



De 19/10/2016 a 21/10/2016

PROPOSTA DE ALTERAÇÃO DA MANGA DE EIXO TRASEIRA DE UM VEÍCULO OFF-ROAD TIPO BAJA

JAGNOW, Diogo Derli ^{1*}, GARBRECHT, Augusto Marcel ², DALCIN, Rafael Luciano ³

^{1*, 2, 3} Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade Horizontina, Campus Arnaldo Schneider, Avenida dos Ipês, 565, Horizontina, RS, Brasil.

*Autor Correspondente: dj001817@fahor.com.br.

RESUMO

O sistema de suspensão presente em veículos automotores tem a função de diminuir as influências da pista sobre os ocupantes e sobre a estrutura do veículo. Veículos do tipo Baja SAE, durante competição, são submetidos a trajetos acidentados, onde têm sua capacidade de manobra, tração e integridade estrutural testadas. Um dos requisitos da competição Baja SAE BRASIL é o baixo custo de fabricação dos veículos. Dentre os componentes que compõem a suspensão traseira, o componente com maior impacto sobre os custos de manufatura é a manga de eixo. Diante disso, este artigo tem a proposta de calcular as forças atuantes sobre a manga de eixo traseira utilizada pela Equipe Baja Sinuelo FAHOR, projetar e realizar uma análise de elementos finitos, visando a concepção de um nova manga de eixo, corretamente dimensionada e que ofereça redução de custos. A comparação entre as duas mangas de eixo mostra que a nova concepção está bem dimensionada, estando adequada às necessidades do projeto e oferecendo uma redução de custos em relação ao componente usado atualmente.

Palavras chave: Suspensão traseira. Baja SAE. Análise de elementos finitos.

BAJA OFF-ROAD VEHICLE REAR UPRIGHT CHANGE PROPOSAL

ABSTRACT

The suspension system in motor vehicles has the function of reducing the influences of the track on the occupants and also on the vehicle structure. Baja SAE vehicles during competition are subjected to rough paths, where their maneuverability, traction and structural integrity are tested. One of the requirements of the competition Baja SAE Brasil is the low manufacturing cost of the vehicles. Among the components of the rear suspension, the component with the greatest impact on manufacturing costs is the upright. Thus, this paper has the objective of calculate the forces acting on the rear upright used by Team Baja Sinuelo FAHOR, design and perform a finite element analysis aiming to create a new upright correctly sized and that provides cost reduction. Comparison of the two uprights shows that the new design is well sized and appropriate to the project needs, offering cost reduction compared to the currently component.

Keywords: Rear suspension. Baja SAE. Finite element analysis.

INTRODUÇÃO

O sistema de suspensão está presente em veículos automotores e tem como objetivo principal diminuir as influências ou irregularidades da pista sobre os ocupantes e sobre a estrutura do veículo (REFFATTI, 2015).

O programa Baja SAE BRASIL é um desafio lançado aos estudantes de engenharia, no qual os alunos se envolvem num caso real de desenvolvimento de um veículo off-road, abrangendo as etapas de concepção, projeto detalhado, construção e testes. Um veículo Baja SAE deve ser seguro, confortável, de baixo custo, atraente, de fácil manutenção e obter bom desempenho nas seguintes provas dinâmicas: frenagem, suspensão, conforto, velocidade final, tração e enduro de resistência (SAE BRASIL, 2010). Na prova de suspensão, denominada *Suspension and Traction*, o veículo é submetido a um trajeto acidentado, onde é testada sua capacidade de manobra, tração e integridade (SAE BRASIL, 2011).

Um dos requisitos da competição é o baixo custo de fabricação do veículo. Dentre os componentes da suspensão, a manga de eixo traseira é o item com maior impacto sobre os custos de manufatura do protótipo Baja Sinuelo V, desenvolvido pelos integrantes da Equipe Sinuelo FAHOR no período 2015/2016.

