

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA

MARLON AMARAL

DESENVOLVIMENTO DE PROJETO DO FLANGE DE ACOPLAMENTO DA COROA
APLICADO AO SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE UM VEÍCULO DE COMPETIÇÃO
FÓRMULA SAE

Joinville

2020

MARLON AMARAL

DESENVOLVIMENTO DE PROJETO DO FLANGE DE ACOPLAMENTO DA COROA
APLICADO AO SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE UM VEÍCULO DE COMPETIÇÃO
FÓRMULA SAE

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel no Curso de Graduação em Engenharia Automotiva do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dr. Modesto Hurtado Ferrer

Joinville

2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Amaral, Marlon

Desenvolvimento de projeto do flange de acoplamento da coroa aplicado ao sistema de transmissão de um veículo de competição Fórmula SAE / Marlon Amaral ; orientador, Modesto Hurtado Ferrer, 2020.

70 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville,
Graduação em Engenharia Automotiva, Joinville, 2020.

Inclui referências.

1. Engenharia Automotiva. 2. Desenvolvimento de produto. 3. Sistema de transmissão. 4. Flange de acoplamento da coroa. 5. Fórmula SAE. I. Ferrer, Modesto Hurtado . II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Automotiva. III. Título.

MARLON AMARAL

DESENVOLVIMENTO DE PROJETO DO FLANGE DE ACOPLAMENTO DA COROA
APLICADO AO SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE UM VEÍCULO DE COMPETIÇÃO
FÓRMULA SAE

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheiro Automotivo e aprovado em sua forma final pela Banca Examinadora e pelo programa de graduação.

Joinville, 15 de março de 2021.

Prof. Dr. Modesto Hurtado Ferrer
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Modesto Hurtado Ferrer
Orientador

Prof.(a) Dra. Elisete Santos da Silva Zagheni
Avaliadora

Engenheiro Rafael Kiemo Pfau Santos
Avaliador

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por me dar força e discernimento para eu possa alcançar meus objetivos.

Agradeço aos meus pais Eonir Avi Amaral e Amauri Amaral, por todo o apoio, incentivo, orações e infraestrutura que me proporcionaram para que eu pudesse estudar e ter uma profissão, muito obrigado, eu amo vocês. Agradeço a minha irmã Samara Amaral por me apoiar em todos os momentos e sempre torcer pelo meu melhor.

A agradeço a todos os meus familiares, em especial a minha madrinha Marilete e minha avó Maria que sempre reza para que eu nunca desista dos meus estudos.

A minha namorada Gisele Vavassori, pelo seu apoio incondicional para que eu pudesse concluir este trabalho e principalmente, seu amor.

Ao meu grande amigo Vinicius Mazetto Leandro, por todos os momentos que dividimos durante a graduação, centenas de horas estudando e pelo seu apoio na elaboração deste trabalho, gratidão. Também ao meu amigo Matheus Scarduelli Luiz, pela parceria formada desde o início da graduação e sua ajuda sempre que precisei, obrigado.

Ao Dr. Modesto Hurtado Ferrer, meu grande amigo, professor, mentor e orientador, obrigado pelos ensinamentos e conselhos dados em todos os momentos durante a graduação.

A equipe Fórmula CEM, onde tive o prazer de trabalhar por quatro anos, nela me apaixonei pela área de projetos, descobri o que é ser um engenheiro e pude me capacitar tecnicamente. Em especial aos meus companheiros de *Drivetrian*, Carlos, Luckyan, Zilli e Gabriel. Também aos líderes de equipe Alan, Pedro, Bruno, Kiemo, Negot, Rosso e Zeca, sempre me inspirei em vocês, obrigado a todos.

Agradeço a empresa SCHULZ Automotiva, pela parceria no fornecimento dos fundidos utilizados nesse trabalho e em especial ao Ronaldo Bandeira Rodrigues pela disposição em nos atender e suas contribuições para este trabalho, obrigado. A empresa TupyTec, pela realização do tratamento térmico do componente, obrigado. Ao instituto SENAI, pela parceria no fornecimento de usinagem, em especial ao Fernando Kasten por me atender sempre que precisei, obrigado.

A Universidade Federal de Santa Catarina, pela oportunidade de fazer parte de sua história e assim poder me tornar engenheiro. A todos os professores do curso de Engenharia Automotiva, meus maiores agradecimentos pelos ensinamentos e experiências compartilhadas. E também a todos os técnicos administrativos, pela atenção e respeito no atendimento aos alunos.

RESUMO

Visto a competitividade existente no mercado de veículos para competição automobilística, a equipe Fórmula CEM da Universidade Federal de Santa Catarina, buscou acompanhar o mercado e analisou algumas melhorias possíveis de aplicação no seu veículo de competição. O objetivo do trabalho é apresentar o desenvolvimento de projeto do flange de acoplamento da coroa, desde sua concepção ao seu dimensionamento, aplicado em veículos classe Fórmula SAE. A partir da necessidade de otimizar o sistema de transmissão do veículo através de melhorias no flange de acoplamento da coroa, foram aplicados métodos e ferramentas de engenharia que obtiveram os requisitos do cliente e do produto, sendo possível ao final do trabalho selecionar os principais princípios de solução para o projeto do produto. Para que isso fosse possível, foram realizados cálculos e simulações de carregamentos no elemento, estudo sobre aplicação de materiais, processos de fabricação e conhecimento das necessidades dos clientes. Por fim, a partir de tais métodos e análises validou-se o desenvolvimento do projeto do flange e sua utilização no sistema de transmissão do veículo.

