

Breno Avelar Mendonça
João Victor Costa
Marcelo Henrique Araujo

Trabalho Acadêmico Integrador VI

Dimensionamento de uma suspensão dianteira tipo duplo A para mini veículo *off-road*

Arcos, MG

19 de dezembro de 2019

Breno Avelar Mendonça
João Victor Costa
Marcelo Henrique Araujo

Trabalho Acadêmico Integrador VI

Dimensionamento de uma suspensão dianteira tipo duplo A para mini veículo *off-road*

Projeto apresentado à disciplina de TAI-
Trabalho Acadêmico Integrador do curso de
Engenharia Mecânica ministrado no Instituto
Federal de Minas Gerais, *Campus Arcos*

Instituto Federal de Minas Gerais
Campus Avançado Arcos
Bacharelado em Engenharia Mecânica

Orientador: Mr. André César Martins de Miranda

Arcos, MG
19 de dezembro de 2019

RESUMO

O presente projeto propõe o dimensionamento de um sistema de amortecimento do tipo duplo A de aplicabilidade em mini veículos *off-road*, com foco em competições BAJA SAE. Para auxílio como parâmetro inicial do dimensionamento do sistema de amortecimento é utilizado o modelo de $1/4$ de veículo, o qual fornece dados para a validação da mola. Posteriormente com a mola estabelecida serviu de base para a escolha do amortecedor que será fixado no sistema de amortecimento. Com a escolha do amortecedor, mola e com auxílio do regulamento (RSBS, 2019) é possível estabelecer as dimensões necessárias para os braços superior e inferior, se adequando perfeitamente ao chassi dimensionado semestre anterior (TAI V). Para a verificação da integridade do mesmo são feitas análises estruturais com auxílio do *software ansys* a fim de verificar a tensão máxima aplicada e sua deformação máxima, tendo como resultado uma tensão máxima de $192,6MPa$ e $0,33mm$ de deformação total. Com tudo com *Software lotus suspension Analysis* é validado a geometria de todo o sistema de amortecimento, de acordo com a verificação da variação do ângulo de câmbor e *Roll Center*, obtendo resultados de -3° a -1° e $39cm$ a $2cm$ respectivamente. Por fim é feita uma pesquisa de mercado com intuito de cotar todos os componentes do sistema de amortecimento.

Palavras-chave: Suspensão. Amortecimento. Amortecedor. Mola. *off-road*. Dimensionamento.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

1	Suspensão veicular	7
2	Suspensão dependente	8
3	Suspensão independente	8
4	Suspensão Duplo A	9
5	Modelo de $1/4$ de veículo	10
6	Ângulo de câmber	11
7	Centro de rolagem	12
8	Nomenclatura da mola	15
9	Curvas de condições críticas	17
10	Condições de contorno	19
11	Tensão máxima	20
12	Deformação máxima	20
13	Suspensão Lotus	21
14	Modelo projetado	23
15	Esqueleto do sistema de suspensão	27
16	Dimensões da estrutura	28

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	5
1.1	Justificativa	5
1.2	Objetivo Geral	6
1.3	Objetivos Específicos	6
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	7
2.1	Revisão bibliográfica	7
2.2	Suspensão veicular	7
2.2.1	Suspensão dependente	8
2.2.2	Suspensão independente	8
2.3	Suspensão Duplo A	9
2.4	Parâmetros da suspensão	10
2.4.1	Modelo de $\frac{1}{4}$ de veículo	10
2.4.2	Ângulo de câmber	11
2.4.3	Centro de rolagem	11
3	METODOLOGIA	13
3.1	Métodos	13
3.2	Definição da rigidez e amortecimento	13
3.3	Dimensionamento da mola	14
3.3.1	Amortecedor	18
3.4	Dimensionamento da estrutura duplo A	18
3.4.1	Análise estrutural	18
3.5	Verificação geométrica do sistema	21
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
5	CONCLUSÃO	24
	REFERÊNCIAS	25
	APÊNDICE A – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS	27
	APÊNDICE B – MANUAL DE INSTALAÇÃO	30

1 INTRODUÇÃO

Desde a criação dos veículos automotores no final do século XIX, a indústria automotiva tem tido grande relevância no cenário mundial e nacional, exercendo grandes influências no meio industrial, agregando diversos setores e contribuindo para inovações tecnológicas. Isto faz com que este ramo se torne referência para outros setores (CARDOSO, 2010). Assim, os sistemas automotivos estão em constante processo de aprimoramento para atender as demandas cada vez mais exigentes do mercado.

Um dos sistemas automotivos que teve evolução significativa nas últimas décadas foi a suspensão. O sistema de suspensão veicular é definido como o conjunto de componentes responsáveis por absorver os choques, vibrações ou irregularidades do solo que seriam transmitidos à estrutura do veículo como um todo. Além de realizar a absorção de impactos, os sistemas de suspensão estão relacionados à estabilidade e à segurança dos ocupantes (ALMEIDA, 2012).

De maneira a atender diferentes tipos de veículos, existe uma grande variedade de sistemas de suspensão disponíveis atualmente no mercado. Tal variedade é necessária para atender os inúmeros conceitos adotados pelos fabricantes de automóveis, devido aos diferentes requisitos de utilização e às condições características de solicitação das suspensões para os vários mercados (GENTA; MORELLO, 2009).

O presente trabalho aborda especificamente o sistema de suspensão dianteira, utilizada em mini veículos *off-road*, para o qual será apresentado o dimensionamento estrutural através de modelagem e simulação computacional.

1.1 JUSTIFICATIVA

Os sistemas de suspensão dividem-se em dois tipos principais: dependente e independente. Dentre os modelos de suspensão independentes se destacam a *Mc Pherson*, *Multilink* e Duplo A. Optou-se pelo desenvolvimento do projeto do modelo Duplo A, também conhecido como *Double wishbone*. Tal escolha está relacionada a suas características de aplicação, sendo destaque em carros de competição BAJA.

Segundo (ROCHA, 2013) a principal vantagem desta configuração de suspensão é permitir um ajuste mais livre do que os outros modelos de suspensão. Seu tamanho compacto também fornece grande versatilidade, permitindo a montagem da mola e amortecedor na horizontal e vertical, realizando o trabalho de comprimir ou estender conforme a necessidade.

1.2 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um modelo de suspensão dianteira para um mini veículo *off-road*, a ser implementado no chassi desenvolvido no semestre anterior (TAI V).

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Dimensionar a estrutura da suspensão e o conjunto mola/amortecedor;
- Verificar a geometria do sistema;
- Especificar os componentes do projeto dimensionado;
- Estudar a viabilidade do custo do projeto.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

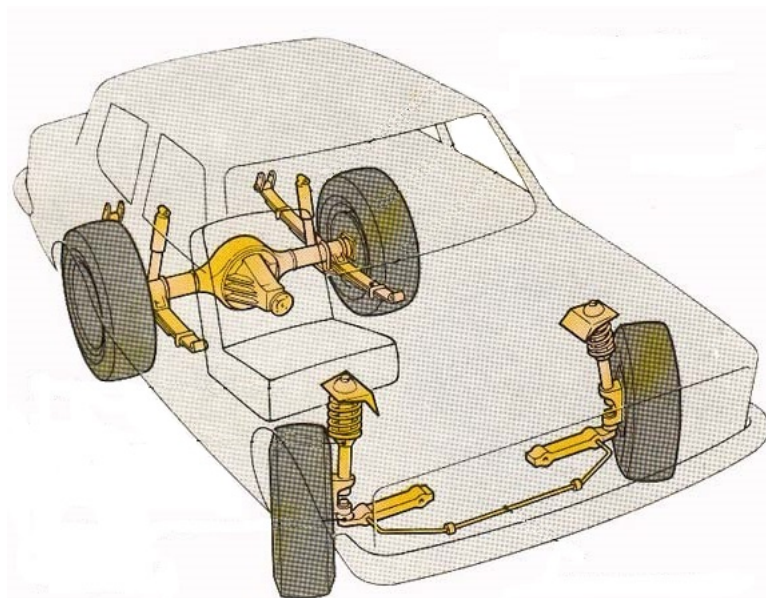
O sistema de suspensão, formado basicamente por um conjunto articulado de mola e amortecedor, tem como um dos principais objetivos diminuir as acelerações verticais transmitidas ao habitáculo do motorista, bem como realizar a aderência do veículo ao solo, gerando estabilidade e segurança ao piloto. O projetista deve atentar-se ao modelo adequado ao seu projeto, dentre as opções de amortecedores e molas contidas em mercados atuais (ANDRADE, 2013).

