

Universidade Federal de Juiz de Fora
Faculdade de Engenharia
Graduação em Engenharia Mecânica

**Projeto e construção de um dispositivo para medição dos coeficientes de
amortecedores automotivos**

Caio Souza Junqueira

Juiz de Fora

2018

Universidade Federal de Juiz de Fora
Graduação em Engenharia Mecânica

**Projeto e construção de um dispositivo para medição dos coeficientes de
amortecedores automotivos**

Caio Souza Junqueira

Juiz de Fora
Faculdade de Engenharia

2018

Projeto e construção de um dispositivo para medição dos coeficientes de amortecedores automotivos

Trabalho Final de Curso apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Área de conhecimento: Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Alexandre da Silva Scari

Juiz de Fora
Faculdade de Engenharia

2018

Ficha catalográfica elaborada através do Modelo Latex do CDC da UFJF
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Junqueira, Caio Souza.

Projeto e construção de um dispositivo para medição dos coeficientes de amortecedores automotivos / Caio Souza Junqueira. – 2018.

69 f. : il.

Orientador: Alexandre da Silva Scari

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Graduação em Engenharia Mecânica, 2018.

1. Elementos de Máquinas. 2. Vibrações Mecânicas. 3. Suspensão. I. Scari, Alexandre da Silva, orient. II. Título.

Projeto e construção de um dispositivo para medição dos coeficientes de amortecedores automotivos

Caio Souza Junqueira

Trabalho Final de Curso submetido à banca examinadora constituída de acordo com o Artigo 9º do Capítulo IV das Normas de Trabalho Final de Curso estabelecidas pelo Colegiado do Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Aprovado em: 20/06/2018

Por:

Orientador: Prof. Dr. Alexandre da Silva Scari

Prof. M.Sc. Vitor Mainenti Leal Lopes

Prof. Dr. Raphael Fortes Marcomini

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter a saúde e a força necessária para ir atrás de meus objetivos e me iluminar durante todo este tempo.

Aos meus pais, Wânia e José Paulo, meus exemplos diários de amor e determinação por todo suporte e motivação. A minha irmã, Helena, cujo carinho e amor foram fundamentais. À minha namorada, Thaís que esteve sempre ao meu lado durante todo este tempo, me apoiando e fazendo com que os meus dias fossem mais leves e com mais alegria. À Ba, por todo amor e dedicação em prol do meu bem estar.

Aos meus amigos do CKMO, agradeço por toda amizade e irmandade durante toda esta trajetória. Aos amigos da Engenharia, agradeço por compartilhar todos os momentos durante este ciclo, o fazendo menos penoso e mais feliz.

Agradeço também aos mestres que tive, por todo ensinamento repassado. Em especial, agradeço ao meu orientador Alexandre Scari por toda paciência, ajuda e profissionalismo na elaboração deste trabalho. Ao professor Flávio pelas reuniões e direcionamentos em prol deste trabalho e ao Vinícius Lagrota e Clayton pela ajuda no tratamento obtenção dos resultados contidos neste trabalho.

Todos vocês tiveram papel importante na minha graduação e crescimento pessoal. Serei eternamente grato por todos os momentos compartilhados.

Obrigado!

“Pensamos demasiadamente e sentimos muito pouco. Necessitamos mais de humildade que de máquinas. Mais de bondade e ternura que de inteligência. Sem isso, a vida se tornará violenta e tudo se perderá”.

Charles Chaplin

RESUMO

O amortecedor veicular é um dispositivo desenvolvido para manter o contato entre pneu e solo, propiciar conforto aos ocupantes do veículo e controlar o movimento das molas contidas no sistema de suspensão. Os fabricantes do mesmo, na maioria das vezes, não fornecem dados como o coeficiente de rigidez das molas e constante de amortecimento. Tendo em vista a necessidade da obtenção destes dados no desenvolvimento do projeto da suspensão da equipe Escuderia UFJF, foi realizado neste trabalho, o desenvolvimento de um dispositivo capaz de medir ambos os dados citados acima. Foi realizado testes para a validação e obtenção das constantes da mola e amortecedor experimentalmente. O dispositivo foi projetado baseando-se em um modelo massa-mola-amortecedor, com um grau de liberdade e o projeto conta com o conhecimento das áreas de elementos de maquinas, soldagem, vibrações mecânicas e resistência dos materiais. É um projeto que visa primeiramente o baixo custo e analisa de forma eficiente as molas e amortecedores.

Palavras-chave: Amortecedor; Vibrações mecânicas; Coeficiente de amortecimento; Suspensão; Molas; Decremento logarítmico;

ABSTRACT

The vehicle shock absorber is a device designed to maintain contact between tire and ground at all times, providing comfort to the passengers and controlling the springs' movement contained in the suspension system. Dumpers manufacturers usually does not provide data such as spring stiffness and damping constant. Considering the needing to obtain those data in the suspension development of the Escuderia UFJF formula student team, the following project seeks to develop a device capable of measuring the terms cited above. Tests were performed experimentally for validation and to obtain spring's and dumper's coefficients. The device was designed based on a mass-spring-damper model, with single degree-of-freedom and the project has the knowledge of areas, such as: machine elements, welding, mechanical vibrations and materials resistance. It is a project that aims, primarily, low cost and efficiently analyze of springs and shock absorbers.

Key-words: Shock Absorber, Dumper, Mechanical Vibrations, Dumping constant, Suspension, Springs, Logarithm decrement;

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Feixe de Molas	16
Figura 2 – Tipos de feixes de molas	16
Figura 3 – Daimler Duplo Cilindro	17
Figura 4 – Suspensão McPhearson	18
Figura 5 – Perspectiva Suspensão Multilink	19
Figura 6 – Suspensão independente duplo A	20
Figura 7 – Suspensão com Molas Helicoidais	22
Figura 8 – Terminação das Molas Helicoidais	22
Figura 9 – Elasticidade das Molas	23
Figura 10 – Amortecedor Telescópico	24
Figura 11 – Tubo Duplo e Tubo Simples	25
Figura 12 – Variações de Zeta	28
Figura 13 – Rolamento detalhado	31
Figura 14 – Solda molecular teórica	31
Figura 15 – Soldagem arco elétrico com eletrodos revestidos	33
Figura 16 – Fluxograma	37
Figura 17 – 1º Esboço	40
Figura 18 – 2º Esboço	41
Figura 19 – Projeto final em CAD	43
Figura 20 – Fixação dos rolamentos	45
Figura 21 – Soldagem dos rolamentos na haste	45
Figura 22 – Haste móvel com os rolamentos fixados	46
Figura 23 – Corrediças dos rolamentos	46
Figura 24 – Abraçadeira ou orelha de fixação do amortecedor na base e haste móvel (ainda em construção)	47
Figura 25 – Dispositivo pré-concluído	47
Figura 26 – Medição da carga exercida pela haste móvel	48
Figura 27 – Dispositivo finalizado	49
Figura 28 – Primeira validação do dispositivo	50
Figura 29 – Medição da carga exercida pela haste móvel	54
Figura 30 – Gráfico Aceleração(m/s^2) x Tempo(s) obtido no ensaio	55
Figura 31 – Gráfico obtido no ensaio de Aceleração(m/s^2) x Tempo(s)	56
Figura 32 – Gráfico Aceleração(m/s^2) x Tempo(s) obtido na filtragem dos resultados obtidos no ensaio	57
Figura 33 – Gráfico Aceleração(m/s^2) x Tempo(s) obtido após a filtragem	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Vantagens e Desvantagens do Duplo A	21
Tabela 2 – Tipos de Soldagem por Fusão	32
Tabela 3 – Classificação dos eletrodos	35
Tabela 4 – Benchmarking Amortecedores SAE	42
Tabela 5 – Resultados obtidos no ensaio do amortecedor	52
Tabela 6 – Tabela completa com os resultados do segundo ensaio.	52
Tabela 7 – Tabela dos resultados obtidos pelo decremento logarítmico	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	<i>Associação Brasileira de Normas Técnicas</i>
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineering</i>
AWS	<i>American Welding Society</i>
CAD	<i>Computer aided-design</i>
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
SLA	<i>Short-Long Arm</i>
SMAW	<i>Shielded Metal Arc Welding</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

a	aceleração
c	coeficiente de amortecimento
c_c	coeficiente de amortecimento crítico
k	constante de rigidez da mola
f_n	frequência natural (Hz)
\vec{F}	força restauradora
F_v	força de atrito viscoso
g	gravidade
$H(\Omega)$	amplitude de resposta a uma frequência adimensional
m	massa
p	número de ciclos
T_d	período
x	deslocamento
\dot{x}	velocidade relativa
\ddot{x}	aceleração relativa
δ	decremento logarítmico
δ_{st}	deslocamento estático
Δs	variação de posição
Δt	variação de tempo
$\Delta \vec{x}$	deformação da mola comprimida ou tracionada
ζ	fator de amortecimento
ω_d	frequência natural amortecida
ω_n	frequência natural
Ω	frequência adimensional

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	MOTIVAÇÃO	13
1.2	OBJETIVO	14
1.2.1	OBJETIVO GERAL	14
1.2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	CONTEXTO HISTÓRICO	15
2.1.1	COMPETIÇÃO FÓRMULA SAE	15
2.1.2	HISTÓRIA DA SUSPENSÃO	15
2.2	SUSPENSÃO	19
2.2.1	MOLA	22
2.2.2	AMORTECEDOR	23
2.2.2.1	AMORTECIMENTO VISCOZO	25
2.3	VIBRAÇÕES	26
2.3.1	GRAUS DE LIBERDADE	26
2.3.2	FREQUÊNCIA NATURAL	26
2.3.3	FATOR DE AMORTECIMENTO	27
2.3.4	DECREMENTO LOGARÍTMICO	29
2.3.5	ACELERÔMETRO	30
2.4	MANCAIS DE ROLAMENTOS	30
2.5	SOLDAGEM	31
2.6	SPLINE CÚBICO INTERPOLANTE	36
3	METODOLOGIA	37
3.1	DEFINIÇÃO DOS REQUISITOS DE FUNCIONAMENTO DO DISPOSITIVO	38
3.1.1	PROCEDIMENTO PARA TESTE DO AMORTECEDOR	38
3.1.2	PROCEDIMENTO PARA TESTE DA MOLA	39
3.1.3	PROCEDIMENTO PARA TESTE DO CONJUNTO MOLA-AMORTECEDOR	39
3.2	MODELAGEM VIRTUAL EM 3D DO DISPOSITIVO	40
3.3	BENCHMARKING DOS AMORTECEDORES	41
3.4	ADEQUAÇÃO DO MODELO EM FERRAMENTA CAD	43

3.5	DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL E MECÂNICO DO DISPOSITIVO	44
3.6	ESCOLHA DOS MATERIAIS E DEFINIÇÃO DOS PROCESSOS DE FABRICAÇÃO	44
3.7	FABRICAÇÃO E MONTAGEM DO DISPOSITIVO	45
3.8	TESTES PARA A VALIDAÇÃO DO DISPOSITIVO	49
4	ANÁLISES E RESULTADOS	50
4.1	VALIDAÇÃO E ENSAIO DA MOLA	50
4.2	ENSAIO DO AMORTECEDOR	51
4.3	ENSAIO DO CONJUNTO MOLA-AMORTECEDOR	53
5	CONCLUSÕES	59
	REFERÊNCIAS	60
	APÊNDICE A – Método de Filtragem	62
	APÊNDICE B – Desenho Técnico	64
	ANEXO A – Termo de autenticidade	68

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

A SAE (Society of Automotive Engineers) promove anualmente competições automobilísticas fazendo que os estudantes de engenharia apliquem na prática os conhecimentos adquiridos em sala de aula, os introduzindo assim, à projetos de alta complexidade. O projeto Fórmula SAE consiste no desenvolvimento, fabricação e otimização de um veículo monoposto, similar a um fórmula 1.

Uma das áreas da equipe é a dinâmica veicular. Ela é essencial para o bom funcionamento e comportamento do veículo na pista. Assim, uma suspensão bem projetada pode gerar inúmeros avanços de desempenho, como o ganho de tração, estabilidade, conforto, etc. O principal componente em um sistema de suspensão é o conjunto mola-amortecedor. Os parâmetros ideais do conjunto variam de carro para carro, e cabe à cada equipe defini-los.

Como se trata de uma equipe estudantil, que na maioria das vezes possui poucos recursos financeiros, e por ser um projeto de custo relativamente alto, deve-se buscar no mercado alternativas que atendam às exigências do veículo e da competição com o menor custo possível. Para o sistema de suspensão, especificamente os amortecedores, costumam-se utilizar amortecedores de bicicletas *downhill*¹, pois possuem amplas variedades de regulagens. Uma alternativa com custo de aquisição mais baixo seria a utilização de amortecedores de motocicletas. Os fabricantes dos mesmos não costumam fornecer valores como a constante de rigidez da mola (k) e o coeficiente de amortecimento (c) dos amortecedores, que são parâmetros essenciais para análise do comportamento dinâmico do veículo.

O presente trabalho procura desenvolver um dispositivo capaz de medir tais coeficientes (k e c), afim de analisar e otimizar o conjunto mola-amortecedor no veículo Fórmula SAE.

¹ Bicicletas *Downhill* são bicicletas apropriadas para descer montanhas. São projetadas para suportar grandes saltos, impactos e serem conduzidas em altas velocidades.

1.2 OBJETIVO

1.2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é projetar e desenvolver um dispositivo que seja capaz de obter os coeficientes de amortecimento de um amortecedor veicular separadamente da mola e posteriormente medir o coeficiente do conjunto mola-amortecedor com o intuito de obter parâmetros para otimizar a utilização do mesmo em um veículo monoposto.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Projetar um dispositivo que, através da compressão, seja capaz de medir a rigidez da mola e a viscosidade do amortecedor;
- Construir o equipamento e validar a metodologia que será empregada na análise experimental;
- Analisar os resultados obtidos no teste para futura aplicação no veículo da equipe ESCUDERIA UFJF.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O Capítulo 2 apresenta todo material base para que os processos a serem realizados neste trabalho sejam compreendidos de forma clara e objetiva.

O Capítulo 3 apresenta como o projeto foi idealizado e posteriormente realizado. Ele apresenta como foi feito e porque foi feito em determinada maneira.

O Capítulo 4 apresenta a validação e os resultados obtidos pelo dispositivo. Com os dados coletados, são calculadas as variações e determinados os valores das constantes de amortecimento., além de entender um pouco da dinâmica do dispositivo.

O Capítulo 5 traz as conclusões sobre os resultados obtidos no capítulo 4 e analisa possibilidades de expansão e soluções de possíveis problemas encontrados neste trabalho tema em futuros trabalhos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONTEXTO HISTÓRICO

2.1.1 COMPETIÇÃO FÓRMULA SAE

A competição de fórmula SAE, segundo o site SAE (2017), foi criada nos Estados Unidos da América (EUA) em 1981 substituindo a mini Indy. Foi incentivada por três montadoras americanas: General Motors, Ford e Chrysler. O objetivo dessas montadoras era estimular e capacitar os estudantes de engenharia ao ramo automobilístico. Os resultados apresentados pelos estudantes deste projeto contratados pelas montadoras foram extremamente satisfatórios o que fortaleceu o apoio à competição e também atraiu novos parceiros. O sucesso foi tanto que empresas começaram a desenvolver produtos específicos para os veículos da competição.

Atualmente a competição ocorre em 6 países diferentes, inclusive no Brasil, onde teve início em 2004. A maneira de integrar os estudantes de cada nacionalidade e comparar o desenvolvimento dos mesmos é através de competições nacionais em que os ganhadores tem o direito de ir representar o país na competição internacional que acontece nos EUA.

2.1.2 HISTÓRIA DA SUSPENSÃO

A história, segundo Kenneth (2000), citado por Okabe (2003), teve o início do desenvolvimento das suspensões que conhecemos hoje, datou-se no século VIII em carruagens que utilizavam correntes de ferro presas a cestos de palha dispostos nos quatro cantos acima do chassi e com rodas através das correntes. Porém este sistema era muito barulhento e oscilava muito, causando náuseas aos passageiros.

No século XV, a utilização das carruagens similares às dos reis da Bavária e Hungria, se popularizou. As correntes de ferro previamente utilizadas, foram substituídas por fitas de couro e também tiveram a sua posição alterada para parte de baixo da carruagem.

