



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DA PARAÍBA
CAMPUS JOÃO PESSOA
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**ESTUDO DE UMA CAIXA DE REDUÇÃO POR CORRENTE
PARA UM VEÍCULO TIPO BAJA SAE**

LOESTER PEREIRA DE CARVALHO NETO

**João Pessoa – PB
2025**

LOESTER PEREIRA DE CARVALHO NETO

**ESTUDO DE UMA CAIXA DE REDUÇÃO POR CORRENTE
PARA UM VEÍCULO TIPO BAJA SAE**

Monografia submetida ao Departamento de Engenharia Mecânica, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – Campus João Pessoa, para conclusão do curso de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Walter Macêdo Lins Fialho

João Pessoa – PB

2025

FICHA CATALOGRÁFICA

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação – CIP
Biblioteca Nilo Peçanha – IFPB, *Campus* João Pessoa

C331e

Carvalho Neto, Loester Pereira de.

Estudo de uma caixa de redução por corrente para um veículo tipo Baja SAE / Loester Pereira de Carvalho Neto. – 2025.

43 f. : il.

TCC (Graduação – Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Instituto Federal de Educação da Paraíba – IFPB / Departamento de Engenharia Mecânica, 2025.

Orientador: Prof. Dr. Walter Macêdo Lins Fialho.

1. Baja SAE. 2. Transmissão. 3. Redução. 4. Corrente. 5. *Solidworks*. I. Título.

CDU 621.717:629.331(043)



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

**SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA**

FOLHA DE APROVAÇÃO

LOESTER PEREIRA DE CARVALHO NETO 201921140037

Estudo de uma Caixa De Redução Por Corrente Para Um Veículo Tipo Baja Sae

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Mecânica do Instituto Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Trabalho aprovado pela banca examinadora em 14 de agosto de 2025.

BANCA EXAMINADORA:

(assinaturas eletrônicas via SUAP) Dr.

Walter Macêdo Lins Fialho, IFPB

(Orientador)

Dra. Michelline Nery Azevedo Lima

IFPB (Examinadora)

Dr. Severino Cesarino da Nóbrega Neto

IFPB (Examinador)

Documento assinado eletronicamente por:

- **Walter Macedo Lins Fialho**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 18/08/2025 11:35:27.
- **Michelline Nery Azevedo Lima**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 18/08/2025 16:31:47.
- **Severino Cesarino da Nobrega Neto**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 19/08/2025 21:44:25.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 18/08/2025. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código 750650
Verificador: 9ba7984a88
Código de Autenticação:



Av. Primeiro de Maio, 720, Jaguaribe, JOÃO PESSOA / PB, CEP 58015-435
<http://ifpb.edu.br> - (83) 3612-1200

Dedico este trabalho de conclusão de curso aos meus pais, por sempre acreditarem e por terem me sustentado até o final do curso. A minha esposa, que me ajudou do início ao fim nesta caminhada. Aos meus irmãos e sobrinhos, por terem alegrado meus dias e aos amigos e familiares por dividir esta caminhada lado a lado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me dado sabedoria e discernimento nesta jornada tão árdua, por ter me dado saúde e condições para chegar até aqui.

A minha esposa, Juliana Carvalho, por ter entrado em minha vida e me transformar em uma pessoa e profissional mais dedicado. A minha mãe, Maria Lúcia, e meu pai, Carlos Augusto, por todos os conselhos, alegrias, pela rede de apoio e pelo esforço, graças a vocês estou no último passo da graduação. Aos meus irmãos Fellipe Carvalho e Leticia Ellen e meus cunhados Maria Camyla e Denilson Santos, por dividirem este fardo ao longo da graduação comigo.

Ao meu professor orientador, Prof. Dr. Walter Macedo Lins Fialho, por ter me acolhido em toda graduação junto ao projeto Baja, por ter me guiado e aconselhado sempre com sabedoria em todas as minhas decisões, obrigado professor por todas as conversas e conselhos que irei levar para o resto da vida.

Ao projeto de extensão Bajampa, por terem confiado em meu trabalho ao longo dos quatro anos em que estive na equipe, aos membros da equipe, em especial Clodemir, Italo, Rhuan, Pedro, Tulio, Lucas, Genivaldo e a todos os membros que fizeram esse brilhante trabalho juntos no qual conseguimos grandes feitos que ficarão sempre em nossas memórias.

A todos os colegas de classe que enfrentaram junto comigo essa jornada tornando-a mais leve e gratificante, a todos vocês desejo um futuro incrível e grandes feitos em suas carreiras.

Ao Instituto Federal da Paraíba, meus professores e a coordenadora Prof. Dra. Michelline Nery Azevedo Lima, graças a vocês estou me tornando um excelente profissional, preparado para os desafios do mercado de trabalho. Aos profissionais incríveis que pude conviver nessa caminhada fica minha eterna gratidão.

A todas as pessoas que participaram direta ou indiretamente desta minha jornada e contribuíram para a realização deste trabalho, o meu muito obrigado.

Sorte é estar pronto quando a oportunidade vem.

Oprah Winfrey

RESUMO

O projeto Baja SAE desafia alunos de graduação em engenharia a projetar, dimensionar, fabricar e validar veículos tipo baja para competições regionais, nacionais e internacionais. O presente trabalho apresenta o desenvolvimento do projeto da redução de velocidade por corrente para um veículo Baja SAE, com o objetivo de garantir uma transmissão de torque eficiente e confiável entre o motor e as rodas. A redução foi projetada considerando critérios de resistência mecânica, facilidade de fabricação e manutenção, além da compatibilidade com os padrões da competição. A metodologia adotada envolveu pesquisa bibliográfica e modelagem 3D dos componentes no software SolidWorks, incluindo eixos, chavetas, engrenagens, corrente de transmissão (modelo similar à utilizada na Honda CG 125cc), rolamentos e mancais. Cada elemento foi dimensionado com base em parâmetros técnicos, como esforços aplicados, vida útil e lubrificação adequada, seguindo normas e referências clássicas da engenharia mecânica. Os resultados obtidos demonstram que a solução projetada atende aos requisitos funcionais e estruturais do sistema de transmissão, contribuindo para o bom desempenho do veículo em condições severas de uso. O trabalho também reforça a importância da integração entre teoria e prática no desenvolvimento de componentes mecânicos aplicados à engenharia automotiva.

Palavras-chave: Baja SAE, Transmissão, Redução, Corrente, SolidWorks.

ABSTRACT

The Baja SAE project challenges undergraduate engineering students to design, dimension, manufacture and validate Baja-type vehicles for regional, national and international competitions. This paper presents the development of a chain-based speed reduction design for a Baja SAE vehicle, with the objective of ensuring efficient and reliable torque transmission between the engine and the wheels. The reduction was designed considering criteria of mechanical resistance, ease of manufacture and maintenance, and compatibility with the competition standards. The methodology adopted involved bibliographical research and 3D modeling of the components in SolidWorks software, including shafts, keys, gears, transmission chain (similar to the one used in the Honda CG 125cc), bearings and bushings. Each element was dimensioned based on technical parameters, such as applied forces, useful life and adequate lubrication, following classic standards and references of mechanical engineering. The results obtained demonstrate that the designed solution meets the functional and structural requirements of the transmission system, contributing to the good performance of the vehicle under severe conditions of use. The work also reinforces the importance of integrating theory and practice in the development of mechanical components applied to automotive engineering.

Keywords: Baja SAE, Transmission, Reduction, Chain, SolidWorks.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Redução por engrenagens.....	14
Figura 2 – Redução por correia.....	15
Figura 3 – Tabela de furo e rasco de chaveta conforme norma DIN 6885/1.....	20
Figura 4 – Eixo CVT movida.....	23
Figura 5 – Eixo secundário.....	24
Figura 6 – Eixo secundário após a modificação de fixação.....	25
Figura 7 – Eixo de tração das rodas.....	26
Figura 8 (A) e (B) – Vistas das montagens dos eixos.....	26
Figura 9 (A) e (B) – Caixa de redução.....	28
Figura 10 – Corrente CG 125.....	29
Figura 11 – Estudo de simulação posição 1.....	36
Figura 12 – Estudo de simulação posição 2.....	37
Figura 13 – Resultado Velocidade Máxima Regional 2024.....	38
Figura 14 – Resultado prova de tração Regional 2024.....	38
Figura 15 – Resultado prova de tração Nacional 2024.....	39
Figura 16 – Resultado prova de tração Regional 2024.....	39
Figura 17 – Quebra após retorno a prova do enduro.....	41
Figura 18 – Retirada do carro.....	42

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
2 DESENVOLVIMENTO.....	14
2.1 TIPOS DE TRANSMISSÃO.....	14
2.2 COMPONENTES PRINCIPAIS DA REDUÇÃO POR CORRENTES	16
2.2.1 Elementos principais.....	16
2.2.1.1 Pinhão.....	16
2.2.1.2 Coroa.....	17
2.2.1.3 Eixos.....	17
2.2.1.4 Corrente.....	17
2.2.2 Material e Especificações dos Eixos.....	18
2.2.3 Dimensionamento e Cálculo dos Eixos.....	18
2.2.4 Rasgo de Chaveta.....	19
2.2.5 Modelagem 3D no SolidWorks.....	21
3 MÉTODOS.....	22
3.1 PROJETO 3D DA REDUÇÃO.....	22
3.2 FIXAÇÃO.....	28
3.3 CORRENTE.....	29
3.3.1 Tensão ideal.....	29
3.3.2. Lubrificação.....	30
3.4 ROLAMENTOS E MANCAIS.....	30
3.4.1 Função e importância dos rolamentos e mancais no Baja SAE.....	30
3.4.2 Montagem e lubrificação.....	33
3.4.3 Análise de falhas por fadiga em mancais sob cargas variáveis.....	33
3.4.4 Redução de Atrito em Mancais de Deslizamento.....	34
3.5 ESTUDO DE SIMULAÇÃO.....	35
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	40
5 REFERÊNCIAS.....	44

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho tem como objetivo desenvolver o projeto de um sistema de redução para a equipe Bajampa, do Instituto Federal da Paraíba, campus João Pessoa. A proposta visa uma solução confiável e de baixo custo de fabricação, sendo escolhida a redução por corrente devido a duas importantes vantagens, menor custo e manutenção simplificada. A redução é um componente fundamental em sistemas de transmissão, responsável por modificar o torque gerado pelo motor, aumentando ou diminuindo sua intensidade.

Existem três principais tipos de sistemas de redução: por corrente, correia e engrenagens. Para este projeto, será analisada uma redução composta por pinhão, coroa e corrente, projetada especificamente para um veículo do tipo baja.

A competição baja SAE, foi criada em 1975 por uma universidade da Carolina do Sul, Estados Unidos e teve sua primeira edição no Brasil em 1995 em Ibirapuera, São Paulo. O baja promovida pela Society of Automotive Engineers (SAE), desafia estudantes de engenharia a projetar e construir veículos off-road. Esses protótipos enfrentam pistas altamente desafiadoras, participando de competições regionais, nacionais e internacionais, onde o sistema de redução desempenha um papel crucial para garantir o bom desempenho do veículo durante as provas.