Segundo (ROCHA, 2013), a estabilidade é o que garante a segurança durante frenagens e contornos de curvas. Ainda segundo ele, o conforto está diretamente ligado absorção das irregularidades do terreno.

2.2 SUSPENSÃO VEICULAR

Suspensão é um mecanismo utilizado com a finalidade de absorver impactos causados pelo solo, garantindo a segurança, estabilidade, conforto e dirigibilidade dos veículos, e diz respeito a um conjunto de componentes que conectam as rodas com o chassi, como ilustra a Figura 1.

Figura 1 – Suspensão veicular



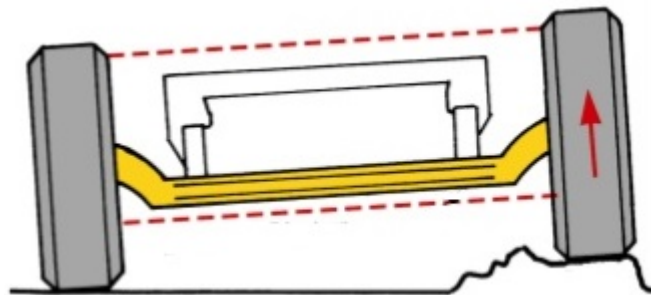
Fonte – (OFICINACIA, 2002)

A escolha do modelo adequado ao projeto tem influência direta na definição dos parâmetros geométricos, bem como nos cálculos estruturais associados à carroceria do veículo. Para isso, faz-se necessário obter o conhecimento dos possíveis tipos de suspensão a ser escolhido para cada finalidade considerando os objetivos de cada aplicação de projeto.

2.2.1 SUSPENSÃO DEPENDENTE

Neste modelo de suspensão, as duas rodas se encontram integralmente ligadas por meio de um eixo rígido, conforme Figura 2, isto é, o impacto sofrido por uma roda é transferido para a outra, produzindo desconforto aos passageiros e interferindo na estabilidade veicular.

Figura 2 – Suspensão dependente

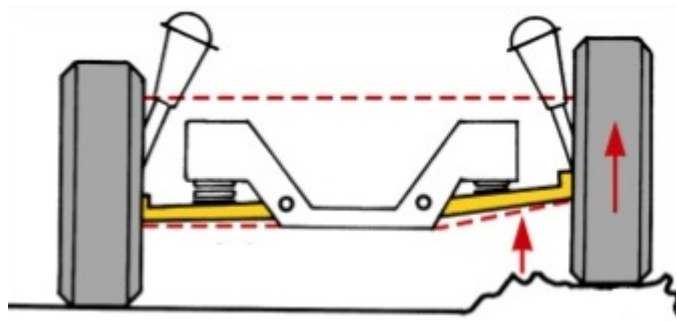


Fonte – (PHAPALE, 2010)

2.2.2 SUSPENSÃO INDEPENDENTE

Já na suspensão independente, uma roda oscila livremente sem influenciar a outra, ou seja, o ângulo sofrido por ela em uma lombada não é transferido para a outra, proporcionando também maior conforto aos passageiros e melhor estabilidade veicular em terrenos irregulares (3).

Figura 3 – Suspensão independente



Fonte – (PHAPALE, 2010)

2.3 SUSPENSÃO DUPLO A

A suspensão Duplo A, também conhecida como *Double-wishbone* é caracterizada como uma suspensão independente. Destacando-se por conter dois braços triangulares, um superior e outro inferior, que se encontram unidos aos demais componentes do sistema de amortecimento como o amortecedor e a mola, entre outros. Utilizadas também em carros de passeios e em veículos *off-road*, tal modelo é exemplificado na Figura 4.

Figura 4 – Suspensão Duplo A



Fonte – (MECHANICSTIPS, 2016)

Sistemas de suspensão Duplo A são frequentemente utilizados em veículos de alto desempenho devido a possibilitar ajustes minuciosos das principais características relacionadas à dinâmica do trabalho da suspensão (CARVALHO, 2011).

Dentre suas vantagens estão:

- Controle mais preciso do ângulo de camber;
- Baixa vibração transmitida à estrutura do veículo;
- Elementos resistentes;
- Curso útil alongado;
- Possibilidade de configuração sobre-esterçante ou sub-esterçante.

Devido a tais características, o sistema Duplo A é considerado por muitos projetistas como um sistema ideal de suspensão, podendo ser utilizado como suspensão traseira e dianteira (PEREIRA, 2011).

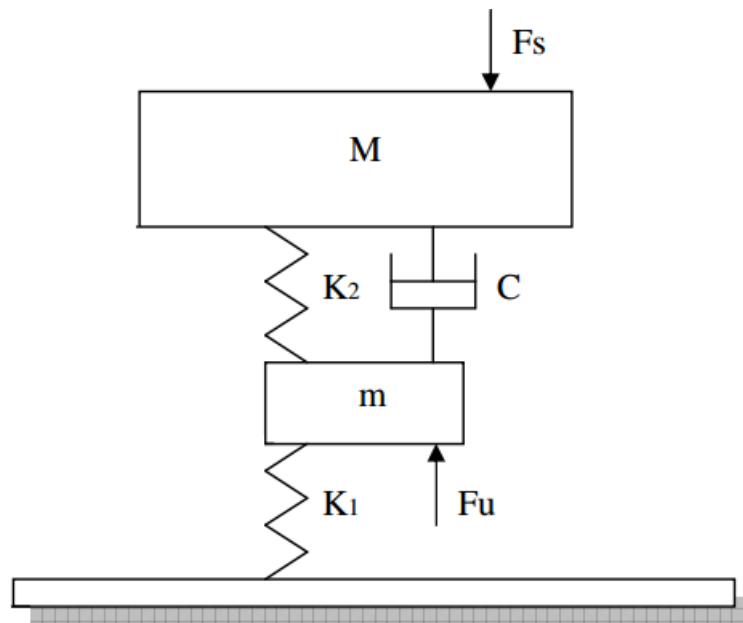
2.4 PARÂMETROS DA SUSPENSÃO

O desempenho de um sistema de suspensão em isolar as vibrações e em propiciar o melhor contato possível pneu-solo pode ser avaliado de forma experimental, utilizando um protótipo físico, mas também de forma teórica, utilizando um modelo dinâmico (FREITAS, 2006).

2.4.1 MODELO DE 1/4 DE VEÍCULO

Dentre os modelos dinâmicos, o mais conhecido e utilizado é 1/4 de veículo, que consiste em simplificar o sistema de suspensão em um conjunto de duas massas, acopladas entre si por um sistema de mola e amortecedor, ligado à pista por uma mola (YAMAGATA, 2012). Tal modelo aparece representado na Figura 5.

