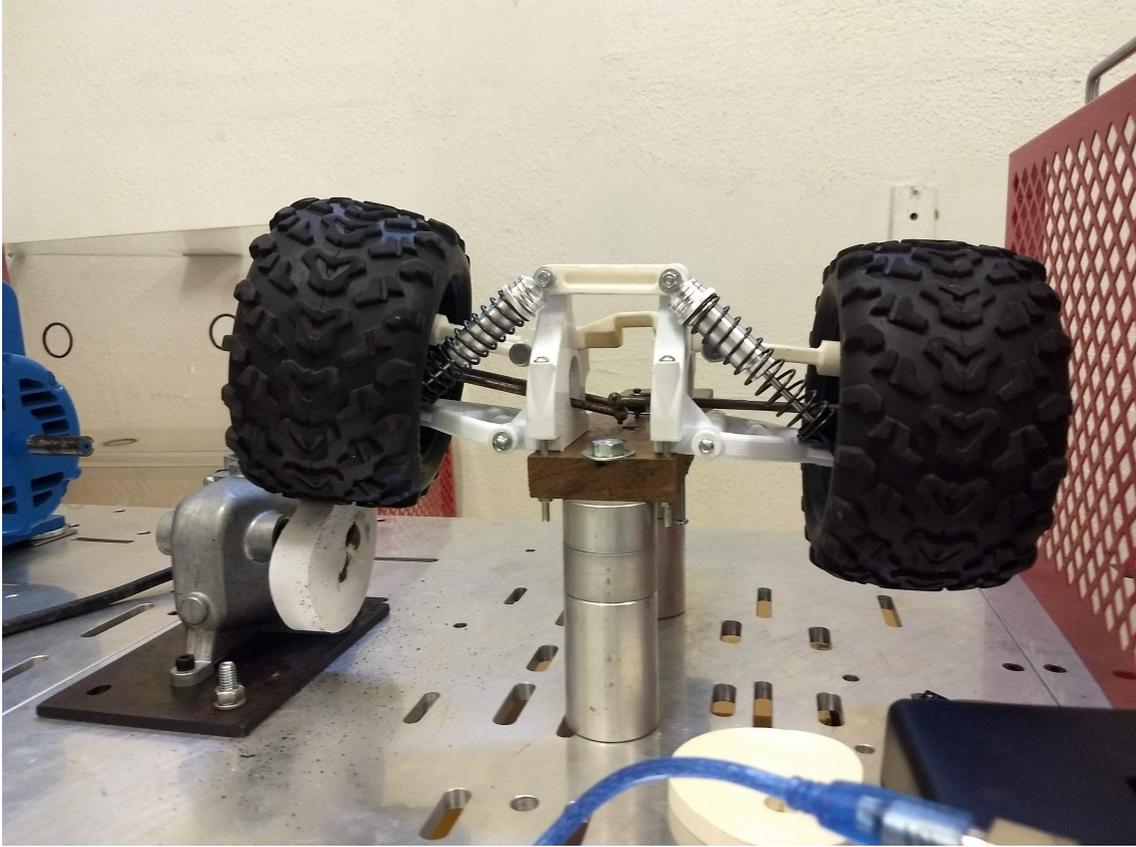


Figura 5.3: Alinhamento da suspensão. Fonte: autoral

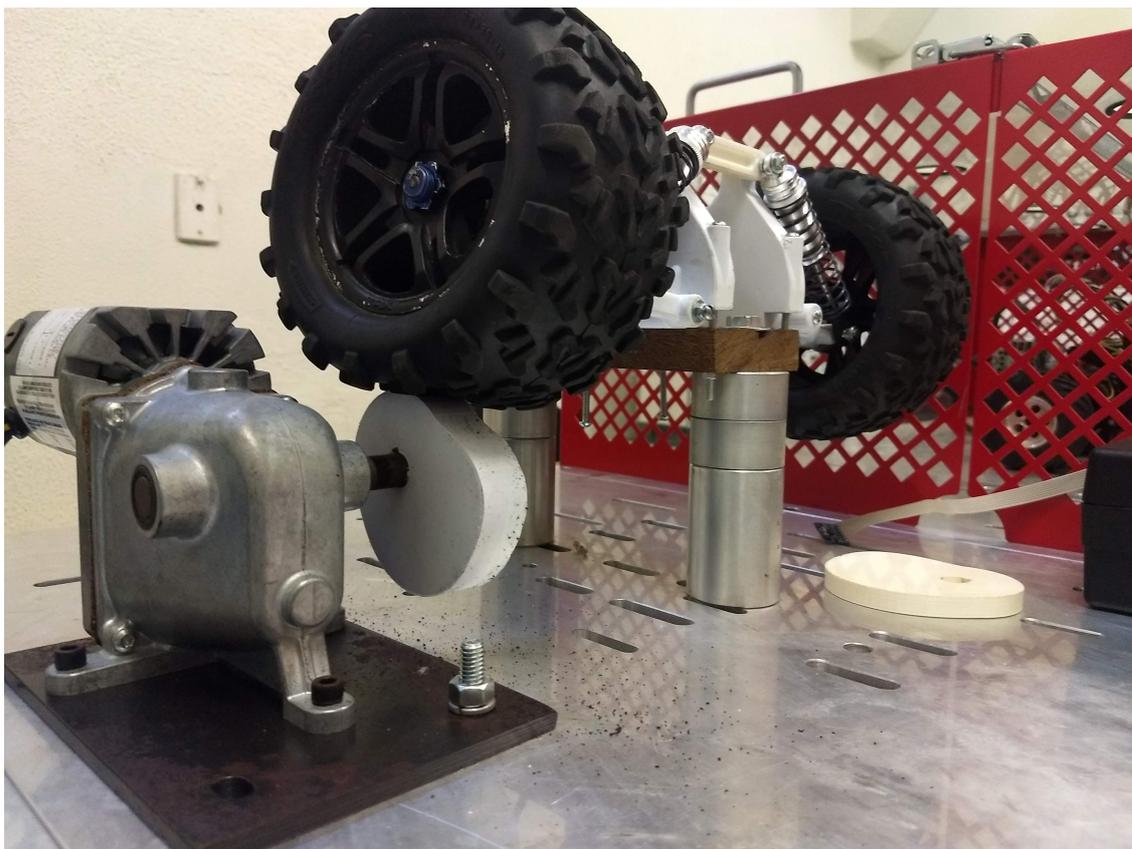


Figura 5.4: Alinhamento da suspensão sob ângulo distinto. Fonte: autoral

## 5.2 Instrumentação

Para tornar possível a extração de dados experimentais do modelo, fez-se necessário o uso de determinados sensores, assim como seus controladores e programas que os operam.

Com o intuito de medir a aceleração vertical dos braços e na manga de eixo da suspensão, foi selecionado um acelerômetro. O modelo escolhido foi um que pudesse atender aos seguintes pré-requisitos: boa precisão e confiabilidade, um custo relativamente baixo, ampla utilização e tamanho compacto. Seu nome é *MPU 6050*. Além do eixo solicitado neste trabalho, este acelerômetro tem um total 6 graus de liberdade. Desta forma ele pode ser usado não só como um giroscópio triaxial, mas também com um acelerômetro triaxial.

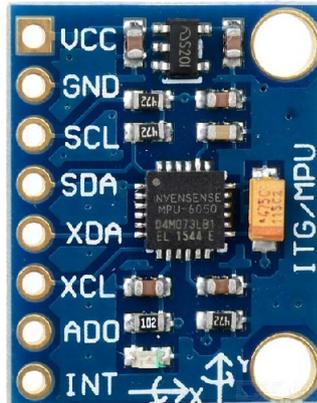


Figura 5.5: Acelerômetro *MPU6050*. Fonte: <https://www.makerlab-electronics.com/>

Para usá-lo corretamente, foi criada uma rotina de programação em Arduino. Esta rotina é responsável por fazer a calibração do sensor, e por obter as medições de aceleração no eixo desejado. O programa também tem em seu código, uma função de filtro de sinais do tipo passa baixa, para amenizar os ruídos inerentes a qualquer tipo de medição.

Para controlar e processar os dados obtidos pelo sensor, foi utilizada a placa micro controladora *Arduino Uno*, que foi capaz de atender aos mesmos pré-requisitos do acelerômetro.



Figura 5.6: Placa micro controladora *Arduino Uno*. <https://www.makerlab-electronics.com/>

Não menos importante, outro cuidado tomado foi na seleção dos cabos que ligam o sensor na placa controladora. Enfatizando a problemática de ruídos, os cabos selecionados também levaram este fator em consideração. Optou-se por cabos utilizados em instalações elétricas de elevadores, pois eles possuem grande resistência à flexão e permitem grandes variações de ângulo de trabalho, além de serem mais rígidos que os cabos comuns, amenizando a vibração do sistema.

