

DIMENSIONAMENTO E MODELAGEM DE UMA SUSPENSÃO PARA UM CARRO FORMULA SAE

Gabriel Moura Araújo¹, Marcio Furukava²

Resumo: A indústria automobilística, seja no contexto urbano ou competitivo, experimenta um crescimento incessante, impulsionado pela aplicação contínua de novos investimentos em tecnologias voltadas para a otimização da eficiência e a redução dos custos associados aos seus produtos. No âmbito competitivo universitário, os veículos Formula SAE evoluem ao longo dos anos, demandando constantes atualizações tecnológicas para superar limitações e competir de maneira eficaz. Muitas dessas inovações são inspiradas por competições de maior envergadura, tais como a Formula E e a Formula 1. Para alcançar posições destacadas nessas competições, aprimoramentos contínuos são aplicados a todos os sistemas do veículo. Tanto em veículos de uso urbano quanto em cenários competitivos, cada componente deve ser dimensionado de forma precisa, permitindo que o usuário extraia o máximo desempenho com segurança. Um exemplo notável é o sistema de suspensão, cujos objetivos incluem a redução dos impactos provenientes de irregularidades no terreno e a manutenção da altura em relação ao solo durante a aceleração e frenagem do veículo. Cada elemento do sistema de suspensão desempenha um papel específico nesse contexto. O presente trabalho propõe-se a modelar e dimensionar cada componente que integra o conjunto de suspensão de um veículo do tipo Formula SAE. Durante a fase de dimensionamento, serão abordados detalhadamente parâmetros essenciais para assegurar a eficiência do sistema. Aspectos como ângulo de câmbio, centro de rolagem, ângulo de king pin, curso de mola, entre outros, serão minuciosamente discriminados e calculados com base em equações e dados provenientes das principais fontes bibliográficas sobre automobilística e dinâmica veicular. A segunda fase do trabalho consistirá na modelagem, onde os resultados obtidos serão integrados às normas estabelecidas pelo regulamento das competições SAE. Nesse estágio, cada elemento do conjunto de suspensão será construído, sempre buscando a minimização do peso, redução dos custos e otimização da eficiência. O software SolidWorks será empregado para modelar e determinar a posição e a orientação de cada peça, possibilitando a realização da montagem e de testes estáticos e dinâmicos através do uso do software de elementos finitos, ANSYS Student. Ao término deste estudo, após o dimensionamento apoiado em bibliografia especializada e documentos de referência, espera-se alcançar valores adequados nos parâmetros previamente mencionados. A meta é desenvolver um sistema de amortecimento eficiente, capaz de atender a todos os requisitos de segurança e estar em conformidade com as regulamentações estabelecidas para o evento.

Palavras-chave: *suspensão, modelagem, automobilismo, dimensionamento, FSAE.*

1. INTRODUÇÃO

A indústria automobilística, tanto em contextos urbanos quanto competitivos, está em constante evolução, impulsionada pela busca por eficiência e desempenho aprimorados. No cenário de competições estudantis, como a Formula SAE, equipes de estudantes de engenharia enfrentam o desafio de projetar e construir veículos de alto desempenho que atendam aos rigorosos critérios de segurança e eficiência. Nesse contexto, o sistema de suspensão desempenha um papel fundamental, pois é responsável por absorver irregularidades do terreno e manter a estabilidade do veículo durante manobras em alta velocidade.

A Sociedade de Automobilismo e Engenharia ou SAE, é fruto da vontade de empresas e grandes profissionais em incentivar novas mentes a ingressarem no ramo da engenharia ligada ao automobilismo e aeromodelismo, buscando o aperfeiçoamento e criação de tecnologias para trazer mais segurança e desempenho dos transportes aéreos e terrestres, com essa ideia em mente, decidiram que a melhor forma de incentivo era através de competições em equipe, surgindo assim as competições SAE por todo o mundo. Dentro dessas competições, para abranger todo o foco de pesquisa, a SAE decidiu subdividi-la em quatro categorias, sendo o Fórmula uma delas e dividida entre combustão e elétrico. A categoria Fórmula surgiu pela carência de engenheiros focados em carros de alta performance, obrigando as grandes marcas a investirem em busca de novas ideias e tecnologias, direcionando as equipes a buscarem criar um carro cujo foco seja o alto desempenho em conjunto com menor consumo energético, seja de origem fóssil ou elétrica.