A gestão da equipe é dividida em subequipes, onde o sistema de powertrain tem como responsabilidade o sistema de transmissão do veículo baja, que é composto por três componentes principais, o motor, padronizado pela SAE, que utiliza o modelo Briggs & Stratton Intek Pro de 10 hp e 305 cilindradas (séries 19 e 20) e o motor honda GX390H1 de 14 hp e 389 cilindradas, a transmissão continuamente variável (CVT), responsável por transferir o torque do motor para o sistema de redução e a própria redução, que ajusta o torque recebido da CVT para as rodas. Este projeto busca otimizar a integração desses elementos para maximizar a eficiência e competitividade do protótipo. Também existem as subequipes de suspensão, responsável pela estudo de movimento do carro, a subequipe de estrutura, responsável pelo estudo de proteção e de toda estrutura do carro, a subequipe de freio, responsável pelo estudo de frenagem, subequipe de elétrica, responsável pelo estudo de componentes elétrico como o botão de emergência e a sub equipe de administração, responsável por todo alinhamento entre equipes, gestão de projetos e gestão financeira, todas as equipes tem a responsabilidade de trabalhar em conjunto para que seja possível alcançar as metas traçadas no início do projeto, praticando gestões de metas para que seja viável a construção do carro no tempo determinado.

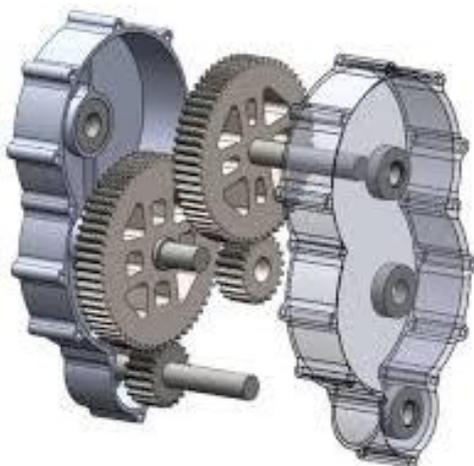
2 DESENVOLVIMENTO

2.1 TIPOS DE TRANSMISSÃO

Em veículos off-road, como os utilizados nas competições baja SAE, o desempenho do sistema de transmissão é determinante para o sucesso em terrenos desafiadores. A redução mecânica, responsável por adaptar o torque e a velocidade do motor às necessidades específicas do veículo, é um dos componentes mais críticos no projeto. Dentre as opções disponíveis, destacam-se a redução por engrenagens, por correia e por corrente, cada uma apresentando características únicas que atendem a diferentes demandas operacionais.

A redução por engrenagens, proporciona alta precisão e eficiência, sendo capaz de suportar grandes cargas. Apesar de ser robusta, sua complexidade de fabricação e custos elevados podem limitar sua viabilidade para projetos de baixo orçamento, como mostra na figura 1, tendo em vista que são feitos por alunos de engenharia. Outro ponto a ser considerado é a utilização dos tratamentos térmicos em todas as engrenagens e sua complexidade de produção, onde terá que seguir passos para ter uma boa qualidade que custará um valor elevado para o projeto.

Figura 1 – Redução por engrenagens.



Fonte: Pereira, Botão e Trindade, 2014.

A redução por correia utiliza correias flexíveis para transmitir o movimento entre polias, oferecendo simplicidade e baixo custo inicial. Entretanto, em aplicações como as competições baja, sua suscetibilidade a deslizamento, desgaste em condições adversas e menor capacidade de carga tornam-na menos competitiva. Existem quatro tipos de correias onde a equipe deveria estudar qual a melhor para se adequar para seu projeto, são as

planas, redondas, V e sincronizadora. Na figura 2, temos como exemplo uma transmissão por correia sincronizadora.

Figura 2 – Redução por correia.



Fonte: Caser, Seraphim, 2014.

Já a redução por corrente destaca-se por combinar eficiência, robustez e custo acessível. Este sistema utiliza uma corrente metálica que conecta o pinhão à coroa, ajustando a relação de transmissão e permitindo a modulação do torque de maneira confiável. A redução por corrente se beneficia de um design simples, que facilita a manutenção e proporciona flexibilidade na escolha das relações de transmissão). Além disso, sua capacidade de operar em condições adversas, como lama, poeira e impactos, a torna ideal para competições off-road.

A eficiência da redução por corrente depende diretamente de três fatores fundamentais: o alinhamento preciso entre os componentes, a lubrificação adequada e a tensão correta da corrente. Um bom alinhamento evita desgastes prematuros e vibrações indesejadas, enquanto a lubrificação reduz o atrito entre os elos e os dentes das engrenagens. Já a tensão correta impede o escorregamento e garante a transferência eficaz de torque. Quando esses parâmetros são devidamente controlados, as perdas por atrito são minimizadas, promovendo maior durabilidade do conjunto e garantindo o desempenho ideal do sistema de transmissão.

Segundo a Timken (2020), o alinhamento adequado dos pinhões e a tensão correta da corrente são essenciais para maximizar a eficiência do sistema e prolongar sua vida útil. Complementando, estudos técnicos apontam que a eficiência de um sistema de corrente bem lubrificado pode atingir valores entre 95% e 98%, demonstrando sua alta capacidade de transmissão de potência (MOTT, 2013).

Em veículos baja, onde o motor padrão Briggs & Stratton Intek Pro® de 10 hp é utilizado, o sistema de redução desempenha um papel vital ao otimizar o torque fornecido às rodas, maximizando a tração e a capacidade de superar obstáculos.

Portanto, em projetos de veículos deste tipo, a redução por corrente oferece uma solução equilibrada entre custo, confiabilidade e desempenho, consolidando-se como uma escolha estratégica da nossa equipe que busca eficiência e otimização

2.2 COMPONENTES PRINCIPAIS DA REDUÇÃO POR CORRENTES

2.2.1 Elementos principais

2.2.1.1 Pinhão

O pinhão é a engrenagem menor que recebe o movimento diretamente da transmissão intermediária, neste caso, a CVT (*Continuously Variable Transmission*). Ele desempenha um papel crucial na determinação da relação de redução, já que o número de dentes do pinhão em relação ao da coroa define a proporção de redução. De acordo com Shigley, "o pinhão é projetado para operar em altas velocidades e deve ser fabricado com materiais resistentes ao desgaste, como aços endurecidos por têmpera e revenimento" (SHIGLEY, *Mechanical Engineering Design*, 2011).

Características do pinhão incluem:

- **Material:** Geralmente aço-liga com tratamentos térmicos para garantir durabilidade e resistência ao desgaste.
- **Dimensão:** Sua dimensão é definida pela relação de redução. Para uma relação 9:1, o pinhão terá significativamente menos dentes que a coroa.
- **Projetos de dentes:** Os dentes são projetados para garantir o engate suave com a corrente, geralmente seguindo normas como ANSI ou ISO para correntes de rolos.

Além disso, como enfatiza Norton (*Machine Design: An Integrated Approach*, 2013), "o pinhão deve ser montado com precisão para evitar desalinhamento, pois qualquer erro pode levar ao aumento do desgaste ou falhas prematuras no sistema".

Esta citação é um alerta para que nosso sistema esteja bem alinhado, pois com o decorrer da competição, garantindo o alinhamento entre os pinhões todo o sistema estará sem defeitos, já se houver algum tipo de desalinhamento as chances de haver algum problema durante a competição são grandes, devido as pistas serem irregulares e feitas para testar toda a robustez dos protótipos.

2.2.1.2 Coroa

A coroa é a engrenagem maior conectada ao eixo acionado, responsável por amplificar o torque e reduzir a velocidade angular. Sua função é complementar ao pinhão no processo de transmissão, e sua resistência estrutural é crucial, dado que opera sob esforços significativos devido ao torque elevado.

Segundo Shigley, "a coroa deve ser projetada para resistir à fadiga e ao desgaste. O dimensionamento de seus dentes e o material escolhido devem levar em consideração o ciclo de carga e as condições de operação" (Shigley, 2011).

Aspectos técnicos da coroa:

- **Relação de dentes:** Em uma redução 9:1, a coroa terá nove vezes mais dentes que o pinhão. Isso reduz a velocidade angular proporcionalmente enquanto aumenta o torque.
- **Material:** Normalmente o mesmo do pinhão, mas em algumas aplicações pode receber tratamentos superficiais como cementação para aumentar a resistência ao desgaste.
- **Montagem:** É fixada ao eixo acionado por chavetas, flanges ou acoplamentos.

2.2.1.3 Eixos

Os eixos desempenham um papel essencial no sistema de transmissão da redução do veículo baja SAE, sendo responsáveis pela transmissão de torque e pela sustentação dos componentes rotativos, como engrenagens e rolamentos. Além disso, eles devem suportar esforços variados, como torção, flexão e forças axiais, garantindo o funcionamento confiável e eficiente do sistema. O projeto adequado dos eixos é fundamental para evitar falhas mecânicas e assegurar a longevidade do veículo.

2.2.1.4 Corrente

As correntes de transmissão são componentes mecânicos fundamentais em sistemas que exigem a transferência de potência entre eixos paralelos, sendo amplamente aplicadas em veículos automotores, máquinas industriais e equipamentos agrícolas. Entre os diversos tipos existentes, destaca-se a corrente de rolos, conhecida por sua robustez, facilidade de manutenção e alta eficiência na transmissão de torque.

Esse tipo de corrente é formado por elos com roletes que se encaixam perfeitamente nos dentes das engrenagens, garantindo uma transmissão de torque confiável e com perdas mínimas. Um dos principais parâmetros na seleção de correntes é o passo — a distância entre os centros dos pinos — que influencia diretamente na resistência e na

compatibilidade com pinhões e coroas. Correntes com passo 428 (12,7 mm), por exemplo, são comuns em aplicações de médio porte que requerem resistência moderada à tração.

A resistência à tração é outro aspecto crítico, devendo ser dimensionada de acordo com a carga transmitida e os esforços dinâmicos do sistema. Correntes corretamente selecionadas podem suportar cargas superiores a 1.900 kgf, dependendo do modelo e da aplicação. Para garantir o funcionamento ideal, é necessário manter uma tensão adequada, geralmente com uma folga entre 20 mm e 30 mm, evitando tanto o excesso de tensão quanto a folga excessiva, que podem comprometer o desempenho e a durabilidade do conjunto.

2.2.2 Material e Especificações dos Eixos

Os materiais selecionados para os eixos devem atender a requisitos de alta resistência mecânica, boa usinabilidade e custo acessível. Para este projeto, após uma análise no mercado e junções de custo benefício, o aço SAE 1045 foi escolhido devido à sua excelente combinação de propriedades mecânicas, como resistência à tração e à torção, aliado a um processo de usinagem eficiente e à possibilidade de tratamento térmico. As propriedades do aço SAE 1045, como limite de escoamento e dureza superficial, permitem atender aos esforços envolvidos no sistema de transmissão.