Palavras-chave: Desenvolvimento de produto. Flange de acoplamento da coroa. Sistema de transmissão. Fórmula SAE.

ABSTRACT

In view of the existing competitiveness in the market for vehicles for automobile competition, the Formula CEM team at the Federal University of Santa Catarina, searching to accompany the market and analyzed some possible improvements of application in its competition vehicle. The objective of the work is to present the development project of the sprocket coupling flange, from its conception to its dimensioning, applied in Formula SAE student vehicles. Based on the need to optimize the vehicle's drivetrain system through improvements in the sprocket coupling flange, engineering methods and tools were applied to reach the requirements of the customer and the product, making it possible at the end of the study to select the main principles of solution for product design. In order to make this possible, calculations and simulations of loadings on the element, a study on the application of materials, manufacturing processes and knowledge of customer needs were carried out. Finally, based on such methods and analyzes, the development of the flange design and its use in the vehicle's drivetrain system was validated.

Keywords: Product development. Sprocket coupling flange. Drivetrain system. Formula SAE.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Concepção com motor central e tração traseira.	17
Figura 2 - Sistema de transmissão de uma motocicleta.	18
Figura 3 - Componentes do sistema de transmissão.	20
Figura 4 - Flange de acoplamento da coroa modelo 2015.	21
Figura 5 - Fluxograma para análise de falha estática.	23
Figura 6 - Teoria de Mohr modificada.	24
Figura 7 - Modelo PRODIP.	26
Figura 8 - Matriz Casa da Qualidade.	28
Figura 9 - Diagrama de Mudge.	31
Figura 10 - Matriz morfológica.	33
Figura 11 - Forma construtiva de uma matriz de Pugh.	34
Figura 12 - Sistema <i>Drivetrain</i> Equipe V8 Racing Facens.	36
Figura 13 - Tulipa.	37
Figura 14 - Diagrama de Mudge aplicado ao projeto.	45
Figura 15 - Matriz Casa da Qualidade aplicada ao projeto do flange.	48
Figura 16 - Geometria CAD do flange de acoplamento da coroa.	53
Figura 17 - Geometria CAD do flange para simulação.	55
Figura 18 - Gráfico de convergência de malha da simulação.	57
Figura 19 - Malha final do modelo numérico.	58
Figura 20 - Distribuição de tensão na geometria.	59
Figura 21 - Regiões de concentração de tensão no componente.	59
Figura 22 - Desenho técnico mecânico do flange.	60
Figura 23 - Matéria prima fundida do flange.	61
Figura 24 - Curva de tratamento térmico do flange.	62
Figura 25 - Geometria final do flange produzido.	63
Figura 26 - Avaliação de concentricidade do componente.	64
Figura 27 - Superfície do flange após a aplicação do revelador.	65

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Notas para avaliação dos concorrentes.....	29
Quadro 2 - Intensidade de relacionamento dos requisitos.....	30
Quadro 3 - Métodos de obtenção do conceito do produto.....	32
Quadro 4 - Etapas do desenvolvimento de projeto do flange.....	41
Quadro 5 - Requisitos dos clientes.....	43
Quadro 6 - Requisitos do produto.....	46
Quadro 7 - Função global e subfunções do flange de acoplamento da coroa.....	49
Quadro 8 - Matriz morfológica aplicada ao projeto do flange.....	50
Quadro 9 - Concepções alternativas de solução do projeto do flange.....	50
Quadro 10 - Análise comparativa entre os flanges modelo 2015 e 2016.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Hierarquia dos requisitos dos clientes.....	45
Tabela 2 - Importância dos requisitos do produto.....	48
Tabela 3 - Matriz de Pugh para determinação do conceito do flange.....	51
Tabela 4 - Propriedades mecânicas dos materiais analisados.....	54
Tabela 5 - Matriz de Pugh para seleção do material do flange.....	54
Tabela 6 - Parâmetros para o cálculo do carregamento.....	56
Tabela 7 - Malhas avaliadas para o modelo numérico.....	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS - Acrilonitrila butadieno estireno

ADI - *Austempered Ductile Iron*

CAD - *Computer-Aided Design*

CAE - *Computer-Aided Engineering*

LSD - *Limited Slip Differential*

MEF - Método de Elementos Finitos

NeDIP - Núcleo de Desenvolvimento Integrado de Produto

PRODIP - Processo de Desenvolvimento Integrado de Produto

QFD - *Quality Function Deployment*

SAE - *Society of Automotive Engineers*

LISTA DE SÍMBOLOS

i_f	Relação final
i_j	Relação de transmissão
i_p	Relação primária
N	Coefficiente de segurança
S_{uc}	Resistência máxima a compressão
S_{ut}	Resistência máxima a tração
T_c	Torque na coroa
T_m	Torque do motor
η	Eficiência mecânica global
σ_1	Tensão principal 1
σ_2	Tensão principal 2
σ_3	Tensão principal 3
σ_x	Tensão normal em x
σ_y	Tensão normal em y
τ_{xy}	Tensão de cisalhamento

