



## AUMENTO DA AUTONOMIA DE UM VEÍCULO MINI-BAJA POR MEIO DO DESENVOLVIMENTO DE UM CUBO DE RODA USANDO SIMULAÇÃO NUMÉRICA.

**Autor (es):** Igor Cordeiro Lima, [igor\\_cordeiro11@hotmail.com](mailto:igor_cordeiro11@hotmail.com)<sup>1</sup>  
Diógenes Sena de França e Silva, [diogenes.sfs@gmail.com](mailto:diogenes.sfs@gmail.com)<sup>1</sup>  
Tiago Simão Ferreira, [tiago.simao@ifmg.edu.br](mailto:tiago.simao@ifmg.edu.br)<sup>1</sup>  
Gustavo Magela Melchiades, [gustavommelchiades@gmail.com](mailto:gustavommelchiades@gmail.com)<sup>1</sup>  
Timóteo Simão Ferreira, [timoteo\\_ferreira@hotmail.com](mailto:timoteo_ferreira@hotmail.com)<sup>2</sup>  
Reginaldo Almeida, [reginaldo.almeida@fcagroup.com](mailto:reginaldo.almeida@fcagroup.com)<sup>2</sup>

**Palavras-chave:** Cubo de roda, Elementos finitos, Resistência ao rolamento, Autonomia.

**Campus:** <sup>1</sup> Instituto Federal de Minas Gerais – Campus Congonhas, Av. Michel Pereira de Souza, 3007 - Campinho, Congonhas - MG, 36415-000; <sup>2</sup> Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Av. Antônio Carlos, 6627 - Brasil, CEP: 31270-901

**Área do Conhecimento (CNPq):** EngenariIII, 3.05.00.00-1; Mecânica dos Sólidos 3.05.03.00-0

### RESUMO

A preocupação com o consumo de combustível em automóveis tem aumentado ano após ano. Com o objetivo de reduzir esse consumo em veículos do tipo mini-Baja, o primeiro passo é estudar quais fenômenos interferem diretamente no consumo. Dentre os vários fenômenos, a resistência ao rolamento é a força que mais contribui para o consumo, quando o veículo se movimenta em velocidade constante. Dentre as possibilidades de reduzir a resistência ao rolamento, a considerada mais viável é o redimensionamento do cubo de roda. Para o redimensionamento, é necessário definir, por meio de equações analíticas, as cargas sob as rodas traseiras quando o veículo estiver sob determinados regimes de movimento. Este trabalho visa definir todas as cargas. Em seguida a análise passará de analítica para numérica e um de cubo de roda de designe comercial será simulado via elementos finitos, com a intenção de medir a tensão e a deformação resultante dessas solicitações. Com o resultado da simulação, foi possível otimizar a geometria, redimensionando o cubo de roda, para um modelo que possui massa inferior e consequentemente menor resistência de rolamento. O trabalho tornou o veículo mais econômico. A comparação entre os resultados de tensão e deformação garantiu a efetividade do processo de otimização.

### INTRODUÇÃO:

A competição de Baja da SAE Brasil existe desde 1995 e desde então vários estudantes de universidades nacionais disputam uns contra os outros em várias provas, para que, à cada edição, uma equipe se sagre campeã nacional e ganhe o direito de representar o país em um competição internacional. Além da competição em si, o projeto Baja SAE Brasil é uma oportunidade de alunos de engenharia aplicarem o conhecimento adquirido em sala de aula. O Brasil tem como objetivo reduzir a emissão de poluentes em 35% até 2030, segundo Rovere et al. (2014). Então, somando esta meta à perspectiva educacional da competição de Baja SAE Brasil, os veículos baja se tornam um ótimo laboratório de testes, para que estudantes de engenharia ajudem o país a cumprir a meta de redução de emissão de poluentes.

Para a competição de Baja da SAE Brasil não é permitido alterar as principais configurações do motor, que poderiam resultar em um menor consumo de combustível. Segundo o regulamento da competição da SAE Brasil (2016), o motor deve ser o mesmo para todos os veículos e o mesmo não deve ser alterado, permanecendo original de fábrica. Uma vez então que não é possível alterar o motor, o necessário para diminuir o consumo de combustível é analisar em quais rotações o motor deve girar, para que ele consuma o menos possível. Aumentando assim sua autonomia.