Figura 5 – Modelo de 1/4 de veículo



Fonte – (MENDES, 2015)

Onde:

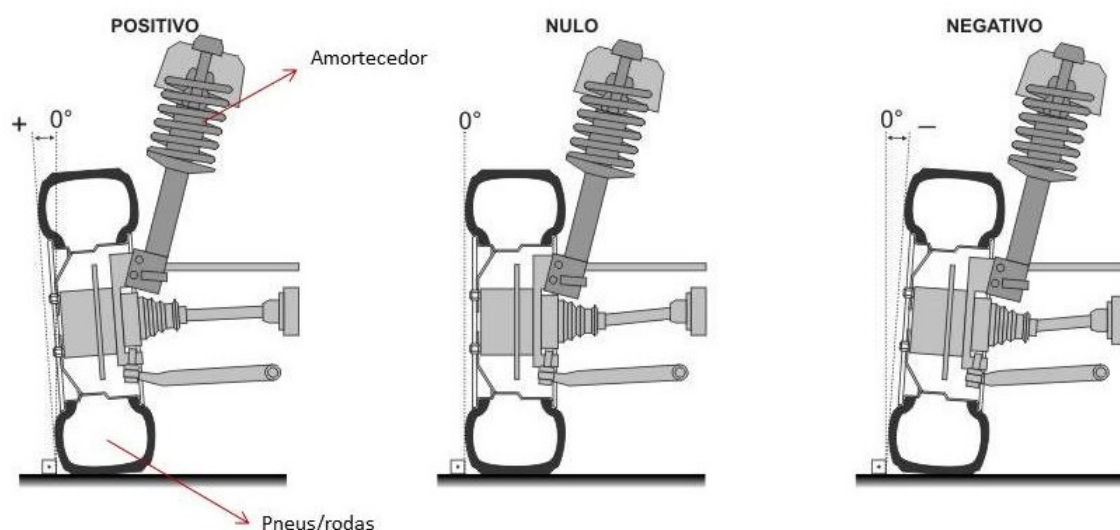
- M** - Massa suspensa
- m** - Massa não suspensa
- C** - Coeficiente de amortecimento da suspensão
- K₂** - Rigidez da mola
- K₁** - Rigidez do pneu
- F_s** - Força atuante na massa suspensa
- F_u** - Força atuante na massa não suspensa

O modelo de $1/4$ de veículo, apesar de simples, é de grande importância para a obtenção de parâmetros iniciais do projeto, tais como os coeficientes de amortecimento, as frequências de ressonância da massa suspensa e da massa não suspensa (RODRIGUES, 2018).

2.4.2 ÂNGULO DE CÂMBER

É o ângulo que corresponde à porcentagem de área do pneu em contato com solo, auxiliando na tração veicular. Quando mal dimensionado gera um desgaste irregular do pneu. O ângulo de câmbor pode assumir valores positivos, negativos ou zero, conforme (Figura 6).

Figura 6 – Ângulo de câmbor

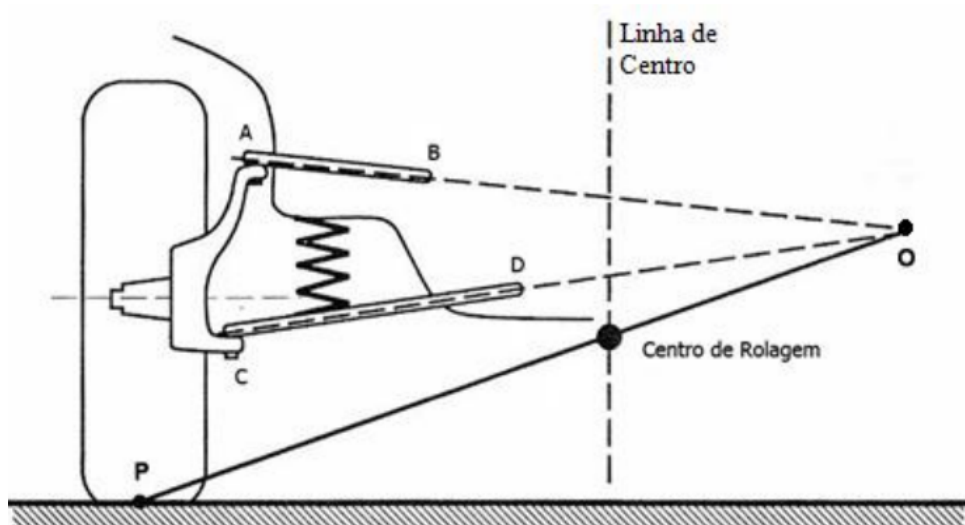


Fonte – (CARUP, 2017)

2.4.3 CENTRO DE ROLAGEM

O termo centro de rolagem ou *Roll Center* (RC) é um importante requisito no estudo de suspensões veiculares. Com o carro transitando em curvas, surgem forças laterais devido à aceleração centrífuga. Estas forças laterais promovem uma reação no pneu devido ao atrito com o solo. O centro de rolagem é um ponto ao redor do qual o veículo tende a rodar ou girar em tais situações (ALMEIDA, 2012). O centro de rolagem é ilustrado na Figura 7.

Figura 7 – Centro de rolagem



Fonte – (ANDRADE et al., 2012)

3 METODOLOGIA

3.1 MÉTODOS

Para melhor desenvolvimento do projeto, o escopo foi dividido em etapas. Inicialmente, foi realizado um levantamento bibliográfico sobre o tema, a partir do qual foi possível determinar a disposição das etapas.

Etapa 1: Pesquisa e desenvolvimento da temática e delimitação dos elementos de contorno do problema;

Etapa 2: Dimensionamento dos componentes - Nesta etapa serão dimensionados o conjunto mola/amortecedor e a estrutura em que estes são fixados;

Etapa 3: Verificação do sistema - Com os componentes dimensionados, serão verificados a integridade do braço, pelo *Software Ansys*, como também a variação do *Roll Center* e ângulo câmber com auxílio do *software Lotus Suspension Analysis*;

Etapa 4: Verificação dos resultados.

3.2 DEFINIÇÃO DA RIGIDEZ E AMORTECIMENTO

Para a determinação dos parâmetros iniciais do projeto, como o coeficiente de amortecimento e rigidez, será utilizado o modelo $1/4$ de veículo, de modo que a rigidez fora obtida através da divisão da fração da força exercida pela massa suspensa sobre o quarto de veículo, sendo calculado pela equação (1).

$$k_r = \frac{M_s \cdot f_d \cdot g}{2L_e} \quad (1)$$

onde M_s é a massa suspensa, f_d é o fator de distribuição de carga e L_e o curso máximo de extensão. Os valores de cada constante serão:

$$\begin{aligned} f_d &= 0,45 \\ M_s &= 180 \text{ kg} \\ L_e &= 80 \text{ mm} \end{aligned}$$

Substituindo os dados na equação, encontra-se a rigidez, k_r :

$$k_r = 6,62 \text{ KN/m}$$

Ainda pelo modelo proposto, o amortecimento do projeto pode ser obtido pela equação (2):

$$C_r = 2\zeta \sqrt{K_r \left(\frac{M_s \cdot f_d \cdot g}{2} \right)} \quad (2)$$

onde os termos da equação são similares à Equação (1), exceto pela taxa de amortecimento (ζ). Segundo Freitas (2006), em condições extremas, tem-se 45% de amortecimento.

$$C_r = 6,16KN \cdot s/m$$

Como a suspensão está intimamente relacionada ao conforto do piloto, é possível determinar a frequência natural do sistema. Segundo (HAPPIAN-SMITH, 2002), o valor aceitável para veículo de competições aproxima-se de 2Hz.