Já no século XVII, houve a introdução das molas de metal e das molas de tiras de metal (em inglês chamado de *Leaf Spring*) como mostra a Figura 1 . Estas segundo Dixon (2001-2002), poderiam ter vários formatos, de acordo com a Figura 2, e constituíram o novo tipo de suspensão, algo similar ao que conhecemos hoje como feixe de molas¹. O funcionamento do sistema era eficiente e era causado pelo atrito entre as lâminas metálicas, porém, tornou as carruagens mais robustas. Com o passar do tempo, já no século XVIII, com o avanço da tecnologia da época relacionadas à produção do metal, conseguiu diminuir

¹ O termo *Feixe de Molas* é a tradução da palavra inglesa *Leaf Spring* e está sujeito à diferentes traduções.

o peso das carruagens devido à suspensão. Em 1804, Obadiah Elliot, criou a primeira carruagem realmente leve, rápida e segura. Ela continha oito molas de tiras de metal, sendo duas dispostas em cada roda do componente e a carroceria era fixada ao eixo através do sistema de suspensão.

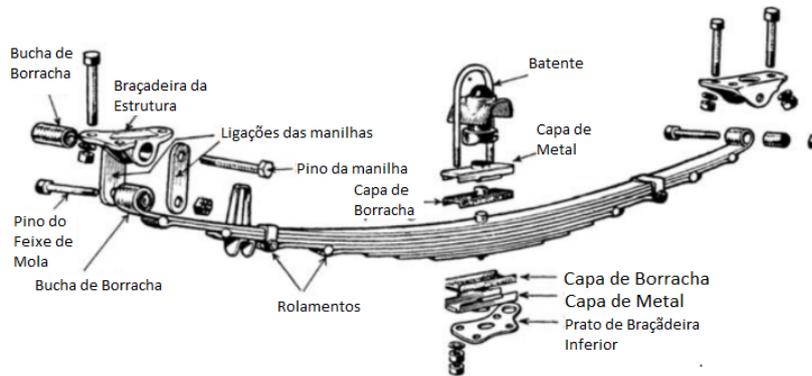


Figura 1 – Feixe de Molas

Fonte: Adaptado de Dixon (2001-2002)

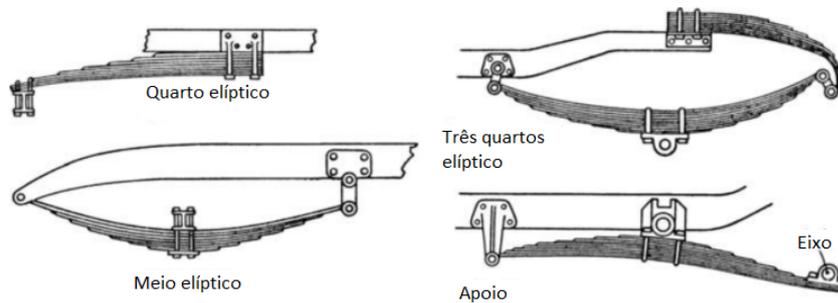


Figura 2 – Tipos de feixes de molas

Fonte: Adaptado de Dixon (2001-2002)

Ainda de acordo com Okabe (2003), em 1897, o Daimler duplo cilindro, como ilustra a Figura 3, foi criado e teve pela primeira vez uma suspensão com molas helicoidais.



Figura 3 – Daimler Duplo Cilindro

Fonte:(Mercedes-Benz, 2017)

Os avanços continuaram até que em 1898, o Decauville, foi o primeiro automóvel a utilizar suspensão dianteira independente em uma competição europeia e a velocidade máxima foi de 65 km/h. Com o passar do tempo, o sistema de suspensão dianteira independente, deixou de ser uma regalia dos carros de corrida e passou a ser utilizado também em carros comuns, com produção em maior escala. A substituição dos feixes de mola, ocorreu, pois, ele apresentava pouca rigidez em altas velocidades, então, se foi gerado um aumento na fricção das tiras de metal. Isso causou uma perda significativa de conforto para os ocupantes. Entre 1902 e 1903, a maioria dos amortecedores adotados nos carros de competição eram hidráulicos e o sistema de suspensão se completava com o uso de "feixes de mola", possibilitando os carros a chegarem à aproximadamente 130 km/h. Dois anos após, Delage, tencionou o sistema e mudou a posição no eixo traseiro do veículo, fazendo com que os mesmos fossem capazes de atingir 170 km/h. Essa evolução foi amplamente aplicada em carros de alto luxo da época e em esportivos, como por exemplo, o Bugatti.

De 1908 a 1914, os carros de corrida, passaram a utilizar um sistema de amortecimento por fricção, que eram discos dispostos nos eixos, próximos às rodas. Este sistema proporcionou um ganho significativo de desempenho e foi amplamente empregado nos automóveis da época, até que em 1936, com o avanço da tecnologia dos amortecedores hidráulicos este foi descartado. Em 1940, como citado em Stone (2002), um projetista da Ford chamado Earle MacPherson, desenvolveu um sistema, Figura 4, que leva o seu

sobrenome, que é empregado até os dias de hoje nos veículos atuais.

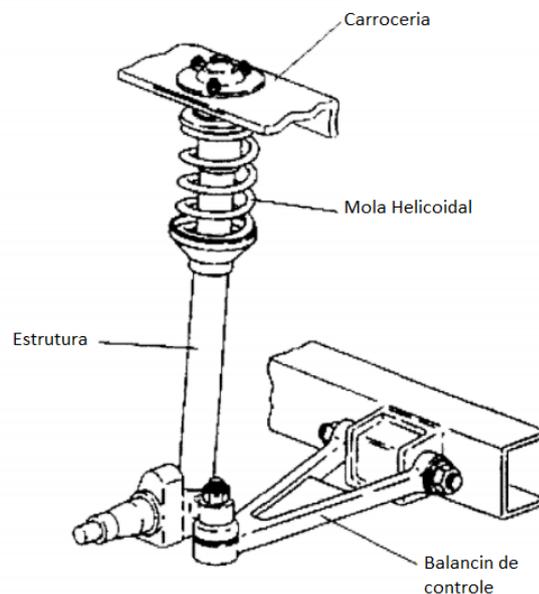


Figura 4 – Suspensão McPhearson

Fonte: Adaptado de Stone (2002)

Paralelo ao tipo de sistema de suspensão, otimizações com os ângulos de caster e cambagem, foram se desenvolvendo. Com isso carros de competição pós década de 20, passaram a adotar a suspensão dianteira de eixo rígido e posteriormente, na década de 30, as barras de torção foram introduzidas nos veículos. Também nessa época, o modelo duplos A's (*Double Wishbone*) foram introduzidos. Este modelo será melhor apresentado no próximo tópico.

Nas décadas de 50 e 60, a Citroën, desenvolveu um amortecedor revolucionário, o hidropneumático. Porém este apresentava uma manutenção extremamente complicada para a época, gerando o desuso do mesmo. Neste tempo, também foi criado a suspensão "multi-link", citada em Dixon (2001-2002), como mostrado na Figura 5 utilizada amplamente em carros de corrida. Diferente do conjunto anterior, este modelo de suspensão fez um grande sucesso entre os carros de competição e é utilizada até hoje nos carros de formula 1. Este tipo de suspensão também pode ser encontrado em alguns carros de ampla fabricação.

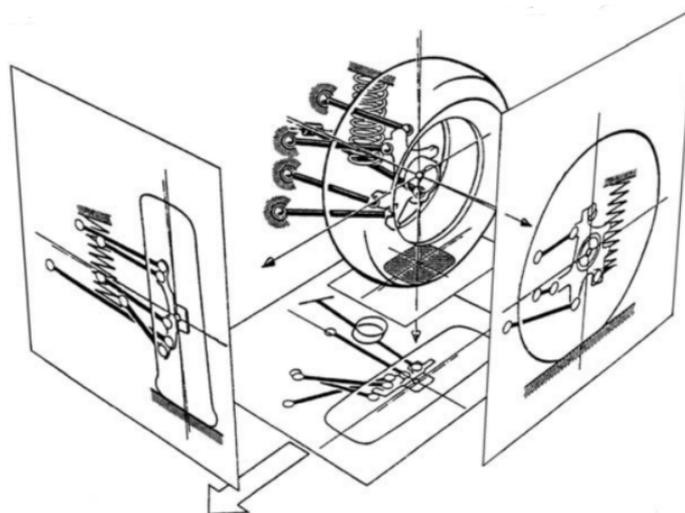


Figura 5 – Perspectiva Suspensão Multilink

Fonte:Dixon (2001-2002)

Nos anos 70, a "Automotive Products" desenvolveu tipo de suspensão ativo com alta sensibilidade, que nivelava rapidamente e continha um sistema anti-rolagem, esse com a mesma função das barras de torção desenvolvida na década de 30. Mais de dez anos após, com o desenvolvimento da eletrônica, a Lotus adotou este princípio e criou o que foi chamado de "Active Ride". Este tipo de suspensão é composto por sensores que acionam amortecedores hidráulicos nas quatro rodas.

Com o passar dos anos, até os dias atuais, as otimizações são geradas continuamente pela indústria automobilística, devido às melhorias das ferramentas para o projeto, qualidade dos componentes que compõem o sistema de suspensão atual e através do conhecimento gerado por tentativas e erros durante todo o desenvolvimento deste sistema. No Brasil, o tipo de suspensão mais utilizado é a independente, MacPherson, com amortecedores hidráulicos.

2.2 SUSPENSÃO

Devido às irregularidades da superfície de rolagem de um veículo, se faz necessário a utilização de um sistema de suspensão, a fim de proporcionar maior conforto e estabilidade. Sendo assim, segundo Costa (2009) um sistema de suspensão deve conter molejamento e amortecimento. Cada projeto contém as suas características e objetivos, assim, esses parâmetros citados anteriormente por Costa (2009), varia de caso a caso.

Sendo assim, um sistema primário de suspensão deve priorizar, segundo Gillespie (1992), o movimento vertical das rodas, para que o chassi seja isolado do solo; manter as rodas sempre em contato com a superfície da rua; reagir às forças produzidas pelos

pneus, sendo elas longitudinais quando há aceleração ou frenagem, lateral quando estiver curvando, além dos torques de direção e frenagem; Resistir à torção do chassi; Manter os pneus em contato com a superfície, com a mínima variação possível de carga.

Outros aspectos como custo, peso, tamanho, fabricação e etc., devem ser analisados para a escolha. Suspensões em geral, podem ser de dois tipos: Independentes ou de eixo rígido. Essas duas se diferenciam, pois, no sistema independente o movimento vertical de uma roda não interfere na roda oposta de um mesmo eixo, o que acontece em um sistema de eixo rígido.

Neste trabalho, o tipo adotado foi uma suspensão independente, modelo duplo A (nos Estados Unidos é chamado de *Double A's*, os britânicos chamam de *wishbone* e alguns autores, como Gillespie, nomeiam este tipo de suspensão como *SLA² suspension*) como mostra a figura 6.

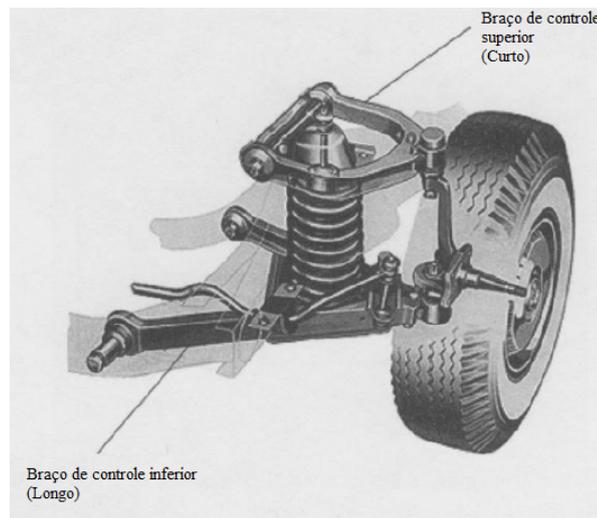


Figura 6 – Suspensão independente duplo A

Fonte: Adaptado de Gillespie (1992)

² SLA é a abreviação de *Short-Long Arm*

Este tipo de suspensão foi escolhido no projeto porque trata-se de um sistema que permite maior contato dos pneus com o solo, permitindo uma maior precisão na direção, além de ser um sistema mais rígido e estável, ou seja, é um sistema que tem uma melhor performance se comparado ao usual McPhearson. Porém, o ponto negativo desse sistema é que se algo falhar, toda a suspensão falha, devido a sua interligação. Sendo assim os custos de manutenção são maiores, comparado ao McPhearson, assim como a sua complexidade. A tabela retirada de Almeida (2012), mostra as vantagens e desvantagens deste tipo de suspensão.

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Controle mais preciso do ângulo de camber ✓ Pequena variação de bitola ao longo do curso ✓ Pouca vibração transmitida à estrutura do veículo ✓ Elementos resistentes ✓ Curso útil alongado ✓ Possibilidade de configuração sobre-esterçante ou subesterçante 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Necessidade de muito espaço para instalação ✗ Custo elevado em comparação com os outros sistemas ✗ Redundância de elementos de ligação ✗ Necessidade de um dimensionamento criterioso para o correto funcionamento.

Tabela 1 – Vantagens e Desvantagens do Duplo A

Fonte: Retirado de Almeida (2012)

2.2.1 MOLA

Como visto anteriormente, existem variados tipos de suspensão existentes. Quando se fala em suspensão, logo nos vem à cabeça, uma mola ou um amortecedor. De fato, estes são os componentes essenciais do sistema. O primeiro é o componente é o principal. Segundo Stone (2002), os quatro principais tipos de molas utilizados nos dias atuais são: Feixe de molas, barras de torção, molas helicoidais e pneumáticas.

O tipo de mola adotado no projeto foi a helicoidal. A figura 7 mostra como o sistema é composto.

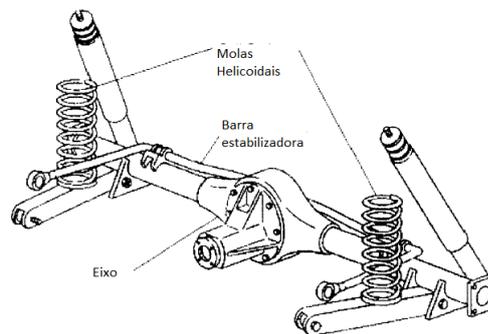


Figura 7 – Suspensão com Molas Helicoidais

Fonte: Adaptado de Stone (2002)

Esta mola, segundo Stone (2002), é amplamente aplicada na indústria automotiva pois é um sistema compacto, porém apresentam pouco ou nenhum amortecimento inerente, fazendo necessária a utilização de amortecedores. As molas helicoidais são utilizadas quando o foco é o conforto e essa contém diferentes tipos de terminações: plana, plana e esmerilhada, esquadrada e, por último, esquadrada e esmerilhada. A figura 8 ilustra estes tipos de terminações. Para o cálculo da rigidez nas molas, é adotada a Lei de Hooke.

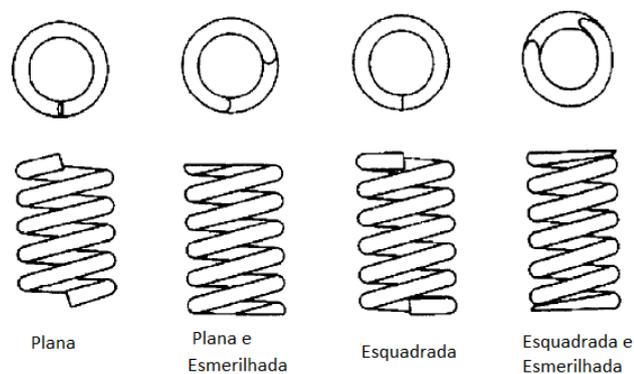


Figura 8 – Terminação das Molas Helicoidais

Fonte: Adaptado de Stone (2002)

A Lei de Hooke, descreve a elasticidade do material quando é submetido a forças de compressão ou tração. A deformação causada por estas forças, pode ser elástica, ou seja, o material retorna a sua forma inicial ou permanente, que ocorre quando o material atinge a sua zona plástica, não retornando ao seu formato original. a Figura 9 mostra uma mola e o comportamento da força restauradora (\vec{F}) quando imposta uma força de tração ou compressão sobre a mesma, causando um deslocamento ($\Delta\vec{x}$). Lembrando que $\Delta\vec{x} = \vec{x} - \vec{x}_0$.