Este trabalho busca responder à seguinte pergunta: Como desenvolver um sistema de suspensão para um veículo de competição Formula SAE que maximize a estabilidade, o conforto e a eficiência estrutural em condições de alta carga? A resposta a essa pergunta foi estruturada por meio de uma metodologia que envolve o dimensionamento dos parâmetros críticos de suspensão, modelagem dos componentes em software de CAD e testes estruturais para validar o sistema.

O objetivo do estudo é modelar e dimensionar o sistema de suspensão para um veículo Formula SAE, de forma que ele suporte as condições extremas encontradas em competições. Para alcançar esse objetivo, parâmetros essenciais como ângulo de câmbio, centro de rolagem, ângulo de caster e curso de mola foram calculados com base em referências consolidadas e simulações dinâmicas. Posteriormente, esses parâmetros foram utilizados na modelagem tridimensional dos componentes, garantindo que o projeto final atendessem aos requisitos de desempenho, segurança e conformidade com as normas da competição.

2. SUSPENSÃO VEICULAR

Segundo Gillespie (1992) [4], as principais funções da suspensão são:

- Providenciar conformidade vertical para que as rodas acompanhem as irregularidades da estrada, isolando o chassi de imperfeições da pista.
- Manter as rodas no alinhamento adequado e o ângulo de *camber* em relação ao solo.
- Reagir controlando as forças longitudinais resultantes produzida pelos pneus (Aceleração e frenagem), forças laterais (Curvas fechadas), frenagens e torções.
- Resistir a rolagem do chassi.
- Manter os pneus em contato com o solo com a menor variação de cargas.

Com esses parâmetros e com as evoluções das tecnologias no decorrer dos anos, o sistema de suspensões se dividiu entre: Suspensão independente e suspensão dependente ou de eixo-sólido segundo Gillespie (1992) [4].

2.1 Suspensões Dependentes

A suspensão dependente ou de eixo-sólido possui 3 tipos mais conhecidos, que são:

2.1.1. Hotchkiss

Segundo MILLIKEN (1995) [1], é o tipo de suspensão dependente mais antigo utilizado nos dias de hoje, composto por um eixo com um par de molas longitudinais (Imagem. 1) onde ela não funciona apenas como mola, mas também se localiza lateralmente com o eixo do veículo, reagindo ao torque proveniente da aceleração e frenagem.

Esse tipo de suspensão, por ser mais antiga, conta com alguns pontos importantes a serem discutidos antes de ser utilizada, pois apesar de ser um conjunto bastante resistente e que, dependendo do número de molas, aguenta uma carga muito maior que as demais, cinematicamente falando, os cálculos se tornam mais complexos que as demais, pois segundo MILLIKEN (1995, p.661) [1] o centros de rotação do controle das molas e do centro da roda podem se desencontrar, dependendo da carga no momento em que for realizada a medição. Esse tipo de suspensão comumente é usado como suspensão frontal de caminhões que recebem muita carga e realizam muito trabalho e apesar de conter pontos positivos, esse não é utilizado nas corridas modernas.

