

PROJETO DE MODELAGEM E DIMENSIONAMENTO DE UMA MANGA DE EIXO PARA UM MINI-BAJA SAE

Caio Ramos de Menezes (Equipe Siará Baja - UFC) E-mail: caiomenezes470@gmail.com
Roberto de Araujo Bezerra (Laboratório de Vibrações - UFC) E-mail: roberto.bezerra@ufc.com
Rômulo do Nascimento Rodrigues (Laboratório de Vibrações - UFC) E-mail: rrodrigues@ufc.com

Resumo: O mini-baja é um veículo off-road monoposto que são destinados a competições universitárias ou para lazer próprio. O mini-baja alia a tração e velocidade para atingir bons resultados nas competições da SAE (Society of Automotive Engineerings). A manga de eixo é um componente fundamental para o veículo, pois embarca três subsistemas em sua estrutura (freio, suspensão e direção). É necessário a fixação de um suporte na manga de eixo para embarcar a pinça de freio, atuando sobre o disco de freio. A suspensão necessita da conexão dos braços de suspensão com a roda, para posicionar os pontos dos terminais, conforme a definição dos ângulos de alinhamento. A direção deve definir o braço de direção, que rege a geometria de direção, raio de curvatura e ângulos de esterçamento das rodas. O presente trabalho é baseado na modelagem e dimensionamento com base na otimização de um componente utilizado na temporada anterior, com a realização de definições de parâmetros cinemáticos e execução de simulações mecânicas. A pesquisa foi elaborada afim de contribuir com o conhecimento sobre o projeto de dimensionamento e otimização de uma manga de eixo através da discussão dos principais aspectos que devem ser considerados no projeto de uma manga de eixo, sobretudo para os amantes do mundo off-road. Os resultados das simulações apontam que os componentes projetados atendem aos objetivos de projeto e resistem aos esforços provenientes da competição, resultado de uma peça com cisalhamento duplo, componentes fixados por parafusos e adoção do alumínio como material do componente principal.

Palavras-chave: Mini-baja, manga de eixo, alinhamento de roda, duplo A.

MODELING AND DESIGN PROJECT OF A KNUCKLE FOR MINI BAJA SAE

Abstract: The mini-baja is a single-seater off-road vehicle that is intend for university competitions or for leisure. The mini-baja combines traction and speed to achieve good results in SAE (Society of Automotive Engineerings). The knuckle is a fundamental component for the vehicle, because incorporates three subsystems in the structure (brakes, suspension and steering). It's necessary to fix the support on the knuckle to embark the brake caliper, functioning on the brake disc. The suspension requires the connection of the wishbones with wheel, to position the terminals points according to the definition of wheel alignments. The steering must define the steering arm, which conducts the steering geometry, curvature radius and wheel steer angles. This work is based on modeling and design on the optimization of a component used in the previous season, with the definition of kinematic parameters and the execution of mechanical simulations. The work was elaborated in order to contribute with knowledge about the design and optimization of a knuckle through discussion of the main aspects that must be considered in the design of the knuckle, especially for fans of the off-road scenery. The results of the simulations indicate that the components design reaches the goals and resists the efforts resulting from the competition, the result of a double shear part, bolted components and adoption of aluminum as main component material.

Keywords: Mini-baja, knuckle, wheel alignment, double wishbone.

1. Introdução

O programa Baja SAE BRASIL é um desafio lançado aos estudantes de Engenharia que oferece a chance de aplicar na prática os conhecimentos adquiridos em sala de aula, visando incrementar sua preparação para o mercado de trabalho. Ao participar do programa Baja SAE, o aluno se envolve com um caso real de desenvolvimento de um veículo *off road*, desde sua concepção, projeto detalhado, construção e testes. (PROGRAMA ESTUDANTIL BAJA SAE BRASIL, 2015)

O mini-baja busca aliar a tração a velocidade, de modo, a conseguir ultrapassar obstáculos (valas, rampas, pedras, troncos) e alcançar boa performance nas provas submetidas pela comissão organizadora do evento. Portanto, é necessário a materialização de um protótipo leve e robusto.



Figura 1 – Protótipo SB-19 na Competição Regional Nordeste Baja SAE em 2019

De acordo com Gillespie (1992), a suspensão é essencial no comportamento cinemático do veículo, além de ser responsável pela transmissão de força e momentos que são transmitidos pela movimentação da roda para o chassi. Assim suas principais funções são:

- Isolar o chassi dos movimentos provenientes das irregularidades da pista;
- Manter os ângulos de alinhamento de roda;
- Manter os pneus em contato com o solo com variação mínima de carga;
- Reagir sobre a força dos pneus;
- Resistir a tendência de capotamento.

