

Desenvolvimento de flange do eixo de saída da caixa de redução de um veículo fora de estrada Baja SAE

Development of a Baja SAE off-road vehicle gearbox output shaft flange

Desarrollo de la brida del eje de salida de la caja reductora de un vehículo todoterreno Baja SAE

Recebido: 20/09/2022 | Revisado: 29/09/2022 | Aceitado: 02/10/2022 | Publicado: 09/10/2022

Cecília Teixeira de Mello e Moura

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9753-2673>

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Brasil

E-mail: cica_pupsy@yahoo.com.br

André Nascimento da Silva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9364-745X>

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Brasil

E-mail: andre.nascimento.enge@gmail.com

Hugo Augusto Tupan Silva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4206-5668>

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Brasil

E-mail: hugo.tupan@ifmg.edu.br

Felipe Vieira Maciel

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7695-1345>

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Brasil

E-mail: felipe.maciel@ifmg.edu.br

Sinval Pedroso da Silva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3622-3308>

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Brasil

E-mail: sinval.pedroso@ifmg.edu.br

Resumo

O programa Baja SAE foi criado pela Sociedade de Engenheiros Automotivos (SAE) nos Estados Unidos com o objetivo de incentivar estudantes de graduação de escolas, à nível mundial, a colocarem em prática os conceitos acadêmicos aprendidos, a fim de desenvolverem o projeto, a fabricação e montagem de um veículo fora de estrada, para participação da competição. Assim, o escopo e objetivo principal deste trabalho foi o desenvolvimento do flange para acoplamento do eixo de saída da caixa de redução ao semieixo, que é parte integrante do sistema *powertrain* deste tipo de veículo. Com base nos dados de entrada do projeto, que incluem o torque transmitido no eixo de saída do sistema *powertrain*, e nos cálculos desenvolvidos após pesquisa bibliográfica realizada, foi possível dimensionar as medidas mínimas necessárias para o flange. Após esta etapa, as dimensões foram ajustadas de acordo com as de elementos de máquinas comerciais utilizados no mercado automotivo, como junta homocinética e parafusos. Referente ao material para a fabricação do flange, foi selecionado o ferro fundido nodular ASTM A536 100-70-03 (GGG-70). Para a montagem do flange e junta homocinética, foi selecionado parafuso do tipo Allen cabeça cilíndrica com sextavado interno e classe 12.9, por possuir boa resistência mecânica necessária para este tipo de aplicação.

Palavras-chave: Baja SAE; Eixo de transmissão; Elementos de máquinas; Flange do eixo de saída; *Powertrain*.

Abstract

The Baja SAE program was created by the Society of Automotive Engineers (SAE) in the United States with the aim of encouraging undergraduate students from schools worldwide to put into practice the academic concepts learned in order to develop the design, manufacture and assembly of an off-road vehicle to participate in the competition. Thus, the scope and main goal of this work was the development of the flange for coupling the gearbox output shaft to the driveshaft, which is an integral part of the powertrain system of this type of vehicle. Based on the project's input data, which includes the torque transmitted on the powertrain system's output shaft, and on the calculations developed after bibliographic research that was carried out, it was possible to define the minimum dimensions required for the flange. After this step, the dimensions were adjusted according to those of commercial machine elements used in the automotive market, such as CV joint and screws. Regarding the material for manufacturing the flange, it was selected the ductile cast iron ASTM A536 100-70-03 (GGG-70). For assembly the flange and CV joint, the cylindrical head Allen screw with internal hexagon and class 12.9 was selected, as it has good mechanical strength required for this type of application.

Keywords: Baja SAE; Driveshaft transmission; Machine elements; Output shaft flange; *Powertrain*.

Resumen

El programa Baja SAE fue creado por la Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE) de los Estados Unidos con el objetivo de incentivar a los estudiantes de pregrado de escuelas de todo el mundo a poner en práctica los conceptos académicos aprendidos para desarrollar el diseño, fabricación y montaje de un todoterreno vehículo de carretera para participar en la competición. Así, el alcance y objetivo principal de este trabajo fue el desarrollo de la brida para acoplar el eje de salida de la caja de cambios al semieje, que es parte integral del sistema de tren motriz de este tipo de vehículos. Con base en los datos de entrada del proyecto, que incluyen el torque transmitido en el eje de salida del sistema de transmisión, y en los cálculos desarrollados luego de una investigación bibliográfica realizada, fue posible dimensionar las medidas mínimas necesarias para la brida. Luego de este paso, se ajustaron las dimensiones de acuerdo a las de elementos de máquinas comerciales utilizadas en el mercado automotriz, tales como junta homocinética y tornillería. En cuanto al material para la fabricación de la brida se seleccionó fundición dúctil ASTM A536 100-70-03 (GGG-70). Para el montaje de la brida y junta homocinética se seleccionó un tornillo Allen de cabeza cilíndrica con hexágono interno y clase 12.9, ya que posee buena resistencia mecánica necesaria para este tipo de aplicación.

Palabras clave: Brida del eje de salida; Eje de transmisión; Elementos de máquinas; SAE baja; Tren motriz.

1. Introdução

Um veículo ou máquina possuem diversos componentes de diferentes complexidades, os quais podem ser classificados como elementos ou órgãos de máquinas. Com base nessa definição, tem-se que tanto um parafuso quanto um eixo virabrequim ou árvore de manivelas de um motor, são elementos de máquinas. Para tornar uma realidade de aprofundamento de conhecimento no mundo acadêmico, conforme SAE-Brasil (2021), foi criado na Universidade da Carolina do Sul, nos Estados Unidos da América, o programa Baja SAE (Sociedade de Engenheiros Automotivos), com a primeira edição realizada em 1976. Este programa consiste em um desafio lançado aos estudantes de graduação, especialmente de Engenharia, para aplicarem na prática os conhecimentos adquiridos academicamente, por meio de um processo integrado de desenvolvimento de produto, visando incrementar a preparação para o mercado de trabalho. Esse processo de desenvolvimento possibilita o aluno envolver com um caso real de desenvolvimento de um veículo fora de estrada (*off-road*) denominado mini baja, desde sua concepção, projeto detalhado, fabricação e testes, além de ter a oportunidade de empreender e desenvolver habilidades essenciais para atuarem como futuros profissionais da área de engenharia. Isso corrobora as informações de Che et al. (2012), os quais afirmam que o programa Baja SAE é tecnicamente desafiador e, entretanto, envolve muitos outros aspectos de uma empresa de engenharia moderna, sendo uma boa ferramenta de aprendizagem situacional para aprimorar tanto as habilidades pessoais quanto o desenvolvimento de trabalho em equipe e liderança dos alunos, habilidades e comportamentos esses denominados *soft skills*. E o mais estimulante para os alunos é que além da premissa do programa em dar total autonomia e responsabilidade aos alunos (por ex.: para dimensionar, desenvolver e projetar os sistemas do veículo, preparar relatórios, fabricar peças, montar o veículo, realizar os testes e as manutenções), as equipes vencedoras em âmbito nacional, são convidadas a participar da competição internacional, nos Estados Unidos (SAE Brasil, 2022). Este veículo é de assento único, movido por um motor com potência de 10 HP (horsepower), que é padrão entre equipes, com mudança de velocidade e torque por meio de transmissão continuamente variável, CVT (*continuously variable transmission*).