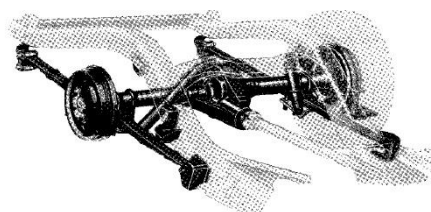


Imagem 1. Suspensão Hotchkiss. ([4] Gillespie)

2.1.2 Four Link

Conhecida também como suspensão de quatro barras (Imagem 2), surgiu como resposta aos problemas encontrados na suspensão *hotchkiss* e veio como principal escolha para carros grandes e de tração traseira (Gillespie, 1992) [4], nesse tipo de geometria, as quatro barras trabalham completando uma à outra, onde, segundo Gillespie (1992) [4] os braços inferior proporciona controle longitudinal do eixo, enquanto os superiores absorvem tanto o torque proveniente de frenagem e aceleração quanto as forças laterais, essa geometria pode utilizar molas helicoidais ou molas à ar, evitando o fator de atrito que existia no sistema de molas longitudinais, assim como o eixo de rolagem e de roda se mantem alinhados.

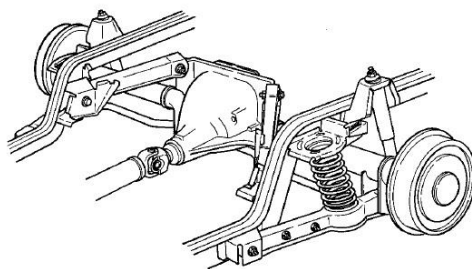


Imagem 2. Suspensão *Four Link*. ([4] Gillespie)

2.1.3 De Dion

Essa está no limite entre a suspensão dependente e a independente, é um sistema de suspensão criado e patenteado pelo Conde de Dion e George Bouton em 1894 (Imagem 3), onde o modelo condiz em uma barra de latão, ligada horizontalmente entre as rodas e tirando o diferencial do eixo e fixando no chassi, reduzindo o peso sobre o diferencial. A barra, assim como os outros dois sistemas, tem como função dissipar as forças provenientes do torque de frenagem e aceleração e as resultantes laterais, pela semelhança com as geometrias anteriores, esse sistema pode ser utilizado tanto com molas longitudinais como com molas helicoidais ou pneumáticas, gerando uma liberdade de construção e uma escolha entre maior capacidade de carga axial ou redução de peso do sistema.

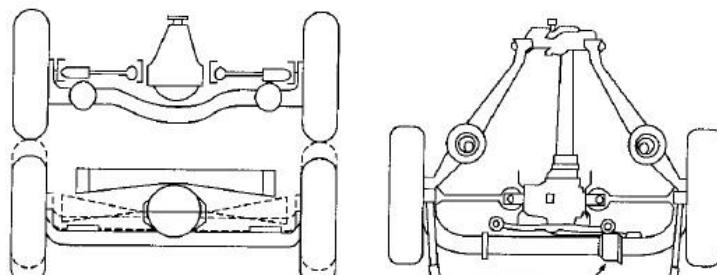


Imagem 3. Suspensão De Dion. ([4] Gillespie)

2.2 Suspensões Independentes

As suspensões do tipo independente compõem uma vasta lista, contendo diferentes tipos de ideias e direcionamentos, essa geometria começou a ser usada no começo do século 20 e segundo Gillespie (1992) [4] Maurice Olley merece a maior parte do crédito, pois foi ele quem reconheceu que esse modelo diminuiria ou resolveria grande parte dos problemas encontrados no sistema de eixo rígido, como a facilidade em encontrar o centro de rolagem quando é escolhido o tipo de geometria de controle dos braços. Sistemas de suspensão independentes são aqueles onde o movimento de uma das rodas não afeta o movimento da outra em um mesmo eixo. Os sistemas independentes mais simples e mais utilizados em veículos são McPherson e Duplo A, e ambos podem ser modelados cinematicamente por um mecanismo de quatro barras ou variações do mesmo (JAZAR, 2009) [2].

2.2.1 Suspensão Tipo Duplo A

Consiste em duas ligações transversais (braços de suspensão) de cada lado do veículo (Imagem 4), que são montadas para oscilar no chassi ou na subestrutura da suspensão e, no caso do eixo dianteiro, são ligadas nas extremidades a articulações da direção ou a terminais rotulares através de juntas esféricas (Reimpell *et al.*, 2001) [3].