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2K_r}{M_s f_d}} \quad (3)$$

Substituindo os valores na equação, obtém-se o valor de (f_n):

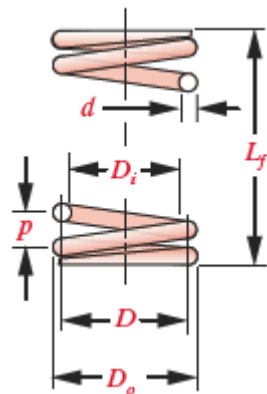
$$f_n = 1.82Hz$$

Já que o valor calculado de f_n abaixo de 2Hz, pode-se afirmar que os parâmetros iniciais para o projeto estão adequados para possibilitar o conforto do piloto durante competições, observando em competições Baja, o conforto tende a ser um aspecto secundário.

3.3 DIMENSIONAMENTO DA MOLA

Para o dimensionamento da mola será utilizado o método empregado por (NORTON, 2013). Os modelos usados para esse tipo de aplicação são molas helicoidais, que deverão ter regulagem a partir da pré-compressão ou extensão, quando houver movimentação dos batentes fixados ao longo do corpo do amortecedor. Esta regulagem é responsável por possibilitar diferentes ajustes. A nomenclatura a ser utilizada no desenvolvimento deste projeto está representada na Figura 8.

Figura 8 – Nomenclatura da mola



Fonte – (NORTON, 2013)

Nomenclatura	Descrição
d	Diâmetro do fio
D_i	Diâmetro interno
D_o	Diâmetro externo
D	Diâmetro médio
L_f	Comprimento efetivo
p	Passo

O dimensionamento da mola tem início pela seleção do material. Existe ampla gama de materiais disponíveis para a fabricação de molas; para o presente trabalho, foi selecionado o material ASTM A228, que apresenta as propriedades necessárias para o projeto. Será utilizado também arame de seção circular, devido o mesmo estar disponível em várias dimensões.

Uma das propriedades a ser consideradas é a resistência a tração, expressa pela Equação (4).

$$S_{ut} = A \cdot d^b \quad (4)$$

onde d é o diâmetro do fio e os termos A e b são coeficientes relacionados ao material.

Para esse projeto foi selecionado d igual a 6mm, sendo que este está relacionado com a resistência à tração mínima do material. Com isso pode ser obtido o valor máximo de S_{ut} . A e b serão iguais a $2153,5MPa$ e $-0,1625$, respectivamente.

$$S_{ut} = 4945,33MPa$$

Após a definição do material, pode-se iniciar a obtenção dos parâmetros geométricos da mola. A razão entre o diâmetro da espira D e diâmetro de fio d , é denominado índice da mola C , expresso pela Equação (5).

$$C = \frac{D}{d} \quad (5)$$

Segundo a (ASSOCIATED-SPRING, 1987), o valor de C , que está relacionado com o desempenho da mola e sua fabricação, deve estar entre 4 e 12. De maneira a obter um resultado intermediário em relação às condições impostas, será utilizado C igual a 8.

Com a equação (5), pode-se encontrar o diâmetro da espira.

$$D = 48mm \quad (6)$$

Relacionando o D com d , pode se obter o valor do diâmetro interno D_i e o diâmetro externo D_o , sendo expressos nas seguintes equações.

$$D_o = D + d = 54mm \quad (7)$$

$$D_i = D - d = 42mm \quad (8)$$

Uma grandeza importante a ser determinada é a rigidez constante da mola K_c , podendo ser calculada pela equação (9).

$$K_c = \frac{i_f \cdot M_s \cdot f_d \cdot g}{2(L_e + 0.5L_{reg} + 5)} \quad (9)$$

onde i_f é o coeficiente de transferência de carga e L_{reg} é comprimento de regulagem para a mola.

Os valores de cada constante serão:

$$\begin{aligned} i_f &= 0,5 \\ L_{reg} &= 100 \text{ mm} \end{aligned}$$

Os valores de M_s , L_e , f_d e g serão os mesmos utilizados na seção anterior. Substituindo os valores na equação (9), encontrando-se K_C .

$$K_c = 38,5 \text{ N/m}$$

Após determinar k_c , é possível encontrar a quantidade de espiras N_t que a mola deverá conter para atingir tal rigidez, sendo calculada pela equação (10).

$$N_t = \frac{d^4 \cdot G}{8D^3 \cdot K_c} + 2 \quad (10)$$

onde G é o modulo de rigidez do material, sendo igual a $80MPa$.

$$N_t = 12$$

Com o N_t determinado, pode-se determinar os valores de comprimento que a mola deve ter, como o comprimento rígido L_{rig} .

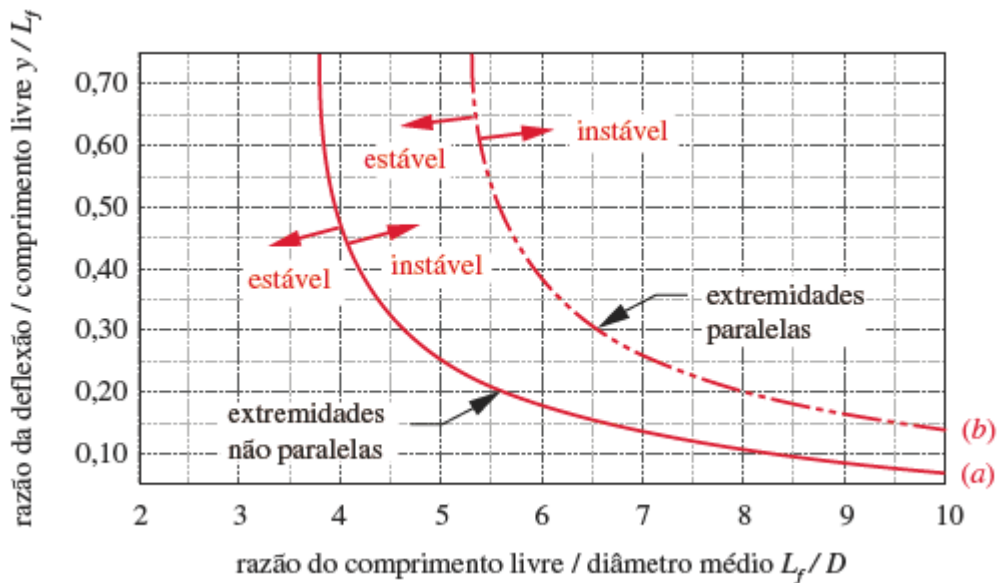
$$L_{rig} = d \cdot N_a = 72mm \quad (11)$$

O comprimento final L_f da mola está diretamente ligado à deflexão que esta sofre quando submetida a uma carga aplicada.

$$L_f = L_e \cdot 0,5L_{rig} + 5 = 139,5mm \quad (12)$$

Quando submetida a um carregamento, a mola se comportará como uma coluna, ou seja, poderá ocorrer flambagem, caso seja muito esbelta. É possível avaliar as condições de estabilidade de molas, em função de suas características geométricas, conforme ilustrado na Figura 9

Figura 9 – Curvas de condições críticas



Fonte – (NORTON, 2013)

Os dois eixos da Figura 9 podem ser obtidos pelas equações (13) e (14).

$$\frac{L_f}{D} \quad (13)$$

$$\frac{y_{max}}{L_f} = \frac{y_{inicial} + y_{trabalho}}{L_f} \quad (14)$$

Através das quais podem ser encontrados os seguintes valores:

$$\frac{L_f}{D} = 2,91$$

$$\frac{y_{max}}{L_f} = 0,356$$

Com os valores obtidos, foi possível verificar a região de estabilidade da mola. Considerando as características geométricas e as forças iniciais, pode-se concluir que este componente está em uma região estável para ser submetido ao trabalho. Definidos os aspectos geométricos da mola.