2.2.3 Dimensionamento e Cálculo dos Eixos

O dimensionamento dos eixos foi realizado com base nos esforços a que estão sujeitos durante o funcionamento do veículo. Os principais parâmetros considerados incluem:

- **Torque transmitido:** Calculado pela equação:

Onde:

$$T = \frac{P}{\omega} = \frac{P}{2\pi N/60}$$

- T é o torque (N·m);
 - P é a potência transmitida (W);
 - ω é a velocidade angular (rad/s);
 - N é a rotação em RPM.
- **Esforços cisalhantes e de flexão:** Determinados utilizando as seguintes expressões:

Onde:

$$\tau = \frac{T}{W_t} \text{ e } \sigma_f = \frac{M}{W_f}$$

- τ é a tensão de cisalhamento (Pa);
 - σ_f é a tensão de flexão (Pa);
 - T torque (N·m)
 - **M** momento fletor (N·m)
 - **W_t** é o módulo de resistência à torção (m³);
 - **W_f** é o módulo de resistência à flexão (m³);
- **Critérios de tensão:** O critério de Von Mises foi utilizado para verificar se as tensões combinadas estão dentro dos limites seguros do material, dado por:

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2 + 3\tau^2}$$

- σ_{vm} é a tensão equivalente de Von Mises (Pa);
- $\sigma_1\sigma_2$ são as tensões normais (Pa);
- τ é a tensão de cisalhamento (Pa).

Com a utilização desses cálculos conseguimos identificar pontos de tensões que possam levar a uma falha durante a utilização da redução ao decorrer da competição. Os dimensionamentos nos auxiliam a evitar que nossos eixos não saiam conformes, deixando assim o carro validado com base teórica e prática para a competição e com uso em relatórios técnicos.

2.2.4 Rasgo de Chaveta

O rasgo de chaveta é um elemento essencial para a transmissão de torque entre os eixos e os componentes rotativos, como engrenagens e polias. Para este projeto, as seguintes considerações foram feitas:

- **Função e Importância:** A chaveta garante a fixação segura dos componentes ao eixo, evitando deslizamentos durante o funcionamento.
- **Normas Aplicáveis:** O dimensionamento do rasgo foi realizado de acordo com a norma NBR 6372, que estabelece as proporções padrão entre o diâmetro do eixo, largura e profundidade do rasgo. E também é regulamentada pela norma DIN6885/1

que disponibiliza uma tabela de rasgos de chaveta a ser seguidas de acordo com cada diâmetro de eixo e material, como mostra a figura 3.

Figura 3 – Tabela de furo e rasco de chaveta conforme norma DIN 6885/1.



Ø do eixo d		Dimensões da chaveta Aço AISI 1045 Trefilado		Prof. Do rasgo no eixo		Prof. Do rasgo no cubo		Arredondamento no fundo do rasgo r, p/ o eixo e cubo.	
Acima de	Até	Largura b	Altura h	t ₁	Tolerância Admissível	t ₂	Tolerância Admissível	máximo	mínimo
6	8	2	2	1,2	+ 0,1	1	+ 0,1	0,16	0,08
8	10	3	3	1,8	+ 0,1	1,4	+ 0,1	0,16	0,08
10	12	4	4	2,5	+ 0,1	1,8	+ 0,1	0,16	0,08
12	17	5	5	3	+ 0,1	2,3	+ 0,1	0,25	0,16
17	22	6	6	3,5	+ 0,1	2,8	+ 0,1	0,25	0,16
22	30	8	7	4	+ 0,2	3,3	+ 0,2	0,25	0,16
30	38	10	8	5	+ 0,2	3,3	+ 0,2	0,4	0,25
38	44	12	8	5	+ 0,2	3,3	+ 0,2	0,4	0,25
44	50	14	9	5,5	+ 0,2	3,8	+ 0,2	0,4	0,25
50	58	16	10	6	+ 0,2	4,3	+ 0,2	0,4	0,25
58	65	18	11	7	+ 0,2	4,4	+ 0,2	0,4	0,25
65	75	20	12	7,5	+ 0,2	4,9	+ 0,2	0,6	0,4
75	85	22	14	9	+ 0,2	5,4	+ 0,2	0,6	0,4
85	95	25	14	9	+ 0,2	5,4	+ 0,2	0,6	0,4
95	110	28	16	10	+ 0,2	6,4	+ 0,2	0,6	0,4
110	130	32	18	11	+ 0,2	7,4	+ 0,2	0,6	0,4
130	150	36	20	12	+ 0,3	8,4	+ 0,3	1,0	0,7
150	170	40	22	13	+ 0,3	9,4	+ 0,3	1,0	0,7
170	200	45	25	15	+ 0,3	10,4	+ 0,3	1,0	0,7
200	230	50	28	17	+ 0,3	11,4	+ 0,3	1,0	0,7
230	260	56	32	20	+ 0,3	12,4	+ 0,3	1,6	1,2
260	290	63	32	20	+ 0,3	12,4	+ 0,3	1,6	1,2
290	330	70	36	22	+ 0,3	14,4	+ 0,3	1,6	1,2
330	380	80	40	25	+ 0,3	15,4	+ 0,3	2,5	2
380	440	90	45	28	+ 0,3	17,4	+ 0,3	2,5	2
440	500	100	50	31	+ 0,3	19,5	+ 0,3	2,5	2

Tol. Da largura do rasgo		Tolerância da largura da chaveta = h9		* mm
No eixo	No cubo	Acima de	Até	
P9	P9	1	3	* mm
N9	JS9	3	6	
		6	10	
		10	18	
		18	30	
		30	50	
		50	90	
		90	120	
		120	180	
		180	250	
		250	315	
		315	400	

* Conforme especificado no desenho.

Fonte: ABNT DIN 6885/1.

- **Processo de Usinagem:** O rasgo foi usinado utilizando fresas apropriadas, e o eixo recebeu um tratamento térmico, como têmpera, que aumenta sua dureza e resistência a tração trazendo mais rigidez ao nosso projeto, aumentando a resistência ao desgaste e reduzir a concentração de tensões.
- **Dimensionamento:** O torque máximo transmitido pela chaveta foi calculado pela equação:

Onde:

$$T_{max} = \frac{\tau_{adm} \cdot b \cdot l \cdot d}{2}$$

- T_{max} : Torque máximo transmitido (Nm);
- τ_{adm} é a tensão de cisalhamento admissível no material (Pa);
- b : Largura da chaveta (mm)
- l : Comprimento útil da chaveta (mm)
- d : Diâmetro do eixo (mm)

Com o uso desta equação podemos calcular o torque máximo que a chaveta vai sofrer durante o torque máximo gerado pelo motor e a partir deste resultado e conhecendo o limite de escoamento que o material da chaveta tem, saber se a mesma sofrerá ruptura ou não, deixando assim, nosso protótipo mais válido de acordo com a teoria usada. (MOTT, Robert L., Elementos de Máquinas 4^a ed. 2006)

2.2.5 Modelagem 3D no SolidWorks

Os eixos e seus respectivos rasgos de chaveta foram projetados no SolidWorks, utilizando ferramentas específicas para garantir um projeto preciso e eficiente. Durante a modelagem, foram seguidos os seguintes passos:

- **Criação do Eixo:** Utilizando a ferramenta de revolução, com base nos diâmetros calculados e demais especificações do projeto.
- **Adicionando o Rasgo de Chaveta:** Com o uso da ferramenta de corte extrudado, foram aplicadas as dimensões padronizadas de acordo com a norma.
- **Análise de Tensões:** Foi realizada uma análise estrutural no SolidWorks Simulation para verificar a distribuição de tensões nos eixos e avaliar a influência do rasgo de chaveta.
- **Ajustes e Validação:** O modelo foi ajustado conforme os resultados das simulações, garantindo que os eixos suportem os esforços aplicados sem falhas.

Dessa forma, a integração entre o dimensionamento teórico e a modelagem 3D permitiu um projeto confiável, funcional e adequado às condições de operação do veículo Baja SAE.

Assim também como sua caixa de proteção, rolamentos e fixações, todas projetadas de modo que nos auxiliasse para que pudéssemos analisar possíveis interferências ou erros de acordo com nossa montagem.

3 MÉTODOS

3.1 PROJETO 3D DA REDUÇÃO

O projeto tridimensional (3D) da redução do veículo Baja SAE desempenha um papel essencial no desenvolvimento do sistema mecânico do protótipo. Por meio da modelagem 3D, é possível representar com precisão as dimensões, geometrias e interações entre os componentes da redução, permitindo uma análise detalhada e otimização do conjunto. Este tópico descreve as etapas e ferramentas utilizadas para a criação do modelo 3D, destacando a importância desse processo para o sucesso do projeto.

Para a modelagem 3D da redução, foi utilizado o software SolidWorks, uma das principais ferramentas CAD (Computer-Aided Design) no mercado. O SolidWorks oferece um conjunto robusto de funcionalidades que permitem a criação de modelos tridimensionais detalhados, realização de simulações e geração de desenhos técnicos.

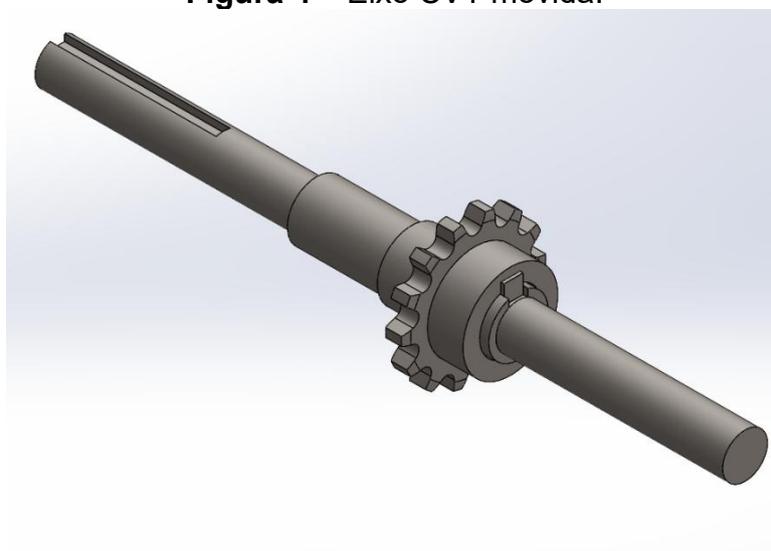
A escolha do SolidWorks como ferramenta principal não foi apenas devido às suas capacidades técnicas, mas também por ser um dos patrocinadores da equipe Bajampa do IFPB. Esse apoio foi fundamental para que a equipe tivesse acesso à licença do software e pudesse usufruir de seus recursos para a realização do projeto. A parceria com o SolidWorks não apenas forneceu a tecnologia necessária, mas também reforçou o compromisso da equipe com a utilização de soluções de engenharia de alto nível.