De acordo com Amaral (2020), desenvolver um componente sem ter uma referência e base, pode resultar em lacunas abertas no processo de desenvolvimento de produtos. Conforme Naunheimer et al. (2011), nos veículos em geral, a relação de transmissão de saída é alcançada por meio da combinação de uma série de componentes no *powertrain* (sistema de transmissão de força). Assim, o setor de *powertrain* é responsável por definir o conjunto de transmissão, e instalá-lo com o motor, cujos componentes devem ser dimensionados para atender a condição de máximo rendimento do sistema como um todo. Segundo Genta e Morello (2020), os eixos e semieixos de transmissão tem como principal responsabilidade transferir torque e velocidade entre componentes, com o objetivo de movimentar as rodas de um veículo.

Com base no descrito, este trabalho é parte integrante do projeto de um veículo fora de estrada em desenvolvimento por

uma instituição federal, cuja equipe tem o propósito de aprofundar nos estudos e conceitos sobre os principais componentes, conjuntos e sistemas deste veículo, desde sua concepção, e seguindo o regulamento administrativo e técnico Baja SAE Brasil (RATBSB), estabelecido pela SAE (SAE-Brasil, 2021). Para que fosse possível estruturar os estudos realizados neste trabalho, a equipe optou em dividir o escopo de atuação para o desenvolvimento do veículo em sistemas, tais como: estrutura (gaiola), suspensão e direção, chassis, freios, eletrônica e *powertrain*. Com base nestes aspectos, o escopo deste trabalho foi limitado em tratar apenas dos carregamentos presentes no eixo de saída do sistema *powertrain*, e com base nestes dados, dimensionar o flange que interliga o eixo de saída da caixa de redução ao semieixo de um veículo fora de estrada Baja SAE.

2. Metodologia

Segundo Lüdke e André (2013), a análise qualitativa se trata de uma pesquisa documental que busca identificar informações factuais nos documentos a partir de questões ou hipóteses de interesse. Portanto, foi feito um levantamento bibliográfico por meio de busca de artigos, trabalhos acadêmicos, literaturas diversas com o intuito de aprofundar conceitos gerais sobre os principais trabalhos já realizados, utilizando para isso recursos informatizados, como buscas realizadas no *Google* acadêmico, repositórios de universidades de ensino, entre outros. Para Pereira et al. (2018), nos métodos quantitativos, faz-se a coleta de dados quantitativos ou numéricos por meio do uso de medições de grandezas, e obtém-se, por exemplo, por meio da metrologia, números com suas respectivas unidades. Yin (2015) considera que os métodos qualitativos e quantitativos não se excluem, e podem ser importantes, se complementando e permitindo um melhor entendimento dos fenômenos em estudo.

Desse modo, este estudo se classificou como qualitativo e quantitativo, pois utilizou-se dos dois métodos para dimensionamento e desenvolvimento de componentes do sistema *powertrain* de um veículo fora de estrada Baja SAE. Para os cálculos foi necessário identificar os parâmetros e dados de entrada que são estabelecidos pelos fabricantes dos componentes e também pelo regulamento administrativo e técnico Baja SAE Brasil – RATBSB - (SAE-Brasil, 2021). Somente de posse dessas informações foi possível ter informações suficientes para que fossem aplicadas nas equações matemáticas identificadas nas pesquisas bibliográficas, e também realizar os desenhos 3D (tridimensional) e 2D (bidimensional) das peças desenvolvidas neste trabalho. Pinheiro et al. (2014) afirmam que devido à interligação de fatores entre os cálculos, é de fundamental importância a utilização de softwares para que se otimize o tempo de dimensionamento. Assim, para essa etapa foi utilizado o *software Solid Edge* Siemens, com a aplicação de modelamento CAD 3D (projeto tridimensional auxiliado por computador), que possibilitou fornecer mais clareza visual de como ocorreu o dimensionamento mecânico do flange do eixo de saída da caixa de redução, assim como a montagem virtual do sistema.

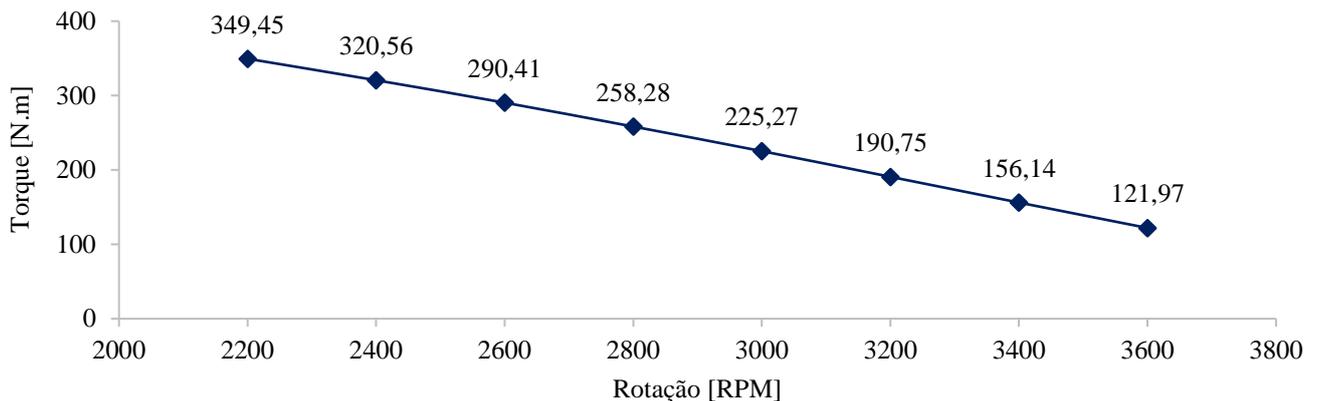
2.1 Dados de entrada

Segundo Shigley et al. (2005), o eixo é uma peça essencial para construções cinemáticas fundamentais mecânicas, pois constitui um bom exemplo de corpo carregado quase estático e dinâmico. Assim, de acordo com Budynas e Nisbett (2020), torque é qualquer vetor de momento que seja colinear com um eixo. Esse momento faz com que o elemento gire em torno do eixo longitudinal, provocando tensões de cisalhamento. De acordo com Bosch (2005), os sistemas de transmissão de um automóvel possuem a função de fornecer força para realizar a tração e impulsão necessárias para gerar movimento ao veículo, sendo necessárias as relações de transmissão para transformar as forças disponíveis de torque em força de tração requerida em diversos momentos e condições de deslocamento do veículo.