A manga de eixo utilizada no veículo Baja Sinuelo V é reutilizada do veículo Baja Sinuelo IV, sendo este, mais pesado que o protótipo sucessor. O objetivo principal deste artigo é analisar as condições estruturais da manga de eixo traseira usada pela Equipe Baja Sinuelo FAHOR e redimensionar este componente visando reduzir os custos de fabricação.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1.1 Suspensão traseira

Nos veículos automotores, a suspensão tem o objetivo de absorver as irregularidades da pista, proporcionando conforto aos ocupantes (COSTA, 2002), boa condução e estabilidade ao veículo (FRANCESCHI *apud* DOTZLAW, 2007).

Segundo Bosch (2002), os tipos de suspensão aplicados em veículos são: suspensão de eixo rígido – aplicada no eixo traseiro de veículos com tração traseira; suspensão de eixo

semirrígido – utilizada no eixo traseiro em conjunto com a tração dianteira; e suspensão independente – aplicada em veículos com tração dianteira e traseira.

O veículo Baja Sinuelo V possui sistema de suspensão independente do tipo duplo A, utilizado em veículos de alto desempenho e que se caracteriza por possuir uma bandeja superior e outra inferior, ambas em formato triangular (ALMEIDA, 2012). A figura 1 mostra os componentes contidos na suspensão traseira do veículo Baja Sinuelo V, sendo que a manga de eixo encontra-se destacada na cor azul.

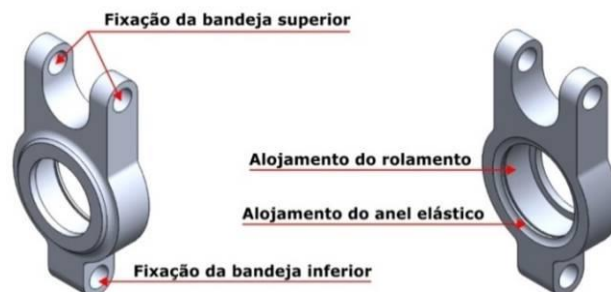
Figura 1: Componentes da suspensão traseira do veículo Baja Sinuelo V.



Fonte: Autores

A suspensão traseira do veículo é montada no chassi através dos suportes da suspensão. A manga de eixo, além de ser o elo entre as duas bandejas, acomoda o rolamento da roda e a ponta de eixo da homocinética. A figura 2 mostra o detalhe da fixação da manga de eixo, bem como a indicação dos pontos de fixação do anel elástico e do rolamento da roda.

Figura 2: Manga de eixo utilizada no veículo Baja Sinuelo V.



Fonte: Autores

A manga de eixo traseira utilizada atualmente é usinada em liga de alumínio 6063-T6, tendo um custo de R\$ 397,50 e massa de 431,77 gramas.

2.1.2 Fator de segurança

Prevendo incertezas de projeto, seja pelo material ou pelas condições do carregamento, faz-se necessário estipular a tensão admissível pelo componente, definida pela Equação 1 (COLLINS, 2006).

$$\sigma_d = \frac{S_{fm}}{nd} \quad (1)$$

Onde:

σ_d - tensão admissível pelo componente;

S_{fm} - resistência do material à falha;

nd - fator de segurança do projeto.

Um projeto seguro deve ser concebido de modo que as tensões de operação não ultrapassem a tensão admissível pelo componente. Collins (2006), sugere um método para seleção de um fator de segurança, no qual devem ser avaliados oito fatores e atribuir um valor numérico conforme sua respectiva importância, de acordo com as necessidades do projeto, sendo que valores negativos correspondem a fatores de baixa importância, valores positivos são atribuídos aos fatores com grande influência e o valor zero corresponde a um fator indiferente. Da soma dos valores atribuídos aos fatores de segurança surge uma variável representada por (t), que, adicionada à Equação 2 fornece o fator de segurança ideal para o projeto (COLLINS, 2006).

$$nd = 1 + \frac{(10 + t)^2}{100} \text{ para } t \geq -6 \quad (2)$$

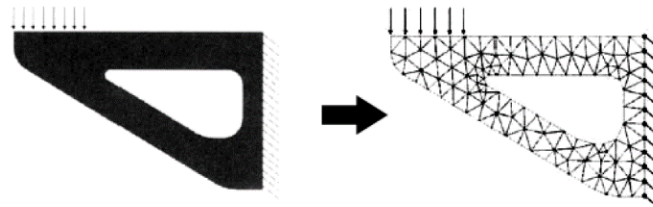
2.1.3 Análise de elementos finitos

O método de elementos finitos é utilizado para resolução de problemas encontrados na construção mecânica. Um software de elementos finitos, dentre outros parâmetros, deve ser escolhido pela interface com o software de CAD disponível, precisão e facilidade de utilização (ZIENKIEWICZ, 2005). Em razão disso, esta pesquisa fará uso do sistema SolidWorks Simulation, um módulo de simulação do software de CAD SolidWorks, do qual a equipe dispõe.