O projeto 3D da redução foi um marco importante no desenvolvimento do veículo baja SAE da equipe Bajampa do IFPB em alguns dos veículos. A utilização desta ferramenta, aliada à abordagem sistemática de modelagem, permitiu a criação de um modelo robusto e eficiente. Além disso, a parceria com o software reforçou a importância da colaboração entre a academia e empresas no desenvolvimento de soluções inovadoras em engenharia.

Com o uso da montagem podemos identificar possíveis falhas, desalinhamentos que possam ocasionar em um mal desempenho do nosso protótipo, logo podemos ver a importância dela para que em um projeto como esse nós leva a poupar tempo e recursos preciosos. Em seguida podemos analisar as montagens dos 3 eixos e suas devidas engrenagens, pinhões, coroa e corrente.

Na Figura 4, podemos ver o eixo da CVT movida, onde nela é chavetada o pinhão de 14 dentes. Neste eixo podemos ver que ele precisa de dois rasgos de chaveta, os mesmos são dimensionados a partir da norma DIN 6885/1 que é possível dimensionar com mais facilidade graças a sua tabela, na qual usamos para fazer a altura da chaveta e largura da mesma, é possível relatar que temos uma rosca interna no eixo para que seja feita a fixação da CVT movida, com o uso de um parafuso M10 e uma arruela, é possível fixar a mesma de forma eficaz e que se for preciso fazer manutenções, podemos fazer isso rapidamente o que torna interessante para possíveis manutenções seja corretiva ou preventiva em nosso protótipo.

Figura 4 – Eixo CVT movida.



Fonte: Equipe Bajampa – IFPB.

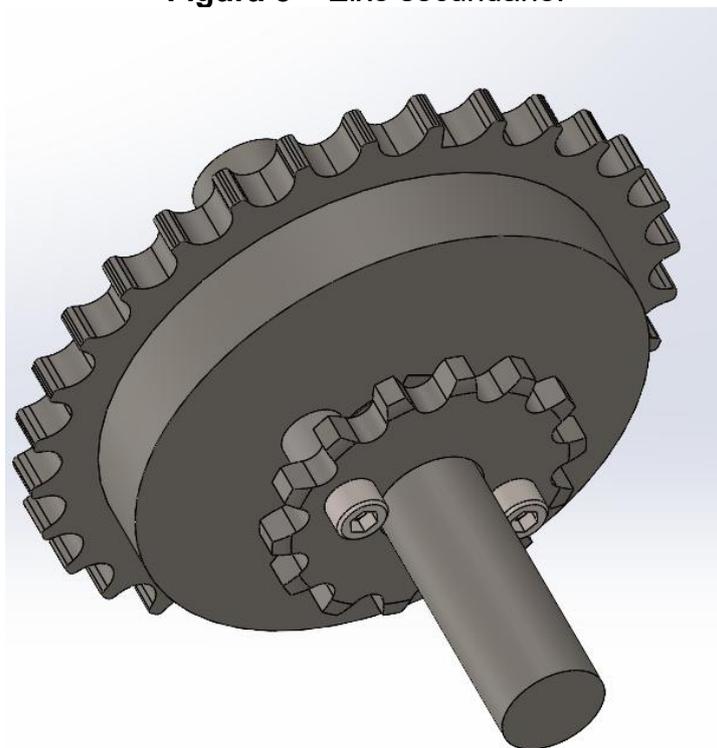
Com a função de transmitir o torque do eixo movido para o eixo de tração, o eixo secundário é montado com o auxílio de rolamentos alojados na carcaça do conjunto (cover) e possui uma engrenagem de 30 dentes, acoplada por meio de uma chaveta, garantindo a transmissão de torque sem deslizamentos. Nessa engrenagem é parafusado um pinhão de 14 dentes, responsável pela primeira etapa da redução, que também está conectado à coroa de 30 dentes localizada no eixo seguinte. Essa primeira redução resulta em uma relação de aproximadamente 2,14:1, o que significa que, para cada 2,14 voltas do pinhão, a engrenagem maior completa uma volta.

Na sequência, a transmissão segue para a segunda etapa da redução, responsável por conectar o eixo da primeira redução ao eixo de tração final do sistema, completando o conjunto de transmissão, como mostra na figura 5. Neste eixo temos uma coroa de 30

dentes e acoplado a ela, um pinhão de 14 dentes, sendo ela a primeira parte da redução dupla que temos em nosso projeto de redução.

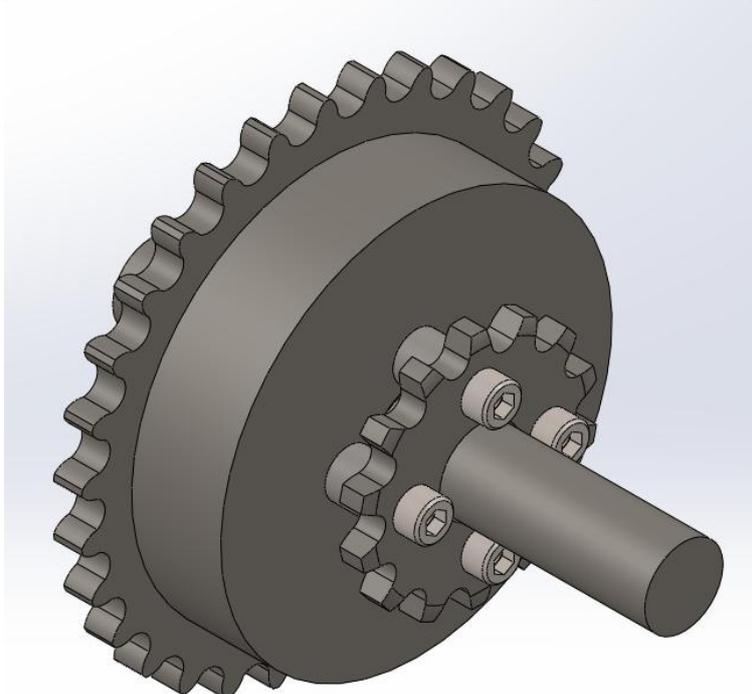
Durante os testes práticos do sistema, foi constatado que os dois parafusos utilizados inicialmente para fixar o pinhão não foram suficientes para resistir ao torque transmitido, ocasionando instabilidade na montagem. Para resolver o problema, foram realizados dois novos furos perpendiculares aos existentes, aumentando o número total de parafusos para quatro, o que proporcionou uma fixação mais robusta e segura.

Figura 5 – Eixo secundário.



Fonte: Equipe Bajampa – IFPB.

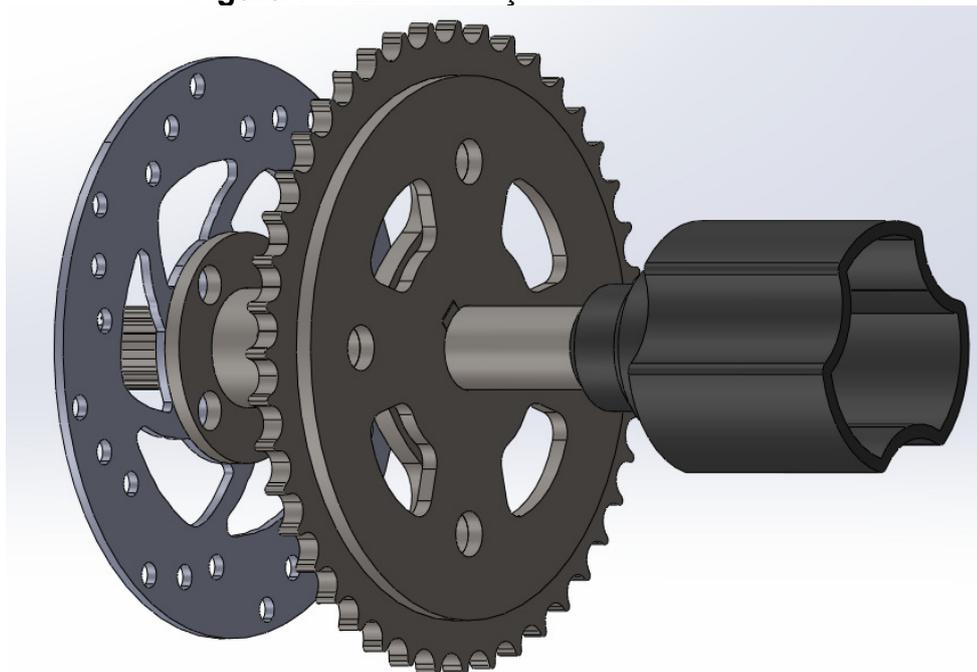
Figura 6 – Eixo secundário após a modificação de fixação.



Fonte: Equipe Bajampa – IFPB.

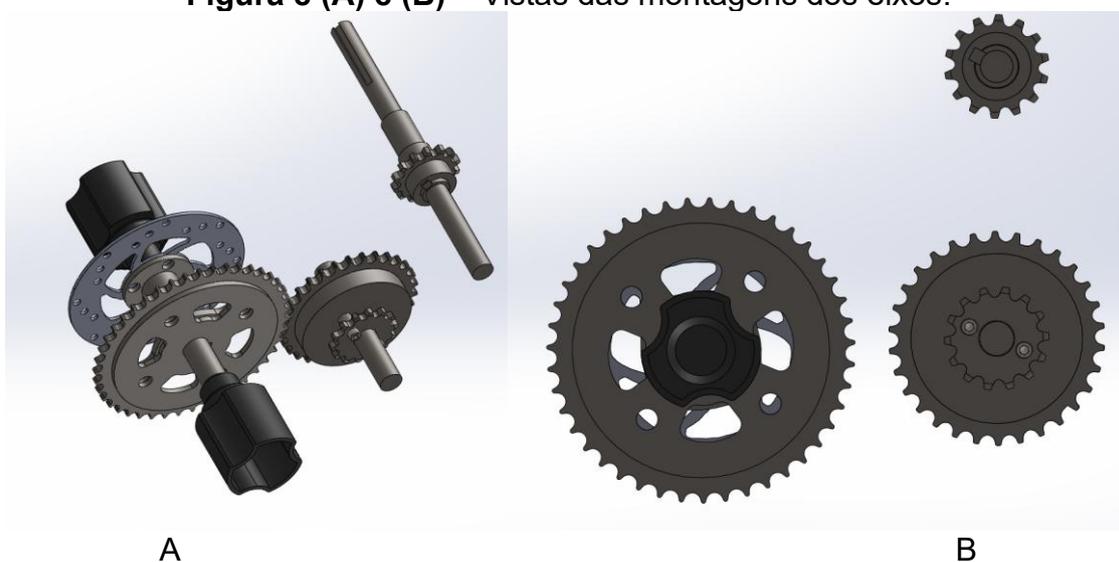
Na Figura 6, podemos analisar a modificação feita após testes técnicos feitos em nosso protótipo, utilizando parafusos M8 dobramos a fixação do pinhão, que é ligado a coroa de 30 dentes, após essa modificação obtivemos um bom resultado, conseguindo assim, seguir nossos estudos para os próximos passos.