3.3.1 AMORTECEDOR

Os métodos empregados para o dimensionamento de amortecedores são de difíceis acessos e muito limitados, gerando dificuldades para encontrar dados que poderiam fundamentar resultados conclusivos. Assim, o grupo optou por especificar um amortecedor com base nos resultados obtidos no dimensionamento da mola. A especificação deste componente se encontra no Apêndice A.

3.4 DIMENSIONAMENTO DA ESTRUTURA DUPLO A

O dimensionamento da estrutura parte da melhor forma de se ajustar ao chassi e atender a dimensões estabelecidas do conjunto mola/amortecedor, respeitando também normas impostas pelo regulamento (RSBS, 2019), como o comprimento de largura máxima do veículo.

3.4.1 ANÁLISE ESTRUTURAL

Com parâmetros definidos, como o valor da carga suspensa, é possível a realização de uma análise estática da estrutura por meio do método dos elementos finitos. Utilizando o *software Ansys* avaliou-se sua deformação e a tensão máxima aplicada com veículo imóvel.

O método de análise por elementos finitos é baseado na formação de malhas no material. Assim, foi possível calcular o deslocamento dos nós que ligam tais malhas em função das cargas, bem como as condições de contorno e propriedades do material. Portanto, foram obtidos resultados de deslocamentos e tensões máximas aplicadas sobre o objeto ensaiado.

O material utilizado na estrutura é o aço SAE 1020, cujas seguintes propriedades (Tabela 1):

Tabela 1 – Propriedades SAE 1020

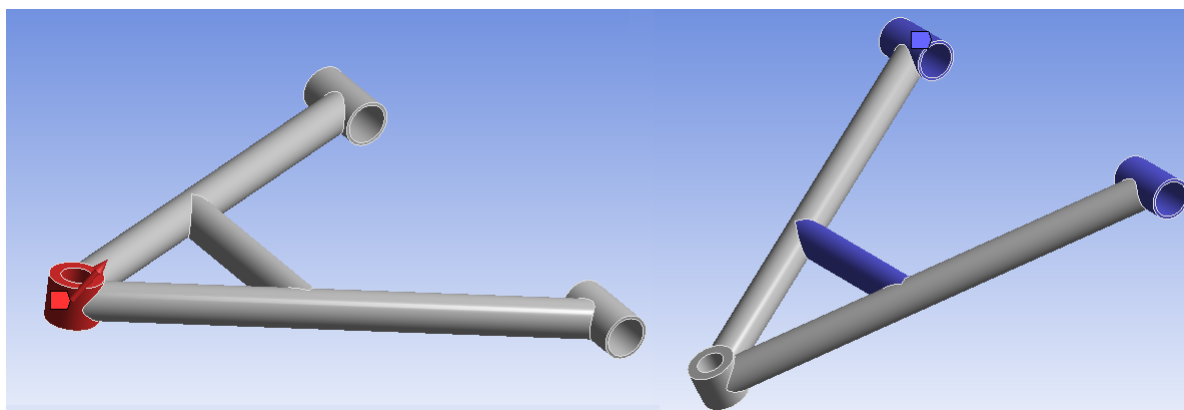
Teor de carbono	0,20%
Módulo de elasticidade	205 GPa
Limite de escoamento	350 MPa
Densidade	7,87 g/cm ³
Resistência a tração	470 MPa

Fonte – (AZO, 2013)

Como se trata de uma análise estática, devem-se levar em conta alguns parâmetros como:

- O braço se encontra fixado nas alças que o ligam ao chassi e no ponto de fixação do amortecedor, ilustrado pela Figura 10 destacado na cor azul;
- A carga é aplicada no ponto de fixação do pivô, ilustrado pela Figura 10 destacado na cor vermelha;
- Tais cargas são provenientes da reação do pneu em contato com solo;
- Os valores das forças aplicadas são provenientes da massa do veículo. O veículo é considerado em queda livre, e dividindo-se este valor por quatro temos a carga atuando na direção Z. Posteriormente, com o veículo em curvas e atentando-se às forças de reação no pneu, novamente é considerada a aceleração da gravidade e a massa total dividida por quatro, considerando a aplicação da força na direção Y.
- Os valores das forças são de 680N nas coordenadas Y e Z;
- Para a verificação da malha e uma melhor qualidade da mesma, foi utilizado os métodos de convergência de malha, desenvolvido também semestre passado por (ARAUJO et al., 2019).