O primeiro item deste trabalho visa conhecer melhor o motor utilizado na competição, aproveitando-se da dependência entre consumo específico, potência e torque, apresentada por Heywood (1988) e relacioná-las à equação de consumo específico do veículo, proposta Brunetti (2013). Para o primeiro item do trabalho, há também a necessidade apresentar a força de resistência ao rolamento, definida também por Brunetti (2013), uma vez que esta é a força que mais interfere na autonomia e demonstrar o quão relevante é o peso do cubo de roda, em relação à resistência ao rolamento. Há também a necessidade, ainda no primeiro item, de caracterizar as cargas que atuam no cubo de roda, em determinadas situações: para o atual trabalho será



considerado um veículo realizando uma curva, com velocidade baixa e constante, explicados por Canale (1989). Por fim, os dados adquiridos na sessão serão aplicados à uma geometria comercial de cubo de roda e este será simulado computacionalmente, para a retirada da tensão de von Mises e da deformação equivalente.

O segundo item do trabalho utilizará a tensão e a deformação resultantes da aplicação de carga no cubo de roda comercial para que seja possível alterar a geometria e o material do cubo de roda. O redimensionamento do cubo de roda tem por objetivo reduzir a massa do mesmo, enquanto a mudança de material visa encontrar um material de menor densidade que suporte as cargas necessárias, diminuindo consequentemente a resistência ao rolamento. A massa será reduzida até que se possa alcançar a maior autonomia possível, sem que haja perigo de falha do cubo de roda, tomando cuidado também a deformação equivalente. Os resultados encontrados pela simulação computacional garantirão um aumento da autonomia do veículo comprovando-se a eficácia do estudo, podendo ser utilizado em competições futuras.

## METODOLOGIA:

### ESTUDO ANALÍTICO DOS PARÂMETROS QUE INTERFEREM NA RESISTÊNCIA AO ROLAMENTO

O regulamento da competição de Baja SAE Brasil (2016) define o motor que deve ser utilizado pelas equipes da seguinte maneira: Motor de quatro tempos, monocilíndrico à gasolina, alimentado por carburador. 305 cilindradas, 10HP e torque máximo de 14,4lb.ft. Heywood (1989) relaciona a potência com o consumo específico na Eq.(1), enquanto Leal et al. (2008) relaciona a potência com o torque Eq.(2).

$$P = \frac{m_f}{scf} \quad (1)$$

$$P = \frac{T2\pi m}{6000} \quad (2)$$

Canale (1989), define as cargas que se opõe ao movimento como sendo: Resistência devido à inclinação da pista, resistência do ar, resistência das forças de inércia, resistência da transmissão e resistência ao rolamento. Com o intuito de simplificar os cálculos, a resistência de transmissão não será considerada, portanto, será assumido como 100% a eficiência da transmissão e da redução. Além disso, para um veículo que esteja em velocidade constante, em uma pista plana, é possível reduzir as cargas de resistência em somente resistência ao rolamento e resistência do ar. Desta maneira, Leal et al. (2008) afirma que o torque consumido pelo veículo, pelas forças de resistência ao movimento dadas em função da velocidade pode ser quantificado pela Eq.(3):

$$T_{req} = \frac{D_{roda}}{2i_{trans}i_{red}} \left[ \frac{C_a \rho_{ar} A_{front}}{2} + (f_{front} G_{front}) + (f_{tras} G_{tras}) \right] \quad (3)$$

Para o atual trabalho, foram considerados os dados de um veículo baja, representado na Tab.1 que contém as relações de transmissão e redução, o diâmetro da roda, o coeficiente de arrasto, a densidade do ar e a área frontal, respectivamente:

Tabela 1: Constantes e coeficientes utilizados no modelo veículo. Fonte: Autor.

itrans	$3,83 \geq i \geq 0,76$
ired	9
Droda	0,508m
Ca	0,32
par	1,1225
Afront	2m



Utilizando novamente as Eq.(1), Eq.(2), Eq.(3) e também a Tab.1, Brunetti (2013) mostra que é possível traçar a curva de potência disponível e potência requerida pela rotação, no qual é possível determinar o ponto de equilíbrio do veículo – ou seja, o ponto onde a potência disponível e a potência requerida se cruzam. Tal curva é mostrada na Fig. 1. O objetivo deste estudo é calcular a autonomia do veículo neste ponto de equilíbrio, e posteriormente tentar aumentá-la o máximo possível.