Em sequência, temos o eixo da redução final, com sua coroa de 43 dentes. Também é acoplado no eixo o disco de freio, onde no seu eixo traseiro é posicionado de forma estratégica de modo com que trave as duas rodas com apenas uma peça de freio, foi utilizado esse sistema com o propósito de diminuir o custo e maior facilidade em sua instalação e manutenção. Nela foi dimensionada a largura e altura da chaveta, para a coroa e disco de freio, também foi feito fixadores para ambos os componentes para que pudéssemos ter um acesso rápido em possíveis manutenções. É possível analisar, na figura 7, que para o eixo de saída de nossa redução foi utilizado o eixo de tração do ford Kar 2013, foi possível o encaixe do mesmo de forma compacta, pois em uma de suas extremidades já é acoplada a tulipa e do outro lado é possível colocar apenas quando a mesma estiver posicionada no seu local final. Foi questionado o uso de tulipas, porém devido aos custos do carro, decidimos manter essa mesma utilizada pela equipe durante a algum tempo, porém satisfazendo a equipe durante seu uso.

Figura 7 – Eixo de tração das rodas.

Fonte: Equipe Bajampa – IFPB.

Com as devidas montagens de cada eixo feita e dimensionada, podemos ter uma ideia de como ficará a montagem das junções das três, conseguindo assim ter um brevíssimo análise de alinhamento e distâncias entre eixo para melhor compatibilizar a mesma dentro da gaiola do carro. Na Figura 8, conseguimos analisar os seus posicionamentos e assim começar a dimensionar sua proteção lateral, que também será sua fixação na gaiola. Conseguimos enxergar na Figura 8 A usa vista isométrica e na B as distâncias entre os eixos, como conseguimos compactar a redução mantendo assim dentro da meta indica.

Figura 8 (A) e (B) – Vistas das montagens dos eixos.

A

B

Fonte: Equipe Bajampa – IFPB.

Na proteção dos componentes rotativos a construção da cover é primordial para o funcionamento de todo o conjunto, com a principal função de proteger as peças, a caixa também é importante para que as distancias entre os eixos sejam compatíveis com os elos das correntes. Esse cálculo de distancias entre eixos teve o auxílio de uma planilha que informa a distância exata para que possa ter os elos da corrente exato, deixando assim a corrente com o dimensionamento ideal para funcionamento.

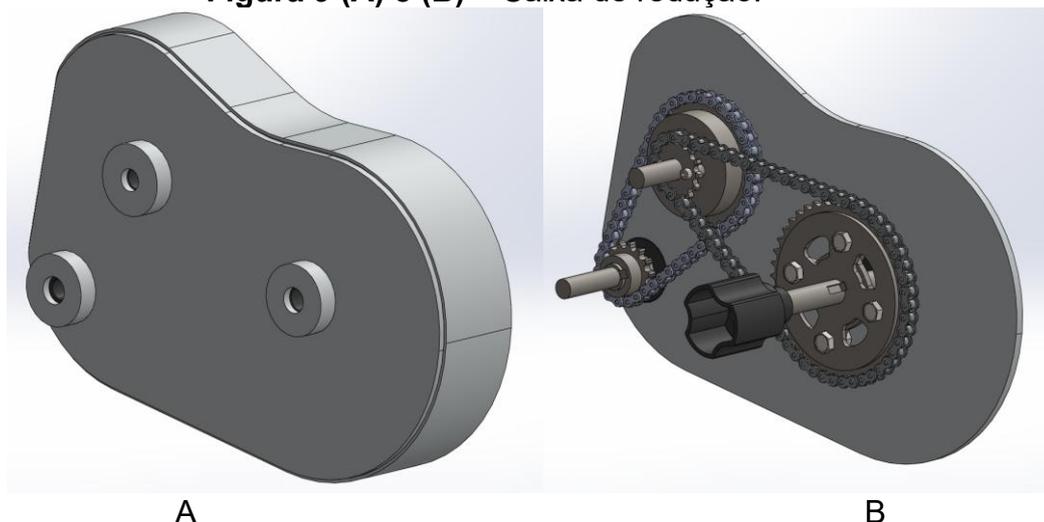
Colocamos a distância entre os eixos ligados pela corrente e os números de dentes na qual a corrente será ligada, em seguida o passo da corrente, que são os dados em amarelos mostrado na Tabela 1, e após isso a planilha calcula o número de elos, o comprimento e a distância final entre os eixos, dados vistos nas janelas verdes, um dos principais pontos para garantimos a tensão ideal da corrente que é de 20 a 30mm é a distância de centro finais entre eixos. A planilha nos auxilia na hora que formos montar e cortar a corrente para fazer a montagem, pois para isso, devemos cortar a corrente no seu ponto certo, caso contrário a mesma não encaixa nos dentes das coroas e pinhões.

Tabela 1 – Planilha de dimensionamento de corrente.

Símbolo	Denominação	Valor
Cinicial	Distância entre centro	229
Zeng1	N° dentes engrenagem 1	14
Zeng2	N° dentes engrenagem 2	43
Pcorrente	Passo da corrente	12,7
N°elos	Quantidade de elos	66
Lcorrente	Comprimento corrente	838,20
Cfinal	Distância entre centros finais	230,678

Fonte: O manual do projetista.

Na utilização da cover, também, podemos destacar que é nela a fixação da estrutura, logo, os pontos de fixação são debatidos com o subsistema de estrutura para analisar os melhores pontos para fixa-la de modo com que não possa haver torções ou desalinhamentos entre os pinhões e coroas ocasionando uma possível queda da corrente, logo, devemos assegurar que durante a fixação da redução na estrutura do carro, a mesma seja capaz de suportar todas as tenções sem sofrer qualquer dano, na Figura 9 A podemos visualizar como ficará a cover toda fechada e na Figura 9 B uma vista isométrica com a cover aberta, onde conseguimos visualizar seus posicionamento já com a corrente, simulando sua montagem final.

Figura 9 (A) e (B) – Caixa de redução.

Fonte: Equipe Bajampa – IFPB.

3.2 FIXAÇÃO

Com o passar de 3 gerações de projetos de redução por corrente, pinhão e coroa, onde foram usados em três passagens de capitania da equipe, desde o início da equipe, em 2009, até o início deste estudo, pudemos analisar vários tipos de fixação da redução, seja ela feita por mancais fixos na estrutura ou por uma redução fechada e removível, tendo elas seus pontos positivos e negativos. A redução fixa por mancais foi a primeira projetada pela equipe, sendo ela fixada por 6 mancais presos em pontos na estrutura do carro, porém passamos por problemas de manutenção da mesma em diversas competições, com desalinhamento dos eixos ocasionando queda da corrente com frequência, assim começamos a utilizar uma redução removível da estrutura, assim facilitando a manutenção da mesma, podendo retirá-la da estrutura caso ocorresse algum problema, conseguimos uma redução de tamanho considerável deixando mais compacto a estrutura do trem de forma do protótipo.

Para sua cover, onde é obrigatório todo o enclausuramento de pontos rotativos que não possa ocasionar algum risco ao mecânico de pista, juiz ou voluntário (RATBSB) foi construído uma caixa, trazendo mais facilidade para a remoção da redução após montada, feita com alumínio, sua estrutura possui costelas onde os eixos são posicionados, trazendo mais resistência em possíveis trancos durante a competição deixando toda a estrutura mais robusta a esses tipos de tensões.

Diante de todas as experiências vividas no projeto, a fixação da redução é considerada um dos principais pontos para o desempenho do carro, então, todo o estudo para que a mesma seja bem fixada é de extrema importância para que não ocorra nenhum tipo de desalinhamento em nosso sistema de redução. Então o uso da cover já nos auxilia

para que esse tipo de problema não ocorra, deixando mais robusta. São utilizadas como dito acima fixadores de forma que deixe nossa redução fixa na estrutura, é fixada com 5 pontos de fixação em torno de nossa redução deixando a mesma firme em nossa estrutura.

3.3 CORRENTE

A corrente utilizada na redução é a mesma aplicada em motocicletas Honda CG 125cc. Esse tipo de corrente é do tipo de roletes, amplamente utilizado em sistemas de transmissão devido à sua eficiência e durabilidade. Sua construção é composta por elos internos e externos interligados por pinos e buchas, permitindo a transmissão de torque entre os pinhões e coroas de maneira eficiente. Essa escolha foi devido ao passo da corrente que é de 428, o que significa 12,70 mm, darem certo com nosso tipo de coroa e pinhão, também trazendo confiabilidade e suavidade para que não tivéssemos problemas diante dessa escolha.

Figura 10 – Corrente CG 125.



Fonte: Manual Honda.

3.3.1 Tensão ideal

A tensão correta da corrente é essencial para o bom funcionamento da transmissão, uma tensão inadequada pode causar desgaste prematuro, perda de eficiência e até falhas mecânicas. Para correntes semelhantes às utilizadas em motocicletas Honda CG 125cc, a folga vertical recomendada geralmente varia entre 20 mm e 30 mm quando medida na parte inferior da corrente, a meio caminho entre o pinhão e a coroa. Esse ajuste garante que a corrente esteja suficientemente tensionada para transmitir o torque sem deslizar, mas com folga suficiente para acomodar variações durante o funcionamento. Esse ajuste mais técnico é um dos pilares para os posicionamentos dos eixos, pois como ficaria inviável um ajuste de corrente utilizado em motocicletas tivemos a opção de ajustar os eixos para que

podéssemos alcançar esse ajuste de forma ideal e eficaz lembrando sempre de deixar o mais compacto possível.

3.3.2 Lubrificação

A lubrificação adequada é essencial para reduzir o atrito entre os elos da corrente e prolongar sua vida útil, recomenda-se o uso de lubrificantes específicos para correntes de transmissão, aplicados periodicamente, especialmente após exposições a sujeira e umidade. Uma lubrificação insuficiente pode causar desgaste prematuro, aumento do atrito e perda de eficiência na transmissão.

Para que não entre tanta sujeira em nossa redução, a sua cover tem esse papel de além de proteger das partes moveis, evitar que o mínimo de sujeira esteja em contato com os componentes. Porém antes de todas as provas é de suma importância a manutenção preventiva da redução para que sujeiras sejam removidas e uma nova lubrificação adicionada para as provas seguintes.

O uso da corrente de motocicleta Honda CG 125cc na redução do projeto bajampa oferece uma solução robusta e eficiente para a transmissão de torque. A manutenção adequada da tensão, lubrificação e monitoramento do desgaste são essenciais para garantir o desempenho e a durabilidade do sistema. A escolha correta do passo e o respeito à capacidade de carga contribuem para o funcionamento confiável da transmissão, assegurando o melhor desempenho nas competições.