Com base nesses fundamentos e nos dados de um redutor previamente dimensionado para o veículo Baja SAE, tem-se o valor do diâmetro (d) do eixo de saída de 26,0 mm. Os cálculos de distribuição de torque no eixo de saída referente ao sistema de redução que inclui a transmissão continuamente variável, CVT (*continuously variable transmission*), conectada em série com

a caixa de redução e os respectivos rendimentos (0,95 para CVT; 0,98*0,98 para os dois pares de redução) estão mostrados de forma compilada na Figura 1. Nota-se que o maior torque do sistema de transmissão é 349,45 N·m à 2200 rpm, o que significa o valor mais crítico que o eixo de saída está submetido. Assim, este dado de entrada foi utilizado para o desenvolvimento dos cálculos e dimensionamento do conjunto flange, o qual é classificado na categoria de acoplamento rígido, que neste caso, faz a conexão entre a saída da caixa de redução para o semieixo do veículo.

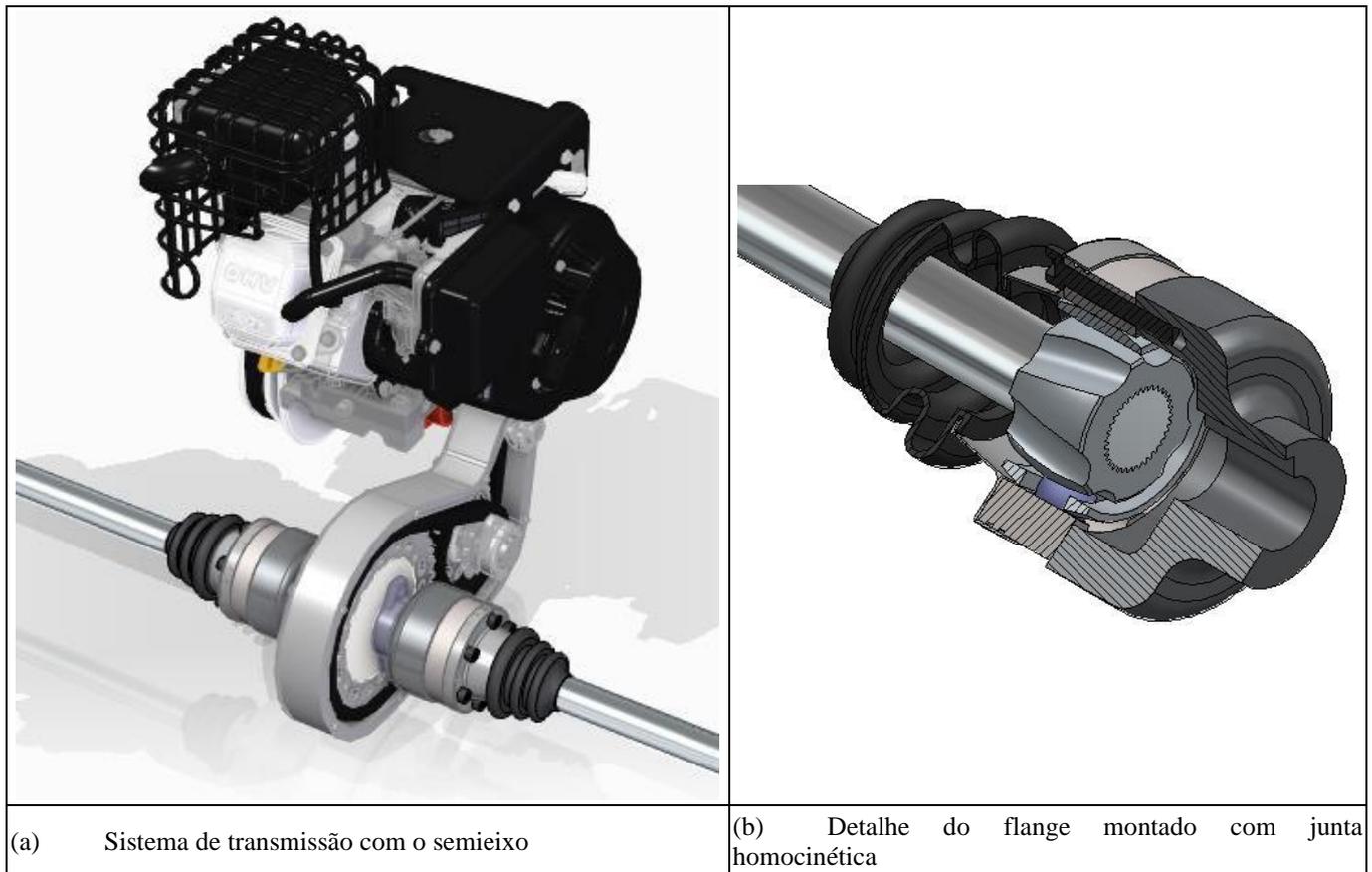
Figura 1. Gráfico de distribuição de torque no eixo de saída do sistema de redução: CVT e caixa de redução.



Fonte: Autores.

De forma ilustrar a montagem do sistema de transmissão do veículo Baja SAE em desenvolvimento, a Figura 2 mostra o modelo CAD 3D de parte deste sistema. Nota-se que o flange necessário para interligar o conjunto transmissão ao semieixo do veículo, é representado nas Figuras 2(a, b), o qual é montado com seis (6) parafusos na junta de velocidade constante (*constant-velocity joint*), também denominada junta homocinética, a qual possui uma coifa de borracha e respectivo suporte de fixação. Esta junta homocinética é composta por seis esferas que se movem em trilhas, possibilitando assim a transmissão de potência (torque e velocidade) com variações de ângulos entre os eixos (de transmissão e semieixo, sendo este último interligado às rodas do veículo).