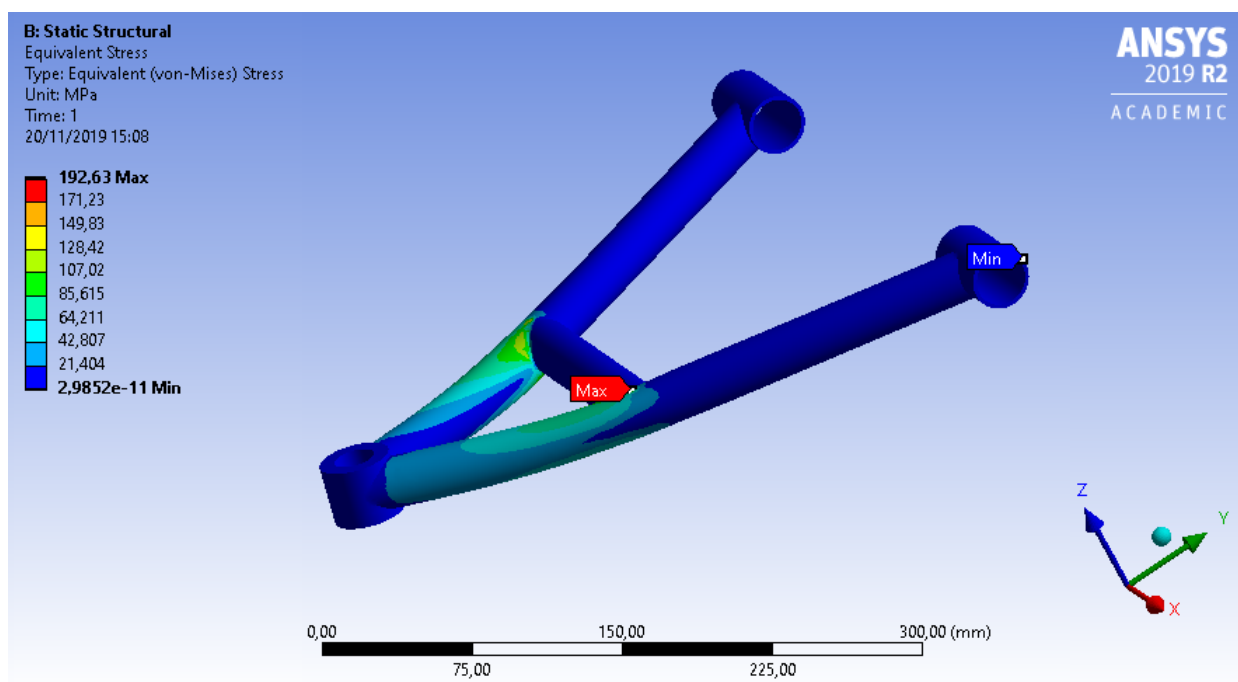
Figura 10 – Condições de contorno



Fonte – Próprios autores

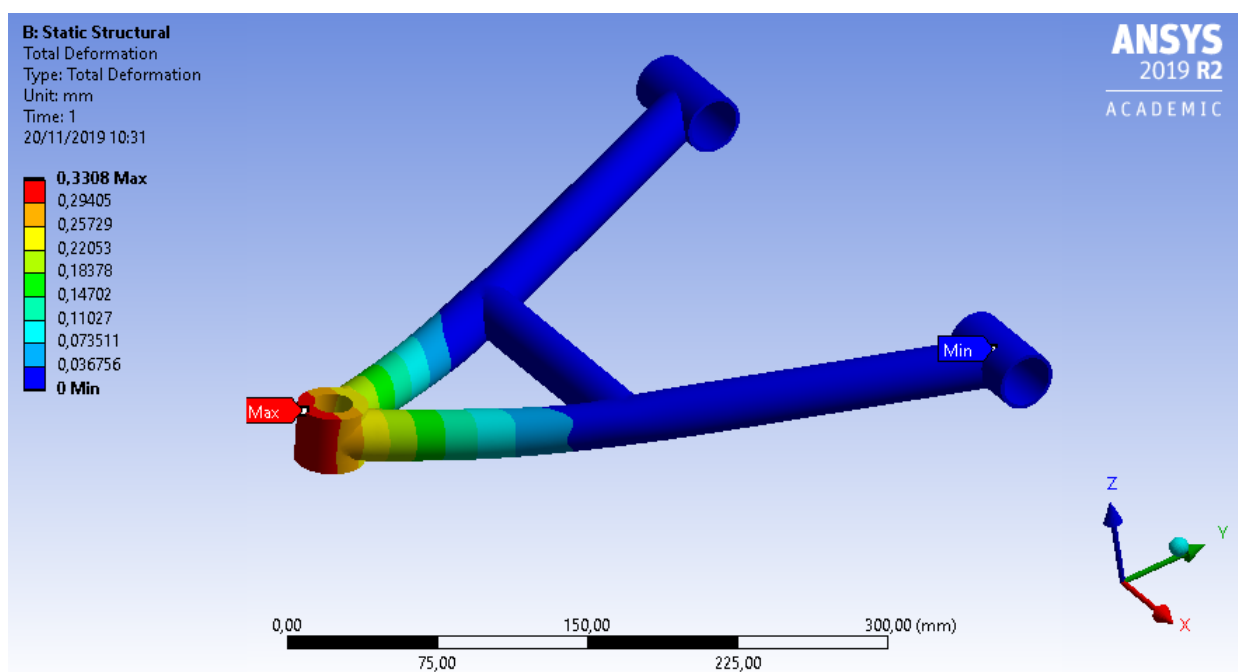
A partir destes parâmetros e dos valores calculados, pode ser realizada uma análise estática (Figuras 11 e 12). Obteve-se como resultados, tensão máxima aplicada de $192,63\text{MPa}$ e deformação máxima de $0,33\text{mm}$.

Figura 11 – Tensão máxima



Fonte – Próprios autores

Figura 12 – Deformação máxima

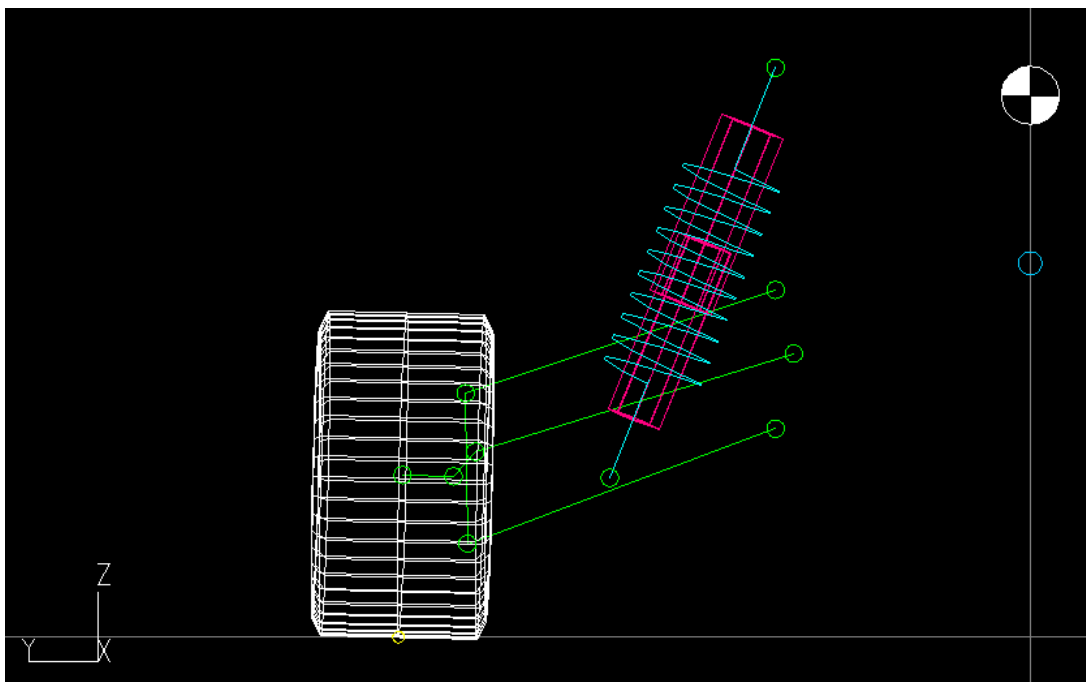


Fonte – Próprios autores

3.5 VERIFICAÇÃO GEOMÉTRICA DO SISTEMA

A verificação geométrica tem o objetivo de verificar o comportamento do *Roll center* e o ângulo de câmber sob amplitudes impostas sobre o sistema, validando as dimensões calculadas neste projeto. Para a análise, foi utilizado o *software Lotus Suspension Analysis*. Primeiro deve-se cotar as dimensões do amortecedor, juntamente com a mola, braços inferior e superior e pneu. A dimensão da manga de eixo será a melhor que se adapta a dimensão do aro utilizado (doze polegadas). O modelo utilizado para a verificação é ilustrado na Figura 13, os resultados obtidos estão na tabela 2.

Figura 13 – Suspensão Lotus



Fonte – Próprios autores

Tabela 2 – Resultados

	Máximo	Mínimo
Variação do <i>Roll center</i>	39cm	2cm
Variação do câmber	-3°	-1°

Fonte – Próprios autores

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Pela utilização do modelo 1/4 de veículo, foram realizados cálculos que permitiram o dimensionamento da mola adequada ao projeto.

Com a realização da simulação estrutural sob condições de competição, foi possível verificar que os valores de tensão máxima residual aplicada é de 192,63MPa. Segundo (HAPPIAN-SMITH, 2002), na pior condição de cargas, a tensão não deverá exceder 67% da tensão de escoamento do material, portanto o coeficiente de segurança mínimo aceito é de 1,5.

$$\sigma \leq \frac{\sigma_e}{1,5} \quad (15)$$

Foi adotado neste projeto um coeficiente de segurança de 1,5 (Equação 15). Para que ocorra critério de falha a tensão aplicada deveria exceder o valor de 233 MPa. Além disso, foi encontrada deformação máxima de 0,33mm, o que pode ser considerado positivo, já que comprova que a suspensão irá absorver grande parte da energia, corroborando os valores encontrados para os braços da suspensão.

A amplitude de variação do *Roll Center* (Tabela 2) se dá pelo fato de o sistema de amortecimento em funcionamento fazer com que também a disposição angular dos braços varie, interferindo na posição do RC. A posição do RC interfere na estabilidade do veículo, principalmente em curvas, onde na pior das hipóteses, se encontra abaixo do solo. O valor mínimo encontrado foi de 2cm, um valor que, apesar de próximo ao solo, atende ao projeto.

A variação do ângulo de câmbor, dentro dos valores encontrados, não chega a ser preocupante para o projeto, pois em terrenos irregulares e curvas, sua tendência é aumentar tendendo a zero. No entanto, deve-se atentar para que, caso o seu valor seja positivo, o que diminuirá sua área de contato com solo em curvas fechadas, prejudicando a estabilidade do veículo.