3.4 ROLAMENTOS E MANCAIS

Os rolamentos e mancais exercem papel fundamental na transmissão de potência e no suporte dos eixos rotativos presentes no sistema de redução do Baja SAE. Sua função principal é permitir o giro suave dos eixos, minimizando o atrito e, conseqüentemente, o desgaste das superfícies de contato.

3.4.1 Função e Importância dos Rolamentos e Mancais no Baja SAE

Os rolamentos e mancais desempenham um papel fundamental nos sistemas de transmissão e suporte de eixos do veículo Baja SAE. Sua principal função é permitir o movimento rotacional suave e eficiente dos componentes mecânicos, reduzindo significativamente o atrito entre superfícies em contato. Além disso, são responsáveis por suportar cargas radiais e axiais, dissipar forças dinâmicas geradas durante o funcionamento do veículo e preservar a integridade estrutural dos eixos, mesmo sob condições extremas de operação.

Em competições como o Baja SAE, nas quais o veículo enfrenta terrenos acidentados, impactos constantes e grandes variações de carga, a escolha adequada dos rolamentos e mancais, considerando tipo, material, vedação e capacidade de carga é essencial para garantir a confiabilidade, durabilidade e desempenho do sistema mecânico. A manutenção preventiva desses componentes também é crítica para evitar falhas prematuras que possam comprometer o desempenho da equipe na competição.

Entre os rolamentos mais utilizados em veículos off-road como o Baja, destacam-se:

- **Rolamentos de esferas:** comuns em aplicações que exigem baixa fricção e suportam cargas radiais moderadas.
- **Rolamentos de rolos cilíndricos:** ideais para cargas radiais elevadas, oferecem maior rigidez.
- **Rolamentos autocompensadores de rolos ou de esferas:** acomodam desalinhamentos entre o eixo e o alojamento, úteis em estruturas sujeitas à flexão.
- **Rolamentos de rolos cônicos:** amplamente utilizados em cubos de roda e sistemas de transmissão, por suportarem simultaneamente cargas radiais e axiais.

Quanto aos **mancais**, que servem como suportes ou alojamentos para os rolamentos ou os próprios eixos, os tipos mais comuns incluem:

- **Mancais de rolamento (ou mancais com rolamentos integrados):** garantem fácil montagem e manutenção, sendo amplamente aplicados em sistemas onde há alta rotação e cargas variadas.
- **Mancais de deslizamento (buchas):** utilizados em aplicações de baixo custo ou onde o espaço e a simplicidade são essenciais; requerem lubrificação constante.
- **Mancais autocompensadores:** utilizados em aplicações que demandam tolerância a desalinhamentos entre os componentes.

A correta seleção entre esses tipos depende das especificações do projeto, como carga, velocidade, tipo de movimento, ambiente operacional (presença de poeira, umidade, lama) e facilidade de manutenção. Investir em componentes de qualidade e em uma boa estratégia de lubrificação e vedação aumenta significativamente a durabilidade e o desempenho do veículo no ambiente hostil das provas do Baja SAE.

No projeto da redução do veículo Baja SAE, os rolamentos foram aplicados nos eixos de entrada, eixo secundário e saída do sistema de transmissão, garantindo o suporte adequado às cargas radiais e, em alguns pontos, às cargas axiais. Foram utilizados rolamentos do tipo rígido de esferas, devido à sua versatilidade, baixo custo e boa capacidade de suportar cargas em regimes moderados de rotação. Os mancais, por sua vez, foram do tipo "mancal com rolamento incorporado", facilitando a montagem e

garantindo um bom alinhamento com a estrutura da caixa de redução. A escolha dos mancais considerou fatores como facilidade de manutenção, resistência à poeira e à vibração, condições típicas das competições Baja SAE.

Rolamentos e mancais não são meros suportes, mas sistemas dinâmicos que influenciam diretamente a eficiência energética, durabilidade e segurança do veículo. Projetá-los para o Baja SAE exige equilíbrio entre resistência mecânica, proteção ambiental e facilidade de manutenção – fatores que podem definir o sucesso na pista. A literatura técnica citada oferece bases sólidas para otimizar esses componentes frente aos desafios únicos da competição.

A seleção, o dimensionamento e a análise da vida útil dos rolamentos utilizados no sistema de redução do Baja SAE seguem critérios estabelecidos por normas técnicas reconhecidas, como:

- **ABNT NBR ISO 281:2008** – Rolamentos – Cálculo da vida nominal;
- **ABNT NBR ISO 76:2008** – Rolamentos – Carga estática básica;
- **ABNT NBR ISO 1132** – Termos técnicos e definições de rolamentos.

Além dessas normas, uma importante base teórica utilizada no desenvolvimento deste projeto foi o livro “**Projeto de Máquinas**” de **Shigley & Mischke**, que aborda de forma aprofundada os métodos de cálculo da vida útil de rolamentos, especialmente por meio da equação de vida nominal conforme a ISO 281, bem como critérios para seleção de materiais e análise de falhas.

A equação de vida nominal, que representa a vida útil esperada para 90% dos rolamentos de um lote, é expressa por:

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^p$$

Onde:

- L_{10} : vida nominal do rolamento (em milhões de rotações);
- C: capacidade de carga dinâmica básica do rolamento (fornecida pelo fabricante);
- P: carga equivalente aplicada ao rolamento;
- p: expoente que depende do tipo de rolamento:
 - p = 3 rolamentos de esferas;
 - p = $\frac{10}{3}$ para rolamentos de rolos.

Essa equação permite prever a durabilidade do rolamento com base na carga aplicada, sendo essencial na fase de projeto para garantir a confiabilidade do sistema mecânico tornando nosso protótipo fiel as teorias.

O “Manual de Engenharia de Rolamentos SKF”, que fornece orientações práticas detalhadas sobre sistemas de vedação, tipos de lubrificação e estratégias para garantir o desempenho dos rolamentos em ambientes severos, como os encontrados nas competições Baja SAE. Esse manual é especialmente útil no que se refere à escolha de graxas, proteção contra contaminantes (poeira, lama e umidade) e manutenção preventiva em condições adversas deixando ainda mais claro a importância da leitura e seguir suas indicações referente ao uso adequado das vedações e lubrificações no sistema da redução do nosso carro.

3.4.2 Montagem e lubrificação

Durante a montagem, foi seguido um procedimento cuidadoso para evitar o desalinhamento ou danos à pista dos rolamentos. Além disso, foram observados os torques corretos de fixação dos mancais, garantindo um aperto seguro sem comprometer a folga interna dos rolamentos seguindo as normas do fabricante.

A lubrificação dos rolamentos é essencial para garantir a vida útil do componente. No Baja, adotou-se a lubrificação com graxa, aplicada previamente nos rolamentos e renovada periodicamente conforme o plano de manutenção da equipe. A graxa utilizada foi escolhida com base na resistência à água, poeira e altas temperaturas, uma vez que o veículo opera em ambientes agressivos, como a graxa azul, onde ela tem todas essas propriedades e somando um baixo custo, perfeito para nosso uso. Uma lubrificação inadequada pode causar aumento de atrito, superaquecimento e falhas prematuras nos rolamentos ocasionando falhas prematuras no sistema e até mesmo travamento dos eixos.

3.4.3 Análise de Falhas por Fadiga em Mancais sob Cargas Variáveis

Mancais, especialmente os aplicados em sistemas de transmissão veicular como no Baja SAE, estão frequentemente sujeitos a cargas cíclicas e variáveis ao longo do tempo. Nessas condições, é comum que falhas ocorram por fadiga, mesmo que os níveis de tensão estejam abaixo do limite de escoamento do material. A fadiga é caracterizada pela nucleação e posterior propagação de trincas, que levam à fratura repentina do componente após um número acumulado de ciclos de carga (CHILDS, 2004).

Segundo Peter R. N. Childs (2004), o fenômeno da fadiga em mancais pode ser previsto por meio da regra de Miner, que calcula o dano acumulado ao longo do tempo. Essa regra é expressa pela equação:

$$\sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i} = D$$

onde n_i é o número de ciclos aplicados a uma determinada tensão e N_i é o número de ciclos até a falha naquela mesma tensão. A falha ocorre quando $D \geq 1$. Essa abordagem permite estimar a vida útil de componentes submetidos a tensões variáveis, como é o caso de mancais em ambientes off-road.

Além disso, fatores como acabamento superficial, presença de entalhes, dimensões do componente e confiabilidade esperada devem ser considerados através de coeficientes redutores da resistência à fadiga. Childs (2004) também ressalta que, em mancais de deslizamento, há uma preocupação adicional com a fadiga da sobre camada, causada pela perda progressiva do revestimento superficial devido ao atrito e à lubrificação inadequada.

As interfaces entre o eixo e o mancal são locais críticos, especialmente em aplicações com contaminantes, desalinhamentos ou variações térmicas intensas. Esses fatores favorecem o surgimento de micro trincas superficiais que, com o tempo, evoluem para falhas completas. Ensaio práticos demonstram que partículas abrasivas e choques mecânicos também são fortes contribuintes para a nucleação de trincas de fadiga (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 2005).

Dessa forma, o projeto de mancais para aplicações em veículos como o Baja SAE deve considerar não apenas as cargas estáticas, mas também o comportamento sob carregamentos cíclicos e variáveis, utilizando métodos de análise por fadiga e critérios de dimensionamento seguros.

3.4.4 Redução de Atrito em Mancais de Deslizamento

Mancais de deslizamento operam sob contato contínuo entre superfícies sólidas, o que torna o controle do atrito e do desgaste um dos principais desafios de projeto. Para isso, é fundamental aplicar estratégias tribológicas adequadas que promovam a separação entre as superfícies, reduzam a fricção e aumentem a vida útil dos componentes.

Segundo o *Tribology Handbook*, de M. J. Neale (1995), a redução do atrito em mancais de deslizamento pode ser alcançada por três abordagens principais: aplicação adequada de lubrificação, uso de materiais autolubrificantes e modificação da textura superficial. Cada uma delas atua em diferentes regimes de operação descritos pelas curvas de Stribeck, que relaciona o atrito com parâmetros como viscosidade do lubrificante, velocidade de deslizamento e carga aplicada.

A curva de Stribeck divide a operação em três regimes principais:

- **Regime limite:** ocorre contato direto entre asperidades das superfícies. Nessa condição, o uso de lubrificantes sólidos, como grafite, dissulfeto de molibdênio (MoS_2) e PTFE, é essencial para reduzir o atrito (NEALE, 1995).
- **Regime misto:** há contato parcial entre superfícies, com presença intermitente de filme lubrificante. Estratégias como a adição de aditivos de extrema pressão (EP) e modificadores de atrito ajudam a evitar o desgaste excessivo.
- **Regime hidrodinâmico:** a separação completa das superfícies ocorre por meio de um filme contínuo de fluido. Esse regime apresenta o menor atrito e desgaste, sendo o ideal em condições de velocidade e carga bem controladas (NEALE, 1995).