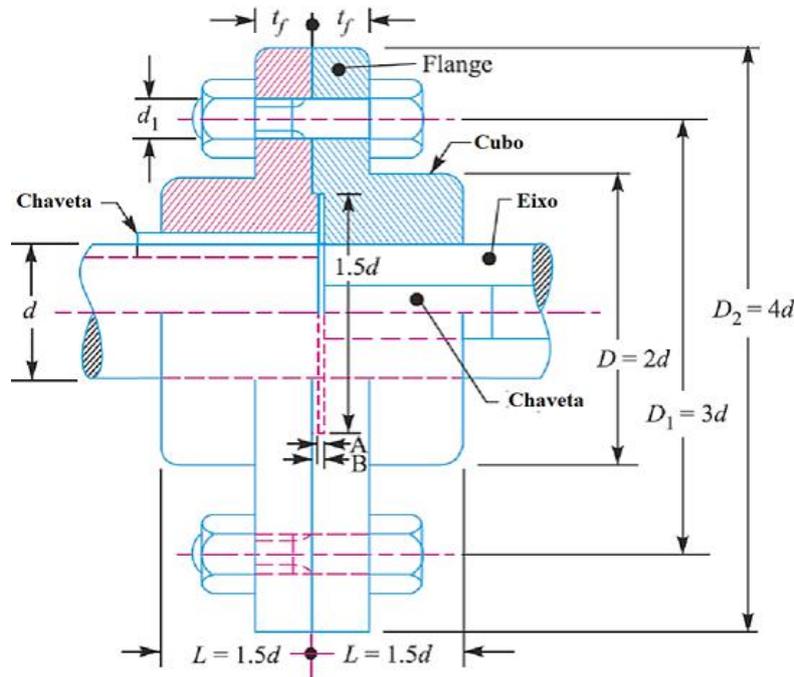
Figura 2. Modelo CAD 3D: (a) sistema de transmissão com o semieixo; (b) flange montado com junta homocinética.



Fonte: Autores.

Como o flange é um elemento de máquina de acoplamento, e cada caso de acoplamento é único, sendo uma ocorrência adaptável a necessidade, assim, por se tratar de um elemento mecânico com propriedades dos materiais sujeitas a esforços e desgastes, algumas literaturas (por ex.: Khurmi & Gupta, 2005) descrevem um roteiro de pré projeto que se aproxima das necessidades genéricas de transmissão de potência, o qual aplica-se no decorrer deste projeto. Diante disso, a Figura 3 mostra uma representação 2D de um conjunto flange, indicando as principais dimensões de projeto. Observa-se que à partir do diâmetro nominal (d) do eixo, é possível definir as demais características e dimensões do flange, cubo e chaveta.

Figura 3. Desenho 2D representativo de um conjunto flange.



Fonte: Khurmi & Gupta (2005) - (adaptado).

Com base na Figura 3, é possível definir as seguintes nomenclaturas e relações:

| | |
|--------------|--|
| d | Diâmetro nominal do eixo ou diâmetro nominal interno do cubo; |
| $D = 2d$ | Diâmetro externo do cubo do eixo; |
| $D_1 = 3d$ | Diâmetro do círculo primitivo de localização dos parafusos de fixação; |
| $D_2 = 4d$ | Diâmetro externo do flange; |
| $L = 1,5d$ | Comprimento do cubo; |
| $d_1 = d_r$ | Diâmetro nominal do parafuso; |
| $t_f = 0,5d$ | Espessura do flange; |
| n | Número de parafusos. |

Tem-se também que:

| | |
|-----------------------------|--|
| τ_s, τ_b e τ_k | Tensão de cisalhamento admissível para: eixo (τ_s), parafuso (τ_b) e material da chaveta (τ_k); |
| τ_c | Tensão de cisalhamento admissível para o material do flange; |
| σ_b e σ_k | Tensão de esmagamento (compressão) admissível para: parafuso (σ_b) e chaveta (σ_k). |

2.2 Dimensionamento dos componentes do conjunto flange da caixa de redução

Neste subtópico está descrito o dimensionamento dos componentes do conjunto flange da caixa de redução de um veículo fora de estrada Baja SAE, tais como o cubo do flange, a chaveta, o flange e os parafusos, conforme a seguir.

2.2.1 Projeto para cubo do flange

De acordo com Khurmi e Gupta (2005), o cubo é projetado considerando-o como um eixo oco, transmitindo o mesmo torque (T) de um eixo maciço, sendo o diâmetro externo do cubo (D) geralmente considerado como o dobro do diâmetro (d) do

eixo ($D = 2d$). Assim, o torque no eixo é calculado conforme a Equação (1).

$$T = \frac{\pi}{16} * \tau_c * \left(\frac{D^4 - d^4}{D} \right) \quad (1)$$

Onde:

| | |
|----------|--|
| T | Torque no eixo; |
| τ_c | Tensão de cisalhamento admissível para o material do cubo do flange; |
| $D = 2d$ | Diâmetro externo do cubo; |
| d | Diâmetro nominal do eixo ou diâmetro nominal interno do cubo. |

Portanto, a partir da Equação (1), é possível obter a tensão de cisalhamento induzida no cubo, sendo o comprimento do cubo definido por: $L = 1,5d$.

2.2.2 Projeto para chaveta

De acordo com Juvinal e Marshek (2016), a chaveta é uma das conexões mais comuns entre um eixo e um cubo (assento) para transmissão de torque. Conforme Norton (2020), pelo fato das chavetas estarem sujeitas a carregamento por cisalhamento, é indicado a utilização de materiais dúcteis para a fabricação, sendo o aço baixo carbono o mais comum (ex.: ABNT 1020), exceto se um ambiente corrosivo exigir chaveta de outros materiais, como o aço inoxidável ou o latão. Conforme Budynas e Nisbett (2020), as chavetas são elementos de proteção para o eixo ou para outros componentes conectados a ela, e os modos de falha são: (i) por cisalhamento, ao longo de sua largura (no ponto de contato entre o eixo e o cubo); (ii) por esmagamento, gerado pela pressão de contato lateral da chaveta contra a área lateral do rasgo do eixo ou do cubo. Para Norton (2020), a chaveta é comumente dimensionada para que falhe antes que o assento da chaveta ou outra parte do eixo, em caso de sobrecarga, preservando assim os elementos mais caros, evitando que estes sejam danificados, sendo também uma das razões para o uso de materiais dúcteis. Segundo Khurmi e Gupta (2005), a chaveta é projetada com proporções usuais padronizadas e, em seguida, verifica-se as tensões de cisalhamento e esmagamento. Para o dimensionamento, a altura é determinada de acordo com o diâmetro do eixo, e o comprimento é geralmente o mesmo do cubo, sendo as chavetas do tipo plana, projetadas com encaixe na metade no rasgo de chaveta do eixo e a outra metade no rasgo de chaveta do cubo. As proporções usuais da chaveta do tipo retangular são: largura $w = d/4$; espessura $t = 2w/3$ ou $d/6$, onde d é o diâmetro do eixo ou diâmetro do furo no cubo (Khurmi & Gupta, 2005).