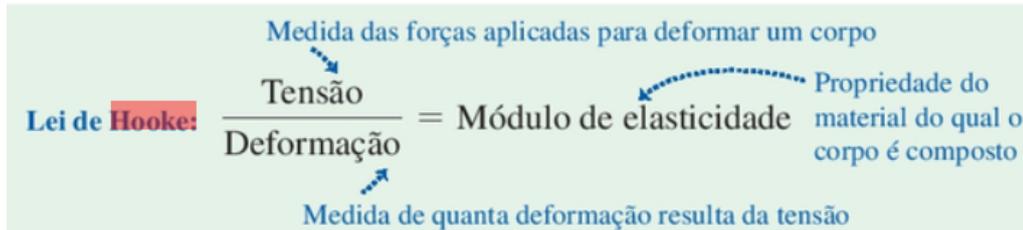


Figura 9 – Elasticidade das Molas

Fonte: Young (2016)

Como é explicitado em Young (2016), o regime elástico tem uma dependência linear entre \vec{F} e a deformação $\Delta\vec{x}$, isto é,

$$\vec{F} = -k\Delta\vec{x} \quad (2.1)$$

onde k é a constante de rigidez da mola, que é uma grandeza característica da mesma e o sinal negativo indica a oposição do sentido entre $\Delta\vec{x}$ e \vec{F} . A equação 2.1 é conhecida como A Lei de Hooke. Quanto maior for o valor de k , mais força será requerida para deformar a mola.

2.2.2 AMORTECEDOR

Os amortecedores são componentes responsáveis por dissipar a energia mecânica do sistema. Eles podem ser divididos em Hidráulicos ou de atrito seco. Neste estudo, o foco esta nos amortecedores hidráulicos. Segundo Freitas (2006), pode-se citar dois tipos de amortecedores hidráulicos: O amortecedor com alavanca e o amortecedor telescópico, como e mostrado na figura 10.

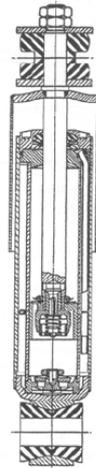


Figura 10 – Amortecedor Telescópico

Fonte: Freitas (2006)

Segundo Milliken (1995), o amortecedor tem como objetivo controlar a ressonância³, suportar a massa suspensa, além de controlar a transmissividade de vibrações para os passageiros assim como melhorar a direção ao reduzir as adversidades entre o contato do veículo com o piso. O amortecedor Telescópico, é amplamente utilizado em veículos automotores. Existem basicamente dois tipos: Os de tubo simples (*Simple Tube*) e os de tubo duplo (*Twin Tubes*). A Figura 11 mostra a diferença entre estes dois tipos.

³ Ressonância ocorre quando há grandes valores de excitação em que a frequência se aproxima da frequência natural do sistema.

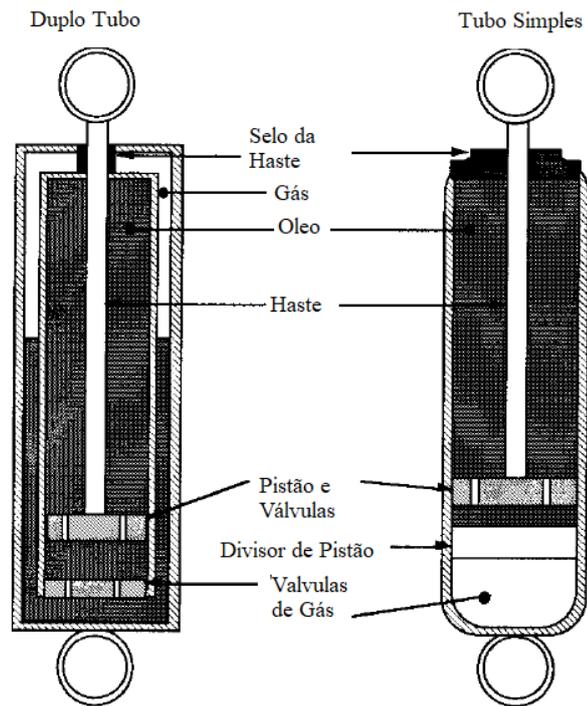


Figura 11 – Tubo Duplo e Tubo Simples

Fonte: Adaptado de Gillespie (1992)

O funcionamento de ambos é bem similar. Durante a compressão e a expansão, o pistão se move transferindo fluido através de um canal interno ao mesmo. Este canal funciona como uma válvula, que regula a passagem de fluido. Esta restrição causa a força de amortecimento do amortecedor. Quanto mais estreito for este canal, maior será o amortecimento do sistema. Os amortecedores mais comuns são os progressivos, em que quanto maior a quantidade de fluido é movimentada pelo pistão, maior é a dificuldade de este escoar internamente, aumentando o amortecimento.

2.2.2.1 AMORTECIMENTO VISCOSO

O amortecimento viscoso, segundo Molina (2004), é aquele que acontece entre um sólido e um fluido viscoso presente entre as partes de um componente as quais apresentam movimento. Como citado por Barbosa (2000), a equação 2.2 que descreve este amortecimento é em geral complicada, porém o modelo linearizado explicitado pela equação, descreve de forma satisfatória, para a maioria dos problemas de engenharia.

$$F_v = c\dot{x} \quad (2.2)$$

A força de atrito viscoso é diretamente proporcional ao coeficiente de amortecimento viscoso (c) e a velocidade relativa entre o sólido e o fluido (\dot{x}), que pode ser encontrada

facilmente através da equação 2.3 que relaciona a variação de posição (Δs) sobre a variação do tempo (Δt).

$$V_r = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (2.3)$$

Este é o parâmetro característico do amortecedor. Cada Amortecedor tem o seu próprio c , assim como cada mola tem o seu k . Quanto maior for o valor de c , maior será a força necessária para o amortecedor comprimir, ou seja, um amortecedor com alto amortecimento viscoso é característico de carros de corrida em que o conforto não é a prioridade e sim o maior contato com a superfície.

2.3 VIBRAÇÕES

Nesta seção será realizada uma breve revisão sobre assuntos relacionados a vibrações mecânicas.

2.3.1 GRAUS DE LIBERDADE

Os graus de liberdade são descritos por Norton (2011), como o número de parâmetros independentes (medidas) para definir uma única posição no espaço em qualquer instante de tempo. Ou seja, é a quantidade de possíveis movimentos de um sistema, seja estes de rotação ou translação.

2.3.2 FREQUÊNCIA NATURAL

Segundo Balachandran & Magrab (2009), para um grau de liberdade, a frequência natural é dada por:

$$\omega_n = 2\pi f_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.4)$$

Na equação 2.4, k é a rigidez da mola, que pode ser obtida através da equação 2.1, f_n também é a frequência natural, porém com a unidade em Hz, diferente de ω_n que é dado em rad/s.

Quando se tem um sistema com oscilações verticais, a equação 2.4, podemos manipular equações a partir da equação geral de vibrações a seguir.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f(t) \quad (2.5)$$

A partir da equação 2.5, consideramos que exista um pré-deslocamento da mola, ou seja, um ponto em que o sistema apresenta equilíbrio estático. Para um melhor

entendimento, imagine uma mola com a sua base presa a uma mesa e com a outra extremidade livre. Ao colocarmos uma caixa apoiada sobre a mola, a mesma comprime até atingir uma deflexão estática máxima. Esta deflexão será considerada nos cálculos subsequentes. Também consideramos a segunda lei de Newton que está apresentada a seguir.

$$F = ma \quad (2.6)$$

Assim, combinando as equações 2.5 e 2.6, e considerando a aceleração como a gravidade (g), tem-se:

$$\ddot{x} + c\dot{x} + k(x + \delta_{st}) = mg \quad (2.7)$$

Em que δ_{st} é a deflexão estática da mola citada previamente. Pela condição de equilíbrio estático, temos que $mg = k\delta_{st}$. Logo, substituindo na expressão 2.4, obtemos a equação de frequência natural para um sistema com oscilações verticais.

$$\omega_n = 2\pi f_n = \sqrt{\frac{g}{\delta_{st}}} \quad (2.8)$$

2.3.3 FATOR DE AMORTECIMENTO

Um sistema vibracional pode ser classificado em três tipos: superamortecido, subamortecido e criticamente amortecido. O amortecimento crítico (c_c) é definido pela constante de amortecimento, a massa do sistema e a frequência natural, como mostra o desenvolvimento expressado em 2.9.

$$\left(\frac{c_c}{2m}\right)^2 - \frac{k}{m} = 0 \quad (2.9)$$

$$c_c = 2\sqrt{km} = 2m\omega_n \quad (2.10)$$

sendo que o sub amortecimento tem valor de $c < c_c$, o sistema criticamente amortecido tem valor de $c_c = c$ e o superamortecimento tem valor de $c > c_c$.

Se foi definido então, um fator que correlacionasse a constante de amortecimento e o amortecimento crítico 2.11, chamado de fator de amortecimento (ζ).

$$\zeta = \frac{c}{c_c} \quad (2.11)$$

O valor que obtêm melhor resposta em um sistema vibracional, ou seja, o qual amortece de maneira mais rápida, está próximo do amortecimento crítico. A equação 2.10 combinada com a equação 2.11 gera a equação 2.12.

$$\zeta = \frac{c}{2m\omega_n} \quad (2.12)$$

Segundo Dixon (1999), o valor desejado do fator de amortecimento em veículos varia de $\zeta = 0.2$ a $\zeta = 0.8$. Ou seja, um sub amortecimento baixo, proporciona maior conforto aos passageiros do veiculo, já fatores próximos ao amortecimento crítico, propicia melhor controle da direção porém com pouco conforto. Em veículos de passageiros, o ζ gira em torno de $0.2 - 0.4$, já para carros de corrida, a idealização é estar próximo de $\zeta = 1$, porém estes valores geralmente ficam em torno de $0.4 - 0.8$. A figura 12 ilustra as diferentes comportamentos de uma frequência de resposta ($H(\Omega)$) com relação há uma frequência adimensional quando há variação dos valores de ζ .

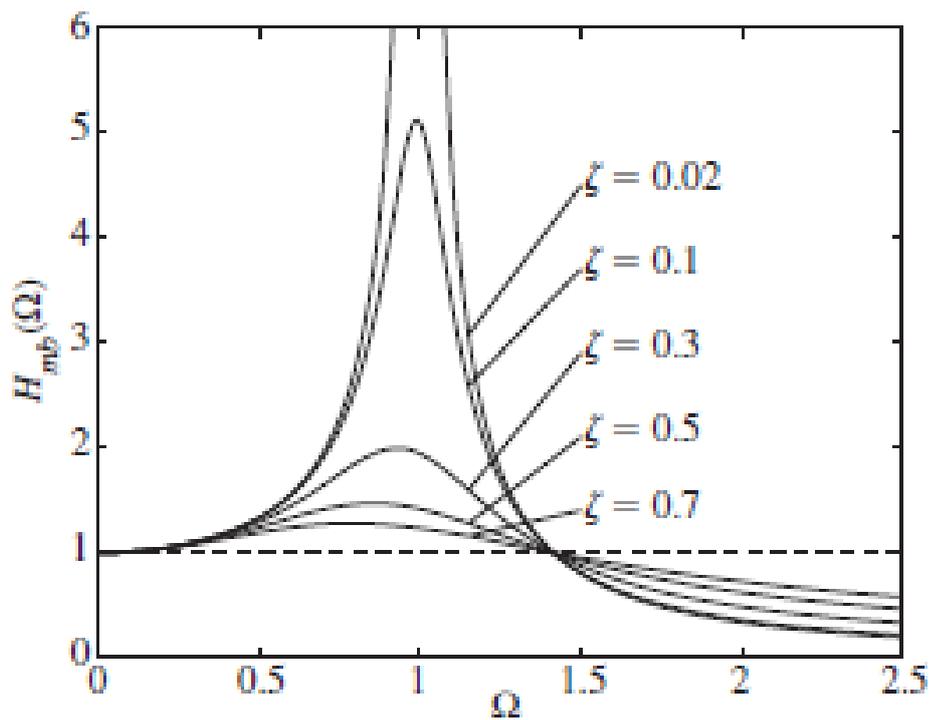


Figura 12 – Variações de Zeta

Fonte: Balachandran & Magrab (2009)

É possível, a partir das faixas de operação citadas anteriormente, afirmar que os amortecedores automotivos são sistemas sub-amortecidos. A partir da equação 2.5, é possível modelar este sistema e obter a resposta para o mesmo. Através de manipulações matemáticas como é demonstrado em Balachandran & Magrab (2009), obtemos a resposta representada pela equação 2.13:

$$x(t) = X_0 e^{-\zeta \omega_n t} \cos(\omega_d t) + \frac{V_0 + \zeta \omega_n X_0}{\omega_d} e^{-\zeta \omega_n t} \text{sen}(\omega_d t) \quad (2.13)$$

Onde, segundo Balachandran & Magrab (2009) a frequência natural amortecida é representada pela equação 2.14

$$\omega_d = \omega \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (2.14)$$

2.3.4 DECREMENTO LOGARÍTMICO

O decremento logarítmico é definido, segundo Balachandran & Magrab (2009), como o logaritmo natural entre duas amplitudes (A) qualquer. Por definição, tem-se a expressão 2.15, em que T_d é o período e p o número de ciclos.

$$\delta = \frac{1}{p} \ln\left(\frac{A(t)}{A(t + pT_d)}\right) \quad (2.15)$$

Considerando $p = 1$ que $A(t)$ é a primeira aceleração considerada (\ddot{x} e $A(t + pT_d)$) é a aceleração seguinte (\ddot{x}_{t+pT_d}). Assim tem-se a equação 2.16

$$\delta = \ln\left(\frac{\ddot{x}(t)}{\ddot{x}_{(t+T_d)}}\right) \quad (2.16)$$

Segundo Balachandran & Magrab (2009), a resposta de um sistema de deslocamento inicial para a aceleração (equação 2.17) é:

$$\ddot{x} = \frac{X_0 \omega_n^2 e^{-\zeta \omega_n t} \text{sen}(\omega_d t - \phi)}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \quad (2.17)$$

Substituindo na definição citada anteriormente, tem-se a equação ??

$$\delta = \ln\left(\frac{\ddot{x}}{\ddot{x}_{(t+T_d)}}\right) = \frac{\ddot{x} = X_0 \omega_n^2 e^{-\zeta \omega_n t} \text{sen}(\omega_d t - \phi) / \sqrt{1 - \zeta^2}}{\ddot{x} = X_0 \omega_n^2 e^{-\zeta \omega_n (t+T_d)} \text{sen}(\omega_d (t + T_d) - \phi) / \sqrt{1 - \zeta^2}} \quad (2.18)$$

Considerando que o período é dado como mostra a expressão 2.19, tem-se a equação simplificada 2.20 pois é de conhecimento matemático que o seno de um número qualquer tem o mesmo valor do seno do mesmo número mais 2π .

$$T_d = \frac{2\pi}{\omega_d} = \frac{2\pi}{\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}} \quad (2.19)$$

$$\delta = \ln\left(\frac{\ddot{x}}{\ddot{x}_{(t+T_d)}}\right) = \ln\left(\frac{e^{-\zeta\omega_n t}}{e^{-\zeta\omega_n(t+T_d)}}\right) \quad (2.20)$$

Pela propriedade de ln, tem-se a equação 2.21:

$$\delta = \ln\left(\frac{\ddot{x}}{\ddot{x}_{(t+T_d)}}\right) = \zeta\omega_n T_d \quad (2.21)$$

Pela relação mostrada na equação 2.19 e pela equação 2.14, é concluída a relação entre o decremento logarítmico e o fator de amortecimento (ζ) representado pela equação 2.22

$$\zeta = \frac{\delta}{\sqrt{4\pi^2 + \delta^2}} \quad (2.22)$$

2.3.5 ACELERÔMETRO

Segundo Omega (2018) , o acelerômetro, é um equipamento desenvolvido para medir a vibração e a movimentação de um determinado dispositivo e/ou estrutura. A força causada por uma vibração ou aceleração pressiona um material piezoelétrico dentro do acelerômetro, gerando eletricidade que é enviada para os medidores. Quanto maior o aperto ou aceleração causada pelo dispositivo e/ou estrutura, maior será a energia enviada para os medidores.

2.4 MANCAIS DE ROLAMENTOS

Os rolamentos ⁴ tem seu primeiro relato de uso segundo Juvinal & Marshek (2012) em 200 a.C e desde então aprimoramentos foram criados até chegarmos no que conhecemos hoje como os rolamentos.

Os rolamentos podem ser de esferas ou de roletes. Os esféricos suportam maiores velocidades e os de roletes, maiores cargas. Eles podem ser classificados como radiais, para suportar cargas radiais; de encosto, para suportar cargas axiais; de contato angular, que suportam cargas tanto axiais quanto radiais.

A seleção de um rolamento envolve a definição do tipo de mancal, o nível de precisão requerido, o tipo de lubrificação, o isolamento (isto é, aberto, blindado ou selado) e da carga básica que o rolamento irá sofrer.