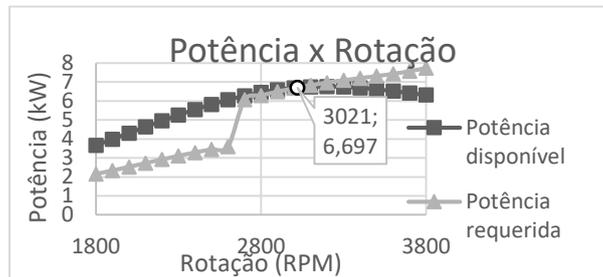


Figura 1: Curva de Potência disponível e potência requerida, em relação à rotação do motor. Fonte: Autor.

Brunetti (2013) define a Eq.(4) através da qual é possível determinar a autonomia de um veículo em função da velocidade, da potência do motor, do consumo específico e da densidade do combustível utilizado. Para o projeto Baja, a SAE (2016) exige que seja utilizado combustível comum, cuja densidade é equivalente à 0,775kg/L.

$$Autonomia = \frac{Pv}{CeP} \quad (4)$$

A Fig.1 mostra que as curvas se cruzam na rotação de 3021rpm. A Tab.2 apresenta os valores de velocidade, consumo específico e potência no ponto de equilíbrio, além do valor da autonomia do veículo.

Tabela 2: Grandezas do veículo no ponto de equilíbrio. Fonte: Autor.

Velocidade	11,746m/s
Consumo Específico	0,508kg/kWh
Potência	6,697kW
Autonomia	9,63km/L

Uma vez que o objetivo do presente trabalho é aumentar a autonomia do veículo, conclui-se que para isso basta deslocar o ponto de intercepção para a direita, para o mais próximo possível do ponto onde a potência será máxima. Retornando à Eq.(3) é possível afirmar que só existem duas possibilidades de reduzir a resistência ao rolamento das rodas, segundo Brunetti (2013). A primeira seria reduzir o coeficiente de resistência ao rolamento, representado pela Eq.(5). Para o atual projeto, foi adotado o valor de 7,107 para  $s$ , que representa o solo de dureza média que retrata o cenário de utilização do veículo.

$$f = (0,0116 + 0,0000142 V) s \quad (5)$$

Considerando o tamanho do cubo, em relação ao tamanho da roda e a complexidade da geometria da roda, em relação à geometria do cubo, é mais barato para uma equipe dimensionar seus próprios cubos. Neste estudo será alterada a geometria do cubo e o material.

#### CARACTERIZAÇÃO DAS FORÇAS QUE ATUAM NO CUBO DE RODA DE UM VEÍCULO MINI-BAJA

Para este trabalho será considerado que o veículo está em velocidade constante enfrentando uma curva, pois neste estado ele está sob o efeito de diferentes tipos de força, o que obriga que o cubo de roda suporte todas, de maneira simultânea. A Fig.2 mostra um fluxograma com os passos para o redimensionamento do



cubo de roda de veículo mini Baja que será utilizado aqui como metodologia para garantir o sucesso do redimensionamento:

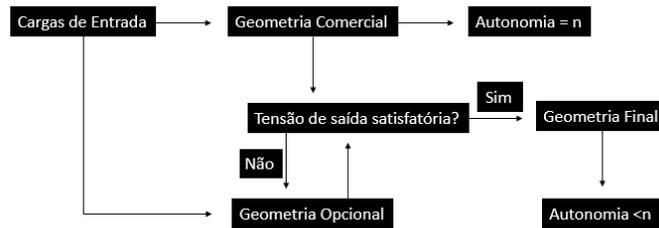


Figura 2: Fluxograma dos passos de redimensionamento do cubo de roda. Fonte: Autor.

Ao realizar uma curva, o veículo fica sujeito a uma força. Essa transferência depende da altura do centro de gravidade do carro. Porém, além da geometria do carro, a velocidade também deve ser considerada. Canale (1989) afirma que a influência da velocidade é quadrática, em relação à força centrífuga. Povoia *et al.* (2011) afirma que a aceleração centrípeta é máxima quando o veículo está no limite do tombamento lateral, que ocorre a uma certa velocidade limite. A Eq.(6) mostra a relação entre a velocidade do veículo e a força lateral.

$$F_c = \frac{mv^2}{R_c} \quad (6)$$

A velocidade limite para que o carro não tombe, quando realizar uma curva, é considerada máxima quando a massa sobre a roda interior à curva for zero, segundo Canale (1989). O mesmo autor afirma que são os eixos dianteiro e traseiro os responsáveis por equilibrar a força centrífuga. À parcela de força de cada eixo, dá-se o nome de força lateral, segundo Brunetti (2013). A Tab.3 mostra os resultados para força lateral, para o torque e para a força peso, que serão os valores de entrada utilizados na simulação computacional.