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 OBJETIVOS	15
1.1.1 Objetivo Geral	15
1.1.2 Objetivos específicos	15
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1 SISTEMA DE TRANSMISSÃO	16
2.1.1 Concepção do trem de potência	17
2.1.2 Componentes do sistema de transmissão	17
2.2 FLANGE DE ACOPLAMENTO DA COROA	21
2.2.1 Tensões atuantes	22
2.2.2 Tensões principais	22
2.2.3 Critérios de falha	23
2.2.4 Teoria de Mohr modificada	24
2.3 DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO	25
2.3.1 Processo de Desenvolvimento Integrado de Produto - PRODIP	26
2.4 PROJETO INFORMACIONAL	27
2.4.1 Matriz Casa da Qualidade	28
2.4.1.1 <i>Diagrama de Mudge</i>	30
2.5 PROJETO CONCEITUAL	31
2.5.1 Método da Matriz Morfológica	32
2.5.1.1 <i>Avaliação e seleção da concepção</i>	33
2.6 PROJETO PRELIMINAR.....	35
2.6.1 Seleção de materiais	35
2.6.2 Materiais e processos de fabricação	35
2.6.2.1 <i>Alumínio</i>	36
2.6.2.2 <i>Aço e suas ligas</i>	37
2.6.2.3 <i>Aço fundido</i>	38
2.6.2.4 <i>Ferro fundido nodular austemperado - ADI</i>	38
2.6.3 Método de elementos finitos	39
2.7 PROJETO DETALHADO	39
3 METODOLOGIA	41
4 ESTUDO DE CASO	42

4.1 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO INFORMACIONAL	42
4.1.1 Requisitos dos clientes	42
4.1.2 Aplicação do diagrama de Mugde.....	44
4.1.3 Requisitos do produto	46
4.1.4 Aplicação da casa da qualidade.....	47
4.2 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO CONCEITUAL	49
4.3 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO PRELIMINAR	52
4.3.1 Geometria, dimensões e posição	52
4.3.2 Seleção do material.....	53
4.3.3 Simulação numérica por MEF	55
4.3.3.1 <i>Resultados da simulação</i>	58
4.4 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO DETALHADO	60
4.4.1 Roteiro de fabricação	60
4.5 VERIFICAÇÃO DO ELEMENTO EM USO	63
5 CONCLUSÃO.....	66
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	68
REFERÊNCIAS	69

1 INTRODUÇÃO

Competitividade é a palavra-chave no mercado de veículos de competições automobilísticas. E para ser competitivo no mercado atual, é necessário que engenheiros e equipes de competições busquem por melhorias que atendam aos requisitos de desempenho, durabilidade e segurança, tudo isso garantindo também uma minimização no tempo e custos de processos.

Diante deste cenário, foi abordado este tema na equipe de competição Fórmula CEM da Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville, onde notou-se uma necessidade em melhorar alguns critérios do projeto do flange de acoplamento da coroa do sistema de transmissão do veículo de competição da equipe, visto que tais melhorias garantem a otimização do funcionamento do sistema.

Desse modo, o principal objetivo do trabalho é o desenvolvimento de projeto do flange de acoplamento da coroa, aplicado ao sistema de transmissão de um veículo de competição Fórmula SAE.

Este trabalho utiliza-se dos conceitos do Processo de Desenvolvimento Integrado de Produto (PRODIP) para a realização de sua metodologia. A escolha do PRODIP aconteceu por ser uma metodologia de trabalho que apresenta uma comunicação clara entre os envolvidos, possibilitando sua realização na prática com a equipe Fórmula CEM. Por meio de PRODIP, foram aplicadas no decorrer do trabalho algumas ferramentas de engenharia, destacando-se a casa da qualidade, a matriz morfológica, o software ANSYS e SolidWorks.

A casa da qualidade é a ferramenta utilizada para gerar os requisitos de projeto do produto, já a matriz morfológica auxilia na seleção de concepções alternativas de soluções para o projeto do produto. Ou seja, ambas foram fundamentais para que se pudesse atingir o objetivo do projeto. Já as ferramentas de simulação de análises numéricas e modelagem geométrica do componente, respectivamente, ANSYS e SolidWorks, foram necessárias para agilizar e garantir os resultados do projeto.

Após levantamento e detalhamento das características do sistema de transmissão e apresentação da metodologia para o desenvolvimento do flange de acoplamento da coroa, apresenta-se, então, alguns resultados fundamentais para a conclusão e aprovação do projeto.

1.1 OBJETIVOS

Nas próximas subseções estão expostos o objetivo geral e objetivos específicos deste trabalho.

1.1.1 Objetivo Geral

O principal objetivo do trabalho é o desenvolvimento de projeto do flange de acoplamento da coroa aplicado ao sistema de transmissão de um veículo de competição Fórmula SAE.

O trabalho é centrado na busca de soluções inovadoras da concepção ao dimensionamento de componentes veiculares, que tornam o projeto da equipe mais competitivo no âmbito das competições nacionais e internacionais em que participa.