As suspensões de tipo duplo A, possui a vantagem da variedade de disposição de seus componentes em relação aos mesmos, podendo possuir geometrias diferentes em cada roda ou na parte frontal e traseira, como é mais usada, podendo modificar parâmetros como *camber*, centro de rolagem e ângulos de *anti-dive*.

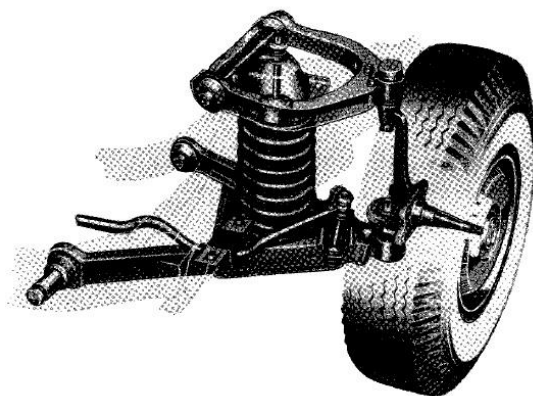


Imagem 4. Suspensão Duplo A ([4] Gillespie)

2.2.2 Suspensão Tipo MacPherson

Segundo Gillespie (1992) [4], esse tipo de suspensão foi criado por Earle S. Macpherson, e é semelhante a duplo a, porém consistia em um amortecedor e na adição de um membro telescópico com sua parte superior fixa ao chassi e sua parte inferior ligada ao conjunto de roda (Imagem 5), com isso, esse sistema consegue evitar a variação do ângulo de *camber*. Porém, devido a concentração de todas as forças nesse ponto do sistema, que geravam grandes impactos no pistão, foi necessário adicionar uma mola para dissipar os impactos.

A vantagem desse sistema é que, segundo Reimpell *et al.* (2001) [3], todos os componentes podem ser ligados em uma só montagem e que providenciam melhor controle do veículo.

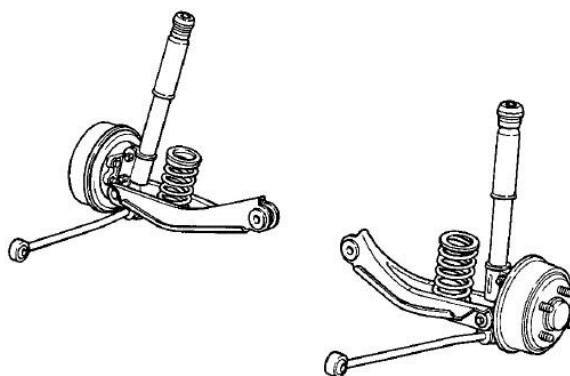


Imagem 5. Suspensão MacPherson ([4] Gillespie)

2.3 PARÂMETROS DE SUSPENSÃO

Muitos são os parâmetros que devem ser avaliados e dimensionados em uma suspensão, como por exemplo, *Caster*, *camber*, *kingpin* ou pino mestre, centro de rolagem e ângulo de convergência, esses valores influenciam diretamente no desenvolvimento e na performance do veículo, por isso, foi necessária a avaliação minuciosa de cada um. A função de alguns deles é a seguinte.

2.3.1 Centro de Rolagem

Segundo Reimpell *et al.* (2001) [3], o centro de rolagem é uma linha imaginária, na vertical, que passa nos centros dos eixos de rodas e, em cada uma das forças transversais exercidas nas molas, sem a existência de forças de rolagem. Uma das principais funções do centro de rolagem segundo MILLIKEN (1995) [1], é a troca de efeitos relativos entre momentos de rolagem e momentos de não-rolagem. Para carros com sistema de suspensão diferentes, o centro de rolagem de cada conjunto, é diferente, para carros que o objetivo seja alto desempenho e curvas em alta velocidade, quanto mais próximo do solo, o centro de rolagem, menor a chance de o veículo sofrer reação da força centrífuga.