As suspensões são divididas em dois grupos: Suspensões dependentes e independentes. As suspensões dependentes existem uma interligação, através de um eixo entre as duas rodas do eixo, em que o impacto em uma roda afeta na outra, já nas independentes um impacto em uma roda não afeta na outra de mesmo eixo. Geralmente, as suspensões são compostas por molas, amortecedores, bandejas e buchas. (GILLESPIE, 1992)

O sistema de direção dos veículos automotores possui grande importância no comportamento estático e dinâmico. A função do sistema de direção é gerar ângulos nas rodas dianteiras e/ou traseiras em resposta às necessidades impostas pelo condutor para que haja o controle do veículo. (GILLESPIE, 1992)

É estabelecido que os sistemas de direção devem ser mecanicamente operados. Sistemas *steer-by-wire* e sistemas operados hidraulicamente são proibidos. (REGULAMENTO BAJA SAE BRASIL (RBSB 11), 2019)

Existem vários mecanismos que atende o objetivo do sistema de direção, porém, o mais utilizado em um protótipo baja é o sistema pinhão e cremalheira, representado na figura 2, pois é um mecanismo leve, de fácil manutenção e fabricação simplificada em comparação ao sistema de rolete e sem-fim.

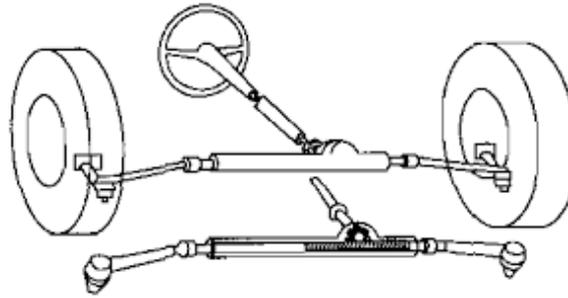


Figura 2 – Sistema de direção pinhão e cremalheira. Adaptado Gillespie

O sistema consiste em um volante que através da coluna de direção leva o movimento de esterçamento até o pinhão, que transforma o movimento rotacional em linear através da cremalheira, e por fim, a ligação feita da cremalheira até o braço de direção localizado na manga de eixo, através da barra de direção, finaliza com o movimento de esterçamento final das rodas.

Cinematicamente, um mecanismo de suspensão de braço duplo A é um link de quatro barras com o chassi como o elo de fixação da roda ao chassi e o elo de controle de direção interligando a manga de eixo até a cremalheira. O amortecedor pode ser instalado entre o braço e o chassi, ou entre o braço inferior e superior. (JAZAR, 2017)

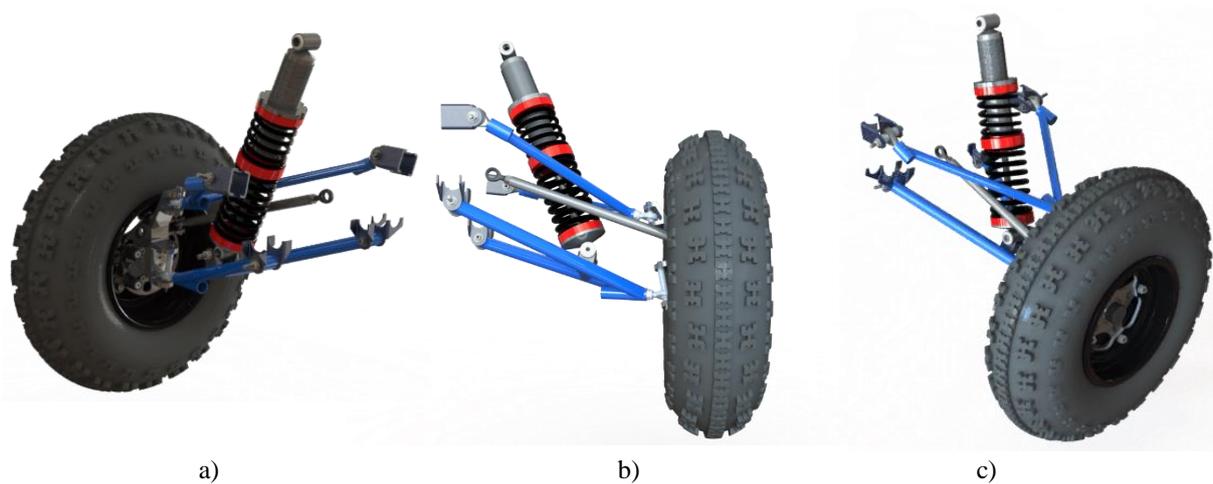


Figura 3 – Geometria dianteira duplo A (protótipo SB-19). a) Vista isométrica (parte interna). b) Vista frontal. c) Vista isométrica (parte externa).

Portanto, é uma geometria que necessita de uma manga de eixo para alocação dos pontos de suspensão, além de ser robusta, não possuir variação de toe com o trabalho de suspensão e permitir diversos ajustes nos sistemas de suspensão e direção. Assim, esses são os motivos de escolha da geometria duplo A, como geometria dianteira do protótipo baja.