1.1.2 Objetivos específicos

- Empregar a metodologia de Processo de Desenvolvimento Integrado de Produto, visando a concepção, o desenvolvimento e a otimização deste componente;
- Dimensionar estaticamente o componente usando análise de elementos finitos;
- Selecionar o material do flange, levando em consideração que a utilização de materiais avançados na indústria automotiva vem permitindo o compromisso resistência e massa, almejado no projeto, para possibilitar a redução de massa e com isto a melhoria da eficiência do veículo, sem comprometer sua segurança;
- Propor estratégias a serem adotadas para viabilizar a manufatura deste componente;
- Investigar a integridade do componente em uso.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Com a missão de disseminar a tecnologia e o progresso da mobilidade, foi fundada no Brasil em 1991, a Associação de Engenheiros da Mobilidade do Brasil – SAE BRASIL, onde por meio de eventos como a competição nacional de Fórmula SAE possibilita que estudantes de engenharia apliquem na prática os conhecimentos adquiridos em sala, desenvolvendo o projeto completo e construindo um veículo tipo Fórmula. (SAE BRASIL, 2019).

Nas competições de Fórmula SAE, os carros são avaliados pela concepção técnica e viabilidade comercial, além de seu desempenho e resistência. Com base nisso, as equipes de competição de Fórmula SAE têm buscado cada vez mais por soluções inovadoras para os elementos do sistema de transmissão, visto que com a otimização desse sistema há um melhor desempenho dos veículos durante as provas realizadas nas competições.

Desse modo, nesta seção são apresentadas as características do sistema de transmissão de um veículo de competição de Fórmula SAE, tendo destaque para um dos seus componentes: o flange de acoplamento da coroa. A partir disto, apresentar-se-á sobre os fundamentos do processo de desenvolvimento do produto, ou seja, métodos e modelos para buscar obter a melhor concepção do produto.

2.1 SISTEMA DE TRANSMISSÃO

De acordo com Bosch (2005), para que o sistema de transmissão seja funcional, seus elementos devem cumprir as seguintes funções:

- Parar o veículo mesmo com o motor em funcionamento;
- Efetuar procedimento de arranque;
- Converter torque e rotação;
- Proporcionar movimento para frente e para trás;
- Permitir rotações diferentes nas rodas motrizes em curvas;
- Possibilitar o motor operar em faixas ideais de consumo e emissões.

Basicamente, define-se que em veículos automotores o sistema de transmissão tem a função de transferir a energia mecânica transformada na unidade de propulsão para as rodas motrizes na forma de força de tração, o que gera conseqüentemente o movimento do veículo (BOSCH, 2005).

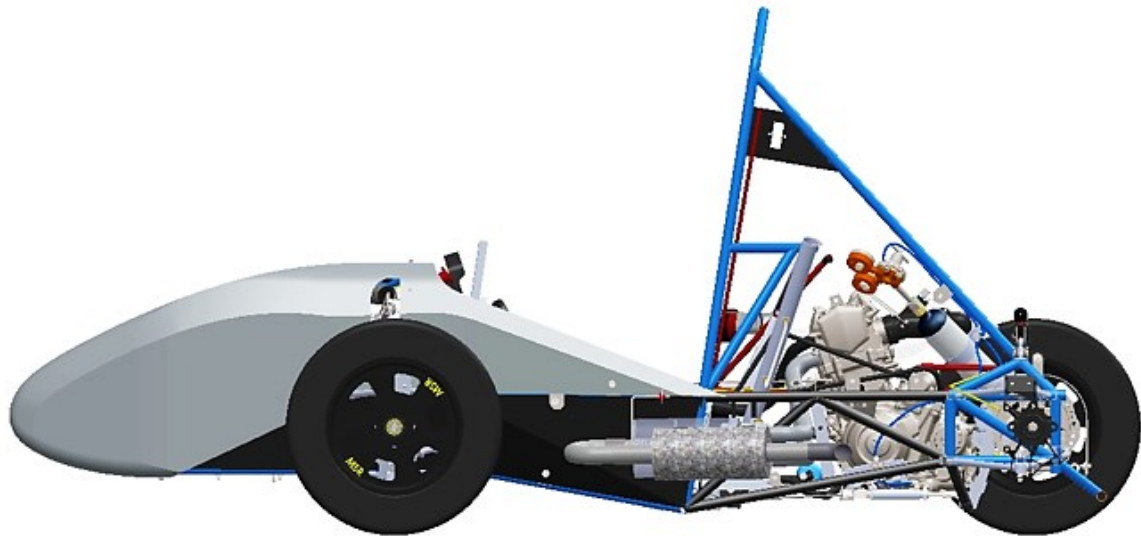
2.1.1 Concepção do trem de potência

O *layout* do sistema de transmissão influencia a dinâmica do veículo, espaço interno, estrutura do chassi, transferência de carga, condução e segurança. A escolha da posição do trem de força depende do setor de mercado onde o automóvel será inserido, da posição do motor e do tipo de tração desejada (CROLLA, 2009).

O regulamento da competição nacional de Fórmula SAE permite qualquer tipo de transmissão, dando liberdade de criação para equipes competidoras. Na categoria combustão, motores com até 710 cilindradas são permitidos e devido à complexidade do projeto de um motor as equipes participantes utilizam motores de motocicletas comerciais.

Na Figura 1 a seguir é possível visualizar uma típica concepção de *powertrain* de um veículo Fórmula SAE, o *layout* de motor central e tração traseira acionado por corrente.

Figura 1 - Concepção com motor central e tração traseira.



Fonte: O Autor (2020).

Este tipo de concepção é utilizado em veículos esportivos. Nesse, o motor é posicionado a frente do eixo traseiro de tração favorecendo a distribuição do peso.