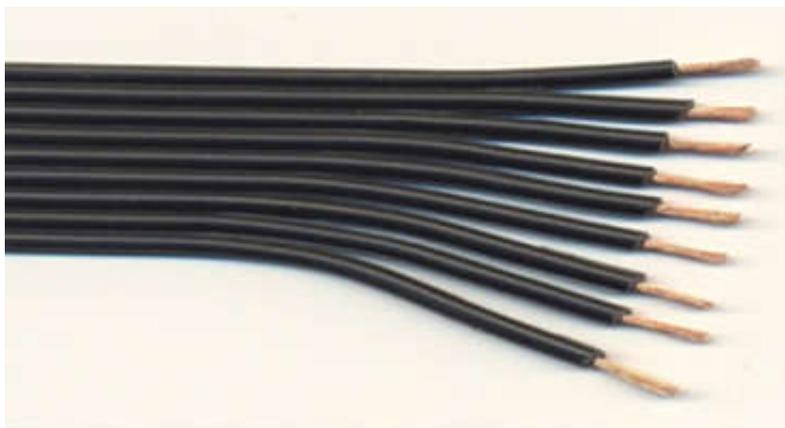


Figura 5.7: Cabos de instalações elétricas de elevadores. Fonte: <http://www.pan.com.br/>

Para que a rotação do motor elétrico seja conhecida, além do controle de corrente interno da bancada, a velocidade em rotações por minuto foi medida por um tacômetro digital do fabricante *Extech*, modelo 461893, cedido pelo Instituto Militar de Engenharia.



Figura 5.8: Tacômetro digital *Extech*. Fonte: <http://www.extech.com/>

## 6

### Metodologia experimental

A velocidade angular do motor elétrico exerce a função de simular a velocidade de deslocamento do veículo. Assim, conhecendo-se não somente a velocidade do motor em rotações por minuto mas também o raio externo do pneu, é possível estimar a velocidade do automóvel em metros por segundo.

Já o came tem a função de simular as imperfeições do solo. Todas suas dimensões são conhecidas, portanto pode-se prever que tipo de estímulo a suspensão recebe.

Dada a faixa operacional do motor elétrico de 80 a 200 RPM, a rotina de testes da suspensão foi feita da seguinte forma: iniciou-se o experimento com uma velocidade angular no motor próxima à máxima, e ao longo do tempo, esta passou por 3 reduções, sempre em regime constante. Para cada velocidade angular dada, o acelerômetro foi programado para fazer medidas contínuas num intervalo de tempo de 5 segundos, com frequência de medição de 1000 medidas por segundo, totalizando 5000 pontos.

O acelerômetro foi posicionado em dois lugares distintos. o início do teste, ele foi preso no braço inferior da suspensão, por meio de uma fita dupla face. Procurou-se deixá-lo o mais paralelo ao solo possível, para que sua calibração não fosse afetada por conta de um desalinhamento. Por meio da figura 6.1 este posicionamento torna-se ainda mais claro.