2.2.3 Projeto para flange

O flange facilita o acoplamento das outras peças necessárias para montagem do flange da caixa de redução. De acordo com Khurmi e Gupta (2005), o flange, na junção com o cubo, está sujeito ao esforço de cisalhamento, e portanto, o torque transmitido (T), é definido conforme a Equação (2):

$$T = \pi * D * t_f * \tau_c * \frac{D}{2} = \frac{\pi * D^2}{2} * t_f * \tau_c \quad (2)$$

Sendo o torque T o produto do perímetro do cubo x espessura do flange x tensão de cisalhamento admissível no cubo x raio do cubo.

Onde,

| | |
|-----------|--------------------|
| $\pi * D$ | Perímetro do cubo; |
|-----------|--------------------|

| | |
|---------------|--|
| t_f | Espessura do flange; |
| τ_c | Tensão de cisalhamento admissível para o material do cubo do flange; |
| $\frac{D}{2}$ | Raio do cubo. |

2.2.4 Projeto para parafusos

De acordo com Khurmi e Gupta (2005), a quantidade mínima (n) de parafusos depende do diâmetro nominal (d) do eixo, sendo: n = 3 (para d até 40 mm); n = 4 (para d até 100 mm); n = 6 (para d até 180 mm). Para o dimensionamento, conforme Juvinall e Marshek (2016), o torque máximo deve ser dividido pelo número de parafusos necessários, tendo assim o valor de torque que cada parafuso está submetido, e desta forma, calcula-se a carga (F) nominal exercida em cada parafuso, de acordo com a Equação (3):

$$T = F \cdot r \quad (3)$$

Onde,

| | |
|---|---|
| T | Torque que cada parafuso está submetido; |
| F | Carga nominal exercida no parafuso; |
| r | Distância da posição central do parafuso ao centro do eixo. |

Conforme Collins et al. (2010), para evitar o dano de um componente ou máquina, faz-se no estágio de projeto a previsão e correção de cenários de falhas potenciais, de forma a selecionar o material ideal e disponível no mercado. Desse modo e de forma a evitar as incertezas e variabilidades que sempre existirão em aplicações práticas, e com o objetivo de alcançar a prevenção de falha, uma das escolhas mais comum utilizadas pelos projetistas é selecionar um fator de segurança de projeto (FS), o qual irá assegurar que a resistência do material será seguramente superior à tensão ou carga máxima, para todas as condições críticas previstas. Com base nesta definição, tem-se que a tensão no parafuso (σ_b) deve ser analisada de acordo com sua classe de resistência, relacionando o nível crítica de falha, que no caso é a resistência ao escoamento (σ_e) do material, com o fator de segurança (FS) escolhido para o projeto. Desta forma, sabe-se que a relação entre a carga nominal de tração (F) e a área sob tração (A_t), deve ser superior à tensão no parafuso (σ_b), visando o máximo de segurança no projeto, de acordo com a Equação (4):

$$\sigma_b = \frac{\sigma_e}{FS} > \frac{F}{A_t} \quad (4)$$

Onde,

| | |
|------------|--|
| σ_b | Valor admissível de projeto para a tensão no parafuso [MPa]; |
| σ_e | Tensão ou resistência mínima ao escoamento [MPa]; |
| FS | Fator de segurança de projeto [adimensional]; |
| F | Carga nominal de tração no parafuso [N]; |
| A_t | Área sujeita à tensão de tração [mm ²]. |

Com base em tabelas, obtém-se o valor da área sob tração (A_t) do parafuso, e assim, aplica-se a Equação (5) para calcular o diâmetro do núcleo (d_r) do parafuso.

$$A_t > \frac{\pi * d_r^2}{4} \quad (5)$$

3. Resultados e Discussão

3.1 Cubo proposto para o flange

Com base nos dados de entrada obtidos como o torque de $349,45 \times 10^3 \text{ N}\cdot\text{mm}$ e diâmetro nominal do eixo de saída ($d = 26,0 \text{ mm}$), calcula-se o diâmetro externo do cubo e o comprimento do cubo, respectivamente por: $D = 2d = 52,0 \text{ mm}$ e $L = 1,5d = 39,0 \text{ mm}$. Posteriormente, a tensão de cisalhamento atuante no cubo do flange é obtida por meio da Equação (1), descrita anteriormente no tópico 2.2.1 da metodologia, pela substituição destes valores (torque, diâmetro externo do cubo do flange, diâmetro nominal do eixo), conforme a seguir:

$$T = \frac{\pi}{16} * \tau_c * \left(\frac{D^4 - d^4}{D} \right)$$

$$349,45 \times 10^3 = \frac{\pi}{16} * \tau_c * \left(\frac{52^4 - 26^4}{52} \right)$$

$$\tau_c = \frac{349.450}{25.882,80} \cong 13,50 \text{ MPa}$$

3.2 Dimensionamento da chaveta

De acordo com Collins et al. (2010), para dimensionamento de chaveta e rasgo de chaveta em função do diâmetro do eixo, é recomendando a padronização conforme as normas ASME/ANSI B17.1-1967 e B17.2-1967. De acordo com Norton (2020), uma chaveta paralela pode ter seção transversal quadrada ou retangular, sendo as retangulares recomendadas para diâmetros superiores a $25,0 \text{ mm}$ (ISO). As proporções geométricas padronizadas estabelecem que a largura de uma chaveta deve ser de aproximadamente igual a um quarto do diâmetro do eixo (Juvinall & Marshek, 2016), sendo o comprimento da chaveta igual ao do cubo. Com base nestas informações e no diâmetro do eixo de saída deste projeto, que é $26,0 \text{ mm}$, definiu-se o modelo de chaveta retangular, comprimento $39,0 \text{ mm}$, largura $8,0 \text{ mm}$ (com base na largura mínima $w = 6,5 \text{ mm}$, analisada em relação ao eixo, $w = d / 4$), e altura $7,0 \text{ mm}$, conforme informações mostradas na Tabela 1. Nota-se que para cada faixa de valor de diâmetro nominal do eixo, têm-se os respectivos valores de largura e altura padronizados para chaveta, o que contribui para o dimensionamento e padronização de elementos de máquinas.