O camber pode ser definido como o ângulo entre a roda e um eixo vertical na vista frontal do veículo, ou seja, a inclinação a roda em relação ao eixo ao plano vertical, de modo a ser classificado como: zero, positivo ou negativo. (JAZAR, 2017)

De acordo com Jazar (2017) o KPI (King Pin Inclination) pode ser definido como o ângulo entre os terminais da suspensão com um eixo vertical na vista frontal do veículo, o KPI também é conhecido por ser o eixo de rotação do pneu, ou seja, o movimento de esterçamento das rodas é em relação a esse eixo.

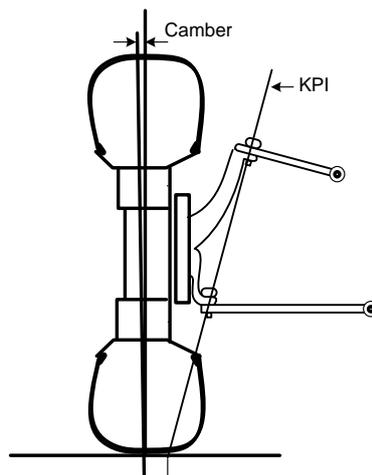


Figura 4 – Representatividade do ângulo de KPI (GILLESPIE, 1992)

O *scrub radius* é a distância entre a prolongação do KPI ao solo e o eixo vertical que passa pelo centro do pneu, tudo isso, visto em uma vista frontal do veículo. O *scrub radius* pode ser negativo, positivo ou mínimo (quando a linha do kpi encontra a linha central do pneu). (JAZAR, 2017)

O caster pode ser definido como o ângulo entre o KPI e um eixo vertical na vista lateral do veículo, de modo a ser classificado como: zero, positivo ou negativo. (JAZAR, 2017)

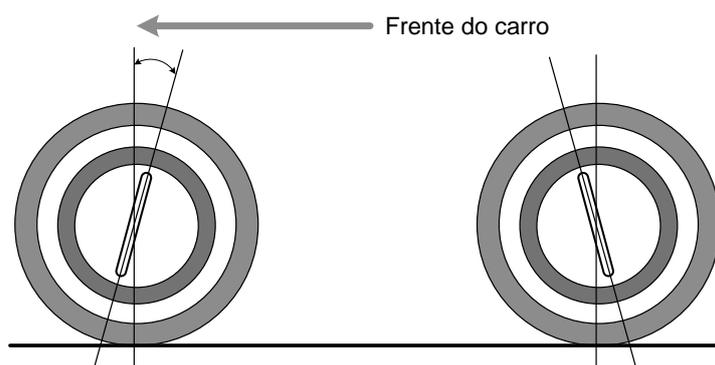


Figura 5 – Representatividade do ângulo de Caster (GILLESPIE, 1992)

O caster é o principal responsável pela mudança de camber durante o esterçamento que influencia no comportamento dinâmico em curvas do veículo, pois essa mudança confere maior aderência do eixo dianteiro permitindo maior liberdade para o eixo traseiro do veículo deslizar, conseqüentemente, o veículo fará curvas de raios menores. Além disso, o caster está diretamente relacionado ao torque de auto alinhamento, que consiste em uma força de reação do pneu com o solo, quando ocorre o esterçamento, resultando em uma reação no volante fazendo com que volte a sua posição inicial, retornando o movimento de esterçamento. O torque de auto alinhamento é bastante comum nos carros *on-road*, como um método de segurança em curvas, fazendo com que o motorista não precise realizar o movimento total de retorno do volante para posição inicial.

O *mechanical trail* é a distância entre a prolongação do caster ao solo e o eixo vertical que passa pelo centro do pneu, tudo isso, visto em uma vista lateral do veículo. O *mechanical trail* influencia diretamente na capacidade da mudança de direção do pneu quando é imposta uma força naquela determinada direção. Sendo um exemplo, a roda do carrinho de supermercado que muda sua direção facilmente para a direção. (JAZAR, 2017)

O toe pode ser definido como o ângulo entre a roda e um plano vertical na vista superior do

veículo, de modo a ser classificado como: *toe-in* ou *toe-out*. *Toe-in* é quando as rodas “apontam” para dentro do carro, já o *toe-out* as rodas “apontam” para fora do veículo. (JAZAR, 2017)

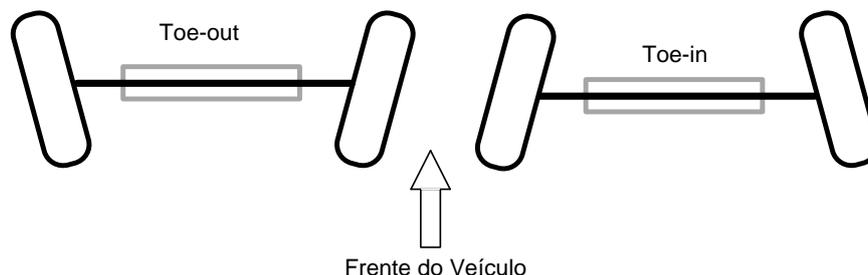


Figura 6 – Representatividade do ângulo de toe (GILLESPIE, 1992)

A manga de eixo é um dos componentes mais importante e complexo de um veículo automotor, o componente embarca três subsistemas em sua estrutura (freio, direção e suspensão). Além disso, o componente que recebe as conexões do chassi a roda do veículo, braços de suspensão e barra de direção, e necessita possuir em sua estrutura suportes para embarcar os sistemas de direção e freio.