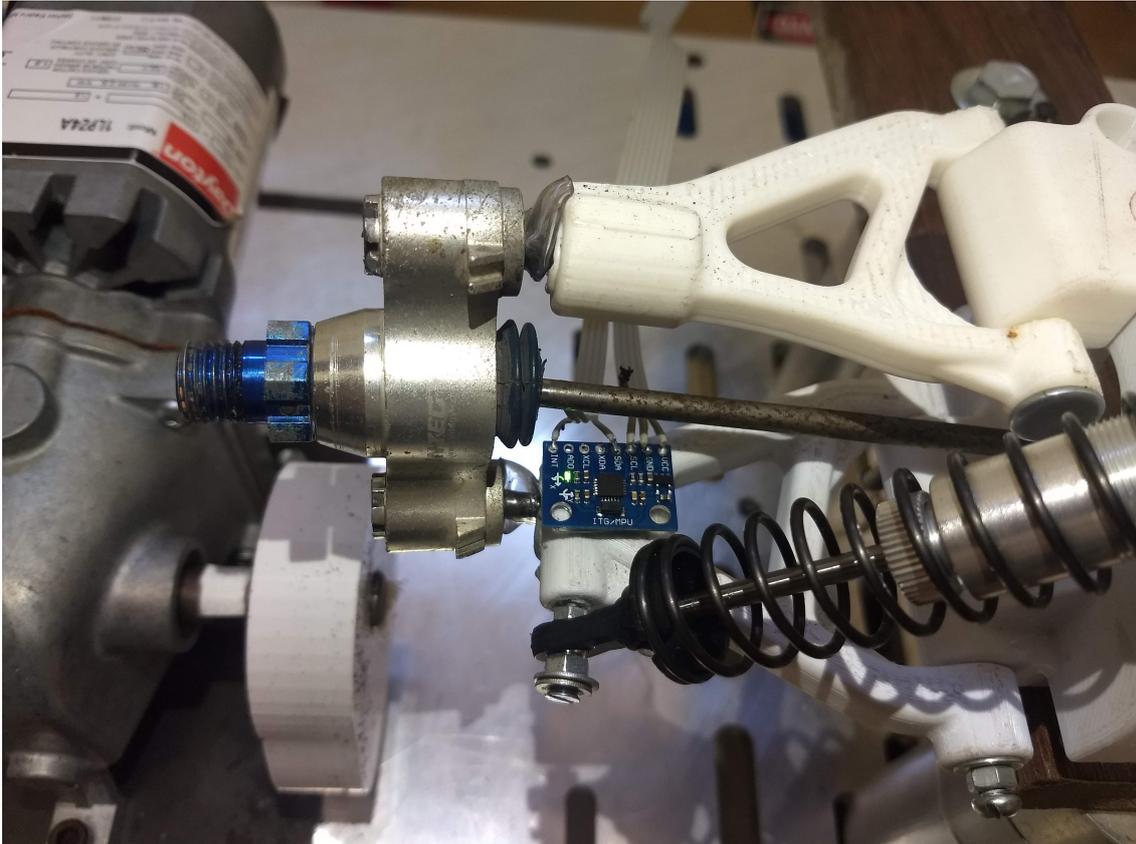


Figura 6.1: Acelerômetro preso no braço inferior. Fonte: autoral

As leituras feitas pelo sensor foram exportadas em *.txt* para posteriormente serem exportadas para uma planilha *Excel*, onde a análise foi feita.

Recolhidos os dados nesta posição, o sensor foi então colocado em sua segunda posição, na manga de eixo. O mesmo cuidado com a sua orientação foi tomado para que a calibração permanecesse válida, e finalmente, seguiu-se o mesmo protocolo.

## 7 Resultados

De acordo com o desempenho do ensaio, pode-se dizer que a plataforma de testes desenvolvida demonstrou-se confiável em múltiplos aspectos.

Primeiramente as peças fabricadas por impressão 3D demonstraram-se absolutamente adequadas para a proposta do projeto. Estas foram um compromisso ótimo entre peso e resistência mecânica. Forneceram baixíssima inércia ao sistema e foram capazes de suportar diversas horas de testes contínuos sem demonstrar sequer uma falha, o que pode ter sido fruto tanto das configurações de impressão corretas, quanto da seleção correta do material. Já os parafusos usados na fixação de todo conjunto se demonstraram igualmente adequados, ao passo que não houve incremento algum de folga ao longo dos ensaios. O acelerômetro foi capaz de manter alta repetibilidade em suas medições, e não precisou ser recalibrado em nenhum momento.

A figura 7.1 mostra o gráfico dos dados coletados do primeiro teste.

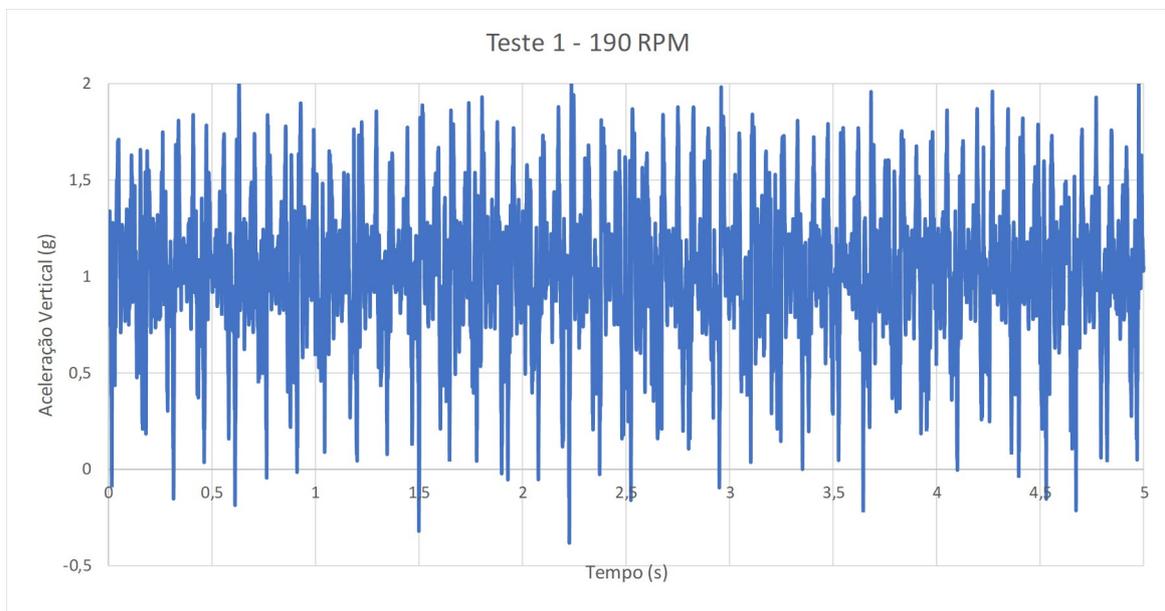


Figura 7.1: Gráfico experimental de aceleração por tempo a 190 RPM. Fonte: autoral

Nota-se com facilidade o padrão do movimento oscilatório repetitivo correspondente ao da suspensão. Os valores atingem picos positivos de no máximo de 2 g e picos negativos próximos a -0.5 g. O espaçamento entre os máximos permanece razoavelmente constante ao longo de toda medição. Não há nenhuma descontinuidade indicando uma possível falha no cabeamento ou nas soldas. Por último vale ressaltar que a leitura foi feita em função da gravidade. Na ausência de estímulo a leitura do sensor permaneceu estável em 1 g. Para uma melhor visualização, a figura 7.2 reduz a janela de tempo do gráfico num fator de 5.