Figura 14 – Modelo projetado



Fonte – Próprios autores

Com todo o sistema dimensionado e especificado, foi possível elaborar orçamento total do projeto, conforme mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 – Orçamento

Descrição	Valor(R\$)
Mola	350,00
Amortecedor	800,00
Estrutura	150,00
Mão de obra	200,00
Fixadores	50,00
Total	1550,00

Fonte – Próprios autores

5 CONCLUSÃO

O projeto desenvolvido no presente trabalho teve como finalidade o dimensionamento de um sistema de suspensão do tipo *Double-wishbone*, visando alta performance de todo o conjunto quando em de funcionamento, mantendo relação com o chassi já projetado no semestre anterior.

Com o modelo $1/4$ de veículo foi possível encontrar os parâmetros iniciais do sistema de suspensão, sendo utilizados como referência nos cálculos seguintes. A mola dimensionada serviu como base para a especificação do amortecedor, tendo assim componentes disponíveis no mercado.

Os resultados obtidos pela análise estrutural se mostraram satisfatórios, indicando que o sistema, quando em funcionamento, atende aos esforços recebidos, validando a geometria dimensionada. A variação do *Roll Center* se encontra dentro dos padrões impostos, respeitando a altura mínima de zero, medida a partir do solo. A discreta variação do ângulo de câmber também se mostrou suficiente para a validação de todo o sistema de amortecimento.

Com a validação dos componentes projetados e especificados, foi feito um levantamento de custos para aquisição das peças. Por se tratar de elevado valor monetário, o grupo optou por não realizar aquisição e a montagem da suspensão. No entanto, em consulta a com integrantes de outras equipes de BAJA sobre os valores do sistema de suspensão concluiu-se que os custos aqui obtidos são inferiores aos custos informados por tais equipes. De qualquer forma, recomenda-se a aquisição dos componentes e montagem do protótipo, para aquisição de dados e comparação com os valores teóricos calculados.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, D. d. A. Dimensionamento cinemático e dinâmico de suspensão duplo a. 2012. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 11.
- ANDRADE, G. d. O. Dimensionamento geométrico e análise elástocinemática de suspensão automotiva do tipo duplo a. 2013. Citado na página 7.
- ANDRADE, G. d. O. et al. Determinação da posição do centro de rolagem em veículos de competição utilizando ferramentas cad/cae. In: *VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica-CONEM*. [S.l.: s.n.], 2012. Citado na página 12.
- ARAÚJO, J. V. C. et al. *Análise estrutural de chassi para um Mini Veículo Off-road pelo método de elementos finitos*. 2019. Disponível em: <https://www.ifmg.edu.br/arcs/ensino-1/tai/20191_TAI5_Chassiminibaja.pdf>. Acesso em: 1 de dezembro de 2019. Citado na página 19.
- ASSOCIATED-SPRING. *Desing Handbook: Engineering guide to spring Design*. 1. ed. Bristol: Barnes Group Inc., 1987. Unico. Citado na página 15.
- AZO, M. 2013. Disponível em: <<https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=9145>>. Acesso em: 17 de março de 2019. Citado na página 19.
- CARDOSO. *Estudo do Comportamento do Chassi de Veículo em Espuma Metálica Submetido a Tese de Impacto*. 2010. Disponível em: <ArtigodeperiódicopublicadonoDesign&Tecnologia>. Acesso em: 6 de abril de 2019. Citado na página 5.
- CARUP. *ALINHAMENTO, BALANCEAMENTO, CÂMBER E CÁSTER*. 2017. Disponível em: <<https://autocarup.com.br/alinhamento-balanceamento-caster-e-camber>>. Acesso em: 28 de setembro de 2019. Citado na página 11.
- CARVALHO, R. O. de. *Dimensionamento de suspensões veiculares para isolamento de vibrações excitadas pela via*. 2011. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/118584>>. Acesso em: 6 de abril de 2019. Citado na página 9.
- FREITAS, L. M. P. *Estudo da dinâmica veicular de uma suspensão veicular do tipo macpherson*. 2006. Disponível em: <<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18149/tde-19012011-114031/publico/DissertacaoMestradoLuisMauro.pdf>>. Acesso em: 3 de novembro de 2019. Citado na página 10.
- GENTA, G.; MORELLO, L. *The Automotive Chassis: Components Design*. 9. ed. Torino: Springer, 2009. v. 1. Citado na página 5.
- HAPPIAN-SMITH, J. *An Introduction to modern vehicle desing*. 1. ed. Wildwood Avenue, Woburn, MA: Butterworth-Heinemann, 2002. Unico. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 22.
- MECHANICSTIPS. *Suspension System*. 2016. Disponível em: <<http://mechanicstips.blogspot.com/2015/07/suspension-system.html>>. Acesso em: 28 de agosto de 2019. Citado na página 9.

MENDES, N. E. de C. *USO DO SIMULINK PARA SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA DINÂMICO DESCRITO POR EQUAÇÕES DIFERENCIAIS*. 2015. Disponível em: <<http://www.abenge.org.br/cobenge/arquivos/3/anais/anais/161118.pdf>>. Acesso em: 7 de novembro de 2019. Citado na página 10.

NORTON, R. L. *Projeto de máquinas*. 4. ed. worcester polytechnic institute, Massachusetts: Bookman, 2013. Unico. Citado 3 vezes nas páginas 14, 15 e 17.

OFICINACIA. *Suspensão*. 2002. Disponível em: <<http://www.oficinaecia.com.br/bibliadocarro/suspensao.html>>. Acesso em: 28 de agosto de 2019. Citado na página 7.

PEREIRA, M. A. S. *Sistema de suspensão do veículo elétrico para coleta seletiva*. 2011. Disponível em: <http://bdm.unb.br/bitstream/10483/3414/1/2011_MarioAugustoSilvaPereira.pdf>. Acesso em: 6 de abril de 2019. Citado na página 9.

PHAPALE. *automobile suspension system*. 2010. Acesso em: 28 de agosto de 2019. Citado na página 8.

ROCHA. *Análise experimental e simulação computacional das forças atuantes na suspensão de um protótipo de formula SAE*. 2013. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10008362.pdf>>. Acesso em: 6 de abril de 2019. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 7.

RODRIGUES, M. C. S. W. *Metodologia de desenvolvimento do sistema de suspensão para um protótipo Baja SAE*. 2018. Disponível em: <http://www.usp.br/ldsv/wp-content/uploads/2014/10/PME2600-PAULO-HIDEKI-YAMAGATA_Artigo_final.pdf>. Acesso em: 7 de novembro de 2019. Citado na página 11.

RSBS. *Regulamento BAJA SAE*. 2019. Disponível em: <<http://portal.saebrasil.org.br/programas-estudantis/baja-sae-brasil/regras>>. Acesso em: 17 de março de 2019. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 18.