Tabela 1. Dimensões de chavetas padronizadas para eixos no sistema internacional métrico.

| Diâmetro do eixo (mm) | Largura x altura da chaveta (mm) |
|---------------------------------------|----------------------------------|
| $< d \leq 12$ | 4 x 4 |
| $12 < d \leq 17$ | 5 x 5 |
| $17 < d \leq 22$ | 6 x 6 |
| $22 < d \leq 30$ | 8 x 7 |
| $30 < d \leq 38$ | 10 x 8 |
| $38 < d \leq 44$ | 12 x 8 |
| $44 < d \leq 50$ | 14 x 9 |

Fonte: Adaptado de Norton (2020).

3.3 Flange proposto

O material selecionado para a fabricação do flange foi o ferro fundido nodular, cujas características e propriedades de classe padrão, segundo especificações da ASTM, ASME e SAE estão mostrados na Tabela 2, para o tipo ASTM A536, o qual

segundo Chiaverini (2015), aplica-se a engrenagens e componentes de máquinas sujeitos a elevados esforços, cargas de choque e fadiga, dentre outros. Referente à composição química para a classe ASTM A536, é especificada mediante acordo mútuo entre fabricantes e consumidores, tendo como principais elementos o C, Si, Mn, P, S. Observa-se que a microestrutura do material altera em função da classe, e consequentemente, ocorre alteração das propriedades mecânicas, como o limite de resistência à tração, o limite de escoamento e a ductilidade medida pelo alongamento percentual, o que possibilita selecionar o material mais adequado para a aplicação.

Tabela 2. Composição química e propriedades mecânicas dos tipos comuns de ferro fundido nodular ASTM A536.

| Classe ASTM A536 | Microestrutura da matriz | Limite de resistência a tração (MPa) | Limite de escoamento (MPa) | Alongamento (%) em 50 mm |
|------------------|---|--------------------------------------|----------------------------|--------------------------|
| 60-40-18 | Ferrítica: pode ser recozida | 410 | 270 | 18 |
| 65-45-12 | Principalmente ferrítica | 445 | 305 | 12 |
| 80-55-06 | Ferrítica-perlítica | 550 | 375 | 6 |
| 100-70-03 | Principalmente perlítica | 689 | 483 | 3 |
| 120-90-02 | Martensítica temperada em óleo e revenida | 820 | 620 | 2 |

Fonte: ASM International (1990); Chiaverini (2015).

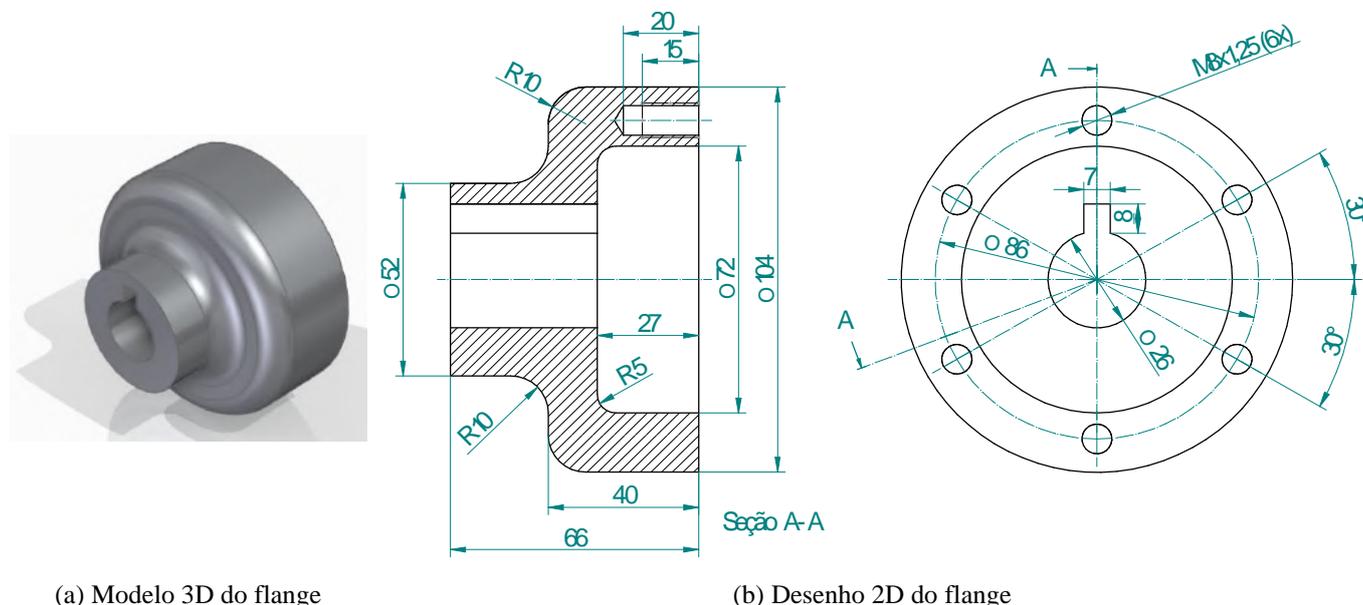
De acordo com ASM International (1990), a classe ASTM A536 100-70-03 (equivalente ao GGG-70, DIN 1693-1), é amplamente utilizada para aplicações que exigem boa combinação de resistência mecânica, resistência ao desgaste e boa resposta ao endurecimento localizado, como exemplo a têmpera superficial, sendo este o material selecionado para aplicação no flange que foi desenvolvido neste trabalho. As propriedades mecânicas mínimas do ferro fundido nodular ASTM A536 100-70-03 grau padrão são: resistência à tração 689 MPa; tensão de escoamento 483 MPa; alongamento 3% (em 50 mm), e as aplicações típicas incluem engrenagens e componentes de máquinas de alta resistência (ASM International, 1990), sendo as especificações e composição química definidas de acordo com os fabricantes. Diante disso, as especificações e composição química (% em peso) do ferro fundido nodular classe ASTM A536 100-70-03, para um tratamento térmico de normalização, de acordo com o fabricante Açofer, são: C= 3,40 – 3,60%; Mn= 0,60 – 0,80%; Si= 2,20 – 2,40%; P= 0,10% máx.; S= 0,2% máx.; Mg= 0,03 – 0,07%; Cu= 0,80 – 1,10%, e faixa de dureza de 230 à 280 HB (Açofer, 2010).

De forma a ilustrar o resultado de todos os cálculos realizados no decorrer deste trabalho, a Figura 4 apresenta a geometria do flange que foi desenvolvido em CAD para a fixação do eixo de saída da caixa de redução ao semieixo do sistema *powertrain* do veículo fora de estrada Baja SAE, sendo mostrado o modelo 3D (Fig. 4a) e o desenho 2D (Fig. 4b), com as respectivas dimensões. Nota-se que o diâmetro nominal do cubo do flange é 26,0 mm (correspondente ao diâmetro nominal do eixo), o diâmetro externo do cubo é 52,0 mm, o diâmetro externo do flange (D2) é 104,0 mm, obtido por meio da relação com o diâmetro nominal do eixo ($D2 = 4d$), e a espessura mínima calculada para o flange ($t_{fmin.}$) foi de 13,0 mm, obtida também por meio da relação com o diâmetro do eixo ($t_f = 0,5. d$).