⁴ Neste trabalho, por simplicidade, o termo Rolamentos tem o mesmo significado que Mancais de Rolamentos

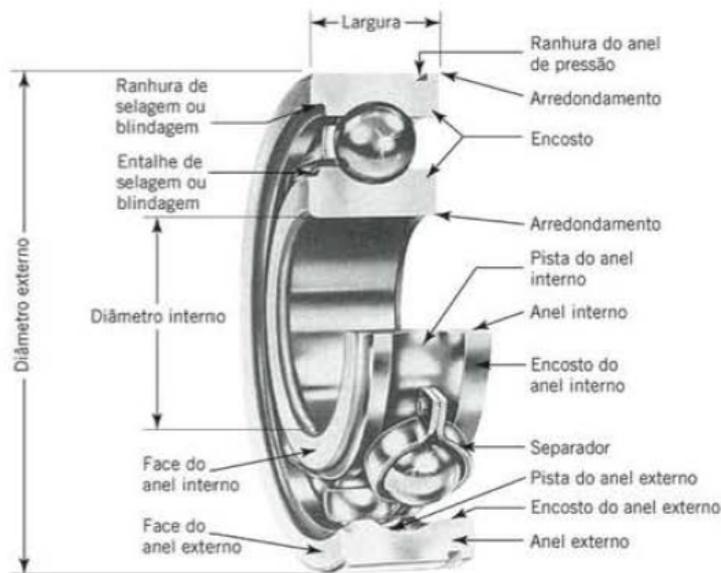


Figura 13 – Rolamento detalhado

Fonte: Juvinal e Marshek (2012)

2.5 SOLDAGEM

A soldagem como citado por Marques & Modenesi (2009) é um processo de união entre peças, vide Figura 14, porém, também pode ser usada para a deposição de material sobre uma superfície desgastada e também para formar um revestimento com características especiais.

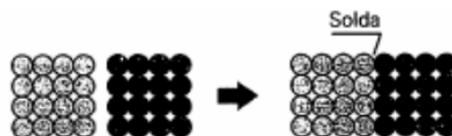


Figura 14 – Solda molecular teórica

Fonte: Soldagem; Fundamentos e Tecnologia (2009)

Embora a soldagem, em sua forma atual, seja um processo relativamente recente, a brasagem e a soldagem por forjamento é utilizada a séculos, como por exemplo na produção de armas e instrumentos cortantes. A soldagem pode ser definida como *"processo de união de metais por fusão"* ou então *"Operação que visa obter a união de duas ou mais peças, assegurando, na junta soldada, a continuidade de propriedades físicas, químicas e metalúrgicas"*. A sociedade americana de soldagem(AWS⁵) define soldagem como *"Operação que visa obter a coalescência localizada produzida pelo aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a aplicação de pressão e de metal de adição."*

⁵ American Welding Society

Os processos de soldagem estão contidos em dois grandes grupos: por pressão (ou deformação) e por fusão. Neste trabalho, o enfoque será dado no segundo grupo.

A soldagem por fusão contém diversos processos. Entre eles os mais conhecidos são: Eletrodo Revestido, MIG/MAG, TIG. A tabela 2 mostra os principais tipos de soldagem por fusão, suas aplicações e características.

PROCESSO	FONTES DE CALOR	TIPO DE CORRENTE E POLARIDADE	AGENTE PROTETOR OU DE CORTE	OUTRAS CARACTERÍSTICAS	APLICAÇÕES
Soldagem por eletro-escória	Aquecimento por resistência da escória líquida	Contínua ou alternada	Escória	Automática/Mecanizada. Junta na vertical. Arame alimentado mecanicamente na poça de fusão. Não existe arco	Soldagem de aços carbono, baixa e alta liga, espessura ≥ 50 mm. Soldagem de peças de grande espessura, eixos, etc.
Soldagem ao Arco Submerso	Arco elétrico	Contínua ou alternada. Eletrodo +	Escória e gases gerados	Automática/mecaniz. ou semi-automática. O arco arde sob uma camada de fluxo granular	Soldagem de aços carbono, baixa e alta liga. Espessura ≥ 10 mm. Posição plana ou horizontal de peças estruturais, tanques, vasos de pressão, etc.
Soldagem com Eletrodos Revestidos	Arco elétrico	Contínua ou alternada. Eletrodo + ou -	Escória e gases gerados	Manual. Vareta metálica recoberta por camada de fluxo	Soldagem de quase todos os metais, exceto cobre puro, metais preciosos, reativos e de baixo ponto de fusão. Usado na soldagem em geral.
Soldagem com Arame Tubular	Arco elétrico	Contínua. Eletrodo +	Escória e gases gerados ou fornecidos por fonte externa. Em geral o CO_2	O fluxo está contido dentro de um arame tubular de pequeno diâmetro. Automático ou semi-automático	Soldagem de aços carbono com espessura ≥ 1 mm. Soldagem de chapas
Soldagem MIG/MAG	Arco elétrico	Contínua. Eletrodo +	Argônio ou Hélio, Argônio + O_2 , Argônio + CO_2 , CO_2	Automática/mecaniz. ou semi-automática. O arame é sólido	Soldagem de aços carbono, baixa e alta liga, não ferrosos, com espessura ≥ 1 mm. Soldagem de tubos, chapas, etc. Qualquer posição
Soldagem a Plasma	Arco elétrico	Contínua. Eletrodo -	Argônio, Hélio ou Argônio + Hidrogênio	Manual ou automática. O arame é adicionado separadamente. Eletrodo não consumível de tungstênio. O arco é constrito por um bocal	Todos os metais importantes em engenharia, exceto Zn, Be e suas ligas, com espessura de até 1,5 mm. Passes de raiz
Soldagem TIG	Arco elétrico	Contínua ou alternada. Eletrodo -	Argônio, Hélio ou misturas destes	Manual ou automática. Eletrodo não consumível de tungstênio. O arame é adicionado separadamente.	Soldagem de todos os metais, exceto Zn, Be e suas ligas, espessura entre 1 e 6 mm. Soldagem de não ferrosos e aços inox. Passe de raiz de soldas em tubulações
Soldagem por Feixe Eletrônico	Feixe eletrônico	Contínua. Alta Tensão. Peça +	Vácuo ($\approx 10^{-4}$ mm Hg)	Soldagem automática. Não há transferência de metal. Feixe de elétrons focalizado em um pequeno ponto.	Soldagem de todos os metais, exceto nos casos de evolução de gases ou vaporização excessiva, a partir de 25 mm de espessura. Indústria nuclear e aeroespacial.
Soldagem a Laser	Feixe de luz		Argônio ou Hélio	Como acima	Como acima. Corte de materiais não metálicos
Soldagem a Gás	Chama oxiacetilênica		Gás (CO , H_2 , CO_2 , H_2O)	Manual. Arame adicionado separadamente	Soldagem manual de aço carbono, Cu, Al, Zn, Pb e bronze. Soldagem de chapas finas e tubos de pequeno diâmetro

Tabela 2 – Tipos de Soldagem por Fusão

Fonte: Marques; Modenesi; Bracarense (2009)

Devido à sua aplicação geral, baixo custo e versatilidade, o processo SMAW ⁶, conhecido como eletrodo revestido, possui ampla utilização no mercado.

Como descrito em ESAB (2000), este processo consiste na abertura e manutenção de um arco elétrico entre o eletrodo revestido e a peça a ser soldada, de modo a fundir simultaneamente o eletrodo e a peça. O metal fundido do eletrodo é transferido para a peça, formando uma poça fundida que é protegida da atmosfera (O_2 e N_2) pelos gases de combustão do revestimento do eletrodo. O metal depositado e as gotas ejetadas do metal fundido recebem uma proteção adicional por meio do banho de escória, a qual é formada pela queima de alguns componentes do revestimento. A Figura 15, representa esse processo.

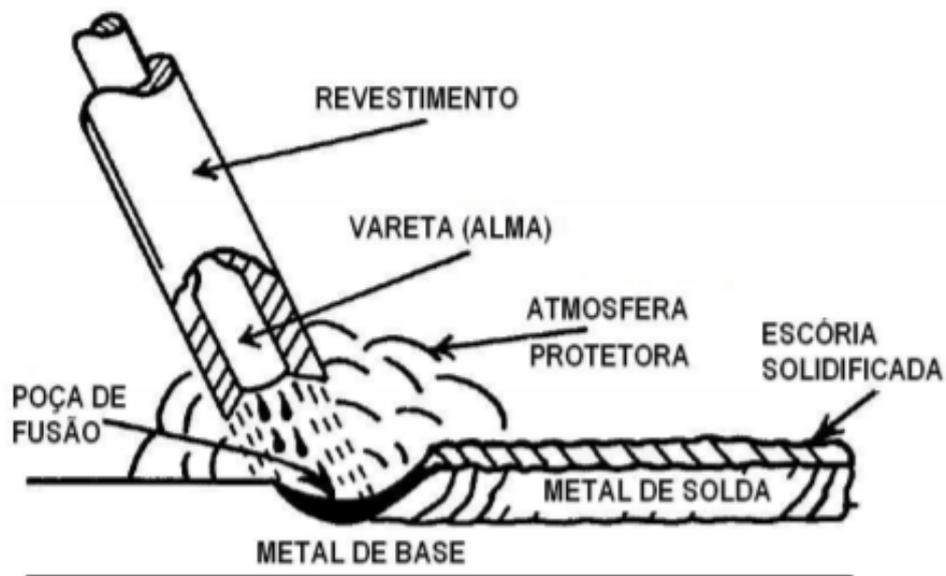


Figura 15 – Soldagem arco elétrico com eletrodos revestidos

Fonte: ESAB (2000)

⁶ SMAW - Shielded Metal Arc Welding

Os eletrodos podem ser classificados segundo a espessura e a composição química do revestimento e o diâmetro corresponde sempre ao diâmetro da alma. Os diâmetros existentes no mercado estão na faixa de 1 a 7 mm, embora existam eletrodos especiais com dimensões diferentes destas.

A classificação dos eletrodos, encontrada em Infosolda (2000) é dada da seguinte forma:

- Peculiar ou fino: Menos comum; tem a espessura menor do que 10% do diâmetro da alma e requer a menor intensidade de corrente para ser fundido. Este eletrodo não apresenta formação de cratera.
- Semi-espesso: Tem uma faixa de espessura que se encontra entre 10 a 20% do diâmetro da alma e requer um valor de corrente ligeiramente superior ao tipo fino para ser fundido. A cratera formada por este eletrodo é a menor de todos os tipos.
- Espesso: Tem uma faixa de espessura que se encontra entre 20 a 40% do diâmetro da alma e requer um valor alto de corrente para ser fundido. A cratera formada pode ser considerada como média.
- Muito espesso: Tem uma faixa de espessura maior que 40% do diâmetro da alma e requer as maiores intensidades de corrente para ser fundido. Apresenta uma cratera profunda.

As funções dos revestimentos de solda são: Proteger o metal de solda, estabilizar o arco, adicionar de elementos de liga ao metal de solda, direcionar o arco elétrico, fazer com que a escória aja como agente fluxuante, caracterizar as posições de solda, controlar a integridade do metal de solda e isolar a alma de aço.

Sendo assim, cada tipo de material requer um tipo de eletrodo devido a sua diferente aplicação. A classificação dos eletrodos revestidos é dada pela ASME⁷ II part C, que segue as definições da AWS. A Tabela 3 mostra como funciona a análise sobre força do arco, tipo de corrente, penetração e etc.

⁷ American Society of Mechanical Engineering

Classe	Corrente	Arco	Penetração	Revestimento-escória	Pó de ferro
EXX10	CC+	agressivo	profunda	celulósico-sódio	0-10%
EXX11	CA/CC+	agressivo	profunda	celulósico-potássio	0
EXX12	CA/CC-	médio	média	rutilico - sódio	0-10%
EXX13	CA/CC-/CC+	suave	leve	rutilico - potássio	0-10%
EXX14	CA/CC-/CC+	suave	leve	rutilico - pó de ferro	25-40%
EXX15	CC+	médio	média	baixo hidrogênio - sódio	0
EXX16	CA/CC+	médio	média	baixo hidrogênio - potássio	0
EXX18	CA/CC+	médio	média	baixo hidrogênio - pó de ferro	25-40%
EXX20	CA/CC-	médio	média	óxido de ferro - sódio	0
EXX22	CA/CC-/CC+	médio	média	óxido de ferro - sódio	0
EXX24	CA/CC-/CC+	suave	leve	rutilico - pó de ferro	50%
EXX27	CA/CC-/CC+	médio	média	óxido de ferro - pó de ferro	50%
EXX28	CA/CC+	médio	média	baixo hidrogênio - pó de ferro	50%
EXX48	CA/CC+	médio	média	baixo hidrogênio - pó de ferro	25-40%
O percentual de pó de ferro é baseado na massa do revestimento					

Tabela 3 – Classificação dos eletrodos

Fonte: ESAB (2000)

2.6 SPLINE CÚBICO INTERPOLANTE

A Spline cúbica, como citado em Lymberopoulos (2013) é uma aproximação por polinômios de uma função de grau 3. Esse método permite que se possa garantir a continuidade da equação até a derivada de segunda ordem. O MATLAB apresenta a rotina pronta chamada Spline. Esse método faz com que a que a curva não tenha picos e nem troque abruptamente de curvatura nos nós.

3 METODOLOGIA

A figura 16 ilustra as etapas do desenvolvimento da metodologia aplicada a este trabalho.

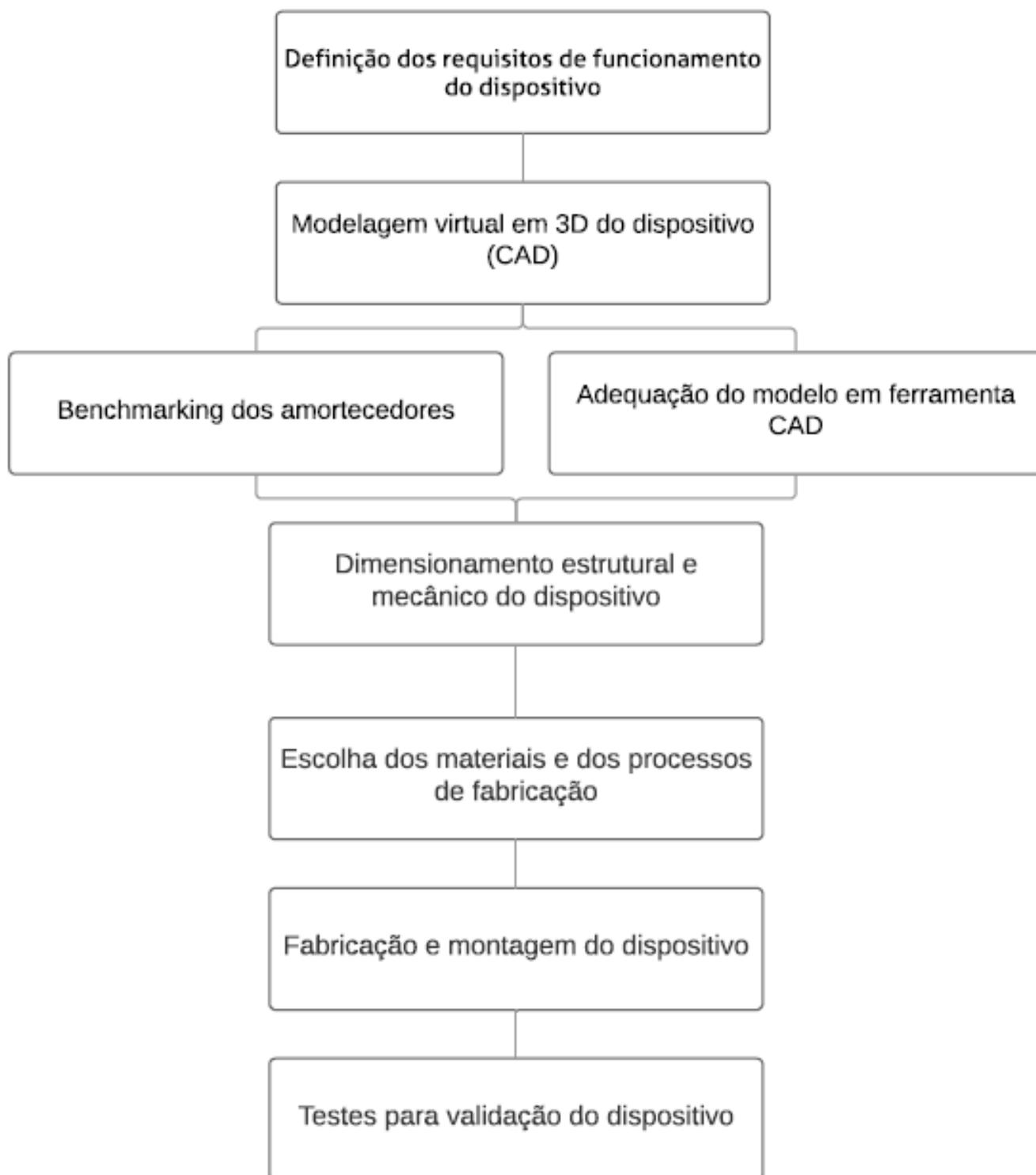


Figura 16 – Fluxograma

3.1 DEFINIÇÃO DOS REQUISITOS DE FUNCIONAMENTO DO DISPOSITIVO

O dispositivo tem como requisito de funcionamento medir de maneira simples, eficaz e de baixo custo os coeficientes de amortecimento do amortecedor e de rigidez da mola, para que estes possam ser aplicados no desenvolvimento do veículo da equipe ESCUDERIA UFJF. Para isso, o modelo foi pensado baseado em uma prensa hidráulica. O objetivo foi criar um esforço vertical sobre a mola ou amortecedor para que este sofra um deslocamento. Sendo assim, o dispositivo tinha que conter dois pontos de fixação, para que o amortecedor fosse preso ao mesmo, e uma base plana quando uma mola estiver sobre análise.

