



ANÁLISE DE ESFORÇOS NA MANGA DE EIXO DIANTEIRA DE UM VEÍCULO BAJA SAE VIA SIMSCALE

Douglas Leite Kojima, douglaskojima1@gmail.com¹
Rodrigo Borges Santos, rodrigobsantos@ufgd.edu.br¹
Augusto Salomão Bornschlegell, augustosalomao@ufgd.edu.br¹

¹Universidade Federal da Grande Dourados – UFGD
Rodovia Dourados - Itahum, Km 12 - Cidade Universitária, Cx. Postal 364 - CEP 79804-970.

Resumo. Neste trabalho foi analisado o deslocamento e as tensões de von Mises sobre a manga de eixo dianteira do veículo protótipo da equipe Baja Guaicurus/UFGD, usando o método dos elementos finitos. O estudo tem por objetivo a análise de esforços para diferentes condições de carregamento e, além disso, contribuir com estudos futuros de novos membros da equipe. Optou-se por utilizar o software SolidWorks para obter a geometria e o software SimScale para a análise por elementos finitos. As análises foram feitas tendo como base os carregamentos sobre o sistema de suspensão na intenção de reproduzir condições de provas da SAE Brasil. Os resultados mostram que a peça se encontra em condição segura para os casos de carregamento considerados.

Palavras chave: Manga de eixo. Análise via SimScale. Baja SAE. Von Mises.

1. INTRODUÇÃO

Devido a constante expansão do mercado automotivo, modificar algumas das variáveis relacionadas a projetos, se torna cada vez mais fundamental. A necessidade de diminuir tempo de desenvolvimento, complexidade e custos, e aumentar a qualidade dos produtos, resultando em maior confiabilidade, desempenho e segurança, se tornaram requisitos imprescindíveis no projeto de um veículo.

O intuito de aperfeiçoar componentes através de análises estruturais detalhadas torna-se necessário para que se obtenha um nível mais elevado da qualidade. Desafio esse proposto pelo programa Baja SAE BRASIL 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. Conforme definido pelo regulamento da competição em SAE Brasil (2018), um veículo Baja SAE deve ser um protótipo monoposto, fora de estrada (*off-road*), esportivo e de desempenho líder de mercado em termos de velocidade, manobrabilidade, conforto, e robustez em terreno acidentado.

A Equipe Baja Guaicurus participa anualmente da competição Nacional Baja SAE, onde estudantes de engenharia formam equipes para representar suas universidades e apresentar seus projetos de veículos *off-road*. A cada edição, as equipes buscam aprimorar e inovar seus projetos a fim de serem mais competitivos e obter melhor rendimento do veículo.

Neste contexto, o presente trabalho busca realizar análises de esforços sobre o conjunto de suspensão do Baja, em específico, sobre a manga de eixo dianteira do veículo G3 da equipe Baja Guaicurus a fim de obter melhores distribuições de tensão. É apresentado um modelo para determinação dos carregamentos estáticos atuantes e são realizadas análises pelo método de elementos finitos de modo a otimizar a geometria da peça visando a redução de massa, o aumento de rigidez e resistência.

O método dos elementos finitos é realizado a partir da subdivisão da geometria em pequenas partes, que são denominados elementos, que passarão a representar o domínio contínuo do problema. A partir dessa subdivisão é possível resolver um problema complexo, pois a partir dessas subdivisões, os problemas se tornam mais simples, possibilitando assim a realização dos cálculos (Mirlisenna, 2016).

O primeiro passo para análise é a determinação das propriedades do elemento a partir da geometria do material e dos dados de carregamento, o segundo passo é a reunião do conjunto de equações finais em uma matriz global. O terceiro passo consiste da aplicação das condições de contorno na matriz final enquanto que o passo final pode ser seguido de substituição para obtenção de tensões ou outras grandezas de saída desejadas (Zienkiewicz et al. 2005).