Tabela 3: Valores de entrada para a simulação computacional. Fonte: Autor.

Torque	368,591552Nm
Força Lateral	989,035N
Força Peso	1501,340N

### SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE UM CUBO DE RODA COMERCIAL

O processo de simulação é um processo de aproximação, tal como afirma Bosch (2005). Uma maneira de diminuir esta divergência de resultados é aplicando um controle de malha, como afirma Alves (2012). Cada malha possui uma geometria e uma quantidade de graus de liberdade.

O tamanho da malha escolhido levou em consideração a aproximação entre a geometria da peça convencional – mostrado na Fig.3 – e a geometria da peça discretizada, como sugere Alves (2012). O resultado do modelo discretizado pode ser visto também na Fig.3, junto do detalhe da malha, enquanto os dados da malha estão detalhados na Tab.4.



Figura 3: Modelo convencional do cubo de roda comercial. Fonte: Autor.

Tabela 4: Número de nós e de elementos do modelo comercial discretizado. Fonte: Autor.

Número de elementos	471603
Número de nós	57767
Tamanho dos	1mm

A Tab.5 apresenta as propriedades do material do cubo de roda comercial, composto por ferro fundido cinzento. A Fig.4 apresenta as condições de contorno do estudo proposto, como propõe Budynas et al. (2011).

Tabela 5: Propriedades do material do cubo de roda. Fonte: Autor.

Módulo elástico	66178,1MPa
Coefficiente de Poisson	0.27
Massa específica	7200kg/m <sup>3</sup>
Limite de ruptura	151,66MPa

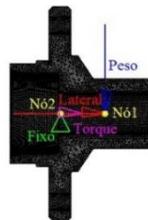


Figura 4: Condições de contorno para o cubo sujeito à curva. Fonte: Autor.

Os resultados das simulações do cubo de roda comercial podem ser vistos na Fig.5, enquanto os valores máximo da tensão de Von Mises e do deslocamento máximo podem ser vistos na Tab.6. O fator de segurança é definido por Hibbeler (2010) como sendo a razão entre a tensão limite de ruptura e a tensão máxima encontrada no modelo. Comparando com o limite de ruptura do material – disponível na Tab.5 – com o fator de segurança que é no mínimo 2,83, fica explícito a possibilidade de se reduzir a razão entre a tensão de ruptura e a tensão máxima.

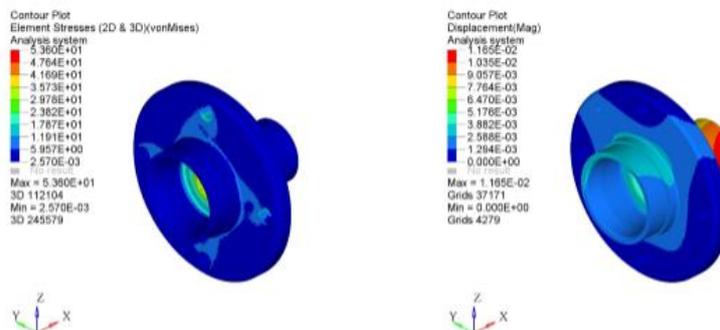


Figura 5: Resultados da tensão de von Mises e deslocamento máximo do cubo de roda comercial. Fonte: Autor.

Tabela 6: Valores máximos de tensão de von Mises e deformação equivalente. Fonte: Autor.

Von Mises máximo	53,60MPa
Deslocamento	0,01165mm



Foram redimensionadas as áreas onde a tensão eram muito baixas. Essas áreas foram eliminadas da peça, pois o estudo apresentado no presente trabalho, que pode ser visto na Fig.5, mostrou serem desnecessárias. A nova geometria do cubo de roda, denominado cubo de roda opcional é mostrado na Fig.6, tal como sua versão discretizada e um detalhe na geometria superficial da malha que não foi alterada, em relação ao modelo do cubo comercial, enquanto os dados da malha estão detalhados na Tab.7. Optou-se novamente por um tamanho de malha constante, pelos mesmos motivos do modelo comercial.

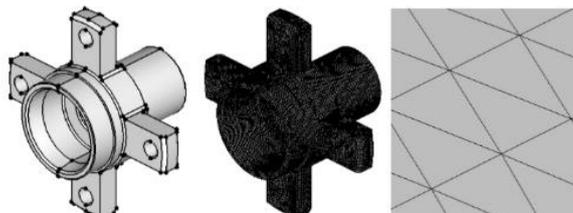


Figura 6: Modelo opcional do cubo de roda. Fonte: Autor.