Assim, foi realizado um primeiro esboço, pensando em apenas fazer um adaptador para que o dispositivo fosse calculado utilizando uma prensa hidráulica. Porém, este esboço foi inviabilizado devido à segurança do usuário e a prensa não ser um instrumento de fácil acesso à equipe, pois o laboratório que a equipe utiliza, não contém este equipamento. Sendo assim, foi desenvolvido um segundo esboço o qual supre os problemas encontrados no primeiro esboço. Este, por sua vez, tem o mesmo princípio, porém não há necessidade de uma prensa. Os esboços serão ilustrados na sessão posterior a essa. Com isso, o modelo proposto, preenche os requisitos de maneira segura, eficaz e de baixo custo, o que é primordial para a equipe, tendo em vista que este será o primeiro carro construído.

Os requisitos e passos de funcionamento do dispositivo devem seguir os passos subsequentes.

3.1.1 PROCEDIMENTO PARA TESTE DO AMORTECEDOR

- Primeiramente, conferir se o dispositivo encontrasse apoiado em uma superfície plana e segura;
- Marcar na haste do amortecedor um deslocamento conhecido a fim de facilitar a medição do tempo;
- Posicionar o amortecedor no dispositivo, de maneira a qual garanta o perfeito alinhamento entre os terminais superior e inferior do mesmo;
- Zerar a partir da régua posicionada na haste direita.
- Marcar com uma caneta na haste do amortecedor um deslocamento conhecido a fim de facilitar a medição do tempo;
- Adicionar anilhas (pesos) de musculação no devido local do aparelho;
- Marcar o tempo de acordo com o deslocamento quando estiver sendo realizada a medição do coeficiente do amortecedor.

Repetir o ensaio no mínimo 5 vezes e encontrar uma média para os valores de c .

Com estes dados coletados e com a equação 2.3, encontramos a velocidade relativa e com ela e sabendo o peso aplicado no dispositivo pelas anilhas, utilizamos a equação 2.2 e então se foi possível encontrar o valor do coeficiente de amortecimento.

3.1.2 PROCEDIMENTO PARA TESTE DA MOLA

- Primeiramente, conferir se o dispositivo encontrasse apoiado em uma superfície plana e segura;
- Posicionar os copos de mola nas extremidades da mola;
- Posicionar a mola no dispositivo;
- Adicionar Anilhas(pesos) de musculação no devido local do aparelho;
- Observar o deslocamento da mola.

Repetir o ensaio três vezes e encontrar uma média para os valores de k .

Com a equação 2.1, consegue-se obter o valor referente à rigidez da mola.

3.1.3 PROCEDIMENTO PARA TESTE DO CONJUNTO MOLA-AMORTECEDOR

- Primeiramente, conferir se o dispositivo encontrasse apoiado em uma superfície plana e segura;
- Prender o acelerômetro no amortecedor.
- Posicionar o amortecedor no dispositivo, de maneira a qual garanta o perfeito alinhamento entre os terminais superior e inferior do mesmo;
- Adicionar peso a haste do dispositivo de forma que comprima o amortecedor.
- Com o amortecedor comprimido, prenda-o com um *tie-up*¹ de plástico.
- Retire o peso adicionado e observe se o *tie-up* manteve o amortecedor comprimido.
- Com o auxílio de uma tesoura, rompa *tie-up* e colete os dados obtidos pelo acelerômetro do instante do rompimento até a estabilidade do amortecedor.

Com os dados captados pelo acelerômetro, utilize o método de filtragem Spline Cúbico e através do gráfico faça o Decremento Logarítmico.

¹ *Tie-up* - Presilha plástica

3.2 MODELAGEM VIRTUAL EM 3D DO DISPOSITIVO

Para um melhor entendimento e análise do dispositivo, foi feita a modelagem através do software SolidWorks. Como dito previamente, o primeiro esboço, Figura 17, era um dispositivo que em conjunto com a prensa hidráulica, realizaria o esforço necessário para o cálculo dos amortecedores e molas.

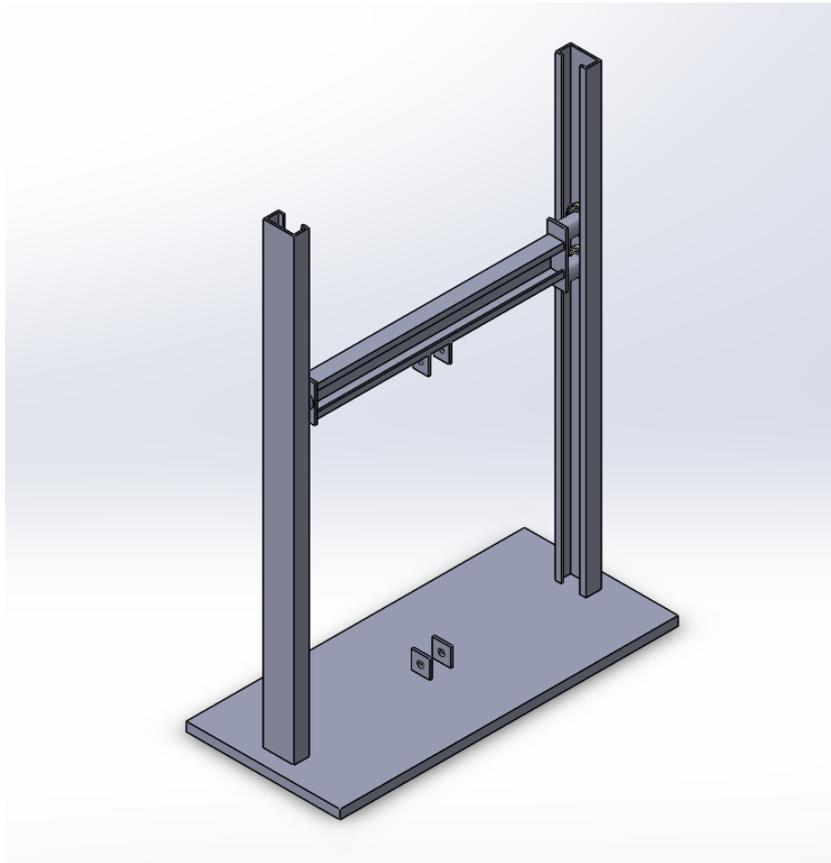


Figura 17 – 1º Esboço

O segundo esboço, como mostra a Figura 18, tem o mesmo princípio, porém teve a sua base alargada e com diferente forma geométrica, deixando de ser um retângulo e passando a ser um "H".

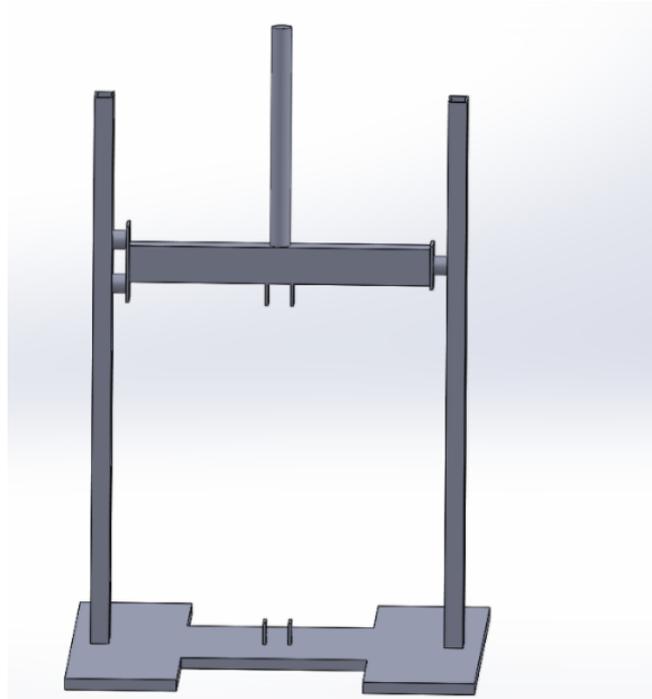


Figura 18 – 2º Esboço

Outra perceptível mudança foi a adição de uma haste no topo da barra móvel. A função da mesma é de servir como apoio e centralização da força, pois a mesma se dará por anilhas de musculação.

3.3 BENCHMARKING DOS AMORTECEDORES

No mercado atualmente existem inúmeros modelos de amortecedores e cada um com as suas devidas características. Para a competição fórmula SAE, a própria SAE, através do *Cost Report* oferece opções de amortecedores para os veículos da competição. A tabela 4 mostra as opções com diferentes fornecedores e preços.

Modelo dos Amortecedores	Fabricante	Prego/Unidade	OBSERVAÇÕES
Damper, AFCO, 1650, Twin tube	AFCO	\$95,00	
Damper, AFCO, 513SP, Mono tube	AFCO	\$85,00	
Damper, AVO, 1.9" Alum Dbl Adj (DAAWA100/75)	AVO	\$145,00	
Damper, Bilstein MDS Formula Student	Bilstein	\$800,00	
Damper, Cane Creek Double Barrel	Cane Creek	\$300,00	
Damper, Cane Creek Double Barrel Air (DBAir)	Cane Creek	\$310,00	
Damper, Cane Creek Double Barrel Air (DBAir)	Cane Creek	\$310,00	
Damper, DT Swiss, M212	DT Swiss	\$178,00	
Damper, DT Swiss, X313	DT Swiss	\$278,00	
Damper, DNM Burner RCP	DNM	\$190,00	
Damper, Eka Stage-5 MTB	Eka	\$225,00	
Damper, Fox DHX 5.0	Fox	\$210,00	
Damper, Fox Van R	Fox	\$125,00	
Damper, Fox Vanilla R	Fox	\$190,00	
Damper, Hotbits 4WD DT1	Hotbits	\$280,00	
Damper, Kind Shock, KS-504	Kind Shock	\$78,00	
Damper, Koni 3012	Koni	\$250,00	
Damper, Koni, Trax Spax DA, Double Adjustable	Koni	\$181,00	
Damper, Koni, Trax Spax DA, Single Adjustable	Koni	\$145,00	
Damper, KW GFw 3-Way Adjustable	KW	\$375,00	
Damper, Manitou, Swinger 4 Way	Manitou	\$100,00	Damper cost without spring
Damper, Marzocchi, Roco TST R	Marzocchi	\$135,00	Damper cost without spring
Damper, Ohlins SD115	Ohlins	\$189,00	
Damper, Ohlins ST44	Ohlins	\$325,00	
Damper, Ohlins TTX 25	Ohlins	\$305,00	
Damper, Ohlins TTX 36	Ohlins	\$500,00	
Damper, Penske 7800-Non-Adjustable Quarter Midget	Penske	\$117,50	Non-adjustable Quarter Midget
Damper, Penske 7800-Piggyback Dbl. Adj. (Kaz Tech.)	Penske/Kaz Tech	\$337,50	Piggyback, Double Adjustable
Damper, Penske 7800-Piggyback Non-Adj.(Kaz Tech.)	Penske/Kaz Tech	\$255,00	Piggyback, Non-adjustable
Damper, Penske 8100	Penske	\$400,00	
Damper, Penske 8300	Penske	\$412,50	
Damper, Penske 8760	Penske	\$680,00	
Damper, Quantum, Zero, non-adjustable	Quantum racing	\$140,00	no external adjustment
Damper, Quantum, One.Zero, single adjustable	Quantum racing	\$195,00	
Damper, Quantum, Two.Zero, Two-way adjustable	Quantum racing	\$325,00	
Damper, Risse Jupiter 5	Risse Racing	\$175,00	
Damper, Risse Jupiter 5R	Risse Racing	\$200,00	
Damper, Risse Jupiter 7R	Risse Racing	\$300,00	
Damper, SRAM, Rock Shox, Vivid R2C	SRAM	\$215,00	
Damper, SRAM, Rock Shox, Vivid R2C	SRAM	\$215,00	
Damper, Tanner	Tanner	\$85,00	
Damper, Team Built	Team	\$-	
Damper, Team Built, Reservoir Bladder	Any	\$5,00	
Damper, X-Fusion Vektor DH 1.0	X-Fusion	\$170,00	
Damper, ZF Sachs, ETX36/15x	ZF Sachs	\$380,00	
Damper, ZF Sachs, Formula Student	ZF Sachs	\$512,05	
Damper, ZF Sachs, RD 36-2	ZF Sachs	\$370,00	
Amortecedor,XTZ Yamaha	ZK	R\$189,90	
Amortecedor, Mini Moto Tr50f e Tr100f	Pro Tork	R\$159,90	

Tabela 4 – Benchmarking Amortecedores SAE

Fonte: FSAE - Cost Report

A partir dessa tabela e da disponibilidade de importação da equipe ESCUDERIA UFJF e após a participação na competição de 2016 (apenas com o projeto), foi possível observar que equipes de primeiro ano e com pouco orçamento utilizam amortecedores de bicicleta downhill de menor custo de aquisição e/ou de minimotos como os utilizados em motos de motocross de 49 cc. Os amortecedores de bicicleta *Downhill* tem a grande vantagem de apresentar diversas regulagens, sendo possível uma melhor adequação e

desempenho quando observado o comportamento do carro na pista. Então com essas observações e buscando um melhor custo, foi importado o amortecedor DNM Burner RCP.

Uma outra hipótese caso não se fosse possível a compra deste amortecedor seria a utilização de amortecedores de motocicleta. Esses seriam recondicionados e enrijecidos caso necessário. Essa hipótese foi levantada devido ao custo mais baixo que os demais citados acima.

Ao analisar as diversas aplicações e tentar fazer com que o dispositivo desenvolvido neste trabalho apresentasse uma maior amplitude de opções de amortecedores a serem medidos, foi considerado expandir a utilização do mesmo para amortecedores de diferentes tamanhos. Pois este dispositivo poderia ser utilizado posteriormente a este trabalho para medições de outros amortecedores como os utilizados na equipe RAMPAGE UFJF (Baja SAE) com o mesmo intuito de realizar melhorias no veículo.

3.4 ADEQUAÇÃO DO MODELO EM FERRAMENTA CAD

Devido à expansão de utilização do dispositivo, como citado anteriormente, o dispositivo teve que sofrer alterações quanto a sua altura e furação das abraçadeiras que fixam o amortecedor no suporte. Os amortecedores previamente pensados, medem em torno de 20-24 mm , já os amortecedores utilizados nos veículos do projeto Baja SAE, medem cerca de 35-45 mm . Então o dispositivo como mostrado na Figura 19, sofreu um aumento na altura, conseqüentemente houve uma alteração na furação que saiu de um furo M8 para dois furos, um M8 e um M10 para adequar à utilização dos dois projetos da UFJF(o desenho técnico do dispositivo pode ser encontrado no apêndice B deste documento) .