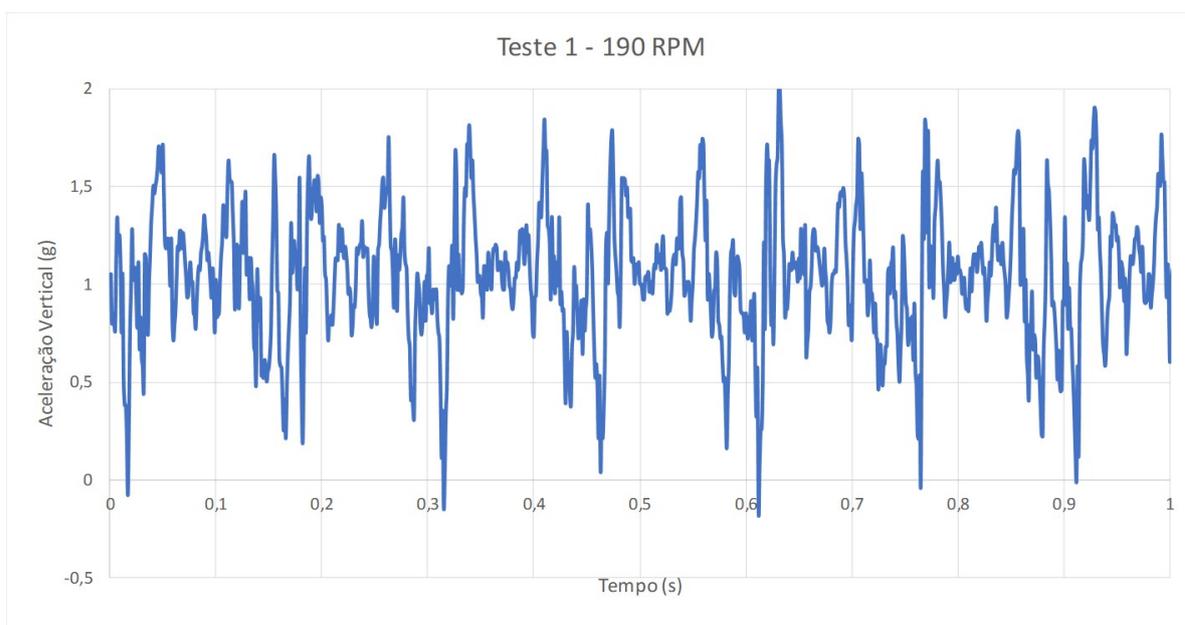


Figura 7.2: Gráfico experimental de aceleração por tempo a 190 RPM com janela reduzida. Fonte: autoral

As medições realizadas com as outras velocidades possuem exatamente o mesmo padrão das medidas das figuras 7.1 e 7.2. A diferença é unicamente a intensidade da aceleração. Com a maior velocidade de rotação do came, este força o pneu a acompanhar seu movimento, provocando um maior deslocamento num mesmo espaço de tempo, quando comparado com menores velocidades angulares. Assim, os testes realizados com valores menores de RPM possuem menor amplitude de aceleração, demonstrando absoluta coerência nos resultados experimentais.