Na suspensão, a manga deve receber os pivôs dos braços de suspensão, que interligam a roda ao chassi, e existem dois mecanismos que se localizam nas terminações dos braços e que permitem o movimento da suspensão (birros e terminais rotulares). Em casos de utilização de terminais rotulares, recomendam-se a adoção de cisalhamento duplo na manga de eixo, pois resiste duas vezes melhor aos esforços cisalhantes em relação ao cisalhamento simples, os birros não permitem a utilização de cisalhamento duplo.

Na direção, se faz necessário a utilização de um suporte de direção em que seu posicionamento, comprimento e angulação são fundamentais para definição da geometria de direção, raio de curvatura, ângulo de Ackerman e entre outros. A barra de direção faz a ligação entre o suporte de direção e a cremalheira, e nas terminações da barra há a presença de terminais rotulares, o que reforça a ideia de uso do cisalhamento duplo no suporte de direção, sendo semelhante ao que ocorre na suspensão. No freio, é necessário a adoção de um suporte para a pinça que deve estar posicionada de modo que as pastilhas estejam centradas entre o disco de freio, para que o raio primitivo do disco seja conforme o projetado e o sistema de frenagem atue corretamente no veículo.

Nesse contexto, o intuito deste trabalho é contribuir com o conhecimento sobre o projeto de dimensionamento e otimização de uma manga de eixo, sobretudo para os amantes do mundo *off-road*, pessoas que possuem interesse em dinâmica veicular e bajeiros. Para isso, foram feitas análises de melhorias em um componente anterior, além de estudos de cinemática dos ângulos de alinhamento de roda e simulações mecânicas no componente.

2. Metodologia

2.1 Inicialização do projeto

A realização do projeto seguiu o fluxograma exibido na figura 10, com fases de iniciação de projeto e análise dos projetos anteriores até validações das simulações, fabricação e montagem. É de fundamental importância, que em um projeto de componentes possua uma sequência lógica de ocorrências para que seja fabricado um componente eficiente.

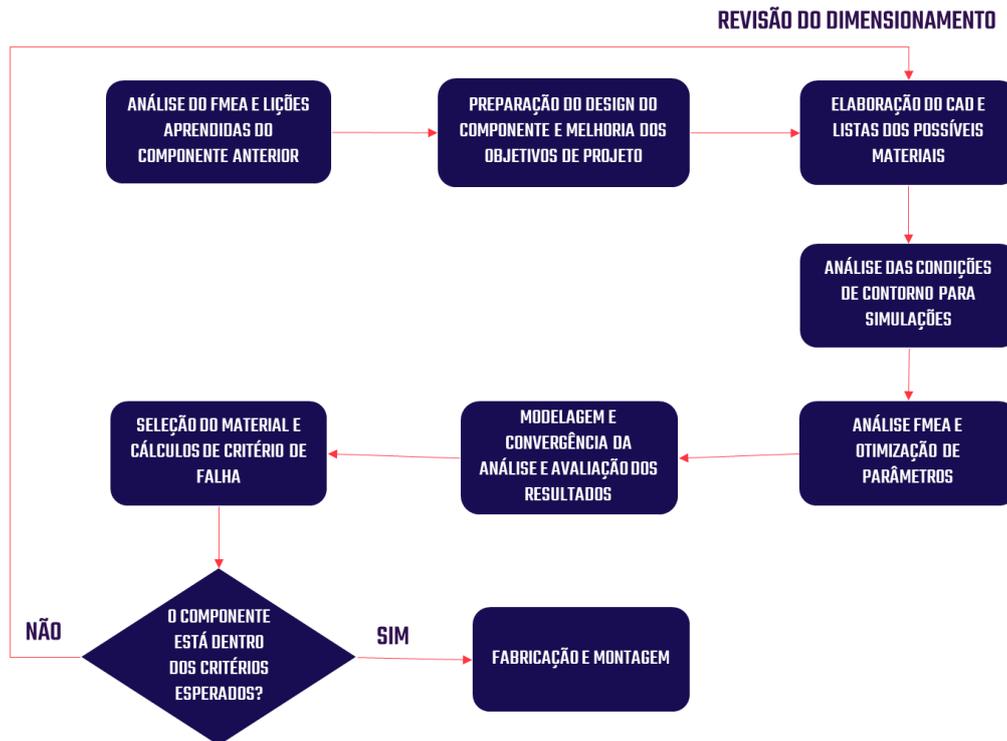


Figura 7 – Fluxograma de projeto

Primeiramente analisou-se a manga de eixo utilizada no projeto anterior, e feito análises por meio da ferramenta FMEA e de documentos de lições aprendidas sobre o componente, de modo, a implementar a melhoria contínua no projeto de dimensionamento do componente.