Tabela 7: Número de nós e de elementos do modelo opcional discretizado. Fonte: Autor.

Número de elementos	332712
Número de nós	39421
Tamanho dos	1mm

Devido à diminuição do volume do cubo de roda, que antes era  $0,00018896\text{m}^3$ , no modelo comercial para  $0,00011942\text{m}^3$  no modelo opcional, a quantidade de nós e de elementos – para o tamanho de nó de 1mm – são menores. Além da mudança do volume, houve também mudança no material da peça: Trocou-se o ferro fundido cinza por uma liga de alumínio que tem suas propriedades mostradas na Tab.8.

Tabela 8: Propriedades da liga de alumínio. Fonte: Autor.

Módulo elástico	69000MPa
Coefficiente de Poisson	0.33
Massa específica	$2700\text{kg}/\text{m}^3$
Limite de escoamento	177,68MPa

A mudança no volume e na densidade do material resultou em uma redução da massa do cubo de roda. O modelo comercial possui massa de 1,360kg enquanto o modelo opcional possui massa de 0.322kg. Uma redução de 76,32% na massa do cubo de roda. Mesmo com a redução de massa, foram mantidas as mesmas cargas, mantendo as condições de contorno idênticas à do geometria comercial. O resultado da tensão e da deformação são mostrados na Fig.7, enquanto os valores máximos são mostrados na Tab.9.

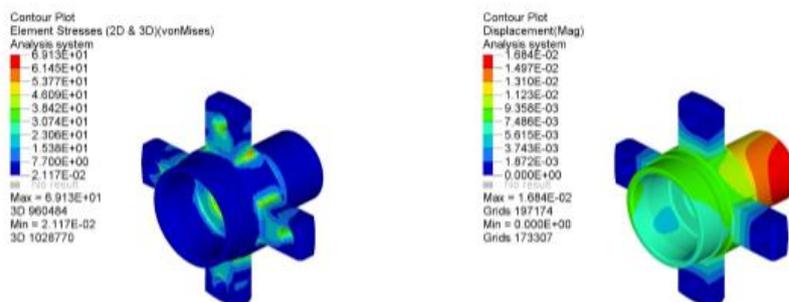


Figura 7: Resultados da tensão de von Mises e deslocamento máximo do cubo de roda opcional. Fonte: Autor.



Tabela 9: Valores máximos de tensão de von Mises e deformação equivalente. Fonte: Autor.

Von Mises máximo	69,13MPa
Deformação máxima	0,01684mm

A tensão máxima continua abaixo do limite de escoamento do material, porém o fator de segurança diminuiu: de 2,83 para 2,57. Um fator de segurança mais baixo garante o não superdimensionamento da peça, o que pode ser traduzido em maior aproveitamento mecânico. Lembrando que quanto maior o fator de segurança, maior também a massa do cubo de roda e maior a resistência ao rolamento. Apesar de mais próximo ao limite, o fator de segurança não preocupa, pois não está totalmente correto. O valor real do fator de segurança é um pouco maior, já que nos cálculos apresentados neste trabalho não foi considerada a resistência ao movimento por causa da eficiência mecânica, nem foi utilizada a velocidade real do veículo, considerando o escorregamento entre pneu/solo.

A alteração na geometria do cubo de roda e em seu material resultou conseqüentemente em uma redução da massa não suspensa do veículo. O peso sobre a roda traseira esquerda que era com o cubo comercial 762,191N, passou à 752,008N uma redução de 10,183N. Como resultado dessa diminuição da carga não suspensa, reduz-se também a resistência ao rolamento. A rotação máxima do cubo de roda comercial foi menor que a rotação máxima do cubo de roda opcional 42 rpms, o que corresponde à 1,37% a mais. A potência máxima subiu de 6,697kW para 6,721kW o que corresponde a um aumento de 0,357%. Como pode ser visto na Fig.8 que mostra o resultado da nova resistência ao rolamento, em relação à potência requerida, na qual é possível perceber que houve realmente um deslocamento no ponto de intersecção, como já era previsto. Os novos valores de velocidade, consumo específico e potência no novo ponto de equilíbrio, além do valor da autonomia do veículo, neste ponto são apresentados na Tab.10.