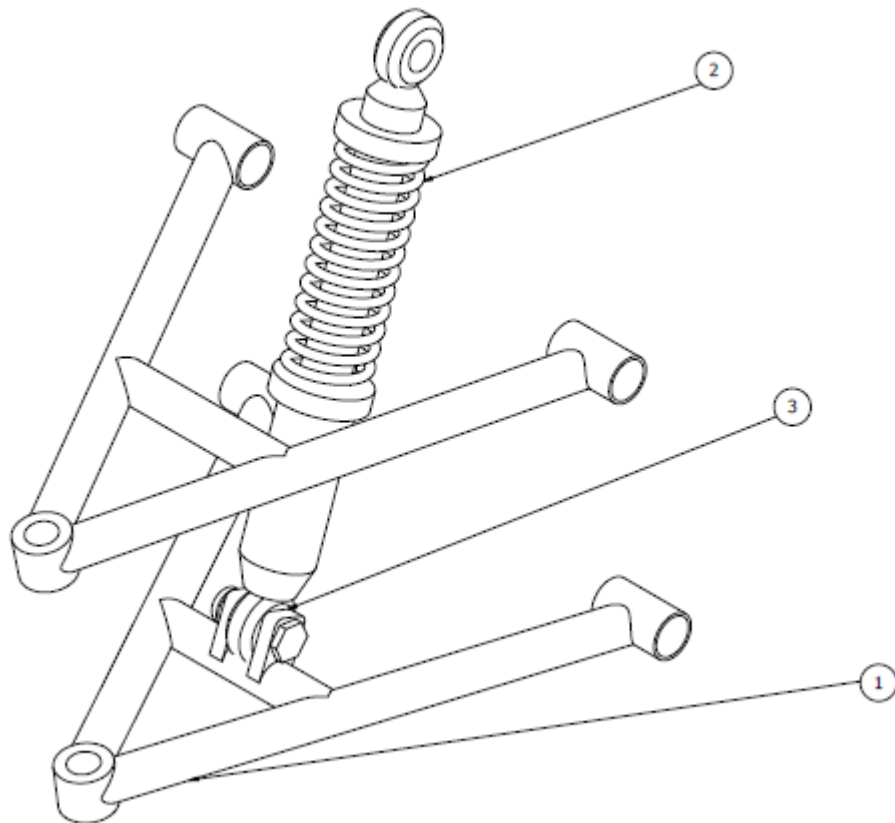
YAMAGATA, P. H. *MODELAGEM DE SISTEMA DE SUSPENSÃO E VEÍCULO BAJA SAE COM SOFTWARE DE DINÂMICA MULTICORPOS*. 2012. Disponível em: <http://www.usp.br/ldsv/wp-content/uploads/2014/10/PME2600-PAULO-HIDEKI-YAMAGATA_Artigo_final.pdf>. Acesso em: 7 de novembro de 2019. Citado na página 10.

APÊNDICE A – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS

ESQUELETO DO SISTEMA DE SUSPENSÃO

Na Figura 15 são identificados os componentes do sistema de amortecimento.

Figura 15 – Esqueleto do sistema de suspensão

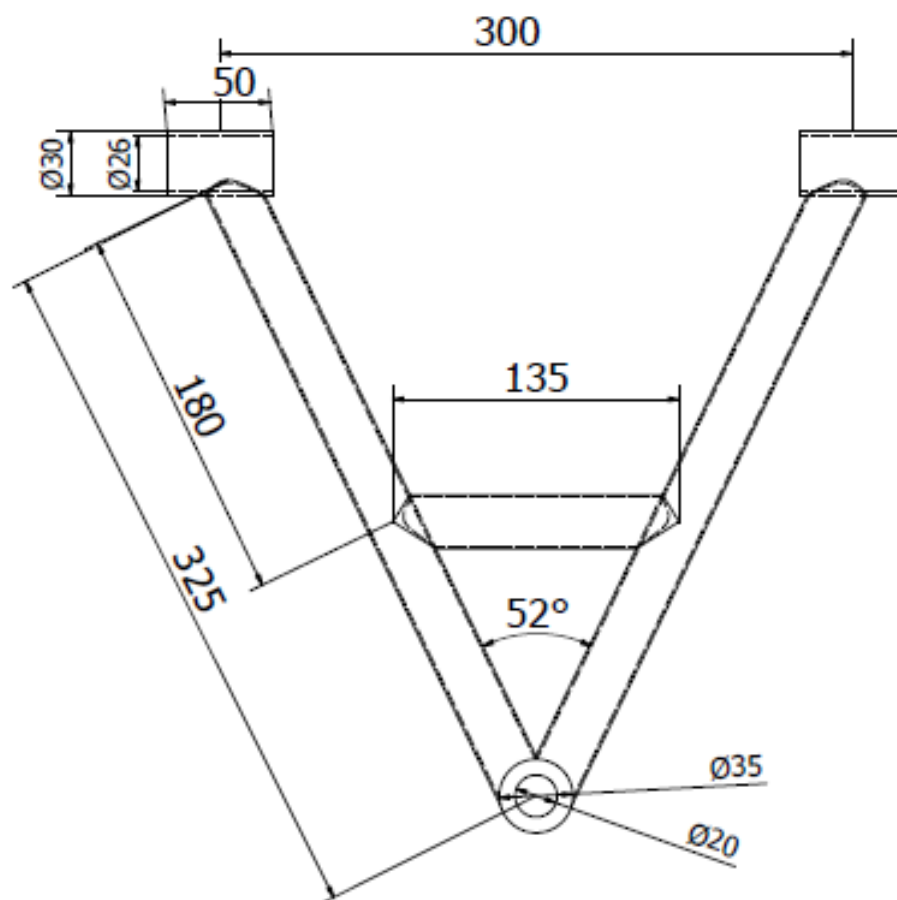


Fonte – Próprios autores

PARTES DO SISTEMA DE SUSPENSÃO

1 - Estrutura - A estrutura é constituída de aço SAE 1020, cujas dimensões são mostradas na Figura 16.

Figura 16 – Dimensões da estrutura



Fonte – Próprios autores

- Braços superior/inferior têm as mesmas dimensões, sendo diferenciados pelo fixador do amortecedor;
- O fixador do amortecedor deve ser fabricado com o mesmo aço utilizado nos braços;
- Junta (Diâmetro x Espessura): $(35 \times 15)mm$;
- Acoplador (Diâmetro x Espessura): $(30 \times 4)mm$.

2 - Mola - A mola é do tipo helicoidal de compressão/extensão, fabricada em ASTM A228, com o diâmetro do fio de 6 mm . Seus aspectos geométricos são detalhados na Tabela 4.

Tabela 4 – Dados da mola

Descrição	Detalhes
Diâmetro interno	42mm
Diâmetro externo	54mm
Diâmetro médio da espira	48mm
Comprimento	139,5mm
Número de espiras	12
Rigidez	38,5N/m

Fonte – Próprios autores

3 - Amortecedor - O amortecedor utiliza óleo como fluido de trabalho e sua haste deverá ter folga de 10 mm do diâmetro interno da mola. Sua especificação está detalhada na Tabela 5:

Tabela 5 – Dados do amortecedor

Descrição	Detalhes
Comprimento da haste	140mm
Amortecimento	2000N · s/m
Comprimento total	330mm

Fonte – Próprios autores

O comprimento total do amortecedor pode ser controlado com uma mola que apresenta regulagem, sendo possível diminuir seu curso durante a extensão/compressão.

APÊNDICE B – MANUAL DE INSTALAÇÃO

1.1 - Procedimentos iniciais:

- A instalação dos componentes devem ocorrer em um local apropriado, que deve ter estar limpo, possuir piso emborrachado e ferramentas específicas;
- Todos os componentes deverão ser inspecionados quanto a sua integridade, de maneira a identificar possíveis danos; componentes defeituosos deverão ser substituídos.

1.2 - Montagem do conjunto mola/amortecedor:

- Antes de realizar o acoplamento da mola no amortecedor, deve-se verificar a existência de óleo na câmara, para isso deve ser feito o movimento de descer e subir a haste até o final;
- Com a mola acoplada ao amortecedor é possível efetuar o aperto da porca de fixação;
- O conjunto deve ser sempre mantido na posição vertical.

1.3 - Fixação dos componentes:

- Inicialmente deve-se fixar a estrutura da suspensão no chassi, atentando-se ao alinhamento deste;
- Em seguida deve-se fixar o conjunto mola/amortecedor, começando com parte superior e depois com a inferior, sendo utilizados parafusos com diâmetro do acoplamento do amortecedor;
- Verificar o posicionamento, de maneira que estejam de acordo com o projeto;
- Verificar se os componentes estão todos bem fixados; caso necessário, realizar o aperto apropriado.