2.1.2 Componentes do sistema de transmissão

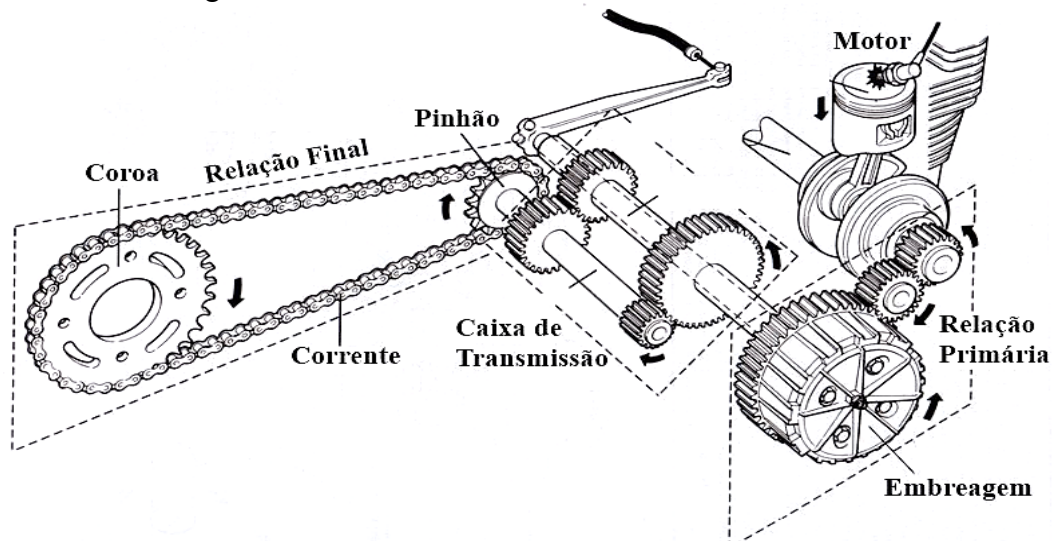
Em veículos de competição de Fórmula SAE o sistema de transmissão é composto, geralmente por: embreagem, caixa de transmissão, relação final composta por pinhão, coroa e corrente de rolos, flange de acoplamento da coroa, diferencial, suporte do diferencial,

tulipas, semieixos, homocinéticas, cubos de rodas, rodas e pneus. A seguir, é detalhada a função dos componentes do sistema de transmissão.

A embreagem permite o arranque do veículo transmitindo o torque do motor para a caixa de transmissão, em trocas de marcha e paradas do veículo possibilita a interrupção do torque isolando a caixa de transmissão do motor, também proporciona um acoplamento suave do disco de embreagem com volante do motor e reduz a vibração torcional do motor a combustão para a transmissão do veículo (BOSCH, 2005).

“A caixa de transmissão modifica o torque e rotação do motor adequando-os à necessidade de tração do veículo no momento requerido” (BOSCH, 2005, p.738). Na caixa de transmissão manual o piloto por meio da alavanca de câmbio faz a seleção e o engate das marchas, cada marcha corresponde a um par de engrenagens que formam a relação de transmissão. Na Figura 2 a seguir está ilustrado o sistema de transmissão de uma motocicleta.

Figura 2 - Sistema de transmissão de uma motocicleta.



Fonte: Claffey (2018).

O sistema de transmissão da maioria das motocicletas é constituído da caixa de transmissão integrada ao motor. O torque produzido pelo motor é multiplicado por três reduções, sendo elas, a relação primária (i_p) que corresponde ao conjunto de engrenagens

entre o motor e a embreagem, a relação de transmissão (i_j) que varia de acordo com a marcha selecionada e a relação final (i_f), até estar disponível na linha de tração do veículo.

Os elementos que compõem a transmissão final de um automóvel são dependentes da posição do motor em relação à direção de deslocamento, posição do motor em relação a transmissão e da alocação dos elementos da transmissão (NAUNHEIMER et al., 2011).

Nos veículos de Fórmula SAE, geralmente são utilizados transmissão final por corrente de rolos simples, aproveitando o conceito das motocicletas conectando a saída da caixa de transmissão ao diferencial, este conceito está apresentado na Figura 2. De acordo com Birrento (2008), este tipo de sistema é utilizado quando há uma distância relativamente grande entre o pinhão e a coroa, elimina o uso de outro tipo de sistema de transmissão, simplificando o conjunto e reduzindo custos.

O torque na coroa, transmitido pela corrente de rolos, pode ser estimado pela equação a seguir:

$$T_c = T_m * i_p * i_j * i_f * \eta \quad (1)$$

Onde, T_m é o torque do motor e η é a eficiência mecânica global que considera o rendimento de todos os elementos do sistema de transmissão até a coroa. A equação 1 será utilizada posteriormente para obter o torque máximo aplicado no flange da coroa.

Quando o veículo está se deslocando em linha reta, as velocidades angulares das rodas de tração são iguais, porém, ao fazer uma curva a roda externa percorre uma distância maior que a roda interna, para que não ocorra escorregamento das rodas é necessário o uso de um diferencial.

Segundo Birrento (2008), as funções do diferencial são: permitir que as rodas girem com velocidades diferentes, transmitir potência e efetuar uma redução de velocidades entre a caixa de transmissão e as rodas. Os três principais tipos de diferenciais são: os abertos utilizados na maioria dos automóveis de passageiro, os diferenciais autoblocantes aplicados em veículos de competição, e o diferencial blocante que conecta os dois eixos juntos para eliminar a ação diferencial.