2.3.2 Ângulo de *Camber*

Ângulo de *camber*, segundo Reimpell et al. (2001) [3], é o ângulo do plano central dos pneus, com um plano vertical ao solo, sendo ele positivo se for inclinado para fora e negativo se for inclinado para dentro. Para carros de passeio, segundo as literaturas, utiliza-se *camber* negativo, para evitar desgastes resultantes da concavidade das vias, porém, para carros do tipo formula SAE, que serão utilizados em ambientes que o solo é prioritariamente plano, a busca para um ângulo próximo de zero é maior, para que com o maior contato dos pneus com o solo, consigam maior eficiência. Outro ponto que o ângulo de *camber* tem influência direta, é a altura do veículo, pois quanto maior a angulação, menor é a altura do veículo.

2.3.3 Ângulo de *caster*

Segundo JAZAR (2009) [2], *caster* é o ângulo em que o eixo do pivô de direção está inclinado para frente ou para trás, na vista lateral do veículo. Avaliando a roda inicialmente reta, se o eixo de direção girar positivamente no eixo Y, concluímos que o *caster* é positivo, se o mesmo acontecer no eixo -Y, conclui-se que o *caster* é negativo. O ângulo de *caster*, sendo negativo, influencia diretamente a centralização do eixo de direção quando uma curva é realizada, já o ângulo de *caster* positivo, induz as rodas a se manterem retas durante uma aceleração ou frenagem, sendo esse o principal objetivo de um carro no qual o objetivo é obter altas velocidades.

3. METODOLOGIA

O desenvolvimento do sistema de suspensão para o veículo Formula SAE foi realizado em três etapas principais: dimensionamento inicial, modelagem tridimensional dos componentes e testes estruturais. A seguir, cada etapa é descrita detalhadamente, apresentando o processo, as condições de simulação e os resultados obtidos, conforme ilustrado nas tabelas e imagens.

3.1. Dimensionamento inicial e parâmetros de suspensão

Na etapa de dimensionamento, parâmetros críticos como ângulo de *câmb*er, centro de rolagem, ângulo de *caster* e curso de mola foram calculados com base em simulações dinâmicas e validaram o comportamento do veículo em condições competitivas. Essas simulações permitiram prever as respostas do veículo em situações extremas, proporcionando ajustes precisos na suspensão para garantir estabilidade e segurança.

As diretrizes principais para o dimensionamento foram extraídas de obras de referência como *Fundamentals of Vehicle Dynamics* de Gillespie (1992) [4] e *Race Car Vehicle Dynamics* de Milliken (1995) [1]. Além disso, fontes complementares como Reimpell et al. (2001) [3] e Dixon (2009) [8] forneceram parâmetros específicos para ângulos de *camber* e *caster* em veículos de alta performance. Os valores obtidos, após o dimensionamento e simulações iniciais, são apresentados nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1. Requisitos pré-definidos. (Autoria própria)

Entre eixo mínimo (mm)	1525
Valor mínimo de <i>bump/rebump</i> (mm)	50
Frequência natural (Hz)	2,9
Massa estimada do veículo (kg)	400
Massa não suspensa (kg)	80
Comprimento do amortecedor (mm)	200
Aro (in)	13

Tabela 2. Parâmetros adquiridos. (Autoria própria)

Parâmetro	Frontal	Traseira
Ângulo de <i>Camber</i> (°)	-4,00	-2,00
Ângulo de Convergência/ <i>Toe</i> (°)	1,00	-2,00
Ângulo de <i>Caster</i> (°)	4,00	0
<i>Caster Offset</i> (m)	0,05	0
Ângulo de Pino Mestre/ <i>Kingpin</i> (°)	5,29	5,19
<i>Kingpin Offset</i> (m)	0,116	0,091
Centro de Rolagem (m)	0,202	0,058

3.1. Modelagem tridimensional e análise estrutural

Após o dimensionamento, a modelagem tridimensional dos componentes foi realizada com base nos resultados do dimensionamento e nas condições de força obtidas a partir das simulações iniciais de dinâmica veicular. Com os valores críticos de geometria e carga definidos, cada componente do sistema de suspensão – incluindo braços, manga de eixo e suportes de fixação – foi modelado em um software de CAD para atender aos requisitos específicos de resistência e conformidade.