Durante uma análise estrutural devem ser impostas as condições de contorno, às quais o componente analisado está exposto, podendo estas ser: deslocamentos, forças, pressões ou temperaturas. Também devem ser impostas as restrições de movimento, denominadas pontos de fixação (ZIENKIEWICZ, 2005).

O método de análise consiste numa aproximação numérica para a decisão de equações via integração, realizado após a divisão do sistema em partes discretas menores, etapa que é conhecida como discretização do modelo, ou geração de malha. Além da discretização geométrica, há a discretização das condições de contorno e dos pontos de fixação, onde estas passam a ser impostas nos nós e não nas superfícies do modelo (ZIENKIEWICZ, 2005). A figura 3 apresenta um modelo antes e após o processo de geração de malha.

Figura 3: Discretização geométrica e das condições de contorno.



Fonte: Zienkiewicz (2005).

Um elemento que recebe a ação de uma força tende a absorvê-la, gerando forças internas, efeito denominado tensão, que pode ser expresso como a razão entre a força aplicada por unidade de área (FONSECA; TAVARES, 2012).

A tensão de Von Mises é um escalar que descreve o estado de tensão dos materiais, isto é, um componente entrará em colapso assim que sua tensão de Von Mises ultrapassar determinado valor, próprio de cada material. Este escalar, utilizado na análise de elementos finitos, é determinado pela Equação 3 (FONSECA; TAVARES, 2012).

$$\sigma_{Von\ Mises} = \sqrt{\frac{(S_X - S_Y)^2 + (S_X - S_Z)^2 + (S_Y - S_Z)^2}{2} + (T_{XY}^2 + T_{XZ}^2 + T_{YZ}^2)} \quad (3)$$

Onde:

S_X - tensão normal na direção do eixo X;

S_Y - tensão normal na direção do eixo Y;

S_Z - tensão normal na direção do eixo Z;

T_{XY} - tensão de corte na direção do eixo Y sobre o plano YZ;

T_{XZ} - tensão de corte na direção do eixo Z sobre o plano YZ;

T_{YZ} - tensão de corte na direção do eixo Z sobre o plano XZ.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1 Fator de segurança

Tendo em vista a situação de impacto, material, gravidade de falha e demais quesitos impostos à manga de eixo traseira, foi estabelecido um valor para cada um dos fatores dispostos na tabela 1.

Tabela 1: Dimensionamento do fator de segurança da manga de eixo traseira.

FATOR	PENALIZAÇÃO
Conhecimento preciso do carregamento	3,5
Conhecimento preciso das tensões	3,5
Conhecimento preciso da resistência do material	3,0
Necessidade de conservação	-3,0
Gravidade da consequência da falha	3,3
Qualidade da fabricação	2,5
Condições de operação	-3,5
Qualidade da manutenção	-3,5
Somatório das penalizações (t)	5,8
Fator de segurança (nd)	3,5

De acordo com a tabela 1, o fator de segurança ideal para a manga de eixo traseira do veículo Baja Sinuelo V deve assumir um valor de, no mínimo, 3,5.

2.2.2 Condições de contorno para o veículo Baja Sinuelo V

As condições de contorno impostas à manga de eixo foram baseadas nas condições de pista enfrentadas pelo veículo durante a prova *Suspension and Traction* nas competições Baja SAE Brasil. Considerou-se o veículo realizando um salto de 1,5 m de altura numa pista de terra seca, com uma velocidade de 41,4 km/h (SAE BRASIL, 2016), seguido de uma frenagem de 4,0 m. Para os dados do piloto, foram utilizados os valores máximos permitidos pela competição: 1,90 m de altura e massa de 113,4 kg (SAE BRASIL, 2012). Os demais dados utilizados na análise são apresentados na tabela 2.