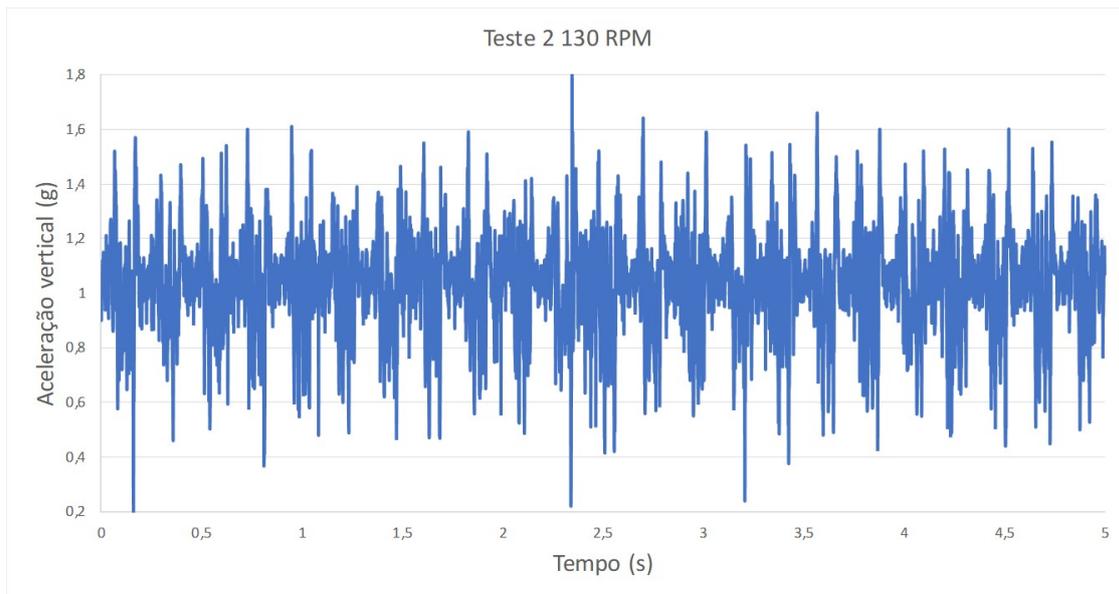


Figura 7.3: Gráfico experimental de aceleração por tempo a 130 RPM. Fonte: autoral

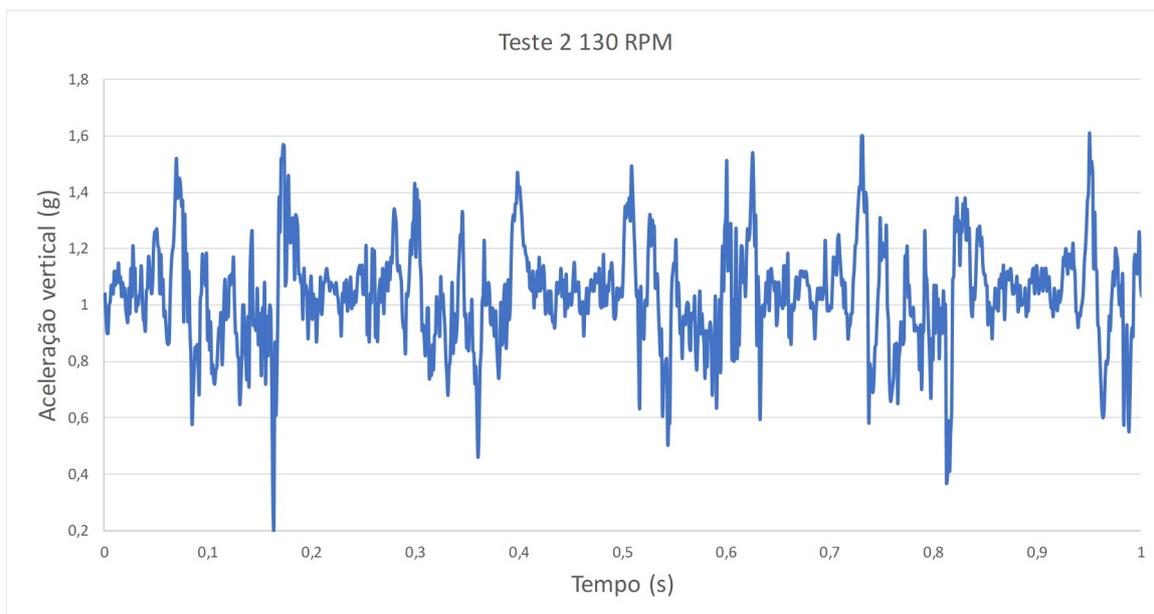


Figura 7.4: Gráfico experimental de aceleração por tempo a 130 RPM com janela reduzida. Fonte: autoral