No projeto anterior, o material da manga de eixo era aço SAE 1020, a peça possuía assimetria, componentes soldados em sua estrutura e cisalhamento simples para receber birros. De modo que, dificultou a manutenção do componente, além do aumento de custos devido à necessidade de fabricação em maquinário CNC e a fabricação de duas peças reservas pela assimetria do componente.



Figura 8 – Manga de eixo SB-19. a) Vista explodida – Montagem da manga de eixo. b) Vista isométrica – Montagem da manga de eixo.

2.2 Definições do projeto

Portanto, após análises cinemáticas no software Adams Car®, foram definidos os ângulos de alinhamento de roda conforme a tabela 1, os ângulos de caster e KPI são definidos pelo posicionamento e angulação dos pontos de suspensão. Esses valores foram escolhidos, para aumentar o fenômeno da mudança de camber com o esterçamento, melhorando o desempenho na saída de traseira.

Tabela 1 – Ângulos de alinhamento de roda escolhidos

Parâmetros	Valor
Caster	15°
Mechanical Trail	74,10 mm
KPI	10°
Scrub Radius	41,20 mm

Fonte: Autoria Própria

Além disso, decidiu-se melhorar o aspecto estrutural, adotando cisalhamento duplo nos terminais de suspensão, utilizar de uma peça simétrica permitindo a capacidade de intercambiar em ambos os lados e fabricação de apenas uma peça reserva, adoção de componentes soldados para evitar concentração de tensão nas regiões soldadas e facilitar a manutenção.

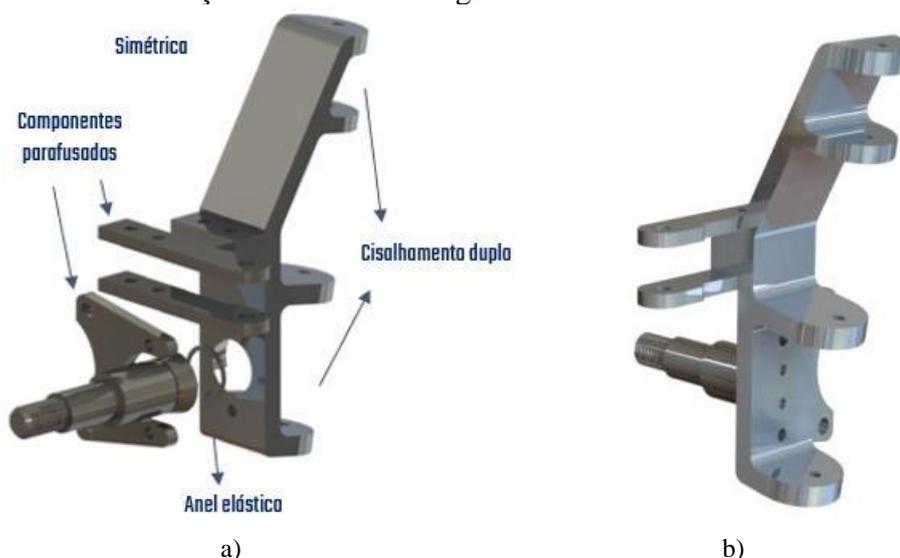


Figura 9 – Manga de eixo SB-20. a) Vista explodida – Montagem da manga de eixo. b) Vista isométrica – Montagem da manga de eixo.

Além das mudanças de geometria, optou-se pela mudança de material de aço SAE 1020 para o alumínio 7075 que possui menor densidade, de modo que a peça se torne mais leve em relação ao componente anterior.

2.3 Condições de contorno das simulações

Para quantificar os esforços atuantes foi feito uma simulação de salto de 1 metro no software CarSim®, afim de simular uma situação ocorrente de salto em rampas nas competições Baja SAE. Foi visto que o pneu sofria uma força de 1350 N em determinado instante do salto, portanto, foi utilizado esse valor aplicado na ponta de eixo e foi fixado os pontos da suspensão e o da direção, proporcionando uma situação mais extrema, de modo, a analisar a resistência do componente.

Para o suporte de direção foi feita a consideração de uma força cisalhante pura resultante do peso total da dianteira do veículo, sendo aplicado no braço de direção. Então, considerando uma massa do veículo de 256 kg e a massa dianteira corresponder a 36% da massa total. Resultando em uma força de 904 N, sendo aplicada diretamente nos furos do braço de direção.

$$F_d = m * 0,36 * g = 256 * 0,36 * 9,81 = 904 \text{ N} \quad (\text{Eq.1})$$

Para o suporte do freio foi aplicado o torque máximo de frenagem de 169 N.m nos furos da orelha e foi analisado a distribuição desse impacto nos componentes.