O coeficiente de atrito foi obtido a partir de Rosa; Leal; Nicolazzi (2008). As demais informações contidas na Tabela 2 são provenientes do projeto detalhado do veículo Baja Sinuelo V e de informativos oficiais das competições Baja SAE Brasil.

Tabela 2: Condições de contorno para análise de esforços.

GRANDEZA	VALOR
Intervalo de tempo até atingir a velocidade máxima	4,622 s
Coefficiente de atrito do pneu com a pista de terra seca	0,70
Massa total do veículo	228,86 kg
Distância entre eixos	1,50 m
Distância longitudinal do eixo traseiro ao centro de gravidade do veículo	0,66 m
Altura do centro de gravidade do veículo em relação à pista após o salto	0,32 m
Distância do centro da roda até o centro da manga de eixo	0,0513 m
Ângulo entre o plano transversal da bandeja e plano vertical da manga de eixo	8,0 °
Fator de segurança	3,50

2.2.3 Forças atuantes sobre a manga de eixo traseira

De acordo com Junior, Ferraro e Soares (2007), a velocidade resultante do veículo pode ser determinada pela Equação 4.

$$VR = \sqrt{Vmáx^2 + 2gH} \quad (4)$$

Onde:

VR – Velocidade resultante do veículo;

$Vmáx$ - Velocidade máxima do veículo;

g - Aceleração gravitacional;

H - Altura do salto realizado pelo veículo.

A força aplicada sobre a manga de eixo, caracterizada como a força de reação da bandeja superior da suspensão traseira sobre o componente, pode ser determinada, segundo adaptado de Hibbeler (2011) e Gillespie (1999), pela Equação 5.

$$F = \frac{M \cdot VR}{\Delta t} \cdot \left(1 - \frac{c}{L}\right) \cdot \frac{\cos(\theta_{bm})}{2} \quad (5)$$

Onde:

F - Força de reação sobre a manga de eixo traseira;

M - Massa total (veículo e piloto);

Δt - Tempo de queda do salto;

c - Distância longitudinal do eixo traseiro ao centro de gravidade do veículo;

L - Distância entre eixos;

θ_{bm} - Ângulo entre o plano transversal da bandeja e plano vertical da manga de eixo.

Adaptado de Gillespie (1999), a transferência de carga dinâmica sobre a roda traseira pode ser obtida pela Equação 6.

$$Wr_{roda} = \left\{ \left[\frac{M \cdot VR}{\Delta t} \cdot \left(1 - \frac{c}{L} \right) \right] + \left[\frac{M \cdot VR \cdot (0 - (Vmáx)^2) \cdot h}{\Delta t \cdot 2 \cdot \Delta S \cdot g \cdot L} \right] \right\} \cdot \frac{1}{2} \quad (6)$$

Onde:

Wr_{roda} – transferência de carga dinâmica sobre a roda traseira;

h – Altura do centro de gravidade em relação à pista;

ΔS – Distância de frenagem;

Conforme a Equação 7, adaptada de Hibbeler (2011) e Gillespie (1999), o momento torsor é definido pelo produto da distância entre centros da roda e da manga de eixo, e a força resultante sobre a roda. Esta força é obtida pelas forças de arrasto e impacto, respectivamente, gerado sobre a roda durante a condição dinâmica imposta ao veículo.

$$Mt = \sqrt{(Wr_{roda} \cdot \mu)^2 + \left(\frac{F}{\cos(\theta_{bm})} \right)^2} \cdot Ceixo \quad (7)$$

Onde:

Mt - Momento torsor sobre a manga de eixo;

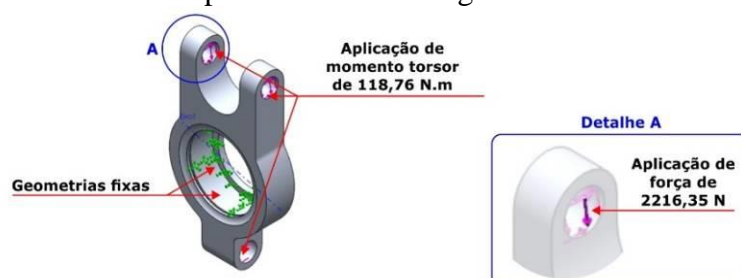
μ - Coeficiente de atrito entre o pneu e a pista de terra seca;

$Ceixo$ - Distância entre o centro da roda e o centro da manga de eixo.