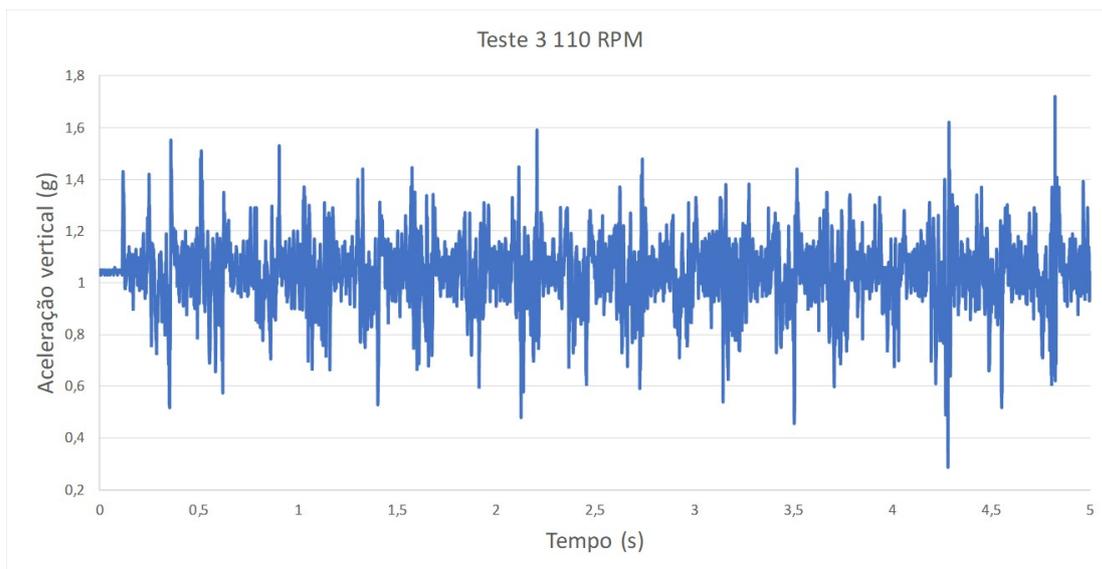


Figura 7.5: Gráfico experimental de aceleração por tempo a 110 RPM. Fonte: autoral

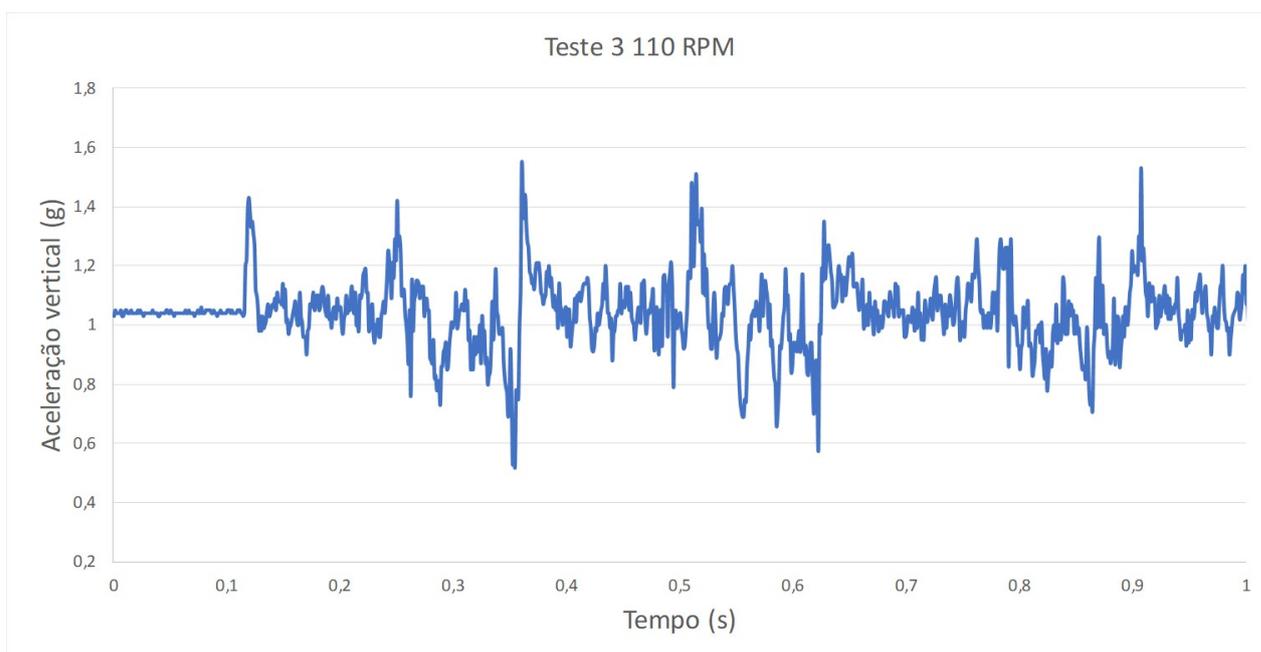


Figura 7.6: Gráfico experimental de aceleração por tempo a 110 RPM. Fonte: autoral

Na figura 7.5 e 7.6 pode-se perceber uma pequena diferença. Nestas medições é altamente provável que o programa de medição tenha rodado antes do motor elétrico estabelecer seu regime permanente, de forma que

foi detectada aceleração virtualmente igual à 1 g. Em outras palavras, houve captura de dados com o sistema estático por cerca de 0,3 segundo.

Para visualização mais clara, a figura 7.7 mostra todos os testes numa mesma janela.