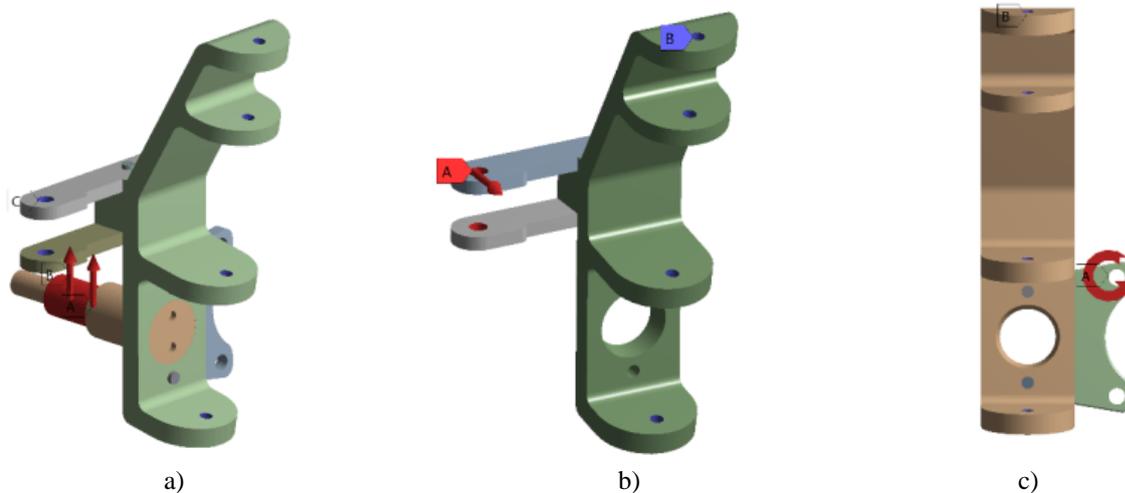


Figura 10 – Forças aplicadas no componente. a) Salto da rampa de 1 metro de altura. b) Força cisalhante no suporte de direção. c) Torque de frenagem no suporte do freio.

3. Resultados e Discussões

Com as condições de contorno definidas foram feitas as devidas simulações, com os três cenários explicitados (salto de 1 metro de uma rampa, força cisalhante no suporte de direção e torque de frenagem no suporte do freio). Optou-se por realizar as simulações de elementos finitos no software Ansys®, e já com a geometria da peça exportada e as condições de contorno definidas, foi feito o refinamento da malha, para que entregue um resultado preciso das cargas atuantes no componente.

Portanto, a malha foi gerada automaticamente para as três condições impostas, e após teve um refinamento pela ferramenta de “Sizing” diminuindo o tamanho do elemento. Na tabela 2, pode-se observar as especificações da malha utilizada na simulação.

Tabela 2 – Especificações da malha

Parâmetros	Valor
Geometria dos elementos	Tetraédricos
Qualidade média	85%
Número de nós	11060072
Número de elementos	7832457

Fonte: Aatoria Própria

Com a malha gerada, optou-se por dois tipos de análises: Estática e fadiga, então foi utilizado o critério de Von-misses e de Goodman, respectivamente. São critérios de falhas bastante utilizados em projeto de máquinas, então, foram geradas as simulações.

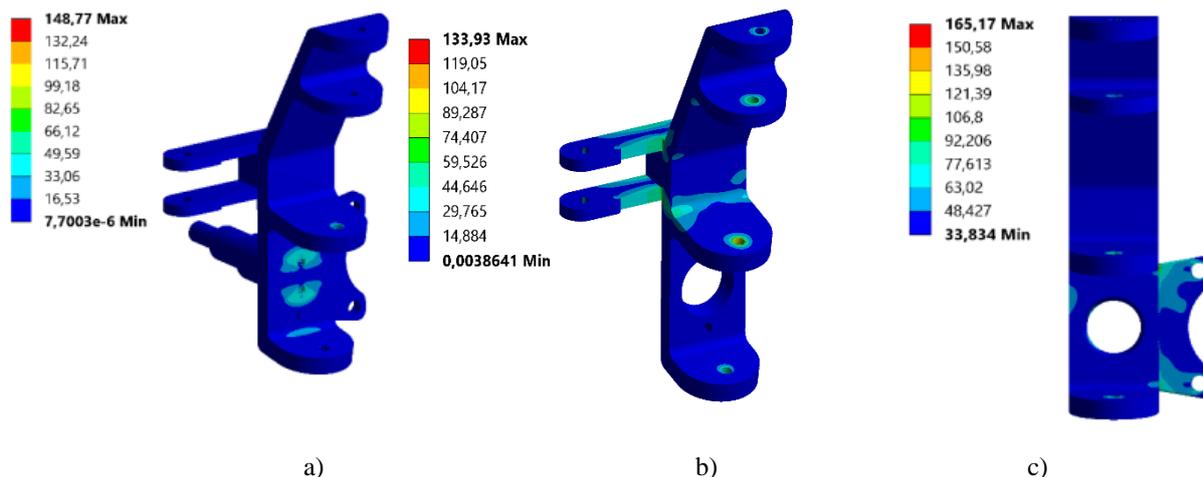


Figura 11 – Simulações de Von-misses. a) Salto da rampa de 1 metro de altura. b) Força cisalhante no suporte de direção. c) Torque de frenagem no suporte do freio.