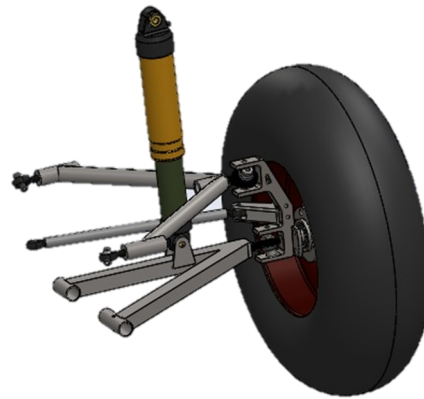
Cada projeto tem seus critérios bem definidos e a razão de cada um deles ser escolhido (Resende, 2016). No presente trabalho serão analisados dados como o limite de escoamento ou tensão de escoamento, as tensões de Von Mises e o deslocamento. Através da análise estática é possível verificar o comportamento do conjunto da suspensão através dos parâmetros citados, além dos fatores de segurança.

O coeficiente de segurança ou fator de segurança é definido pela razão da tensão em determinado local e a tensão de escoamento do material, mostrando assim ser uma reserva estratégica para o projetista (Resende, 2016).

Segundo Jazar (2008), a suspensão tem a função de ligar as rodas ao veículo, permitindo uma movimentação relativa. Assim, o sistema de suspensão deve prover a capacidade de impulsionar, frear e esterçar o veículo, através de sua ligação com as rodas.

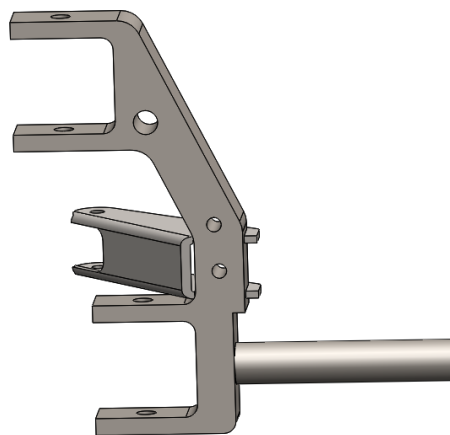
Conforme Milliken e Milliken (1995), a suspensão do tipo Duplo A (ou *Double Wishbone*) tem a característica de apresentar duas bandejas no formato da letra “A”, na qual, geralmente, o braço superior é menor que o inferior. Este sistema é considerado um dos melhores para controlar os parâmetros cinemáticos do pneu, além de distribuir melhor as cargas suportadas no chassi, em mais pontos de contato. A Fig. 1 mostra uma suspensão deste tipo.

Figura 1. Suspensão do tipo Duplo A (Autor, 2019)



A manga de eixo é um dos componentes mais importantes dos veículos automotores, pois está diretamente associado a capacidade de reunir em uma única região, os quatro sistemas responsáveis pelo controle dos movimentos veiculares. Sendo eles os sistemas de suspensão, de direção, de freio e de transmissão (Klava, 2003). Na Fig. 2, é demonstrada uma manga de eixo dianteira utilizada em um veículo baja SAE.

Figura 2. Manga de eixo do protótipo G3 da equipe Baja Guaicurus (Autor, 2019)



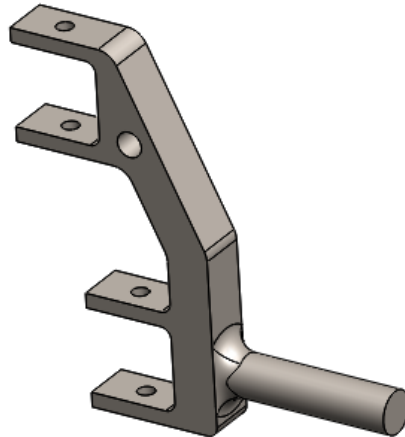
Um grande problema enfrentado pela equipe Baja Guaicurus é o desempenho insatisfatório do sistema de suspensão e direção nas competições organizadas pela SAE Brasil na prova de *Suspension and Traction*, prova em que a equipe só conseguiu pontuar uma vez desde a sua criação. Com o intuito de facilitar os futuros projetos relacionados a suspensão e direção, optou-se por realizar a análise nesse sistema realizando uma simulação em um modelo simplificado da manga de eixo utilizando o software *SimScale*, de forma a determinar o máximo carregamento suportado pela peça, isto é, a carga limite para o escoamento do material.