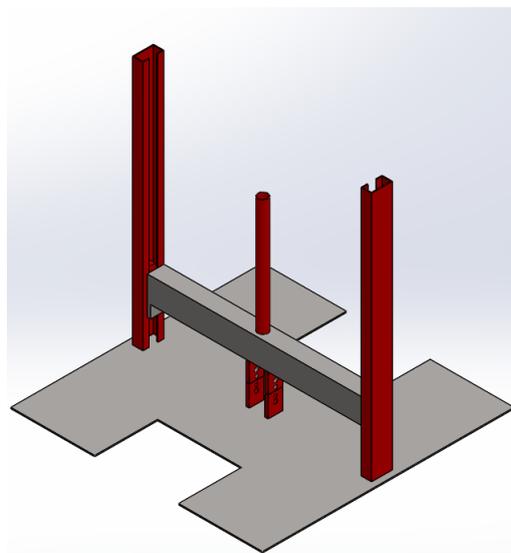


Figura 19 – Projeto final em CAD

3.5 DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL E MECÂNICO DO DISPOSITIVO

O escopo do dispositivo, teve como característica principal, ser leve, de baixo custo e portátil. Dessa forma, todo o dimensionamento estrutural, levou em conta esses três fatores. Como o dispositivo foi projetado para trabalhar apoiado com toda a sua base em uma superfície plana, essa não necessitava ser espessa para evitar riscos de empeno. Tendo uma base mais esbelta, adquirimos baixo peso do dispositivo. O dispositivo trabalha com anilhas de musculação, então, o diâmetro delas definiu o tamanho a ser utilizado na base. A altura foi dimensionada a partir do tamanho do maior amortecedor a ser medido. Os rolamentos utilizados, têm função de apenas guiar a haste móvel com o menor atrito possível, ou seja, a carga e a velocidade sofrida pelo rolamento neste trabalho serão relativamente baixas, desprezando-as. O mancal de rolamento esférico se adéqua perfeitamente à função requerida pelo mesmo. O principal requisito para a seleção deste é a sua medida, pois este deverá correr em um espaço sem folgas que possibilitem desvios ou desnivelamentos. A corredeira que este estará inserido não necessita ser de material muito resistente, pois a mesma não sofrerá muitos esforços.

3.6 ESCOLHA DOS MATERIAIS E DEFINIÇÃO DOS PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

No mercado de metais, existe disponível para compra guias, de baixo custo, que se encaixam corretamente nos rolamentos. Comparando o disponível no mercado com as exigências do projeto, foi comprado duas chapas U de 2"enrijecidas de 600 *mm* que acompanharam rolamentos guia de 43 *mm* de diâmetro e 16 *mm* de espessura. Este rolamento já vem com um eixo acoplado de 120 *mm*. Para a haste móvel do dispositivo, era necessário uma superfície plana para o posicionamento das anilhas de musculação. A opção encontrada foi o Metalon quadrado de 2 *mm* de espessura e com o comprimento de 570 *mm* e largura de 40 *mm*. Por fim, para a base, que como dito anteriormente não precisava de muita espessura foi comprado uma chapa xadrez com 3 *mm* de espessura pois apresentava um menor custo e era aplicável ao projeto.

Os processos de fabricação que foram utilizados na construção do dispositivo foram soldagem com eletrodo revestido 6013, utilização de uma policorte e um esmeril. O eletrodo 6013 foi escolhido pois apresenta baixa penetração devida as chapas serem finas, pode ser utilizada qualquer tipo de corrente e pode ser soldado em diferentes posições. A resistência à tração de 60.000 psi é satisfatória para os parâmetros de carga do dispositivo, além deste tipo de soldagem ser de baixo custo.

3.7 FABRICAÇÃO E MONTAGEM DO DISPOSITIVO

A montagem do dispositivo se iniciou com a medição de todos os itens relativos a montagem. Depois de devidamente conferidos, foi marcado na chapa xadrez os cortes a serem feitos pela policorte. Logo após, foi produzido as chapas de fixação dos rolamentos na haste móvel como mostra a figura 20. Após produzida a fixação, esta foi soldada na haste com E6013 e o conjunto (chapa e rolamento) foi soldado ao Metalon como mostra as figuras 21 e 22.



Figura 20 – Fixação dos rolamentos



Figura 21 – Soldagem dos rolamentos na haste



Figura 22 – Haste móvel com os rolamentos fixados

Após os rolamentos devidamente posicionados e soldados na haste móvel do dispositivo, foi soldado as corredeiras na base, ou seja, as duas vigas U enrijecidas. A figura 23 mostra as corredeiras sendo fixadas na base. Foi utilizado trenas e esquadros para melhor posicionamento das mesmas afim de garantir seu alinhamento e que elas se encontravam perpendiculares à base.



Figura 23 – Corredeiras dos rolamentos

Com as corredeiras e a haste móvel testadas, foi a vez de confeccionar as abraçadeiras ou orelhas para que o amortecedor fosse fixado de maneira centralizada no dispositivo, afim de evitar flambagem ou desalinhamento do mesmo. A figura 24 ilustra a fixação soldada na haste móvel. A figura 25 mostra o dispositivo até este ponto de leitura.



Figura 24 – Abraçadeira ou orelha de fixação do amortecedor na base e haste móvel (ainda em construção)



Figura 25 – Dispositivo pré-concluído

Para determinar o peso adicional que a haste faz sobre o amortecedor, foi posicionada uma balança sob a mesma como mostra a figura 26. Essa figura demonstra o procedimento realizado, porém ainda faltava a haste a qual irá centralizar as anilhas de musculação. Sem a haste o resultado encontrado foi de 2,040 *kg*, porém adicionando a haste de centralização das anilhas mais a solda, a massa medida pela balança foi de 2,560*kg*. Ou seja, peso que a haste livre exerce sob o amortecedor é de aproximadamente 25N.



Figura 26 – Medição da carga exercida pela haste móvel

Por fim, o dispositivo foi pintado com as cores da equipe ESCUDERIA UFJF e uma régua com uma agulha foi adicionada ao mesmo para termos uma maior precisão de medição. A figura 27 mostra o dispositivo pronto para uso.



Figura 27 – Dispositivo finalizado

3.8 TESTES PARA A VALIDAÇÃO DO DISPOSITIVO

A validação do dispositivo foi realizada comparando os valores de k obtidos através do dispositivo, com o valor tarado pelo fabricante da mola. Com esses valores foi possível comparar os dados de ambos a fim de verificar e validar o dispositivo.

A validação será descrita no próximo capítulo.

4 ANÁLISES E RESULTADOS

4.1 VALIDAÇÃO E ENSAIO DA MOLA

A primeira análise realizada foi com o intuito de validar o dispositivo. A mola do amortecedor da equipe ESCUDERIA UFJF, apresenta uma rigidez de 550 lbf/in ou 96.3198 N/mm. considerando a gravidade 9,81 m/s^2 , necessitamos de 9,82 kg para a mola deslocar 1 mm .

Assim, com o dispositivo ainda inacabado, faltando apenas alguns detalhes, como a pintura e a agulha lateral, foi feita a validação. Foi colocado uma anilha de 20 kg e foi anotado o deslocamento três vezes e foi obtido em todas as medições um deslocamento de 2 mm . A figura ilustra essa validação.



Figura 28 – Primeira validação do dispositivo

Como indicado na equação 2.1, foi possível determinar a constante de rigidez (k) da mola. então tem-se:

$$F = kx$$

logo, pelo fabricante tem-se:

$$96.3198N = k.1mm$$

$$k = 96.3198N/mm$$

Com os valores obtidos pelo dispositivo, tem-se que:

$$196.2N = k.2mm$$

$$k = 98,1N/mm$$

A partir dos valores coletados seguindo o procedimento citado em 3.1.2 e com o valor de k encontrado foi possível obter o desvio entre fabricante e o medido. Esse desvio corresponde a 1,85% que é um desvio considerável baixo e que valida de forma eficaz o dispositivo. Esse desvio de 1,85% pode ser atribuído ao observador do experimento ou a um leve atrito entre o rolamento e as guias.

4.2 ENSAIO DO AMORTECEDOR

Com a verificação realizada, foi preparado o teste para a obtenção de c seguindo o procedimento citado em 3.1.1. O amortecedor foi posicionado sem a mola no dispositivo com marcações previamente designadas para os pontos de coleta baseados no deslocamento do mesmo. Assim foi adicionado na haste anilhas que somavam 15 kg de massa mais 2,5 kg da haste móvel, totalizando 17,5 kg. O amortecedor começou a se deslocar quando o peso foi liberado, de forma eficaz, porém após alguns segundos, a haste móvel apresentou resistência ao ensaio fazendo com que os rolamentos agarrassem nos trilhos. Provavelmente a causa da anormalidade seria devido à um desalinhamento da haste móvel perante os guias laterais. Foi tomado uma série de pontos ao longo da guia a fim de observar possíveis empenos na mesma, tendo em vista que durante a validação essa não apresentou interferência ao movimento da haste.

Com as medições se foi possível observar que houve uma ligeira variação das medidas, ou seja, foi possível constatar que as guias laterais não estavam mais paralelas uma a outra, fazendo com que a haste móvel "agarrasse" ao se deslocar. Este empeno, ocorreu possivelmente durante o transporte do dispositivo. Devido à falta de alças para carrega-lo, é intuitivo que o usuário transporte o mesmo segurando pelos dois barramentos verticais, gerando o empeno.

Constatado o problema e na tentativa de melhorar os resultados houve o desempenho das hastes e a adição de óleo mineral nas mesmas a fim de lubrificar a correção. Foi nítida a mudança de comportamento do dispositivo. Então foi adicionado 12 kg com anilhas de musculação e somadas ao peso da haste de 2,5 kg obtém-se um total de 14,5 kg de massa aplicada no amortecedor. O deslocamento ocorreu de maneira suave e sem apresentar interferência a olho nu.

Primeiramente, foi encontrado o valor para o amortecimento crítico através da equação 2.10.

$$c_c = 2\sqrt{km} = \sqrt[2]{98100 * 14,5}$$

$$c_c = 2385,33 \text{ N.s/m}$$

Com isso, foi iniciada a coleta de dados. O procedimento 3.1.1 foi seguido. O deslocamento da haste adotado foi de 10 mm e foi realizada a marcação na haste. A haste do amortecedor contém 50 mm de extensão. Os 10 mm adotados se encontravam-se no final do curso do amortecedor. Então o experimento foi repetido 10 vezes. Os valores de tempo obtidos estão demonstrados na tabela 5. Com o deslocamento e o tempo conhecidos, através da equação 2.3, foi possível encontrar a velocidade relativa do amortecedor.

EXPERIMENTO DE MEDIÇÃO DO AMORTECEDOR			
MEDIDA	DESLOCAMENTO (m)	TEMPO (s)	VELOCIDADE (m/s)
1	0,0100	0,1100	0,0909
2	0,0100	0,1200	0,0833
3	0,0100	0,1000	0,1000
4	0,0100	0,1100	0,0909
5	0,0100	0,1300	0,0769
6	0,0100	0,1300	0,0769
7	0,0100	0,1200	0,0833
8	0,0100	0,1200	0,0833
9	0,0100	0,1100	0,0909
10	0,0100	0,1200	0,0833
Média	0,0100	0,1170	0,0855

Tabela 5 – Resultados obtidos no ensaio do amortecedor

Com os dados coletados e calculados, foi possível calcular o valor de c , através da equação 2.2. A força utilizada foi calculada seguindo a equação 2.6 em que $m=14,5$ kg e $a=g=9,81$ m/s^2 . Como consequência, através da equação 2.11, foi possível conhecer o valor do fator de amortecimento (ζ). A tabela mostra os valores de F , c e ζ encontrados no ensaio.

EXPERIMENTO DE MEDIÇÃO DO AMORTECEDOR						
MEDIDA	DESLOCAMENTO (m)	TEMPO (s)	VELOCIDADE (m/s)	F (N)	c	ζ
1	0,0100	0,1100	0,0909	142,2450	1564,6950	0,6560
2	0,0100	0,1200	0,0833	142,2450	1706,9400	0,7156
3	0,0100	0,1000	0,1000	142,2450	1422,4500	0,5963
4	0,0100	0,1100	0,0909	142,2450	1564,6950	0,6560
5	0,0100	0,1300	0,0769	142,2450	1849,1850	0,7752
6	0,0100	0,1300	0,0769	142,2450	1849,1850	0,7752
7	0,0100	0,1200	0,0833	142,2450	1706,9400	0,7156
8	0,0100	0,1200	0,0833	142,2450	1706,9400	0,7156
9	0,0100	0,1100	0,0909	142,2450	1564,6950	0,6560
10	0,0100	0,1200	0,0833	142,2450	1706,9400	0,7156
Média	0,0100	0,1170	0,0855	142,2450	1664,2665	0,6977

Tabela 6 – Tabela completa com os resultados do segundo ensaio.

Com os valores obtidos, é possível analisar que o teste ficou próximo do esperado.

Segundo citado na seção 2.3.3 , é dito que o valor de ζ para veículos esta entre 0.4-0.8, indicando um sistema subamortecido. Na tabela 6, foi possível observar que a média dos valores experimentados ficou dentro da margem tida como padrão para carros de corrida. Devido a velocidade não ser constante durante o ensaio, pois em um período inicial, há uma aceleração (gravidade), é possível que a mesma não estivesse totalmente em regime permanente quando foi medida sendo assim podendo gerar distorções no resultado. Mesmo com esse possível fator de desvio, este ensaio esboça uma boa aproximação do coeficiente de amortecimento.

4.3 ENSAIO DO CONJUNTO MOLA-AMORTECEDOR

Foi então realizado por último a medição com o conjunto completo (mola-amortecedor) descrito na seção 3.1.3, a fim de comprovar os resultados dos dois métodos utilizados anteriormente e possivelmente demonstrar possíveis desvios nas medições anteriores. Este método também buscou analisar possíveis interferência da mola no coeficiente c e do amortecedor no coeficiente k . A figura 29 abaixo mostra o dispositivo instantes antes do terceiro ensaio.



Figura 29 – Medição da carga exercida pela haste móvel

O ensaio foi realizado no LIS (Laboratório de Imagem e Sinais) da UFJF. O acelerômetro utilizado foi o DeltaTron 4507B da marca Brüel & Kjaer e o procedimento seguido está explícito no item 3.1.3.

Os gráficos obtidos neste ensaio estão contidos nas figuras 30 e 31 abaixo.

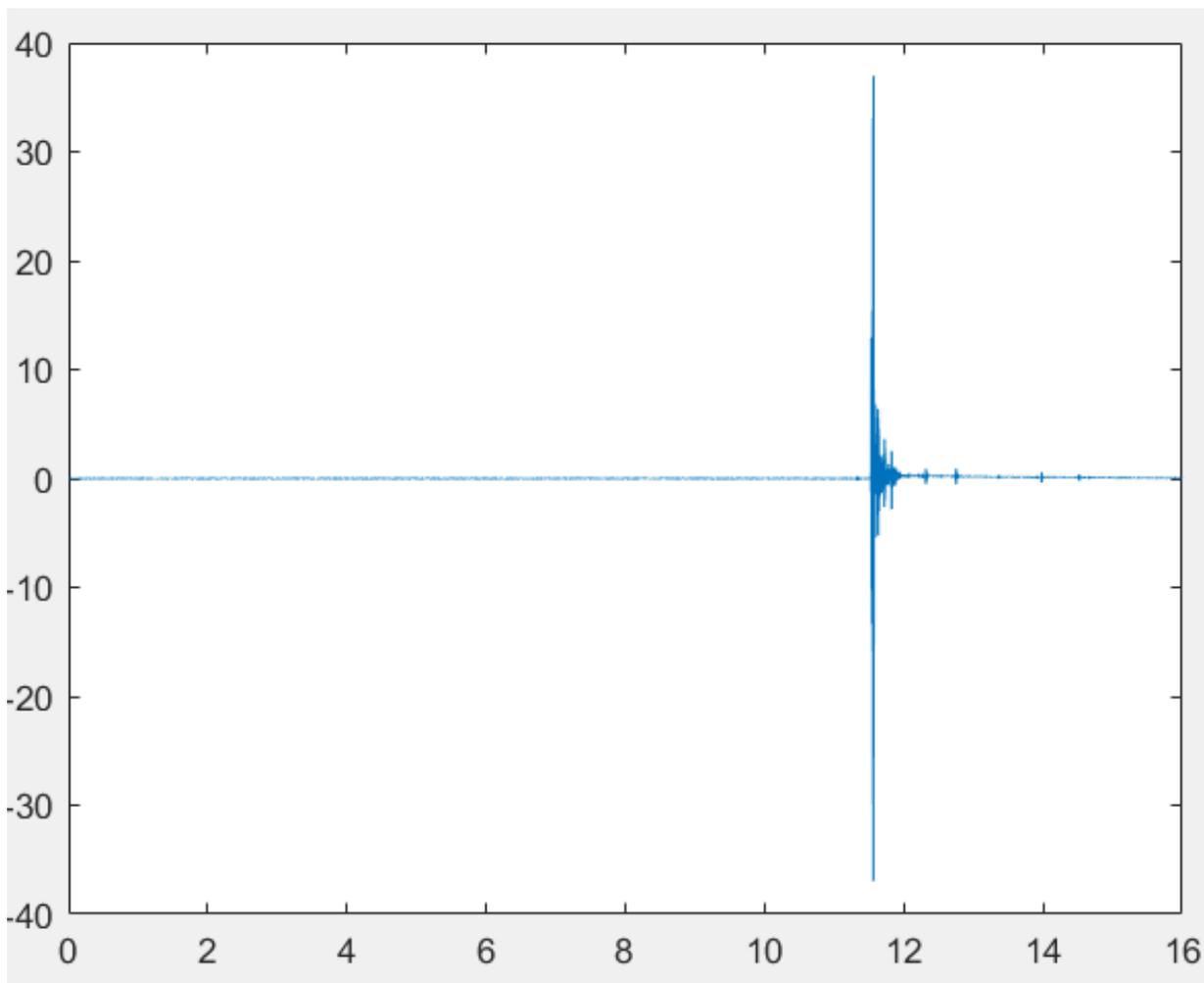


Figura 30 – Gráfico Aceleração(m/s^2) x Tempo(s) obtido no ensaio

É possível analisar por este gráfico muitos ruídos no ensaio. A causa dos mesmos pode ter ocorrido aos seguintes fatores:

- O ensaio foi realizado sobre uma laje, pois o laboratório sem encontra no segundo pavimento, e devido à sua sensibilidade, é possível que a laje tenha vibrado e o acelerômetro captou esta vibração. Essa vibração da laje pode ter ocorrido devido ao fluxo de pessoas sobre a mesma .
- Quando o *tie-up* foi rompido, é possível que a tesoura tenha se chocado levemente contra o conjunto mola amortecedor, gerando uma vibração prévia ao rompimento.
- Com o rompimento do *tie-up* e o impulsionamento do conjunto mola -amortecedor, provavelmente gerou uma vibração ao dispositivo. Como o amortecedor se encontrava fixado ao mesmo, e possível que o acelerômetro tenha captado a vibração do dispositivo, além da vibração do amortecedor, se persistindo por um período maior de tempo.