Para o cálculo do coeficiente de segurança nas condições estáticas, utiliza-se a equação 2.

$$N = \frac{\sigma_{escoamento}}{\sigma_{m\acute{a}x}} \quad (Eq.2)$$

De acordo com Andrade (2002), os coeficientes de segurança são empregados para prevenir incertezas quanto a propriedades dos materiais, esforços aplicados, variações, etc. Dependem então de uma série de requisitos, entre os principais o tipo de carregamentos e o modo de utilização.

Tabela 3 – Coeficiente de segurança (estático)

Componente	Tensão Máxima (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Coeficiente de segurança (estático)
Manga de eixo	148,77	390	2,621
Suporte de direção	133,97	300	2,239
Suporte de freio	165,17	300	1,816

Fonte: Autoria Própria

De acordo com as simulações, em condições estáticas foi obtido valores de coeficientes de segurança bastante satisfatórios, visto que as situações impostas nas simulações são extremas e os valores dos coeficiente de segurança revelam uma boa resistência mecânica aos esforços impostos.

Para a análise de fadiga, se faz necessário um maior detalhamento de dados, pois os esforços variam durante o tempo, de modo que necessita um maior cuidado para definir o coeficiente de segurança e analisar se o componente possui vida infinita ou não para a situação imposta. O limite de fadiga para o material, cuja definição é o nível de tensão abaixo do qual não ocorrem mais falhas por fadiga, podendo-se continuar os ciclos de tensão ilimitadamente, consideramos esse valor de 10⁶ ciclos. (NORTON, 2013)

As resistências à fadiga ou a limites de fadiga obtidos de ensaios com corpos de prova padrão ou de estimativas baseadas em testes estáticos devem ser modificadas para considerar, em seus valores finais, as diferenças físicas entre os corpos de prova e a peça real que está sendo projetada. Esses e outros fatores estão incorporados dentro de um conjunto de fatores de redução da resistência que são, depois, multiplicados pela estimativa teórica para se obter a resistência à fadiga corrigida ou o limite de fadiga corrigido para uma aplicação em particular. (NORTON, 2013)

$$Se = C_{carreg} * C_{tam} * C_{super} * C_{temp} * C_{conf} * Se' \quad (Eq.3)$$

Tabela 4 – Fatores de correção para resistência à fadiga

Fator de correção	Manga de eixo	Suporte de Direção	Suporte de Freio
Carregamento	0,700	0,700	0,700
Tamanho	0,854	0,883	0,869
Superfície	0,878	0,893	0,893
Confiabilidade	0,814	0,814	0,814
Temperatura	1,000	1,000	1,000

Fonte: Autorial Própria

De acordo com Norton (2013), com informações similares para a região de baixo-ciclo, pode-se construir um diagrama S-N para materiais e aplicações particulares. Portanto, com o valor de resistência á fadiga corrido, foi elaborado a curva S-N dos três componentes (manga de eixo, suporte de direção e suporte do freio). É uma curva que representa o valor de resistência a fadiga do material pelo número de ciclos.