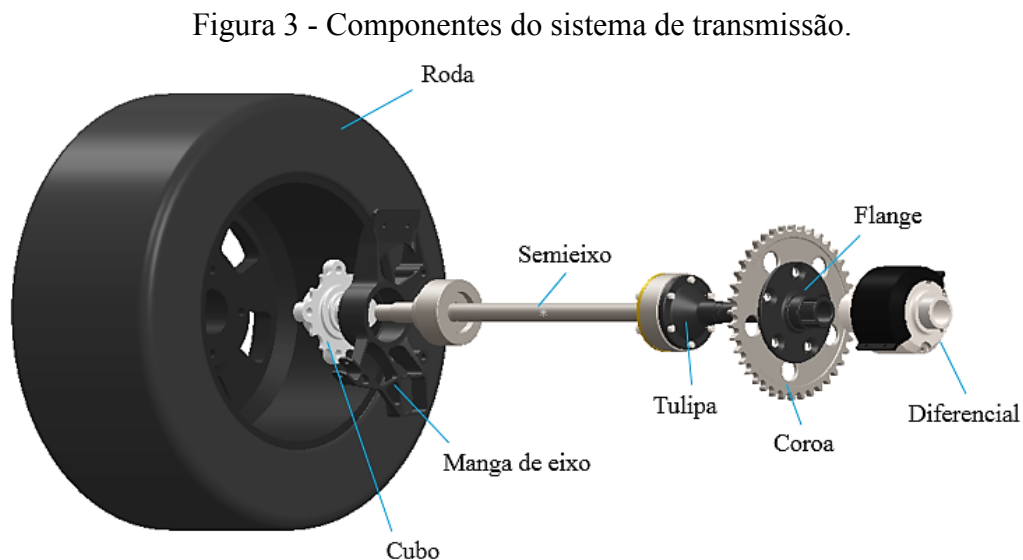
A relação de redução do diferencial acontece entre o pinhão e a coroa, os diferenciais abertos tem a característica de transmitir toda a potência do motor para a roda com baixa aderência, fazendo com que o veículo perca tração. A solução para esse problema foi o desenvolvimento dos diferenciais autoblocantes.

O uso de diferenciais autoblocantes nas competições de Fórmula SAE é corriqueiro, entre eles destacam os diferenciais de deslizamento limitado (LSD – *Limited Slip Differential*) e o Torsen (Sensível ao Torque), o segundo é o modelo utilizado pela equipe Fórmula CEM em seu veículo a combustão.

O diferencial Torsen possui um sistema completamente mecânico, onde as engrenagens planetárias e satélites cônicas são substituídas por engrenagens sem fim e rodas sem fim respectivamente.

Eixos de transmissão são responsáveis por transferir torque entre componentes que possuem eixos de rotação desalinhados. No intuito de garantir o curso da suspensão independente do veículo e em veículos com tração dianteira permitir o esterçamento das rodas, é utilizado o eixo de transmissão do tipo semieixo (GENTA; MORELLO, 2009).

Os semieixos possuem juntas de velocidade constante em cada extremidade, a junta externa (lado da roda) é a homocinética fixa, articulação que não muda de comprimento, a junta interna (lado da transmissão) é a junta deslizante ou trizeta, permite que o comprimento do semieixo seja alterado conforme o curso da suspensão (BIRCH; ROCKWOOD, 2008). A Figura 3 a seguir apresenta o semieixo em sua posição de trabalho junto com os outros componentes do sistema de transmissão.



Fonte: O Autor (2020).

O semieixo é o elemento que faz a ligação entre a tulipa acoplada na engrenagem sem fim do diferencial e o cubo de roda, permitindo que o torque do motor que percorreu todo o sistema de transmissão chegue até as rodas motrizes e se transforme em força de tração no contato entre o pneu e pavimento.