2.2.4 Condições de contorno para a manga de eixo traseira

A figura 4 mostra a interface do módulo *SolidWorks Simulation*, onde é possível visualizar as condições de contorno aplicadas durante a análise de elementos finitos.

Figura 4: Condições de contorno para análise da manga de eixo traseira.



Fonte: Autores

Conforme indicado na Figura 4, as faces internas da manga de eixo, onde o rolamento da roda fica alojado, foram consideradas geometrias fixas. Uma força (F) de 2216,35 N foi aplicada sobre os furos superiores do componente, uma vez que, estando o amortecedor da suspensão apoiado sobre a bandeja superior, é nesta região que ocorre a reação à força vertical gerada do salto.

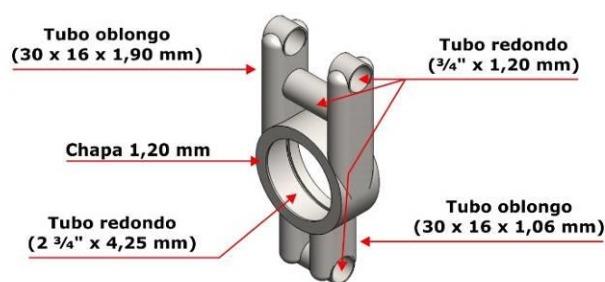
Sobre o plano que intercepta o centro dos furos superiores e do furo inferior, foi criado um eixo – Eixo 1 – com um ângulo de $14,81^\circ$ em relação ao plano horizontal do componente. Nos furos superiores e no furo inferior foi aplicado um momento torsor (Mt) de intensidade 118,76 N.m em torno do Eixo 1, que representa a reação do eixo da roda em relação às bandejas fixadas na manga de eixo.

Vale ressaltar que estas condições de contorno foram aplicadas tanto na manga de eixo utilizada atualmente pela equipe, quanto na nova manga de eixo, que visa a redução de custos.

2.2.5 Modelamento da manga de eixo com redução de custos

A manga de eixo visando redução de custos foi modelada através do software *SolidWorks* utilizando como material o aço SAE 1020, por ser de baixo custo e fácil aquisição. A figura 5 mostra o perfil da nova manga de eixo, bem como os materiais utilizados para fabricação.

Figura 5: Manga de eixo para redução de custos.



Fonte: Autores

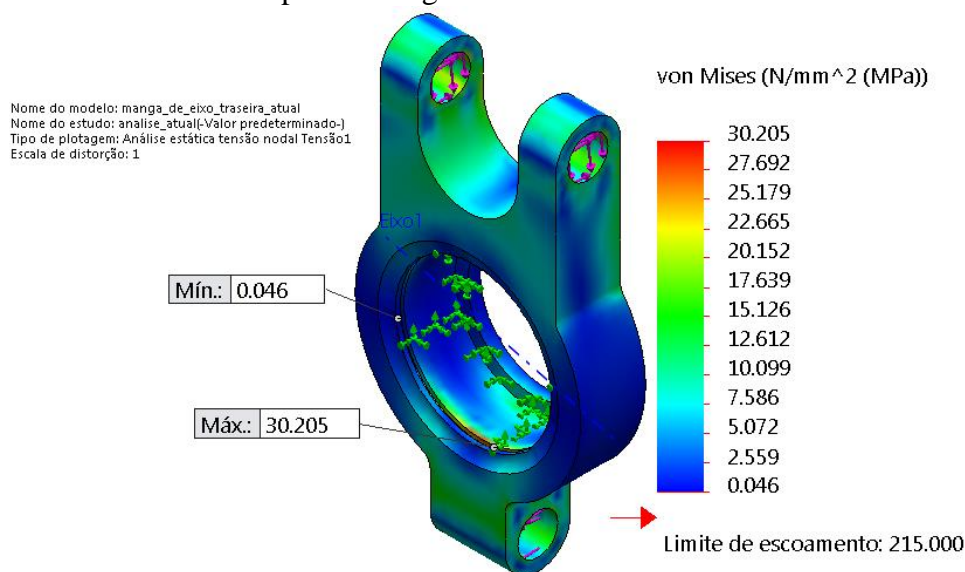
Vale ressaltar que apenas a geometria deste componente sofreu adaptações, isto é, as dimensões base da nova manga de eixo não foram modificadas em relação ao componente usado atualmente pela equipe.