2. METODOLOGIA

Nesta seção é detalhado o desenvolvimento da análise de esforços da manga de eixo simplificada do protótipo G3 da equipe Baja Guaicurus pelo Método dos Elementos Finitos (MEF).

O presente trabalho faz uso basicamente de duas ferramentas computacionais para a resolução do problema de análise de esforços, o sistema CAD e o sistema CAE. No sistema CAD (*Computer Aided Design*), foi utilizado o software *SolidWorks 2017* onde foram determinadas as propriedades do material, as vistas 2D para fabricação e também o modelo 3D, conforme mostra a Figura 3.

Figura 3. Modelo simplificado utilizado nas análises (Autor, 2019)



O material utilizado na peça é o aço estrutural AISI 1045 trefilado, devido ser um material comumente utilizado, de boa resistência mecânica em comparação ao alumínio, e também por ser de menor custo, viabilizando o projeto. As propriedades desse material serão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades do Aço AISI 1045 Trefilado (Autor, 2019)

Propriedade	Valor
Módulo elástico (<i>GPa</i>)	205
Limite de escoamento (<i>MPa</i>)	530
Coefficiente de Poisson	0,29
Densidade (<i>kg/m³</i>)	7850
Resistência de tração (<i>MPa</i>)	625
Módulo de cisalhamento (<i>GPa</i>)	80

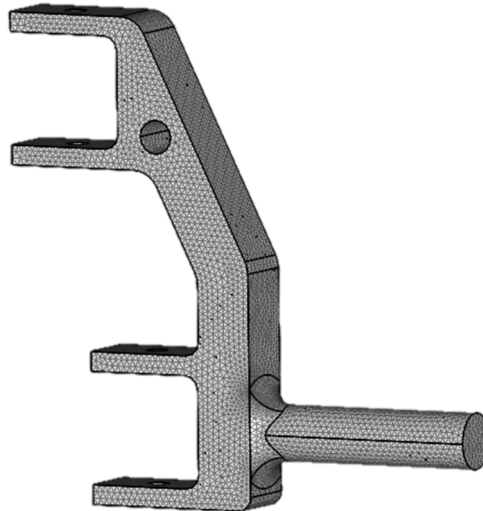
De extrema importância também é o modelo 3D para o desenvolvimento do trabalho, não só pelas visualizações, mas também porque é à partir dele que é gerado a malha para simulação numérica. Para isso, utilizou-se o outro sistema, o CAE (*Computer Aided Engineering*). Então, o software livre *SimScale*, onde as funcionalidades de cálculo são realizadas em nuvem, foi utilizado para realizar a análise de esforços, tensões e deformações, importando o modelo do CAD para o CAE através de um arquivo *Step*.

Optou-se pela mesma definição de malha em toda a geometria apenas para reduzir o tempo de processamento computacional. O tipo de elemento utilizado foi o tetraédrico linear e para o desenvolvimento da malha, foram realizados diversos testes com diferentes configurações estipulando os tamanhos dos elementos até encontrar um resultado satisfatório de número de elementos e nós. A Tab. 2 mostra as propriedades da malha considerada e a Fig. 4 a malha gerada.

Tabela 2. Propriedades da malha (Autor, 2019)

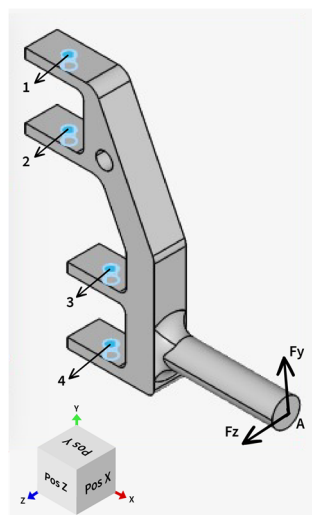
Número de nós	Arestas	Faces	Volumes
16508	1337	15362	73541

Figura 4. Malha gerada (Autor, 2019)



Para a solução do problema e encontrarmos a máxima tensão e alongamento da manga de eixo, é necessário definir as condições de contorno, que são pontos específicos onde são conhecidos restrições de movimento com os graus de liberdade associados e os carregamentos aplicados. A Fig. 5 exemplifica esses pontos.