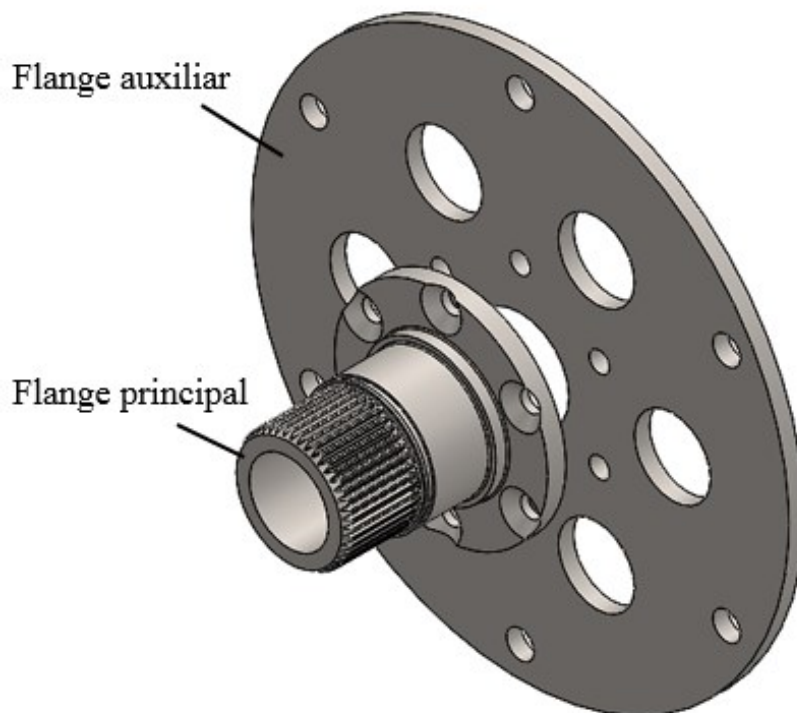
2.2 FLANGE DE ACOPLAMENTO DA COROA

Um acoplamento é um conjunto mecânico composto de elementos de máquinas utilizado para transmitir torque entre eixos ou dispositivos. Os acoplamentos rígidos não permitem desalinhamento entre as peças conectadas, já os acoplamentos complacentes podem absorver algum tipo de desalinhamento. (NORTON, 2013)

O flange da coroa é um acoplamento rígido que conecta a coroa ao diferencial, este componente é fundamental para que o fluxo de torque chegue ao diferencial e seja distribuído para as rodas motrizes. O mesmo deve ser resistente o suficiente para suportar os esforços impostos pelo sistema, leve para garantir o requisito de redução de massa do veículo, possuir fácil manufatura e manutenção, proporcionar elevada segurança e durabilidade, ser barato e ambientalmente amigável.

Na Figura 4 a seguir é apresentado um exemplo de flange de acoplamento da coroa.

Figura 4 - Flange de acoplamento da coroa modelo 2015.



Fonte: O Autor (2020).

Este conceito de flange foi utilizado pela equipe Fórmula CEM no ano de 2015, o mesmo é composto por dois flanges, sendo eles o flange principal que conecta o diferencial em um flange auxiliar acoplado a coroa da transmissão. Ambos possuem um furo passante, o qual serve para que o eixo da tulipa possa ser acoplado ao diferencial, o flange principal

também desempenha o papel de eixo para o rolamento do suporte do sistema, o qual é travado por um anel elástico de fixação.

2.2.1 Tensões atuantes

Quando em serviço, o flange de acoplamento da coroa sofre esforço de torção advindo do torque alternado do motor. Esse esforço externo gera uma tensão de cisalhamento no elemento e corresponde a maior solicitação do componente. O flange também está sujeito a flexão devido suportar o peso da coroa, fixadores, parte da corrente e servir de apoio para os rolamentos da tulipa e suporte do diferencial, acarretando em tensões normais na estrutura.

De acordo com Norton (2013), falhas no elemento ocorrem quando a tensão em algum ponto excede um valor de segurança, sendo necessário encontrar as maiores tensões que ocorrem em qualquer lugar do contínuo do material selecionado para o componente. Estas tensões são analisadas criteriosamente, comparadas com limite de resistência do material e aplicadas no cálculo de fator de segurança, assegurando a integridade estrutural do componente.

2.2.2 Tensões principais

Como mencionado na subseção anterior, muitas vezes estamos interessados em saber quais são a maior e menor tensão normal que atuam na geometria do objeto de estudo. A esse conjunto de valores chamamos de tensões principais.

As tensões principais são resultado da combinação das tensões internas no componente induzidas pelo carregamento externo. Segundo Norton (2013), para um caso bidimensional, as mesmas podem ser obtidas pela equação a seguir.

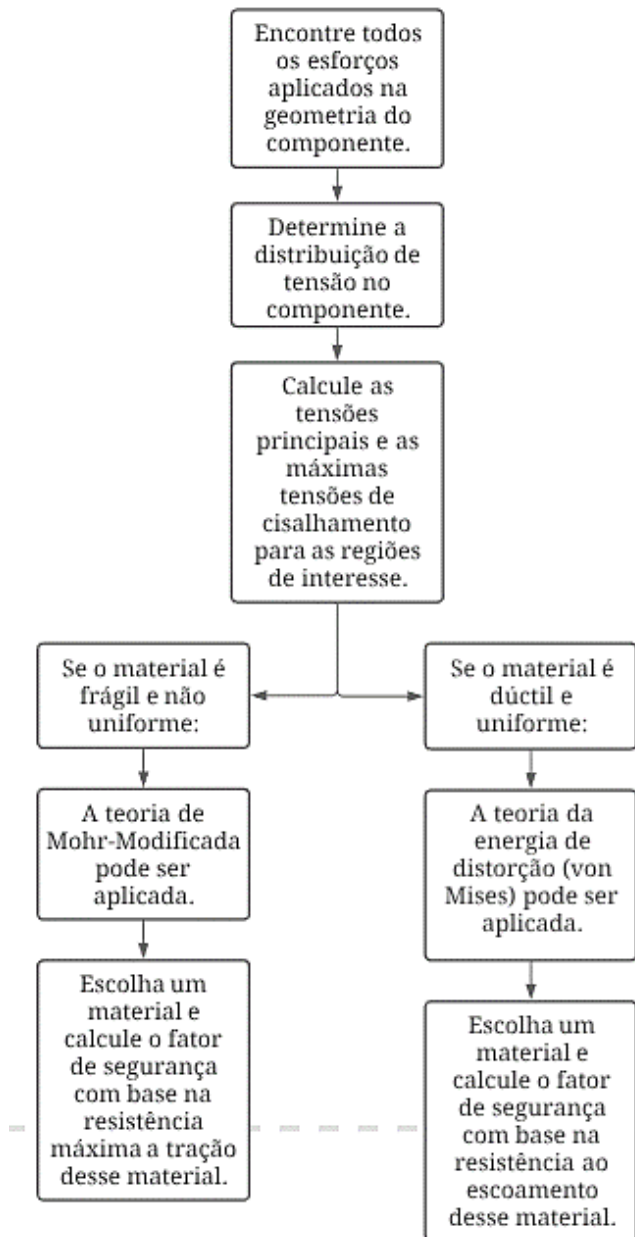
$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (2)$$

Onde σ_x e σ_y são as tensões normais e τ_{xy} é a tensão de cisalhamento.