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1 Análise da manga de eixo atual

Utilizando o limite de escoamento da liga de alumínio 6063-T6 – 215 MPa – e o fator de segurança – 3,50 – na Equação 1, encontrou-se um valor de 61,429 MPa para a tensão admissível de projeto para a manga de eixo utilizada atualmente para equipe. A Figura 6 mostra a análise de esforços realizada neste componente.

Figura 6: Escala de Von Mises para a manga de eixo traseira atual.



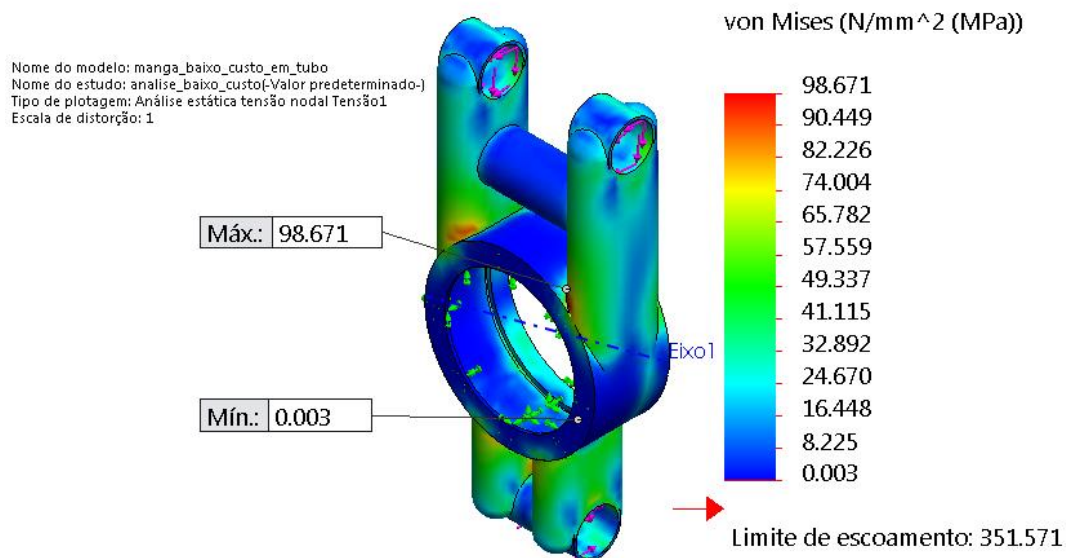
Fonte : Autores

Conforme indicado na figura 6, a tensão máxima atingida pelo carregamento na manga foi de 30,205 MPa, isto é, o componente encontra-se superdimensionado.

2.3.2 Análise da manga de eixo com redução de custos

Conforme já mencionado, a nova manga de eixo será fabricada em aço SAE 1020, cuja tensão de escoamento é de aproximadamente 351,5 MPa. Esta tensão juntamente com o fator de segurança, aplicados na Equação 1, obteve-se uma tensão admissível de projeto de 100,449 MPa. A figura 7 mostra a análise de esforços realizada para a nova manga de eixo.

Figura 7: Escala de Von Mises para a manga de eixo com redução de custos.



Fonte: Autores

Pela Figura 7, pode-se concluir que a manga de eixo projetada encontra-se bem dimensionada, pois a tensão máxima atingida durante simulação foi de 98,671 MPa, ainda abaixo da tensão admissível de projeto.

2.3.3 Comparativo entre componentes

A manga de eixo atual possui massa de 431,77 gramas e custo total de R\$ 397,50. Já a nova manga de eixo com redução de custos, possui massa de 435,17 gramas e custo total de R\$ 54,17. Com estes dados é possível verificar um aumento de massa de 0,8% e uma redução de custos de 86,4%.