Outra estratégia destacada por Neale (1995) é o uso de mancais com materiais autolubrificantes, como ligas de bronze sinterizado impregnadas com óleo ou revestimentos com PTFE, grafite ou MoS_2 . Esses materiais proporcionam baixos coeficientes de atrito (μ entre 0,05 e 0,10), mesmo em condições adversas ou com falhas intermitentes de lubrificação. Revestimentos secos (dry films) de MoS_2 , por exemplo, são eficazes em aplicações de alta temperatura e carga, e são amplamente utilizados em ambientes automotivos e aeroespaciais.

Pesquisas modernas, como as de Fang et al. (2020), complementam o conteúdo do manual de Neale ao mostrarem que a texturização superficial com microcavidades ou ranhuras transversais favorece a formação de filme lubrificante local, reduz o atrito e melhora a retenção de óleo. Esses padrões texturizados funcionam como microreservatórios e auxiliam na lubrificação durante ciclos de partida e parada. No contexto de veículos off-road como o Baja SAE, onde há variações constantes de carga e velocidade, é fundamental adotar soluções que combinem diferentes técnicas de redução de atrito. A escolha de materiais de baixa fricção, uso de lubrificantes apropriados e, quando possível, aplicação de texturas funcionais são fatores que otimizam o desempenho e reduzem falhas prematuras por atrito excessivo.

3.5 ESTUDO DE SIMULAÇÃO

Podemos analisar também possíveis falhas em rolamentos, estruturas e eixos através de simulações, onde usamos o software ansys versão student para auxiliar nessa etapa. Com o crescimento de estudos e ferramentas em software de simulação, está presente também em nosso desenvolvimento está ferramenta tão poderosa na engenharia. Foi considerado os torques calculados em cada etapa da redução, para simular uma possível parada ou travamento dos mancais ocasionando tensões forçadas pelo eixo da

CVT acoplada no primeiro eixo da árvore da redução, tanto quanto ao terceiro eixo, o que leva a tração as rodas, onde também é fixado a pinça de freio.

O motor Briggs & Stratton serie 19 fornece uma potência de 18,3N.m e ao passar pela CVT com sua relação em abertura máxima, pois na própria CVT já existe uma redução como dito acima, o torque chega ao eixo de entrada da redução com 62,65 N.m, com isso na relação seguinte no eixo intermediário o torque aumenta para 134,28 N.m e chega ao eixo de tração com uma potência de 412,43 N.m. Esses dados são de extrema importância para a sequência do devido estudo, pois são com eles que conseguimos analisar como a caixa se comportaria em uma possível quebra, simulando um rolamento travado ou um freio brusco em cada eixo. Cada valor foi colocado em seus respectivos lugares onde são fixados, no eixo de saída da CVT e entrada da redução foi colocado o torque de 62,65N.m já no eixo secundário, o eixo do meio onde são fixados a coroa de 30 dentes junto ao pinhão de 14, foi colocado o torque calculado de 138,28N.m e por último no terceiro eixo o torque de 412,43N.m. Nas figuras 12 e 13, conseguimos analisar a possível deformação da cover.

Figura 11 – Estudo de simulação posição 1.

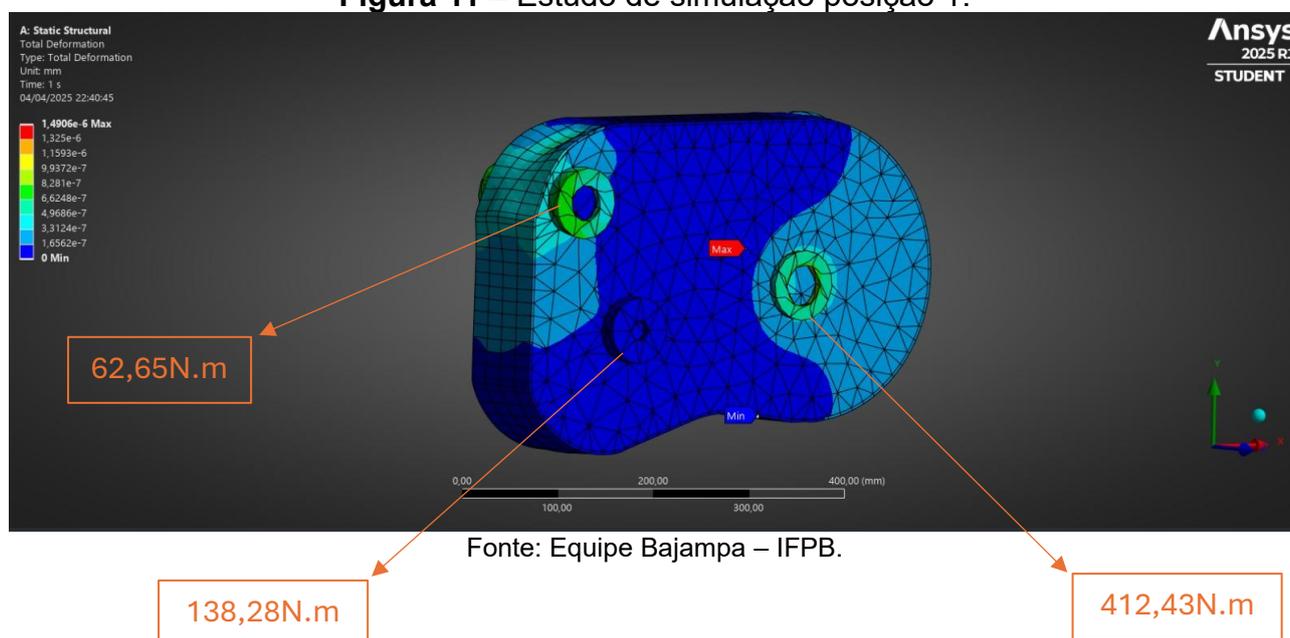
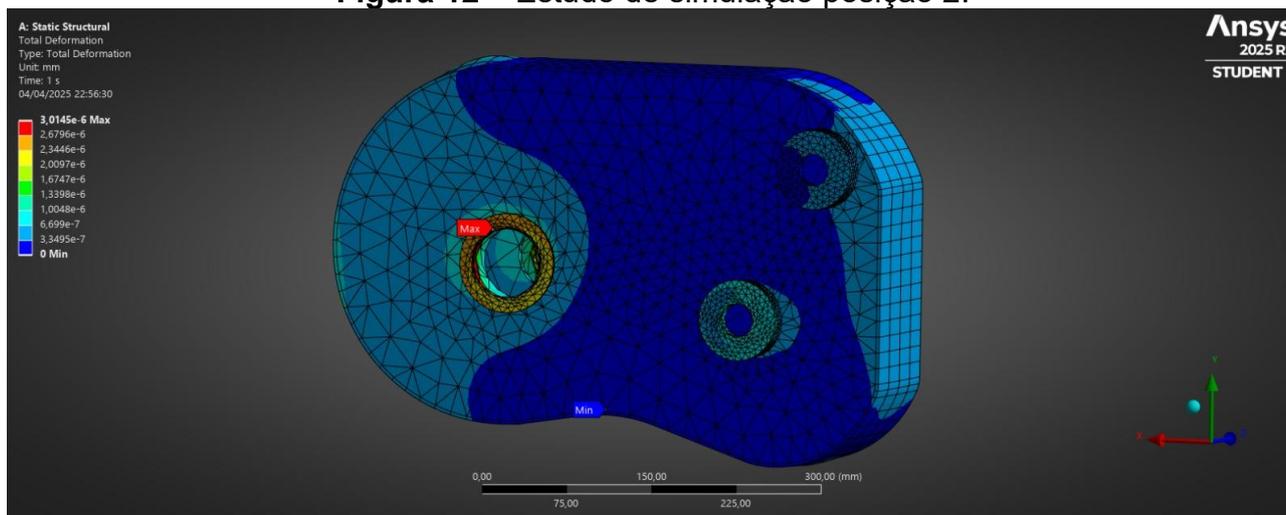


Figura 12 – Estudo de simulação posição 2.



Fonte: Equipe Bajampa – IFPB.

A simulação nos mostra que a caixa está bem dimensionada com seus devidos reforços estruturais e locais estratégicos para que a deformação sofrida seja pouca, onde na imagem está em escala que possamos visualizar os pontos que sofreram mais, já na escala real, está deformação é desconsiderava em relação a possíveis quebras da caixa, também podemos analisar devidas posições de fixação para que deixe a cover com mais resistência, principalmente nos pontos de maior deformação, impedido desalinhamento entre pinhão e coroa, evitando uma possível queda da corrente, já para o eixo de saída da redução, onde também existe pontos de tensões maiores por conta de seu alto torque, é possível fazer ranhuras ao redor do mancal, reforçando estruturalmente a cover deixando a mesma ainda mais robusta.

Com sua montagem finalizada, podemos analisar que conseguimos uma redução total de 6.1 tornando nosso carro mais rápido com relação a nossa antiga relação de 13.1 que foi utilizado nos protótipos anteriores. Tivemos uma melhora em nossa velocidade final considerável, que chegou à marca de 34km/h que em comparação ao carro anterior era de 23km/h, uma melhora bastante considerável de aproximadamente 12km/h. Também podemos perceber que em relação ao torque do carro, o mesmo se comportou semelhante as provas de tração, isso foi possível graças a diminuição da estrutura e melhores dimensionamentos do geral do carro, conseguindo perder de peso e melhor desempenho diante das provas, onde podemos comparar seus resultados comparando com a redução 13.1 utilizado no nacional de 2024, na figura 14 e com a redução nova utilizada no regional

do mesmo ano, na figura 15, comprando com provas de velocidade máxima e a prova de tração.

Figura 13 – Resultado Velocidade Máxima Nacional 2024.

	51	Bombaja UFSM Universidade Federal de Santa Maria	41.65 41.14	30
29º	52	Cataratas Baja SAE Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE	29.36 27.54	3.44
36º	53	CEFAST BAJA SAE Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG	23.2 22.12	0
30º	54	UFPR Baja SAE Universidade Federal do Paraná	27.8 29.23	3.16
36º	55	Bajampa Instituto Federal da Paraíba Campus João Pessoa - IFPB	23.07 -	0
21º	57	Corsários Baja Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sudeste de Minas Gerais - Campus Juiz de Fora	30.36 30.66	6.25

Fonte: Site Baja SAE Brasil.

23,07Km/h

Figura 14 – Resultado Velocidade Máxima Regional 2024.

Segurança	Projeto	Dinâmicas	Arquivo		
	#			Velocidade	Pontos
5º	1	Mangue Baja Tecnoferr UFPE - Universidade Federal de Pernambuco		39.71 38.89	31.24
7º	2	Paraybaja Universidade Federal de Campina Grande		38.47 37.58	28.74
	3	Caraubaja SAE UFERSA - Universidade Federal do Semi-Árido - Campus Caraubas		41.06 40.81	33.96
4º	4	Cactus Baja UFERSA - Universidade Federal do Semi-Árido - Campus Mossoró		40.81 35.67	33.45
8º	6	Mandacaru Baja UNIFACS - Universidade Salvador		35.09 35.39	22.53
6º	8	ZabumBaja UFRPE		38.51 37.79	28.82
	9	Baajatinga UNIVASF		45.24 44.58	42.38
10º	10	Bumba Meu Baja UEMA		29.68 27.83	11.02
9º	13	Bajampa IFPB		34.49 34.33	20.72
	14	UFPBaja UFPB		45.11 46.54	45
11º	17	Bajagreste IFPE - Caruaru		24.12 24.21	0

Fonte: Site Baja SAE Brasil.