- **Integração dos Parâmetros de Simulação na Modelagem:** Os parâmetros de ângulos de camber e caster, centro de rolagem, e offset do pino mestre, derivados das simulações dinâmicas, foram aplicados diretamente na modelagem para assegurar que o sistema de suspensão manteria a aderência e estabilidade em curvas e mudanças de direção. Esses ângulos foram inseridos como pontos de referência na criação dos braços de suspensão e na posição das mangas de eixo, garantindo a conformidade geométrica com o comportamento desejado.
- **Configuração dos Pontos de Montagem e Geometria:** A partir das simulações de dinâmica, os pontos de montagem foram ajustados na modelagem para atender às cargas previstas. Por exemplo, os valores de kingpin offset e caster offset, calculados para maximizar a estabilidade direcional e a resposta ao volante, foram ajustados na montagem digital para cada componente, assegurando um alinhamento preciso com o centro de rolagem e uma distribuição de peso ideal para otimizar o desempenho.
- **Ajustes de Peso e Redução de Interferências:** Além de garantir precisão estrutural, a modelagem digital também possibilitou ajustar a espessura dos componentes e minimizar o peso da suspensão, uma estratégia recomendada por Adams & Askenazi (1999) [6]. Com a modelagem CAD, foi possível visualizar interferências potenciais e ajustar a posição e geometria dos componentes para reduzir cargas desnecessárias, sem comprometer a integridade do sistema.

Para validar o desempenho estrutural dos componentes, foi realizada uma análise de elementos finitos (FEA), simulando as condições de carga extremas às quais o sistema de suspensão estaria sujeito. As condições de simulação foram aplicadas conforme detalhado a seguir:

Condições de Simulação

1. Força Máxima (Bump): A condição mais extrema de simulação considerou uma carga de 2,5G no eixo vertical (-Y), representando o impacto sobre a suspensão em uma situação de bump (impacto vertical).
2. Força Aplicada: 2452 N de força foi aplicada à manga de eixo e aos braços de suspensão, representando o valor máximo para cenários de frenagem e curvas intensas.
3. Material: Os componentes foram simulados utilizando aço SAE 1020, considerando suas propriedades de resistência e elasticidade adequadas para a aplicação.
4. Malha e Configuração de Simulação: Foi aplicada uma malha padrão na análise FEA para garantir precisão nas simulações e consistência nos resultados de deformação e tensão. Nas chapas de fixação, foi utilizado um fator de força de $f/2$ para distribuir a carga de maneira uniforme, minimizando o risco de cisalhamento duplo.

4. Resultados e conclusões dos testes

A análise estrutural confirmou que os componentes projetados suportam as condições de uso extremo, demonstrando resistência adequada sem risco de falhas ou deformações permanentes. Os valores de tensão e deformação obtidos nas simulações mostraram-se dentro dos limites de segurança do aço SAE 1020, atendendo aos requisitos de segurança e desempenho exigidos pela competição e os resultados estão apresentados na Tabela 3 e na Imagem 6.

Tabela 3. Propriedades do material. (Autoria Própria)

Propriedade	Material	Manga	Braços	Suporte
Resistencia à tração (Mpa)	440	-	-	-
Deformação (m)	-	0,0012	0,00041	0,00040
Tensão resultante (Mpa)	-	260	230	118,36