CONCLUSÃO

Através do método de análise de elementos finitos apresentado neste trabalho, as seguintes conclusões podem ser retiradas:

- A manga de eixo atualmente utilizada é superdimensionada, isto é, o componente está projetado para suportar uma tensão muito superior à necessária.
- A nova concepção de manga de eixo traseira proporciona uma redução de custos de 86,4 % em relação ao projeto atual.
- Além de atingir a redução de custos, o novo componente encontra-se bem dimensionado, tendo em vista que a tensão máxima de operação encontra-se abaixo da tensão admissível de projeto.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, D. A. **Dimensionamento cinemático e dinâmico de suspensão duplo A**. Trabalho final de curso (Engenharia Mecânica) – Universidade de Brasília. Brasília, 2012.
- BOSCH, R. **Automotive handbook: electronic automotive handbook**. 1 ed. [S.l.]: [s.n.], 2002.
- COLLINS, J. A. **Projeto mecânico de elementos de máquinas**. LTC, 2006.
- COSTA, P. G. **A bíblia do carro**. [S.l.]: [s.n.], 2002.
- FONSECA, J. O.; TAVARES, J. M. **Introdução ao SolidWorks: análise de tensões de peças**. Faculdade de Engenharia FEUP. Portugal, 2012.
- FRANCESCHI, J. **Dinâmica funcional de uma suspensão duplo A**. Trabalho final de curso (Engenharia Mecânica) – Universidade Regional Integrada de Erechim. Erechim, 2014.
- GILLESPIE, T. D. **Fundamentals of vehicle dynamics**. Warrendale - EUA: SAE International, 1999.
- HIBBELER, R. C. **Estática Mecânica para Engenharia**. 12 ed. 2011.
- JUNIOR, F. R.; FERRARO, N. G.; SOARES, P. A. T. **Os Fundamentos da Física 1**. 9 ed. Editora Moderna, 2007.
- REFFATTI, F. **Determinação das forças atuantes na suspensão dianteira de um veículo baja SAE**. Trabalho final de curso (Engenharia Mecânica) – Faculdade Horizontina. Horizontina, 2015.
- ROSA, E.; LEAL, L. C. M.; NICOLAZZI, L. C. **Uma introdução à modelagem quase estática de veículos automotores de rodas**. 2008. Disponível em: <<http://www.grante.ufsc.br>>. Acesso em: ago. 2016.
- SAE BRASIL, 2010. **Regulamento Baja SAE Brasil – Capítulo 1 – Definições**. Disponível em: <http://www.saebrasil.org.br/eventos/programas_estudantis/arquivos/Baja_2013_RBSB_1_-_Definicoes_-_Emenda_0.pdf>. Acesso em: set. 2016.
- SAE BRASIL, 2011. **Regulamento Baja SAE Brasil – Capítulo 9 – Avaliações e Pontuação**. Disponível em: <http://www.saebrasil.org.br/eventos/programas_estudantis/arquivos/Baja_2013_RBSB_9_-_Avaliacoes_e_Pontuacao_-_Emenda_3.pdf>. Acesso em: set. 2016.
- SAE BRASIL. **Informativo 03 – Prova de projeto**. 2014. Disponível em: <http://www.saebrasil.org.br/eventos/programas_estudantis/arquivos/Informativo%2003%20-%20Prova%20de%20Projeto.pdf>. Acesso em: ago. 2016.
- SAE BRASIL. **Pontuação oficial da SAE Brasil da 22ª Competição de Baja – Etapa Nacional**. 2016. Disponível em: <http://www.saebrasil.org.br/eventos/programas_estudantis/arquivos/Pontua%C3%A7%C3%A3o%20Baja%202016%20-%20Rev.%201.pdf>. Acesso em: ago. 2016.
- SAE BRASIL. **Regulamento Baja SAE Brasil – Capítulo 5 – Requisitos gerais do veículo**. 2012. Disponível em: <http://www.saebrasil.org.br/eventos/programas_estudantis/arquivos/Baja_2013_RBSB_5_-_Requisitos_Gerais_do_Veiculo_-_Emenda_2.pdf>. Acesso em: ago. 2016.
- ZIENKIEWICZ, O. C.; TAYLOR, R. L.; ZHU, J. Z. **Finite element method – Its basis and fundamentals**. 6 ed. Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005.