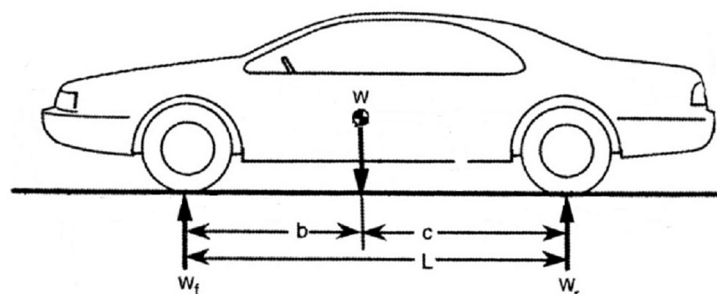
Figura 5. Condições de contorno (Autor, 2019)



Nesse caso, foi realizado a restrição de movimento, nas direções x, y e z, fazendo o engaste dos pontos de fixação da bandeja superior (pontos 1 e 2) e da bandeja inferior (pontos 3 e 4). O ponto A representa o local de aplicação dos carregamentos, conforme mostra a Figura 5.

Para determinar a intensidade das forças atuantes em cada eixo do veículo aplica-se as equações de equilíbrio para o diagrama de corpo livre mostrado na Figura 6.

Figura 6. Diagrama de corpo livre de um veículo (Adaptado de Gillespie, 1992)



Sendo W_f e W_r as forças que agem sobre os eixos dianteiro e traseiro, L é a distância entre eixos do veículo, b e c , são as distâncias do centro de gravidade até o eixo dianteiro e traseiro, e W é a força peso do veículo. Para o caso em questão, o protótipo G3 da Baja Guaicurus possui um centro de gravidade deslocado para a parte de trás do veículo, sendo 54% sobre o eixo traseiro e 46% sobre o dianteiro. A Tab. 3 mostra os parâmetros do veículo.

Tabela 3. Parâmetros do veículo (Autor, 2019)

L (mm)	1500,00
b (mm)	693,50
c (mm)	806,50
Massa do carro (kg)	185,00
Massa do piloto (kg)	85,00

Então, fazendo a somatória dos momentos em relação ao eixo traseiro igual a zero, obtém-se a força atuante no eixo dianteiro.

$$W_f = W \frac{c}{L} \quad (1)$$

E de forma análoga, obtém-se a força atuante no eixo traseiro.

$$W_r = W \frac{b}{L} \quad (2)$$

Para considerar uma situação de frenagem do veículo, estima-se a força de frenagem F_h , conforme a norma EN 12195-1:2010, dada por:

$$F_h = m * 0,8 * g \quad (3)$$

Sendo m a massa do veículo e g a aceleração da gravidade (9,81 m/s².)

Neste trabalho é realizada a análise de esforços considerando três casos de carregamento.

1º caso: A força $W_f/2$ é aplicada na peça (no ponto A e direção Y). Esta condição representa o caso mais simples, em que o peso do carro é distribuído igualmente nas duas rodas dianteiras.

2º caso: Uma condição de frenagem é considerada. A força $F_h/2$ devido a frenagem é aplicada na direção Z e a força $W_f/2$ é aplicada na direção Y.

3º caso: Representa um caso crítico que pode ocorrer em condições de provas das competições SAE Brasil. Considera-se que o veículo perca o contato com o solo durante a passagem por uma rampa e, então, todo o peso do veículo seja aplicado em apenas uma roda e com um ângulo de 45°, gerando componentes da força peso nas direções Y e Z.

Tabela 4. Carregamentos sobre o protótipo (Autor, 2019)

Análise	Descrição	Carregamento	Valor (N)	Direção
1	Força sobre o eixo dianteiro em uma roda	$W_f/2$	712,06	Y
2	Força sobre o eixo dianteiro em uma roda Força de frenagem em uma roda	$W_f/2$ $F_h/2$	712,06 1059,48	Y Z
3	Componente da força W_f na direção Y Componente da força W_f na direção Z	$W_f * \cos 45^\circ$ $W_f * \sin 45^\circ$	1872,92 1872,92	Y Z

3. RESULTADOS

Com todos os parâmetros do modelo definidos, é possível realizar as simulações e obter os resultados desejados. A finalidade da otimização e dimensionamento de uma peça faz com que seja necessário compreender em quais áreas haverá uma maior concentração de tensão. Através da simulação é possível prever se a peça resiste aos esforços em que lhe é imposta e também as áreas mais críticas, sujeitas aos maiores esforços e conseqüentemente, mais tendente à falha. As figuras 7, 8 e 9, mostram, respectivamente, as tensões de Von Mises para os três casos de carregamentos analisados.