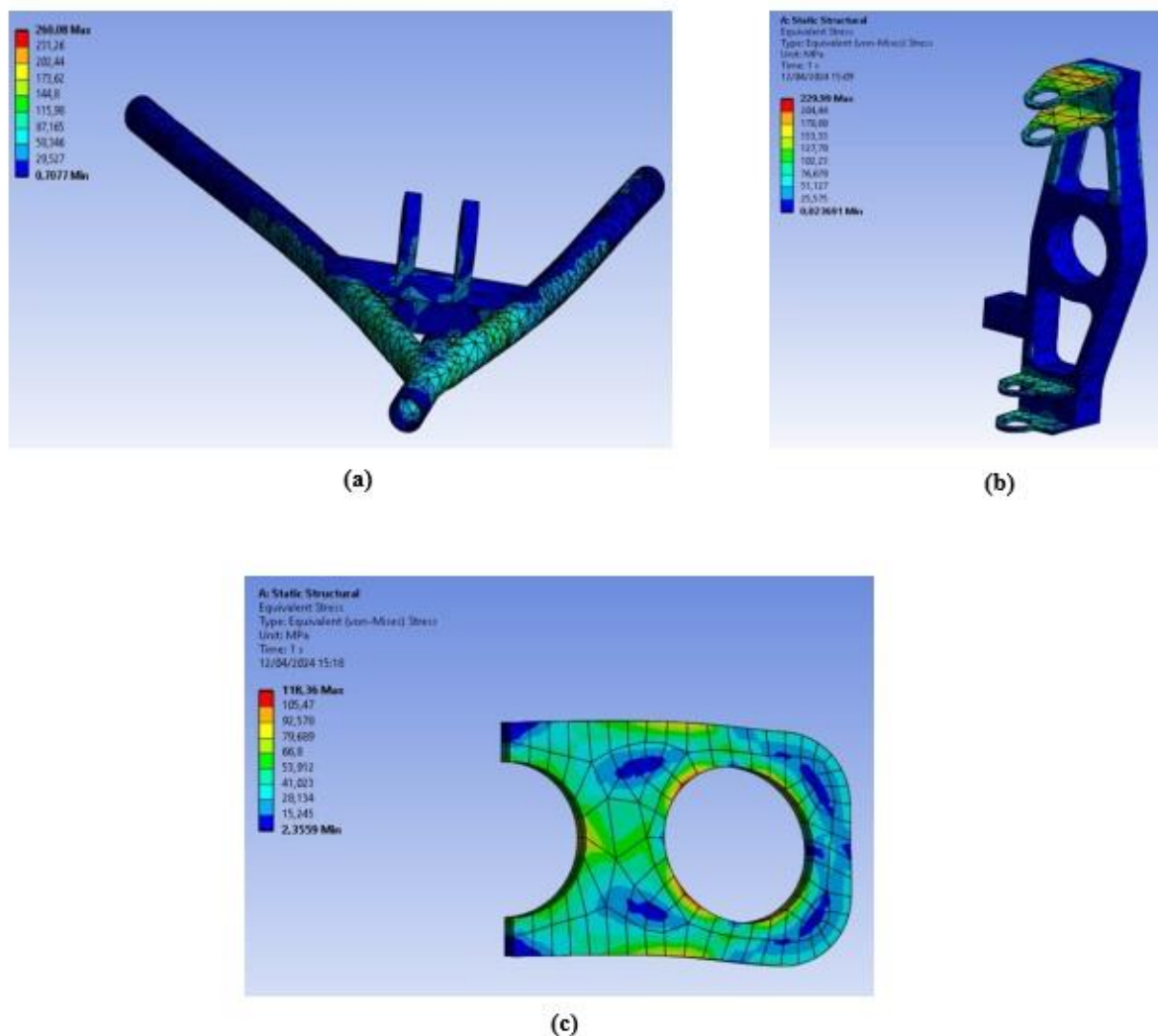


Imagem 6. Resultado dos testes em todos os componentes. (a- Braço de suspensão; b- Manga de roda; c- Chapa de fixação) (Autoria Própria)

5. CONCLUSÃO

O desenvolvimento e a análise do sistema de suspensão para o veículo Formula SAE permitiram uma compreensão aprofundada dos parâmetros críticos que influenciam a dinâmica e o desempenho veicular. Utilizando simulações detalhadas e modelagem 3D, foi possível dimensionar cada componente de maneira precisa, assegurando que o sistema atende aos requisitos de estabilidade, aderência e segurança para condições de competição.