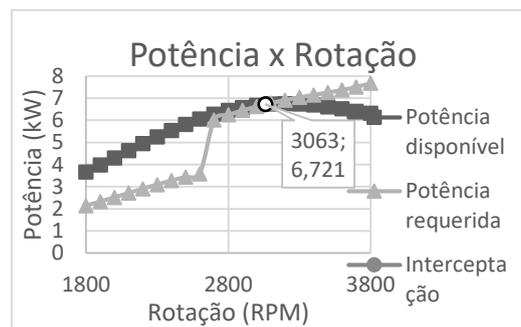


Figura 8: Curva de Potência disponível e potência requerida, em relação à rotação do motor. Fonte: Autor.

Tabela 10: grandezas do veículo no novo ponto de equilíbrio. Fonte: Autor.

Velocidade	11,909m/s
Consumo Específico	0,507kg/kWh
Potência	6,721kW
Autonomia	9,75km/L

A Tab.10 comprova o aumento da autonomia do veículo, com o redimensionamento do cubo de roda, tal como previsto. A autonomia do veículo, utilizando o cubo de roda comercial é de 9,63km/L, enquanto com a utilização do cubo de roda opcional é de 9,75km/L, o que representa um aumento de 1,246% na autonomia do veículo, ou em número, 120m à mais para cada litro de combustível consumido pelo veículo. Considerando que o tanque dos veículos mini-baja possuem, por padrão, segundo o regulamento da SAE (2016) 3L, então o veículo equipado com o cubo de roda opcional rodaria 360m à mais, à cada tanque de combustível.

## CONCLUSÕES:

À primeira vista, os novos valores são pouco diferentes dos anteriores, o que poderia colocar em questionamento a viabilidade do processo. Porém apesar de baixos valores de redução, o resultado é considerado satisfatório, uma vez que a alteração da geometria do cubo de roda não é a única possibilidade



de redução da resistência ao rolamento, mas é a mais fácil de se aplicar. Vale aqui ressaltar que seria também uma possibilidade alterar o material do cubo de roda, para que fosse possível reduzir a massa, sem precisar diminuir tanto o fator de segurança.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- Bosch, R. 2005. Manual de Tecnologia Automotiva. 25ªEd. São Paulo: Blucher. pp. 190-196;749.
- Brunetti, F., 2013. Motores de Combustão Interna. 3ªEd. Vol1. São Paulo: Blucher. pp. 223-250.
- Budynas, R., Nisbet, J.K., 2011. Elementos de Máquinas de Shigley – Projeto de Engenharia Mecânica. 8ªEd. Porto Alegre: AMGH. pp. 963-971.
- Canale, A.C., 1989. Automobilística Dinâmica e Desempenho. 10ªEd. São Paulo: Érica. pp. 57-77.
- Filho, A. A., Elementos Finitos - a Base da Tecnologia Cae - Análise Não Linear. 1ªEd. São Paulo: Érica.
- Heywood, J. B. 1988. Internal Combustion Engine Fundamentals. 1ªEd. McGraw-Hill Education. pp. 42-52.
- Hibbeler, R. C., Resistência Dos Materiais. Pearson Education.
- Leal, L.C.M., Nicolazzi, L.C. e Rosa, E, 2008. Uma introdução à modelagem quase estática de veículos automotores de rodas. Publicação interna do GRANTE – Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC.SC, Brasil. pp. 43-76.
- Povoa, A.H., Nacif, G.C.L., Christoforo, A.L., Dias, A.M.S., Panzera, T.H., 2011. Avaliação numérica do emprego de geometria alternativa na elaboração do flange de roda de um protótipo off-road mini-baja.
- Rovere, E. L. L., Wills, W., 2014. Eficiência energética e emissões de gases de efeito estufa (GEE). SAE Brasil (RBSB5). Requisitos Gerais do Veículo. Emenda 3. 2016.

#### Participação em Congressos, publicações e/ou pedidos de proteção intelectual:

Este trabalho, em diferentes versões, foi apresentado parcialmente nos congressos: SIMMEC 2016 sob o título de “Redimensionamento de cubo de roda de um veículo mini-Baja, por meio de simulação numérica, visando diminuição da resistência ao rolamento”, no CONEM 2016 sob o título de “Redimensionamento de cubo de roda de um veículo mini-baja, por meio de simulação numérica, visando aumento da autonomia” e no congresso da SAE de 2016 sob o título de “Redimensionamento de cubo de roda de um veículo mini-baja, por meio de simulação numérica, visando aumento de força trativa”.

#### Agradecimento

Os autores gostariam de agradecer o auxílio dos membros da equipe de Bajaço, o apoio do Instituto Federal de Minas Gerais Campus Congonhas e também o apoio da Altair Brasil pela contribuição à realização do trabalho.