Figura 7. Tensão de von Mises (Pa) para o 1º caso (Autor, 2019)

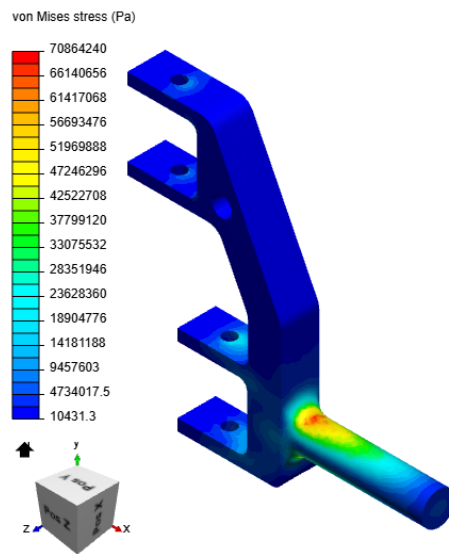


Figura 8. Tensão de von Mises (Pa) para o 2º caso (Autor, 2019)

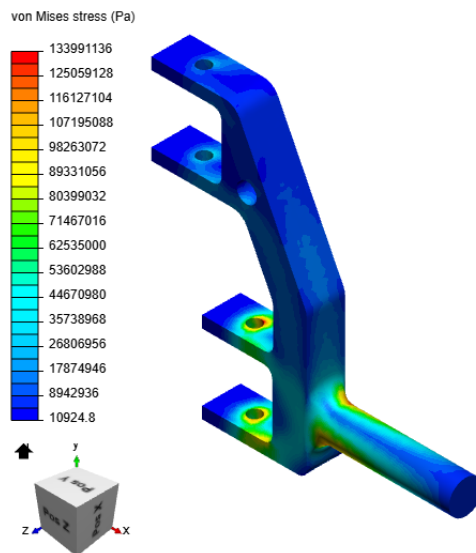
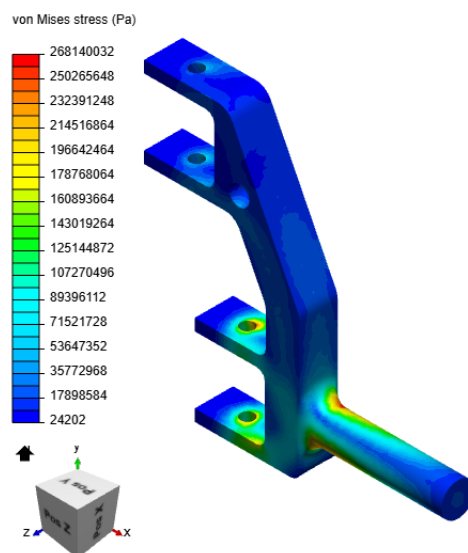


Figura 9. Tensão de von Mises (Pa) para o 3º caso (Autor, 2019)



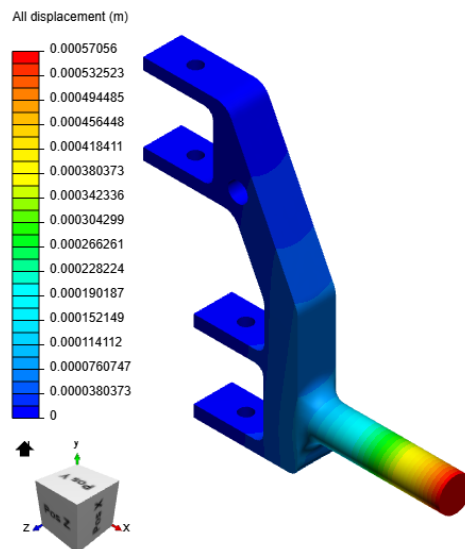
A Tabela 5 mostra os resultados para os três casos de carregamentos. Nota-se que, como esperado, o primeiro caso representa a condição menos severa de carregamento, tendo um fator de segurança de 7,47. O valor do fator de segurança é obtido fazendo a divisão da tensão de escoamento do material pela tensão máxima de von Mises obtida. Por outro lado, o terceiro caso é o mais severo, tendo um fator de segurança de 1,97. Portanto, a peça para as três condições analisadas encontra-se em condição segura, isto é, não atinge a tensão de escoamento do material.