Os valores obtidos para ângulos de camber, caster, e centro de rolagem mostraram-se alinhados com as melhores práticas descritas por Gillespie (1992) [4] e Milliken & Milliken (1995) [1], autores amplamente reconhecidos na área de dinâmica veicular. Esses parâmetros foram ajustados para maximizar a eficiência em situações de curvas fechadas e frenagens bruscas, onde o desempenho da suspensão é mais exigido. Estudos de Reimpell et al. (2001) [3] e Dixon (2009) [8] confirmam a importância de uma configuração adequada da suspensão para reduzir a rolagem e manter a estabilidade em trajetórias não retilíneas, corroborando os valores calculados neste trabalho.

A análise estrutural através de elementos finitos, sob condições de carga extremas, validou a resistência e durabilidade dos componentes projetados. O aço SAE 1020, escolhido para os componentes de suspensão, apresentou tensões e deformações dentro dos limites de segurança, conforme especificado em literatura técnica. Referências como Wong (2008) [9] e Bakker et al. (1987) [7] apontam para a importância de testes sob altas cargas em sistemas de suspensão, recomendando uma abordagem robusta para garantir que o sistema suporte as forças exercidas durante condições de bump e carga lateral intensa.

Recomendações para Estudos Futuros: A partir dos resultados obtidos, recomenda-se investigar o impacto de materiais alternativos, como ligas de alumínio e materiais compósitos, que podem reduzir o peso da suspensão

sem comprometer a resistência estrutural, conforme sugerido por estudos como Adams e Askenazi (1999) [6]. Além disso, a implementação de simulações de dinâmica avançadas que considerem condições de pista e variáveis ambientais, como temperatura e umidade, pode contribuir para um ajuste mais refinado do sistema de suspensão, conforme sugerido por Jazar (2009) [2] em suas investigações sobre dinâmica veicular em condições variáveis.

Este trabalho oferece uma base sólida para o desenvolvimento de suspensões em veículos de alta performance, especialmente no contexto da competição Formula SAE. O uso de referências técnicas renomadas e validações empíricas reforça a confiabilidade dos resultados e demonstra que o sistema projetado é adequado para suportar as exigências da competição, equilibrando desempenho, segurança e eficiência estrutural.

6. REFERÊNCIAS

- [1] Milliken, W. F., Milliken, D. L., 1995. "Race Car Vehicle Dynamics." 1. Ed.
- [2] Jazar, R. N., 2009. "Vehicle dynamics: theory and applications." 3. Ed New York, NY.
- [3] Reimpell, J., Stoll, H., Betzler, J. W., 2001. "The automotive chassis: engineering principles." 2. Ed. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- [4] Gillespie, T. D., 1992. "Fundamentals of Vehicle dynamics." 1. ed. Warrendale: Society of Automotive Engineers.
- [5] Zaidie, M. N. A., Hashim, M. S. M., Tasyrif, M., Basha, M. H., Ibrahim, I., Kamaruddin, N. S., Shahrman, A. B., 2017. "Analysis of a front suspension system for UniART FSAE car using FEA". Journal of Physics: Conference Series, Vol. 908. doi:10.1088/1742-6596/908/1/012058.
- [6] Adams, H., & Askenazi, A. (1999). *Chassis Engineering: Chassis Design, Building & Tuning for High Performance Handling*. HPBooks.
- [7] Bakker, E., Nyborg, L., & Pacejka, H. B. (1987). "Tyre Modelling for Use in Vehicle Dynamics Studies". *SAE Technical Paper Series*, 870421.
- [8] Dixon, J. C. (2009). *Suspension Geometry and Computation*. Wiley.
- [9] Wong, J. Y. (2008). *Theory of Ground Vehicles*. Wiley.