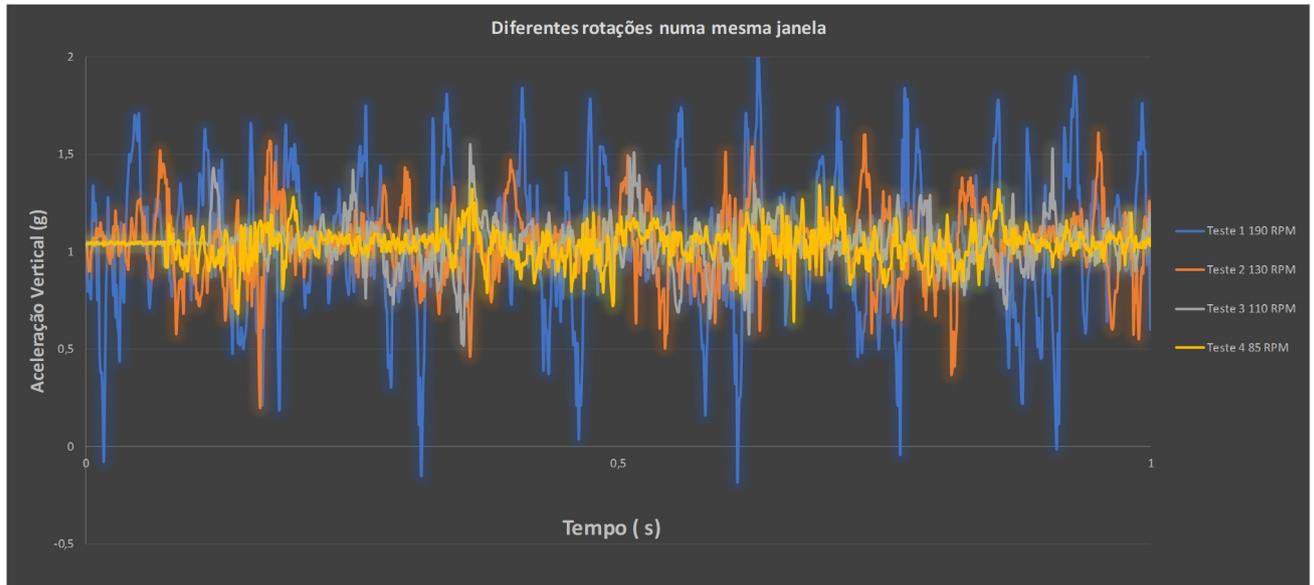


Figura 7.7: Gráfico experimental de aceleração por tempo a 110 RPM. Fonte: autoral

Por meio do gráfico 7.7, pode-se perceber uma pequena defasagem entre os picos sinais oriundos de gráficos distintos. Estas se dão pela dificuldade de marcar a posição inicial no eixo do came, já que não há ajuste tão fino sobre sua posição. Pequenas variações na amplitude do sinal são admissíveis, uma vez que, devido ao tamanho considerável do came associado ao conjunto da suspensão, o motor estava sofrendo um torque resistivo que não pode ser desprezado.

## 8

### Conclusões

É seguro dizer que até o final deste trabalho, o projeto foi plenamente desenvolvido. Foi possível realizar um experimento claramente multidisciplinar, de grande valor para os envolvidos em sua criação. O experimento apresentou resultados sólidos e alertou para a ampla possibilidade na continuidade de seu uso em trabalhos futuros.

Estes trabalhos futuros podem tirar proveito do modelo físico criado, e variar a instrumentação a fim de medir uma série de parâmetros que não pertenceram à este projeto. Pode-se explorar giroscópios para medir a variação do ângulo de trabalho dos braços, e assim determinar o deslocamento da mola para estimar dados como transmissibilidade de esforços. O modelo pode ser testado como 1/2 carro ao invés de 1/4 de carro, também pode-se desenvolver o conjunto de suspensão dianteira para fazer uma análise ainda mais completa.

Além do viés experimental, o modelo tridimensional ainda pode ser usado para as mais diversas simulações dentro do ramo da Engenharia Veicular.

## Referências Bibliográficas

Crolla, David. "Automotive engineering: powertrain, chassis system and vehicle body."(2009).

Gillespie, Thomas D. "Vehicle dynamics."Warren dale (1997).

Farzadi, Arghavan, et al. "Effect of layer thickness and printing orientation on mechanical properties and dimensional accuracy of 3D printed porous samples for bone tissue engineering."PloS one 9.9 (2014): e108252.

Kim, Heechang, et al. "Experimental study on mechanical properties of single-and dual-material 3D printed products."Procedia Manufacturing 10 (2017): 887-897.

Santana, Leonardo, et al. "Avaliação da composição química e das características térmicas de filamentos de PLA para impressoras 3D de código aberto."anais do IX Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Fortaleza (Ce), Brasil. 2016.

Norton, Robert L. Cinemática e dinâmica dos mecanismos. AMGH Editora, 2010

Tymrak, B. M., M. Kreiger, and Joshua M. Pearce. "Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions."Materials Design 58 (2014): 242-246.

Vivekanandan, N., et al. "Design, analysis and simulation of double wishbone suspension system."International Journal of Mechanical Engineering 2.6 (2014): 1-7.

## Referências Bibliográficas

# A

## Apêndice