34,49Km/h

O resultado de velocidade máxima mostra que há ainda uma diferença considerável para os primeiros colocados e que sim, podemos ajustar e melhorar ainda mais nosso carro para que conseguimos alcançá-los, com uma redução ainda menor e com a redução de algumas partes, deixando o carro mais compacto e robusto, conseguiremos reduzir essa lacuna e brigar para um pódio nessa dinâmica. Porém é importante informar também que em testes feitos no próprio instituto nosso carro alcançou uma velocidade de 42km/h, após

vários testes e ajustes alcançamos essa marca, porém, devido a termos que desmontar o carro para levar a competição, pois temos que colocá-lo dentro do portas mala do ônibus, acabamos perdendo esses ajustes finos, pois temos pouco dias para fazer a montagem do carro durante a competição e não podemos fazer testes nele antes da competição, perdendo assim alguns ajustes importantes para que pudéssemos repedir o resultado feito durante os testes. Em seguida, na Figura 16, o resultado da prova de tração do nacional de 2024, e na Figura 17 a do regional do mesmo ano, a prova exige que carro tem que puxar o máximo de barras de concreto possível, no qual, a equipe que puxar por mais metros ganha.

Figura 15 – Resultado prova de tração Nacional 2024.

6º	52	Cataratas Baja SAE Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE	8.58 7.1
13º	53	CEFAST BAJA SAE Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG	7.24 7.44
10º	54	UFPR Baja SAE Universidade Federal do Paraná	7.21 7.98
29º	55	Bajampa Instituto Federal da Paraíba Campus João Pessoa - IFPB	5.74 5.37
34º	57	Corsários Baja Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sudeste de Minas Gerais - Campus Juiz de Fora	4.59 4.8

Fonte: Site Baja SAE Brasil.

5,74 metros

Figura 16 – Resultado prova de tração Regional 2024.

Segurança	Projeto	Dinâmicas	Arquivo	
#			Distância [m]	Pontos
4º	1	Mangue Baja Tecnoferr UFPE - Universidade Federal de Pernambuco	9.45 9.35	23.19
6º	2	Paraybaja Universidade Federal de Campina Grande	8.39 8.44	18.82
5º	3	Caraubaja SAE UFERSA - Universidade Federal do Semi-Árido - Campus Caraúbas	9.3 9.4	22.98
	4	Cactus Baja UFERSA - Universidade Federal do Semi-Árido - Campus Mossoró	9.43 10.41	27.36
	6	Mandacaru Baja UNIFACS - Universidade Salvador	14.48 14.36	45
7º	9	Baajatinga UNIVASF	7.4 7.34	14.31
9º	10	Bumba Meu Baja UEMA	4.1 -	0
8º	13	Bajampa IFPB	7.35 7.38	14.22
	14	UFPBaja UFPB	11.46 9.54	31.91

Fonte: Site Baja SAE Brasil.

7,38 metros

Uma prova, de que mesmo com uma redução maior que nossos concorrentes, ainda não conseguimos deixa-lo com mais torque que os demais, claro que todo o conjunto do carro faz diferença e que devemos analisar o contexto do carro por igual, mas que esses resultados mostram que ainda é possível variar mais e deixa-lo ainda mais robusto para que conseguimos competir em geral, como podemos comprar com as competições do nacional e regional, onde obtivemos uma diferença de quase 2 metros. A redução é um dos itens principais durante as provas, mas o conjunto de redução, suspensão e estrutura fazem a diferença durante essas provas, deixando claro que todas as subequipes devem pensar em conjunto para que o protótipo possa ter um bom desempenho.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conclui-se que o resultado foi o esperado pela equipe, conseguimos uma relação menor da nossa redução, aumentando assim nossa velocidade final e mantendo nosso torque ainda dentro do esperado, pois com a nova redução em conjunto com as demais subequipes conseguimos uma relação peso x torque similar ao que se encontrava antes.

Entretanto, durante a competição nacional 2024, tivemos a infelicidade da chaveta de freio romper durante o enduro. Com isso, tivemos que retornar aos boxes e arrumar durante o decorrer da prova de enduro que dura quatro horas. O conserto dessa chaveta foi realizado durante duas horas e meia, pois, tivemos que retirar a redução toda da gaiola e para isso, foi retirado parte da suspensão traseira e a CVT para conseguir sacar para fora a redução. Após o ajuste, assim que voltamos, ao passar de 5 obstáculos nossa corrente caiu devido a um desalinhamento entre o segundo e terceiro eixo, devido a pressa de voltar a competição, a fixação da cover não ficou como projetada causando este desalinhamento entre o pinhão e coroa fazendo com que a corrente caísse, na Figura 18 mostra o momento em que saio do carro para analisar a quebra.

Figura 17 – Quebra após retorno a prova do enduro.



Fonte: Equipe Bajampa – IFPB.

Devido à quebra ter ocorrido dentro da pista, o regulamento fala que o conserto tem que ser feito dentro da pista caso o carro não tenha condições de ir para os boxes. Logo, tentamos arrumar a corrente na pista, porém por restar pouco mais de meia hora para a prova encerrar, não conseguimos arrumar, já que os passos para arrumar a corrente eram parecidos com a primeira quebra que levou mais de duas horas para fazer.

Já no regional do mesmo ano, após as mudanças da redução, conseguimos um ótimo desempenho durante as dinâmicas, conseguindo disputar frente as equipes presentes na competição, devido ao conjunto de redução ter funcionado, e ter uma resposta e velocidade final equivalente as demais equipes, porém, ao iniciar o enduro no dia seguinte, acabamos lhe dando com outro problema, ao passar por obstáculos a suspensão descomprimia e o desalinhamento entre o eixo da redução com o eixo de tração para as rodas fazia com que a trizeta escapasse da tulipa, ocasionando assim a queda do eixo de tração da roda, isso ocorreu várias vezes após a troca da trizeta, ainda na primeira volta do enduro, fazendo com que acabasse as peças de reposição e em consequência o abandono da prova, na Figura 18 mostra a equipe retirando o carro após a quebra.

Figura 18 – Retirada do carro.

Fonte: Equipe Bajampa – IFPB.

O desenvolvimento da redução sempre foi um desafio marcante dentro da equipe, mas também uma das maiores fontes de aprendizado. A experiência com o conjunto de powertrain me mostrou que, mesmo diante das dificuldades, é possível conquistar grandes resultados quando existe dedicação e união de equipe. A redução anterior nos levou a um desempenho histórico no nacional, garantindo o 46º lugar entre 60 equipes e, no regional, evoluímos ainda mais, conquistando o 11º lugar.

Esses resultados vão muito além das posições, representaram uma virada na história da equipe e me motivaram a buscar soluções ainda melhores. Ao longo deste trabalho, percebi na prática que a engenharia não se limita a cálculos e projetos, mas envolve resiliência, persistência e trabalho em equipe. Foi gratificante constatar que, com as melhorias propostas, alcançamos uma evolução de mais de 50% no desempenho, o que comprova que estamos no caminho certo.

Mais do que números, fica a certeza de que cada esforço valeu a pena e de que a redução pode continuar evoluindo, tornando-se cada vez mais robusta e eficiente. Sei que contratempos sempre existirão, mas acredito que é justamente essa capacidade de superar desafios que diferencia um bajeiro, nunca desistimos e só ficamos satisfeitos quando alcançamos o topo. Espero que este trabalho seja mais um passo nessa jornada e que nossa equipe siga crescendo, até chegar ao ponto mais alto possível. Para mim, fica a certeza de que essa experiência marcou profundamente minha formação, tanto profissional

quanto pessoal, e que levarei esses aprendizados para toda a minha carreira como engenheiro.

5 REFERÊNCIAS

ARAÚJO, M. H. **PROJETO DE UMA CAIXA DE REDUÇÃO PARA UM MINI VEÍCULO OFF-ROAD**. 2021. 35 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Arcos, Minas Gerais, 2021.

CASER, I. N.; SERAPHIM, S. K.C. **PROJETO DE CAIXA DE REDUÇÃO DE VELOCIDADE POR CORREIA SINCRONIZADORA PARA VEÍCULO BAJA SAE**. 2014. 60 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Espírito Santo, 2014.

CIPOLLA, G. **Desenvolvimento de caixa de redução para veículo Baja SAE**. 2015. 58 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia, Guaratinguetá, São Paulo, 2015.

COURA, I. L. **DIMENSIONAMENTO DE UMA CAIXA DE REDUÇÃO FIXA PARA EQUIPE SAMABAJA**. 2022. 60 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Instituto Federal do Espírito Santo, São Mateus, Espírito Santo, 2022.

NORTON, R. L. Projeto de Máquinas Uma abordagem integrada. 4a. ed. [S.l.]: BOOKMAN EDITORA LTDA, 2013.

SHIGLEY; BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. Elementos de Máquinas de Shigley. 8a. ed. [S.l.]: AMGH Editora Ltda, 2011.

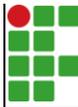
PAULINO, H. P. **Desenvolvimento de caixa de redução para veículo do tipo Baja SAE**. 2024. 50 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2024.

PEREIRA, M. S., Botão, K. F. S., Trindade, M. A. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO DE UM SISTEMA DE TRANSMISSÃO MECÂNICA POR ENGRENAGENS PARA UM PROTÓTIPO DE UM VEÍCULO OFF-ROAD BAJA SAE. **Anais do Creem 2014**, Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS (ABECM). *Ensaios Mecânicos e Análise de Falhas*. São Paulo, 2005.

NEALE, M. J. *Tribology Handbook*. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1995.

FANG, H. et al. "Surface Texturing in Tribology: A Review." *Coatings*, vol. 10, no. 3, 2020.

	INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
	Campus João Pessoa - Código INEP: 25096850
	Av. Primeiro de Maio, 720, Jaguaribe, CEP 58015-435, João Pessoa (PB)
	CNPJ: 10.783.898/0002-56 - Telefone: (83) 3612.1200

Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

Trabalho de conclusão de curso

Assunto:	Trabalho de conclusão de curso
Assinado por:	Loester Neto
Tipo do Documento:	Tese
Situação:	Finalizado
Nível de Acesso:	Ostensivo (Público)
Tipo do Conferência:	Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- Loester Pereira de Carvalho Neto, ALUNO (201921140037) DE BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA - CAMPUS JOÃO PESSOA, em 30/08/2025 09:55:35.

Este documento foi armazenado no SUAP em 01/09/2025. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 1592754

Código de Autenticação: 8edb28b18d