Ressalta-se que os dados obtidos por meio das equações utilizadas neste trabalho, são valores mínimos necessários, para os quais pode-se usar como base para a seleção de componentes padrão de mercado, e assim, adequar as dimensões conforme necessário. Diante dessa premissa, nota-se que apesar da necessidade mínima ser de três (3) parafusos, conforme o dimensionamento realizado ao longo deste trabalho, mas com base em componentes comerciais, os quais são utilizados frequentemente para este tipo de projeto, foi definido seis (6) furos igualmente espaçados, os quais são utilizados para a montagem de seis (6) parafusos M8x1,25. Nota-se também que o diâmetro mínimo do círculo referente a posição central dos parafusos é 78,0 mm, o qual foi adaptado para 86,0 mm para atender a junta homocinética comercial selecionada para este

projeto. Ressalta-se que o espaço oco, referente às cotas de 27,0 mm e 72,0 mm, é para considerar possível deslocamento da junta homocinética durante o funcionamento do veículo, de forma a possibilitar a movimentação dos componentes, e evitar assim colisão durante condição dinâmica do sistema.

Figura 4. Geometria CAD do flange proposto: (a) modelo 3D; (b) desenho 2D.



(a) Modelo 3D do flange

(b) Desenho 2D do flange

Fonte: Autores.

3.4 Dimensionamento e seleção de parafusos para fixação

Conforme descrito no tópico 2.2.4 da metodologia, a quantidade mínima (n) de parafusos é definida em função do diâmetro do eixo ($d < 40$ mm, tem-se que $n = 3$), e como para este projeto o eixo de saída possui diâmetro nominal $d = 26$ mm, tem-se portanto que a quantidade mínima de parafusos é três. À partir da definição da quantidade de parafusos e considerando a classe de propriedade 12.9, por ser uma classe de maior resistência mecânica, que é requerido para este tipo de aplicação, e com base na Tabela 3, obtém-se as especificações para o parafuso de aço a ser selecionado. Nota-se que a classe de propriedade 12.9 atende a faixa dimensional de parafusos métricos de M1,6 até M36, cujo material possui resistência mínima de prova $\sigma_p = 970$ MPa, resistência mínima ao escoamento $\sigma_e = 1.100$ MPa e resistência última de tração $\sigma_u = 1.220$ MPa.

Tabela 3. Especificações de classe de propriedade métrica para parafusos de aço.

| Classe de propriedade | Faixa dimensional do diâmetro nominal, d (mm) | Resistência mínima de prova, σ_p (MPa) | Resistência mínima ao escoamento σ_e (MPa) | Resistência última de tração, σ_u (MPa) |
|-----------------------|---|---|---|--|
| 4.6 | M5 até M36 | 225 | 240 | 400 |
| 4.8 | M1,6 até M16 | 310 | - | 420 |
| 5.8 | M5 até M24 | 380 | - | 520 |
| 8.8 | M17 até M36 | 600 | 660 | 830 |
| 9.8 | M1,6 até M16 | 650 | - | 900 |
| 10.9 | M6 até M36 | 830 | 940 | 1.040 |
| 12.9 | M1,6 até M36 | 970 | 1.100 | 1.220 |

Fonte: Juvinal, 2016 (Adaptado).

Assim, com base na quantidade mínima requerida de parafusos $n = 3$, e considerando o valor de toque máximo atuante ($T = 349,45 \times 10^3 \text{ N}\cdot\text{mm}$, conforme mostrado na Figura 1), calcula-se o torque submetido em cada parafuso, obtendo assim o valor de $116.483,33 \text{ N}\cdot\text{mm}$. Diante disso, e com base no diâmetro mínimo do círculo referente a posição central dos parafusos ($78,0 \text{ mm}$), e na Equação (3) descrita anteriormente, obtém-se a carga nominal de tração (F) que cada parafuso pode suportar.

$$T = F \cdot r$$

$$116.483,33 \text{ N}\cdot\text{mm} = F \cdot 39 \text{ mm}$$

$$F = 2.986,75 \text{ N}$$

Em relação ao valor do Fator de Segurança (FS) selecionado para o projeto, conforme Juvinal e Marshek (2016), para materiais cujas propriedades sejam conhecidas em termos de médias, operados em ambientes comuns e sujeitos a cargas e tensões que possam ser determinadas, o valor do FS deve-se enquadrar na faixa de 2 à 2,5. Desta forma, adotou-se o valor de $FS = 2,5$, e com base na Equação (4), descrita anteriormente, é possível calcular a área do parafuso sujeita à tensão de tração, conforme mostrado a seguir:

$$\sigma_b = \frac{\sigma_e}{FS} > \frac{F}{A_t}$$

$$= \frac{1.100}{2,5} > \frac{2.986,75 \text{ N}}{A_t}$$

$$A_t > \frac{2.986,75 \text{ N}}{440 \text{ MPa}}$$

$$A_t > 6,79 \text{ mm}^2$$

Assim, com base na Equação (5) descrita anteriormente, calcula-se o diâmetro do núcleo do parafuso:

$$6,79 \text{ mm}^2 > \frac{\pi \cdot d_r^2}{4}$$

$$27,16 \text{ mm}^2 > \pi \cdot d_r^2$$

$$d_r^2 > 8,64 \text{ mm}^2$$

$$d_r > 2,94 \text{ mm}$$

Com base neste dimensionamento, e consultando a Tabela 4, que mostra as dimensões principais de roscas de parafusos padrão métrico, é possível selecionar o parafuso comercial. Observa-se que o diâmetro do núcleo padrão mínimo de $3,14 \text{ mm}$, correspondente à área sob tração de $8,78 \text{ mm}^2$, se refere ao parafuso M4 de passo $0,70 \text{ mm}$, o qual de acordo com o dimensionamento realizado, atende este projeto.