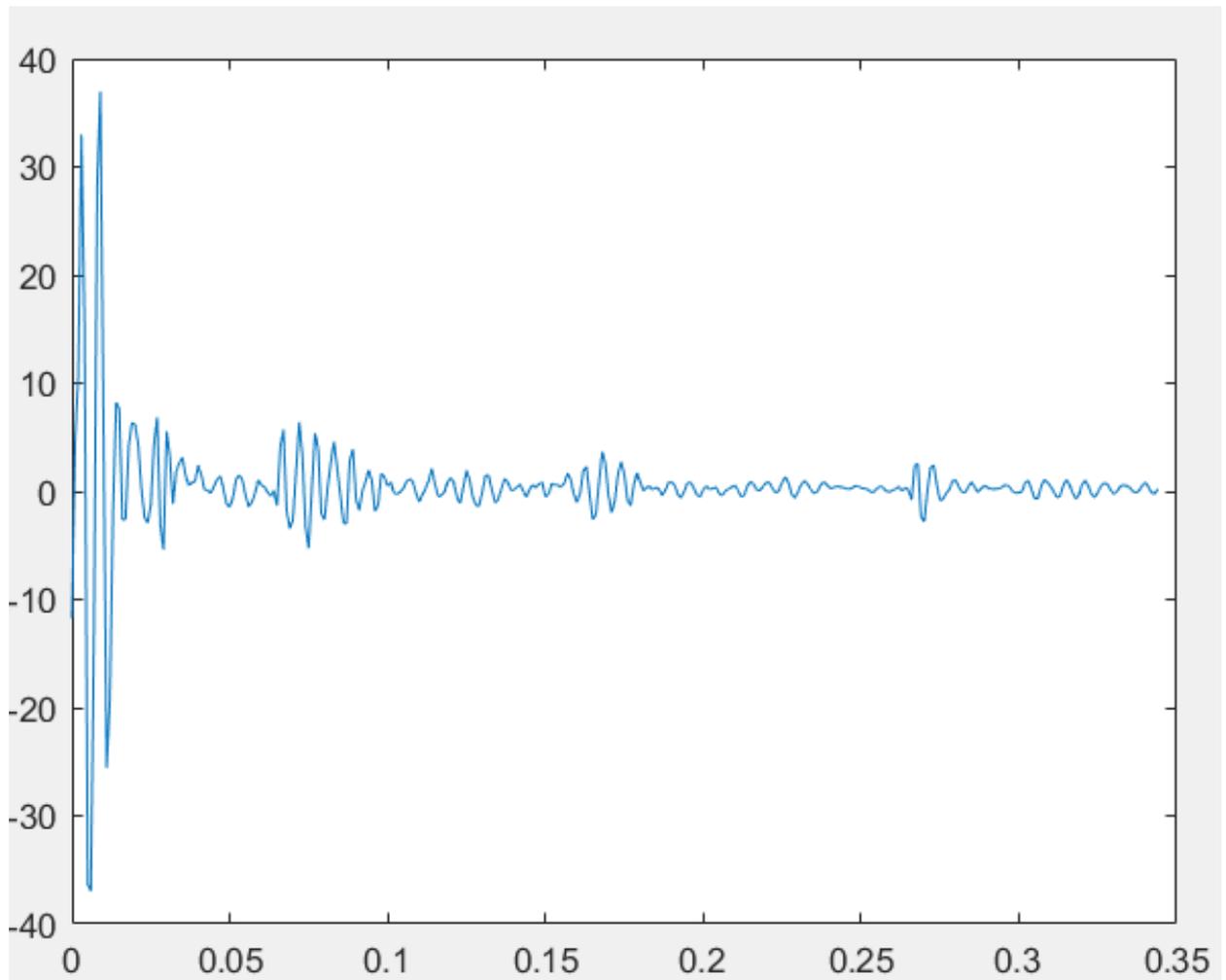


Figura 31 – Gráfico obtido no ensaio de Aceleração(m/s^2) x Tempo(s)

Buscando melhorar os dados coletados no experimento, foi realizada uma filtragem de ruídos utilizando o método Spline Cúbico Interpolante como mostra a figura 32 (o código para essa filtragem se encontra no Apêndice A deste documento). Com essa filtragem, e selecionando a primeira parte do gráfico anterior, chegamos nas curvas demonstradas na figura 33

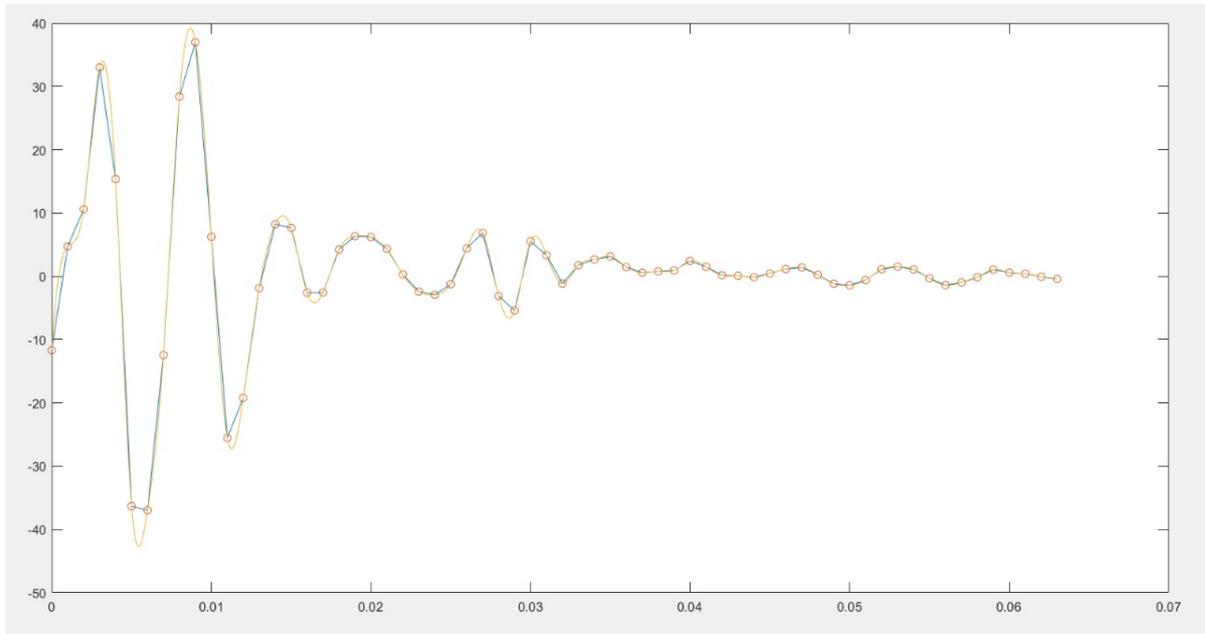


Figura 32 – Gráfico Aceleração(m/s^2) x Tempo(s) obtido na filtragem dos resultados obtidos no ensaio

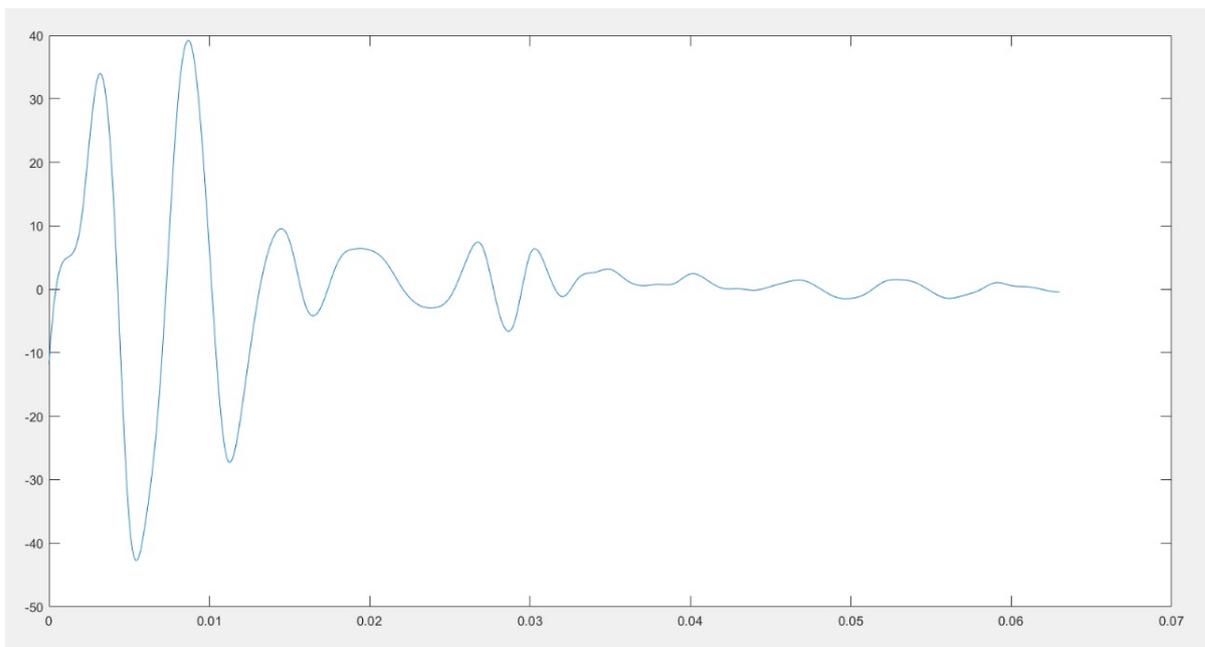


Figura 33 – Gráfico Aceleração(m/s^2) x Tempo(s) obtido após a filtragem

Foi possível notar uma melhora na aparência dos dados coletados. Foi então realizado o cálculo de decremento logarítmico pegando dois pontos da curva gerada pelo acelerômetro e os mesmos dois pontos só que na curva filtrada. O método utilizado para a seleção destes pontos foi procurar dois picos sequentes o qual apresentavam pico mais esquadrado, sem pontas. Ou seja, com uma melhor experimentação. A tabela 7 mostra os resultados obtidos para os pontos selecionados no gráfico gerado pelo acelerômetro e pela

curva filtrada.

Cálculo do Decremento logarítimo						
Dados	Ponto	p	A_t	$A_{(t+pT_d)}$	δ	ζ
Pontos do Gráfico sem filtro	1	1	-25,56	-2,56	2,301021	0,344038
	2	1	36,97	7,63	1,578019	0,243701
Pontos do Gráfico com filtro	1	1	-27,27	-4,19	1,873086	0,28582
	2	1	39,23	9,54	1,413948	0,219652

Tabela 7 – Tabela dos resultados obtidos pelo decremento logarítmico

Foi possível notar uma grande variação dos ζ 's entre os dois pontos de medição. Também se foi possível observar, se comparado aos ensaios individuais, uma grande discrepância dos resultados. Sendo assim foi constatado que o meio de obtenção dos dados através deste ensaio foi ineficiente.

5 CONCLUSÕES

Com a finalização da construção e dos ensaios realizados neste trabalho, conclui-se que é possível utilizar o dispositivo para uma aproximação dos fatores de amortecimento e rigidez para os testes em que os itens avaliados se encontram separados, ou seja, mola e posteriormente amortecedor. Os resultados obtidos para estes convergem para os valores esperados que foram encontrados nas literaturas estudadas no presente trabalho (ζ entre 0.2 e 0.8). Para a obtenção de valores mais precisos, será necessário o aprimoramento do sistema.

Para a análise do conjunto mola-amortecedor, será necessário a implementação de otimizações no sistema para que capacite o mesmo a realizar as medições de maneira eficaz e sem demais deturpações.

As causas discutidas para os possíveis erros encontrados no ensaio podem, possivelmente, serem sanadas com a realização do ensaio em mesmo nível sem as distorções causadas pela a vibração da laje. Outra possível melhoria seria a substituição das vigas U por guias lineares, as quais propiciariam menos atritos ao sistema. Com essas mudanças é provável que o procedimento para a realização do ensaio do conjunto também seja reestruturado.

Por fim, após as análises e estudos sobre a dinâmica dos componentes e do dispositivo, é possível considerar eficaz, para a equipe ESCUDERIA UFJF, a utilização do dispositivo para medição dos coeficientes de amortecedores. Os dados obtidos no presente trabalho servirão para otimizar o sistema dinâmico do veículo e também possibilitará à equipe variar as regulagens do amortecedor com o conhecimento das variáveis em cada mudança.

Como sugestão, pode-se estudar melhor o comportamento vibracional do dispositivo, realizando uma análise modal; Otimizar partes do dispositivo e atribuir sensores para captar os dados com maior precisão; Desenvolver um método mais eficaz para a obtenção das variáveis através do conjunto mola-amortecedor.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Daniel de Araújo. **Dimensionamento Cinemático e Dinâmico de Suspensão Duplo A**. [S.l.]: Universidade de Brasília, 2012.
- BALACHANDRAN, Balakumar; MAGRAB, Edward B. . **Vibrations**. [S.l.]: CENGAGE Learning, 2009.
- BARBOSA, Fávio de Souza. **Modelagem Computacional de Estruturas com camadas Viscoelásticas Amortecedoras**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2000.
- COSTA, Paulo G. **Suspension Geometry and Computation**. [S.l.]: John Wiley & Sons Ltd, 2009.
- DIXON, John C. **The Shock Absorber Handbook**. [S.l.]: Society of Automotive Engineers, 1999.
- DIXON, John C. **A bíblia do carro**. [S.l.]: Independente, 2001–2002.
- ESAB. **The ESAB Filler Metal Technology Course, Apostila de Eletrodos Revestidos**. 2000. Acesso em: 15 set. 2017. Disponível em: <http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901097rev1_apostilaeletrodosrevestidos_ok.pdf>.
- FREITAS, Luís M. **Estudo da Dinâmica Vertical de uma Suspensão Veicular do Tipo MacPherson**. [S.l.]: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2006.
- GILLESPIE, Thomas D. **Fundamentals of Vehicle Dynamics**. [S.l.]: Society of Automotive Engineers, 1992.
- INFOSOLDA, site. **PROCESSO COM ELETRODO REVESTIDO - FUNDAMENTOS**. 2000. Acesso em: 15 set. 2017. Disponível em: <<http://www.infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/processos/164-processo-com-eletrodo-revestido-fundamentos.html>>.
- JUVINALL, Robert C.; MARSHEK, Kurt M. . **Fundamentos do projeto de Componentes de Máquinas**. [S.l.]: Lct, 2012.
- LYMBEROPOULOS, Alexandre. **INTERPOLAÇÃO POLINOMIAL SPLINES CÚBICOS**. [S.l.], 2013. Acesso em: 27 Abr. 2018. Disponível em: <<https://www.ime.usp.br/mat/2458/textos/splines.pdf>>.
- MARQUES, Paulo V.; MODENESI, Paulo José . **SOLDAGEM; Fundamentos e Tecnologia**. [S.l.]: Universidade Federal de Minas Gerais, 2009.
- MERCEDES-BENZ. **Daimler duplo cilindro - 1897**. 2017. Acesso em: 30 Out. 2017. Disponível em: <<https://mercedes-benz-publicarchive.com/marsClassic/en/instance/ko-/Daimler-motor-carriage-Phoenix-car-4-hp-1897—1902.xhtml?oid=5983>>.
- MILLIKEN, Willian F. **Race Car Vehicle Dynamics**. [S.l.]: Society of Automotive Engineers, 1995.