Figura 12 – Curva S-N da manga de eixo

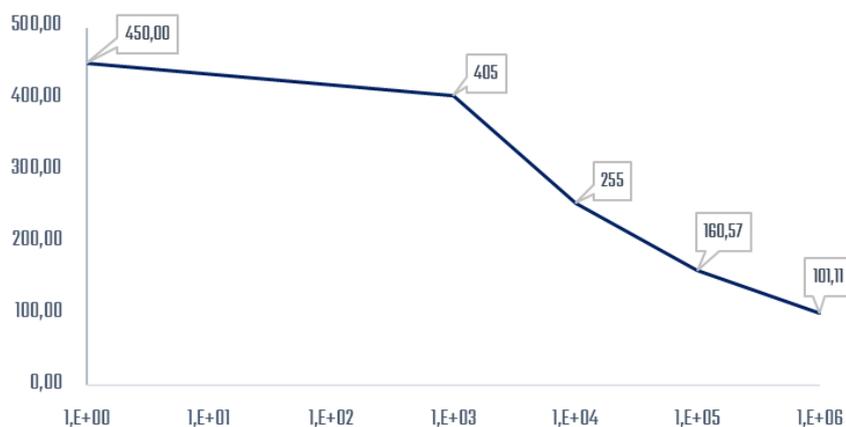


Figura 13 – Curva S-N do suporte de direção

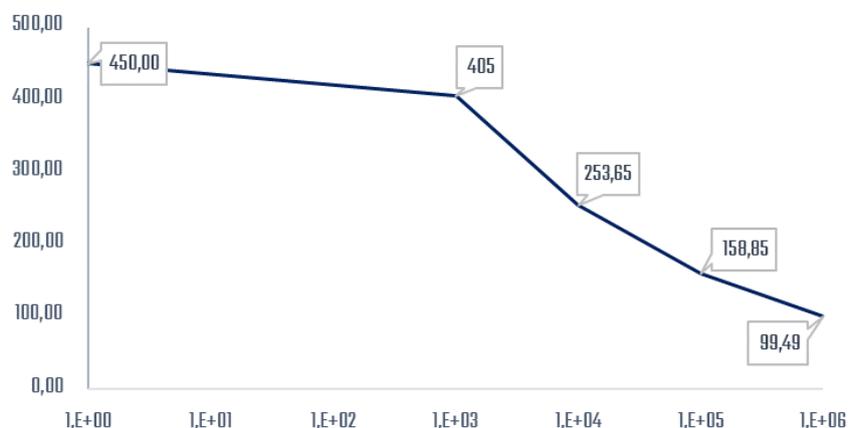


Figura 14 – Curva S-N do suporte de freio

De acordo com a modelagem das curvas S-N de cada componente, pode-se analisar que todos os componentes possuem vida infinita analisando o esforço máximo e visto que a tensão analisada é a tensão alternada. Portanto, é reiterado que os componentes atendem os requisitos funcionais e são resistentes aos esforços impostos. Consequentemente, após todo o processamento dos dados foram feitos os cálculos dos coeficientes de segurança para cada componente.

Tabela 5 – Coeficiente de segurança (fadiga)

Componente	Tensão Máxima (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Coeficiente de segurança (fadiga)
Manga de eixo	165,71	390	1,208
Suporte de direção	133,97	300	1,473
Suporte de freio	170,72	300	1,224

Fonte: Autoria Própria

Com os coeficientes de segurança de fadiga calculados, pode-se analisar também que são aspectos satisfatórios que reiteram as condições de resistência mecânica dos componentes em relação a cargas cíclicas extremas, as quais foram impostas nas simulações.

4. Conclusões

O processo de otimização adotado no projeto de dimensionamento da manga de eixo permitiu avaliar a importância do componente nas condições cinemáticas da suspensão e direção do veículo. A partir das simulações foi visto que o coeficiente de segurança estático da manga de eixo ficou de 2,621 e que possui vida infinita em relação a cargas cíclicas, portanto, pode-se concluir que a manga de eixo e os componentes anexados atendem aos objetivos de projeto e resistem aos esforços provenientes da competição Baja SAE.

Em relação a modelagem, a escolha pela opção com cisalhamento duplo, resultou em uma maior resistência ao cisalhamento nos terminais de suspensão. A adoção de componentes parafusados, facilitou a manutenção da montagem e aumentou a durabilidade dos componentes. A geometria simétrica, permitiu a existência de apenas uma peça reserva lateralmente intercambiável, reduzindo de imediato 25% do custo total. Como resultado final, foi obtido uma manga de eixo e suportes robusto, simétrico, de fácil manutenção e alta resistência, que atendeu todos os requisitos cinemáticos e dinâmicos de projeto.

Referências

- ANDRADE, A. S. “Coeficientes de segurança”, Slides de Aula de Elementos Orgânicos de Máquinas I da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.
- GILLESPIE, THOMAS D. *Fundamentals of vehicle dynamics*. Vol. 400. Warrendale, PA: Society of automotive engineers, 1992.
- JAZAR, REZA N. *Vehicle dynamics: theory and application*. Springer, 2017.
- MILLIKEN, WILLIAM F., AND DOUGLAS L. MILLIKEN. *Race car vehicle dynamics*. Vol. 400. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers, 1995.
- NORTON, ROBERT L. *Projeto de máquinas*. bookman editora, 2013.
- PROGRAMAS ESTUDANTIS BAJA SAE BRASIL. Acesso em 12 de Abril de 2021, disponível em SAE Brasil: <http://portal.saebrasil.org.br/programas-estudantis/baja-sae-brasil>.
- REGULAMENTO BAJA SAE BRASIL 11(RBSB 11) - Avaliação e Pontuação – Emenda 3. Acesso em 12 de Abril de 2021, disponível em SAE Brasil: http://www.saebrasil.org.br/eventos/programas_estudantis/arquivos/Baja_2019_RBSB_9__Avaliacoes__Pontuacao_-_Emenda_3.pdf.

ANEXO

Lista de Símbolos

Fd – Força atuante no suporte de direção (N)	m - massa do veículo (kg)
g - gravidade (m/s^2)	Ccarreg – Fator de carregamento
N – coeficiente de segurança	Ctam – Fator de tamanho
σ escoamento – Limite de escoamento (Mpa)	Csuper – Fator de superfície
σ_{max} – Tensão máxima da simulação (Mpa)	Cconf – Fator de confiabilidade
Se – Resistência à tração corrigido (Mpa)	Ctemp – Fator de temperatura
Se' – Limite de fadiga estimado (Mpa)	