Tabela 4. Dimensões principais de roscas de parafusos padrão métrico (ISO).

| Diâmetro nominal d (mm) | Passo p (mm) | Diâmetro do núcleo d_r (mm) | Área sob tração A_t (mm ²) |
|---------------------------|----------------|-------------------------------|--|
| 3 | 0,50 | 2,39 | 5,03 |
| 3,5 | 0,60 | 2,76 | 6,78 |
| 4 | 0,70 | 3,14 | 8,78 |
| 5 | 0,80 | 4,02 | 14,18 |
| 6 | 1,00 | 4,77 | 20,12 |
| 7 | 1,00 | 5,77 | 28,86 |
| 8 | 1,25 | 6,47 | 36,61 |
| 10 | 1,50 | 8,16 | 57,99 |

Fonte: Norton (2020).

Considerando a quantidade mínima necessária e dimensionada de três parafusos M4, e que geralmente neste tipo de montagem para veículos populares, utiliza-se seis (6) parafusos M8 e respectivas juntas homocinéticas comerciais com furo padrão para parafuso M8 (por exemplo utilizada em veículos Gol gerações G2-G4 da Volkswagen), portanto, foi selecionado para este projeto parafuso do tipo Allen M8 x 1,25. Em relação ao comprimento do parafuso, considerando que o comprimento útil de rosca do flange é 15 mm (Figura 4), e que para a montagem utilizou junta homocinética comercial com 31,7 mm de espessura e um suporte com coifa de proteção de borracha (Figura 2), desta forma, o comprimento definido para o parafuso foi de 45,0 mm. Com base nestes aspectos, foi selecionado o parafuso Allen M8 x 1,25 x 45,00 mm de comprimento, cabeça cilíndrica com sextavado interno e classe de propriedade 12.9, conforme norma DIN EN ISO 4762 - antiga DIN 912 - (DIN EN ISO, 2004).

Considerações Finais

Com base nos objetivos e metodologia definidos inicialmente para o desenvolvimento do flange para acoplamento do eixo de saída da caixa de redução ao semieixo do sistema *powertrain* de um veículo Baja SAE, e nos principais resultados obtidos, foi possível definir as seguintes considerações finais:

- As premissas e dados de entrada utilizados no projeto foram essenciais para atender os objetivos do projeto, que por meio do torque transmitido no eixo de saída do sistema *powertrain*, e nos cálculos desenvolvidos, após a realização de pesquisas bibliográficas, aliada à experiência dos integrantes da equipe, foi possível dimensionar as medidas mínimas necessárias para o flange.
- A utilização de componentes padrão de mercado para compor o conjunto mecânico foi possível (por ex.: elementos de máquinas comerciais utilizados no mercado automotivo), por meio da adaptação das medidas do flange e atendendo as dimensões mínimas necessárias para o projeto, as quais foram definidas durante o dimensionamento realizado.
- O projeto mecânico foi aprimorado por meio do uso de CAD com modelamento 3D (tridimensional), que possibilitou a montagem virtual do conjunto mecânico e do sistema como um todo, assim como para a realização do detalhamento 2D.
- Como trabalhos futuros, sugere-se a fabricação de um protótipo do flange para compor o sistema *powertrain* do veículo fora de estrada Baja SAE em desenvolvimento. Espera-se que este trabalho se aplique como base e referência para projetos e dimensionamentos futuros da equipe e de outras equipes de projetos.

Agradecimentos

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais (IFMG), Brasil, pela oportunidade de realizar este trabalho e pela bolsa de iniciação científica (PIBIC).

Referências

- Açofer. (2010). *Catálogo técnico de ligas de ferro: normas técnicas do ferro fundido*. Açofer. http://acoferbrasil.com.br/site/sistema/catalogo_portugues/NORMAS FERRO.pdf
- Amaral, M. (2020). *Desenvolvimento de projeto do flange de acoplamento da coroa aplicado ao sistema de transmissão de um veículo de competição fórmula SAE*. Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville.
- ASM International. (1990). *AMERICAN SOCIETY FOR METALS. ASM Handbook, vol. 1. Properties and selection: irons, steels, and high-performance alloys*. ASM International®. <https://doi.org/10.1002/jcb.240590830>
- Bosch, R. (2005). *Manual de tecnologia automotiva* (1st ed.). Edgard Blücher.
- Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2020). *Shigley's mechanical engineering design* (11th ed.). McGraw-Hill Education.

- Che, D., Clark, D. A., Shaw, D. W., & Gidley, J. S. (2012). Lessons learned from starting an SAE Baja program at a small liberal arts college. *American Society for Engineering Education*, AC 2012-3714.
- Chiaverini, V. (2015). *Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos*. (7th ed.). Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração (ABM).
- Collins, J. A., Busby, H., & Staab, G. (2010). *Mechanical design of machine elements and machines: a failure prevention perspective* (2nd ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- DIN EN ISO. (2004). *DIN EN ISO 4762 - Hexagon socket head cap screws* (pp. 1–14). DIN - Deutsches Institut für Normung.
- Genta, G., & Morello, L. (2020). The automotive chassis - Volume 1: component design. In *The Automotive Chassis* (2nd ed., Vol. 1). Springer Nature Switzerland AG. <https://doi.org/https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-35635-4>
- Juvinall, R. C., & Marshek, K. M. (2016). *Fundamentos do projeto de componentes de máquinas* (5th ed.). LTC - Livros Técnicos e Científicos.
- Khurmi, R. S., & Gupta, J. K. (2005). *A textbook of machine design*. S. Chand Publishing.
- Lüdke, M., & André, M. E. D. (2013). *Pesquisa em educação: abordagens qualitativas* (2nd ed.). E.P.U.
- Naunheimer, H., Bertsche, B., Ryborz, J., & Novak, W. (2011). Automotive transmissions: fundamentals, selection, design and application. In *The Mechanical Principles of Engineering and Architecture* (2nd ed., Vol. 3, Issue 1). Springer.
- Norton, R. L. (2020). *Machine design: an integrated approach* (6th ed.). Pearson.
- Pereira, A., Shitsuka, D., Parreira, F., & Shitsuka, R. (2018). *Metodologia da pesquisa científica*. [free e-book]. Núcleo de Tecnologia Educacional (NTE) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).
- Pinheiro, V., Nogueira, L. M., & Costa, A. L. de M. (2014). Algoritmo para análise gráfica e dimensionamento de eixos de transmissão de potência. In *Anais do XIV CONEMI - Congresso Nacional de Engenharia Mecânica e Industrial* (Issue 1).
- SAE-Brasil. (2021). *Regulamento administrativo e técnico Baja SAE Brasil - RASTBSB-Emenda 4*. http://saebrasill.hospedagemdesites.ws/RATBSB_emenda_04.pdf
- Shigley, J. E., Mischke, C. R., & Budynas, R. G. (2005). *Projeto de engenharia mecânica* (7th ed.). Bookman.
- Yin, R. K. (2015). *Estudo de caso: planejamento e métodos* (5th ed.). Bookman.