MOLINA, Ricardo. **Elementos de um Sistema Mecânico**. [S.l.], 2004. Acesso em: 01 Out. 2017. Disponível em: <https://www.ime.usp.br/~oda/contents/01Matem%E1tica-01Sistemas%20Din%E2micos/04_Elem_Sist_Mec.pdf>.

NORTON, Robert L. **Cinemática e Dinâmica dos Mecanismos**. [S.l.]: AMGH, 2011.

OKABE, Eduardo Paiva. **Metodologia de projeto para o desenvolvimento de suspensão veicular**. [S.l.]: Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, 2003.

OMEGA. **Accelerometer**. 2018. Acesso em: 12 jan. 2018. Disponível em: <<https://www.omega.com/prodinfo/accelerometers.html>>.

SAE. **Fórmula SAE Brasil**. 2017. Acesso em: 09 set. 2017. Disponível em: <<http://portal.saebrasil.org.br/programas-estudantis/formula-sae-brasil>>.

STONE, Richard. **Automotive engineering fundamentals / Richard Stone and Jeffrey K. Ball**. [S.l.]: Society of Automotive Engineers, 2002.

YOUNG, Hugh D. **Física 1, Sears e Zemansky: mecanica**. [S.l.]: Pearson Education do Brasil, 2016.

APÊNDICE A – Método de Filtragem

```
%% Parameters startTime = 11.555;
% seconds
endTime = 11.9; % seconds
startTimeMs = startTime*103; % milliseconds
endTimeMs = endTime*103;
% milliseconds
%% Cut data - useful data from 11.5 to 15
dataX = x(startTimeMs+1:endTimeMs,1);
dataY = x(startTimeMs+1:endTimeMs,2);
figure;
plot(dataX, dataY);
deltaTime = x(startTimeMs+1,1) - x(startTimeMs,1);
%% New vectors
X = dataX - startTime;
Y = dataY;
figure;
plot(X,Y);
%% Interpolation
sampled = 0:deltaTime/10:X(end);
YY = spline(X,Y,sampled);
figure;
plot(X,Y);
hold on;
plot(X,Y,'o',sampled,YY);
% Plot only reconstructed graph
figure;
plot(sampled, YY);
```

```

%%%%%%%%%% Second analysis%%%%%%%%%%
%% Sampling data using the first graph - manually sampled
x2 = [11.5605 11.566 11.63 11.825 12.32]';
y2 = [((-36.97+(-36.33))/2) -25.56 -5.268 -2.815 -0.4786]';
% inferior samples
x2pos = x2;
y2pos = -y2;
% using the same values of the inferior samples for the superior samples, but
reflected.

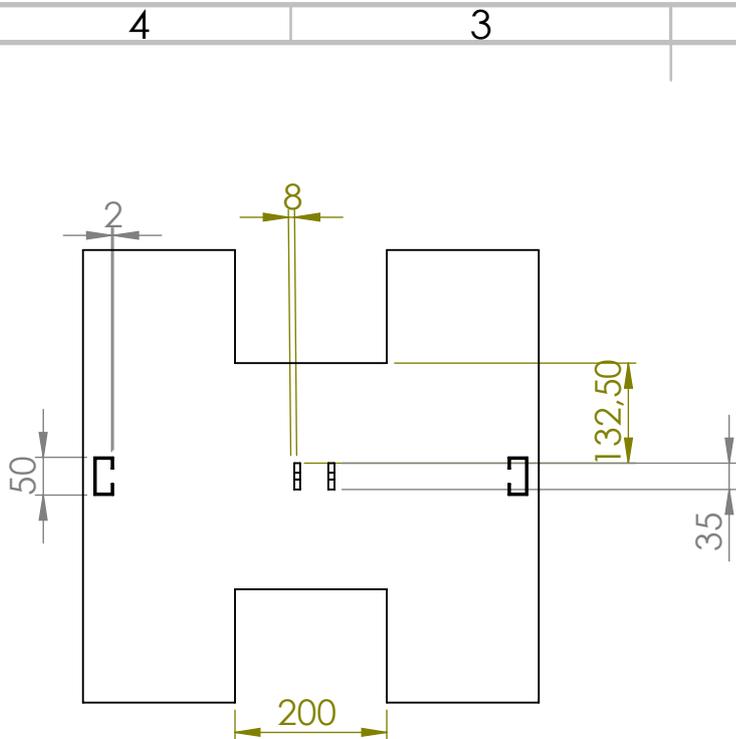
% Fitting process
f = fit(x2,y2,'exp1');
% inferior exponential
fpos = fit(x2pos,y2pos,'exp1');
% superior exponential

%% plot results
figure;
plot(f,x2,y2);
% plot inferior exponential
hold on;
plot(fpos,x2pos,y2pos);
% plot superior exponential
hold on;
plot(x(11561:12320,1), x(11561:12320,2));
% plot original graph using only the part of interest grid on;
title('Title here');
xlabel('xlabel here');
ylabel('ylabel here');

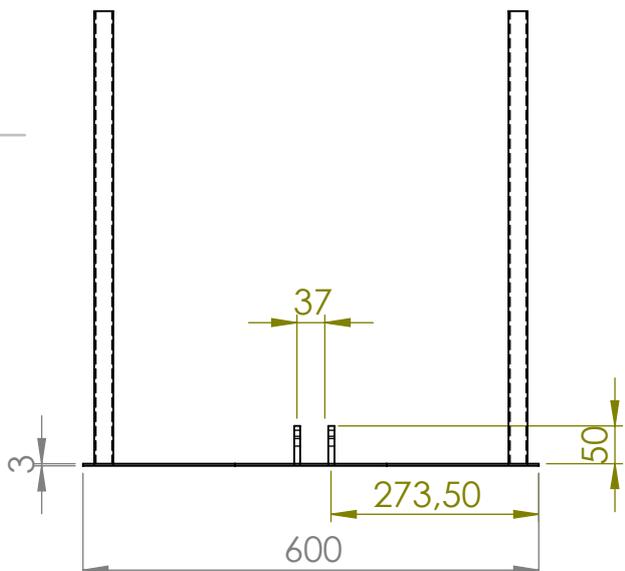
%% Print exponential structure f
fpos

```

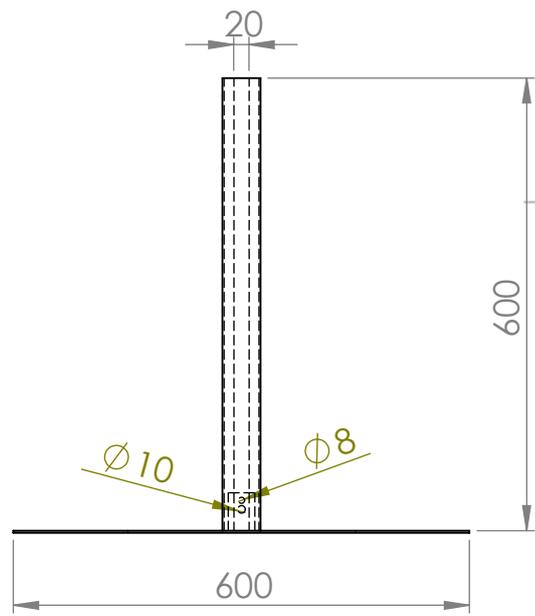
APÊNDICE B – Desenho Técnico



VISTA SUPERIOR



VISTA FRONTAL



VISTA LATERAL

SE NÃO ESPECIFICADO:
DIMENSÕES EM MILÍMETROS
ACABAM. SUPERFÍCIE:
TOLERÂNCIAS:
LINEAR:
ANGULAR:

ACABAMENTO:

REBARBAR E
QUEBRAR
ARESTAS
AGUDAS

NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO

REVISÃO

	NOME	ASSINATURA	DATA
DESEN.			
VERIF.			
APROV.			
MANUF.			

TÍTULO:
BASE

MATERIAL:
Produto educacional do SOLIDWORKS. Somente para fins de instrução

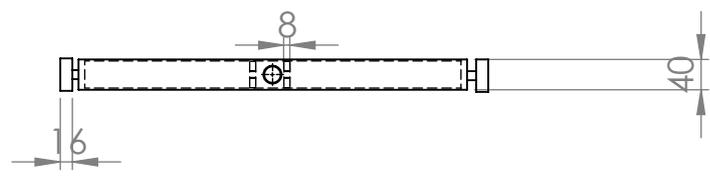
DES. Nº
01

A4

4 3 2 1

F

F

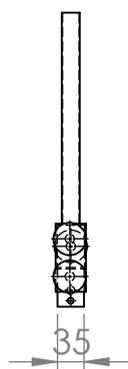
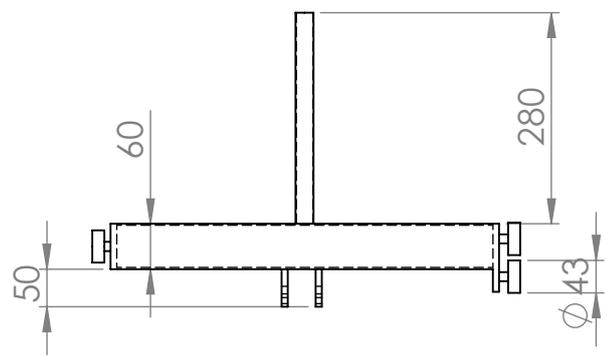
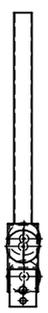


E

E

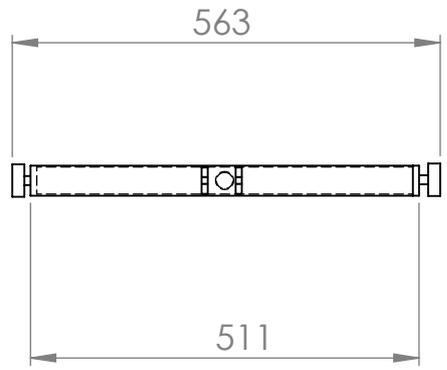
D

D



C

C



B

B

SE NÃO ESPECIFICADO:
DIMENSÕES EM MILÍMETROS
ACABAM. SUPERFÍCIE:
TOLERÂNCIAS:
LINEAR:
ANGULAR:

ACABAMENTO:

REBARBAR E
QUEBRAR
ARESTAS
AGUDAS

NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO

REVISÃO

	NOME	ASSINATURA	DATA
DESEN.			
VERIF.			
APROV.			
MANUF.			

TÍTULO:
HASTE MÓVEL

QUALID

DES. Nº
02

A4

Produto educacional do SOLIDWORKS. Somente para fins de instrução

PESO:

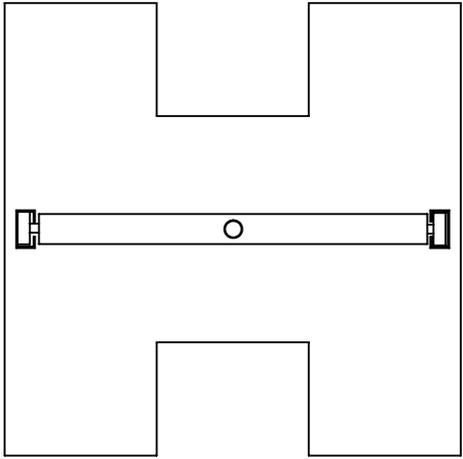
ESCALA:1:10

FOLHA 1 DE 1

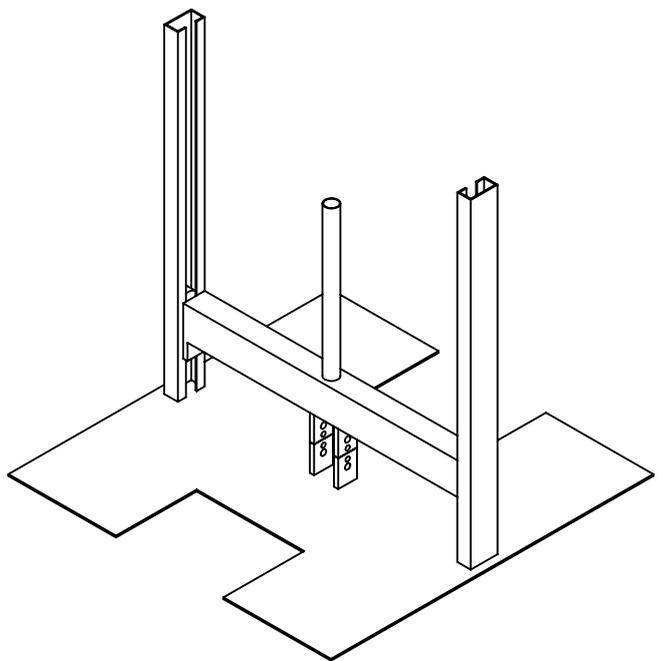
4 3 2 1

A

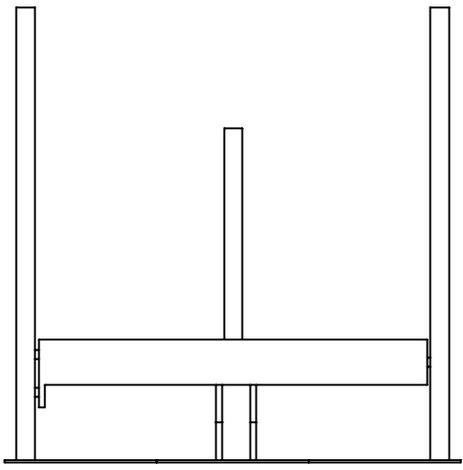
A



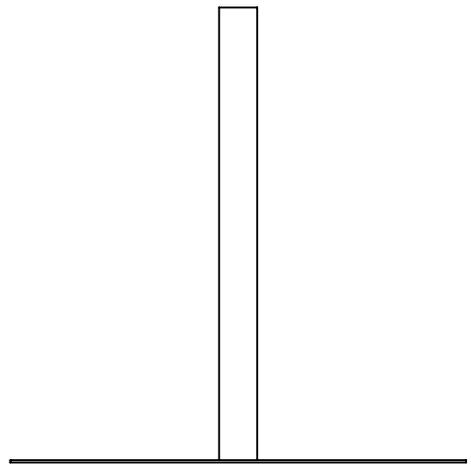
VISTA SUPERIOR



VISTA ISOMÉTRICA



VISTA FRONTAL



VISTA LATERAL

SE NÃO ESPECIFICADO:
DIMENSÕES EM MILÍMETROS
ACABAM. SUPERFÍCIE:
TOLERÂNCIAS:
LINEAR:
ANGULAR:

ACABAMENTO:

REBARBAR E
QUEBRAR
ARESTAS
AGUDAS

NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO

REVISÃO

	NOME	ASSINATURA	DATA
DESEN.			
VERIF.			
APROV.			
MANUF.			

TÍTULO:
DISPOSITIVO PARA CÁLCULO DE AMORTECIMENTO

QUALID. MATERIAL:

DES. Nº
03

A4

Produto educacional do SOLIDWORKS. Somente para fins de instrução

PESO:

ESCALA:1:10

FOLHA 1 DE 1

ANEXO A – Termo de autenticidade



UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA

Termo de Declaração de Autenticidade de Autoria

Declaro, sob as penas da lei e para os devidos fins, junto à Universidade Federal de Juiz de Fora, que meu Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Graduação em Engenharia Mecânica é original, de minha única e exclusiva autoria. E não se trata de cópia integral ou parcial de textos e trabalhos de autoria de outrem, seja em formato de papel, eletrônico, digital, áudio-visual ou qualquer outro meio.

Declaro ainda ter total conhecimento e compreensão do que é considerado plágio, não apenas a cópia integral do trabalho, mas também de parte dele, inclusive de artigos e/ou parágrafos, sem citação do autor ou de sua fonte.

Declaro, por fim, ter total conhecimento e compreensão das punições decorrentes da prática de plágio, através das sanções civis previstas na lei do direito autoral¹ e criminais previstas no Código Penal², além das cominações administrativas e acadêmicas que poderão resultar em reprovação no Trabalho de Conclusão de Curso.

Juiz de Fora, ____ de _____ de 20 ____.

NOME LEGÍVEL DO ALUNO (A)

Matrícula

ASSINATURA

CPF

¹-LEI N° 9.610, DE 19 DE FEVEREIRO DE 1998. Altera, atualiza e consolida a legislação sobre direitos autorais e dá outras providências.

²-Art. 184. Violar direitos de autor e os que lhe são conexos: Pena - detenção, de 3 (três) meses a 1 (um) ano, ou multa.