Tabela 5. Resultados das simulações (Autor, 2019)

Caso	Carga (N)	Eixo	σ (MPa)	Fator de Segurança
1º	712,06	Y	70,86	7,47
2º	712,06 (-1059,48)	Y Z	133,99	3,95
3º	1872,92 (-1872,92)	Y Z	268,14	1,97

Outro parâmetro analisado foi o deslocamento sofrido pela peça devido ao carregamento definido pelo terceiro caso. Pode-se notar na Fig. 10, que a região que sofreu o maior deslocamento é a mais próxima do carregamento. O resultado pode ser considerado bom, tendo em vista que o maior deslocamento foi da ordem de 0,57 milímetros, não afetando o funcionamento da manga.

Figura 10. Deslocamento (m) para o 3º caso (Autor, 2019)



Ainda que os carregamentos utilizados tenham sido baseados em estudos anteriores e de um protótipo Baja SAE com características diferentes, comparação com Yan (2011) e Viegas (2016), demonstrou-se ordens de grandeza análogas, variando acerca da situação de simulação.

4. CONCLUSÕES

No presente trabalho foi realizada a análise de esforços na manga de eixo de um veículo Baja. A análise foi realizada utilizando o método dos elementos finitos e, fazendo o uso do software livre *SimScale*. As condições de contorno foram definidas e três condições de carregamento foram analisadas. Os resultados se mostram satisfatórios para os três casos, visto que, na situação mais crítica foi obtido um coeficiente de segurança igual a 1,97, significando que a peça se encontra segura em todas as análises realizadas.

Vale a pena ressaltar que a equipe Baja Guaicurus está desenvolvendo instrumentação para realizar medições de esforços reais no veículo e, em condições que possam representar as provas das competições SAE Brasil. Dessa forma, permitindo análises mais representativas e, então, verificando a possibilidade de otimização da peça nos quesitos de massa, geometria e tipo de material.

5. REFERÊNCIAS

- GILLESPIE, T. D., 1992. "Fundamentals of vehicle dynamics". Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers, Inc.
JAZAR, R. N., 2014. "Vehicle dynamics: Theory and application". Riverdale, NY: Springer.

- KLAVA, B., 2003. “Desenvolvimento das Etapas de Análise e Otimização Estrutural de uma Manga de Eixo”. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- MILLIKEN, W. F.; MILLIKEN, D. L., 1995. “Race car vehicle dynamics”. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers, Inc.
- MIRLISENNA, G. “Método dos Elementos Finitos: O que É?”. Disponível em: < <https://www.esss.co/blog/metodo-dos-elementos-finitos-o-que-e/>>. Acesso em: 29 jun. 2019.
- RESENDE, V. R., 2016. “Análise de uma suspensão para um veículo de Fórmula SAE via elementos finitos”. Monografia em Engenharia Automotiva, Universidade de Brasília, Brasília.
- SAE BRASIL, 2018. “Regulamento Baja SAE Brasil: Competição Baja SAE Brasil – E2”.
- VIEGAS, B. B. C., 2016. “Análise numérica de mangas de eixo para veículo Baja SAE” Monografia em Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília.
- YAN, L. T. W., 2011. “Análise estrutural utilizando o método de elementos finitos de componentes do veículo Baja SAE submetidos a esforços de fadiga.”
- ZIENKIEWICZ, O. C.; TAYLOR, R. L.; ZHU, J. Z., 2005. “The finite element method. Its basis and fundamentals”. Burlington, MA: Elsevier Butterworth-Heinemann, 6ª Edição.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.