2.2.3 Critérios de falha

Segundo Norton (2013), materiais dúcteis e frágeis possuem mecanismos de falha diferentes quando carregados estaticamente. Desta maneira, se faz necessário ter diferentes critérios de falha para cada uma dessas classes de material. O fluxograma da Figura 5 a seguir auxilia na seleção do critério de falha estática.

Figura 5 - Fluxograma para análise de falha estática.



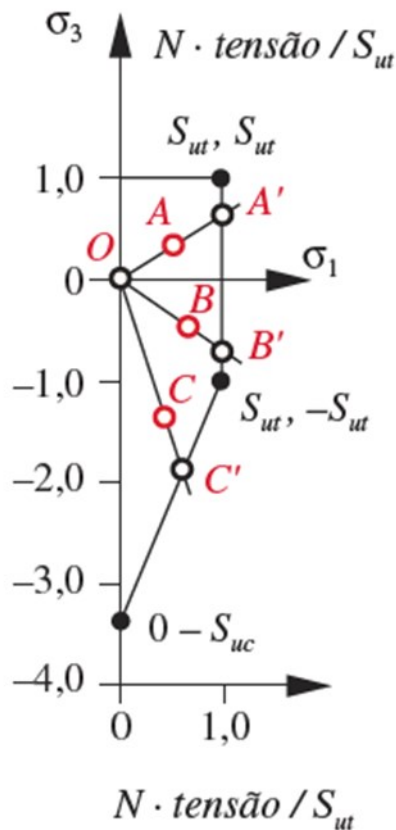
Fonte: Adaptado de Norton (2013).

2.2.4 Teoria de Mohr modificada

A falha de um componente pode ser prevista a partir da aplicação de um critério de falha adequado a característica do material selecionado para a fabricação do mesmo. De acordo com Norton (2013), para materiais frágeis, os quais apresentam níveis de deformação específica até a ruptura menores do que 5% e não uniformes, aqueles em que sua resistência a tração é muito menor do que sua resistência a compressão, a teoria de Mohr modificada é indicada.

A teoria foi estabelecida de forma a ajustar melhor os dados de falha observados em testes reais. Para o caso em duas dimensões, se as tensões principais estiverem ordenadas na forma $\sigma_1 > \sigma_3$ e $\sigma_2 = 0$, somente o primeiro e quarto quadrantes precisam ser analisados, como mostra a Figura 6 a seguir (NORTON, 2013).

Figura 6 - Teoria de Mohr modificada.



Fonte: Norton (2013).

Segundo Norton (2013), se as duas tensões principais não nulas são positivas, como exemplo o ponto A na Figura 6, o coeficiente de segurança pode ser expresso pela seguinte equação:

$$N = \frac{S_{ut}}{\sigma_1} \quad (3)$$

Para o caso onde as tensões principais não nulas tem sinais opostos e o ponto estabelecido por elas encontra-se acima do ponto $(S_{ut}, -S_{ut})$, da mesma forma que o ponto B da Figura 6, o coeficiente de segurança é obtido pela mesma expressão do caso anterior.

E se o estado de tensão retorna um ponto na região do gráfico abaixo do ponto de coordenadas $(S_{ut}, -S_{ut})$, como o ponto C na Figura 6, o fator de segurança é obtido pela equação 4 a seguir.

$$N = \frac{S_{ut}|S_{uc}|}{|S_{uc}|\sigma_1 - S_{ut}(\sigma_1 - \sigma_3)} \quad (4)$$

Um fator de segurança maior do que 1 indica que a peça não falha para o carregamento aplicado, ou seja, os pontos A', B' e C' não são extrapolados.

2.3 DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO

Neste capítulo serão abordadas as ferramentas de engenharia que proporcionam a concepção, o desenvolvimento e a otimização do flange de acoplamento da coroa.

“Projetar é formular um plano para atender uma necessidade específica ou resolver um problema.” (BUDYNAS; NISBETT, 2016, p.4). É do cotidiano do engenheiro de desenvolvimento de produtos, criar, alterar e otimizar produtos para atender aos requisitos de projeto. Segundo Budynas e Nisbett (2016), um produto deve ser funcional, seguro, confiável, competitivo e próprio para ser usado, fabricado e comercializado.

Nas etapas iniciais de um projeto de produto é onde se tomam decisões importantes a respeito do componente, como a geometria, a seleção do material e o processo de fabricação. É necessário ter cuidado nas tomadas de decisões com o objetivo de reduzir os custos do produto tornando o projeto competitivo. De acordo com Rozenfeld et al. (2006),

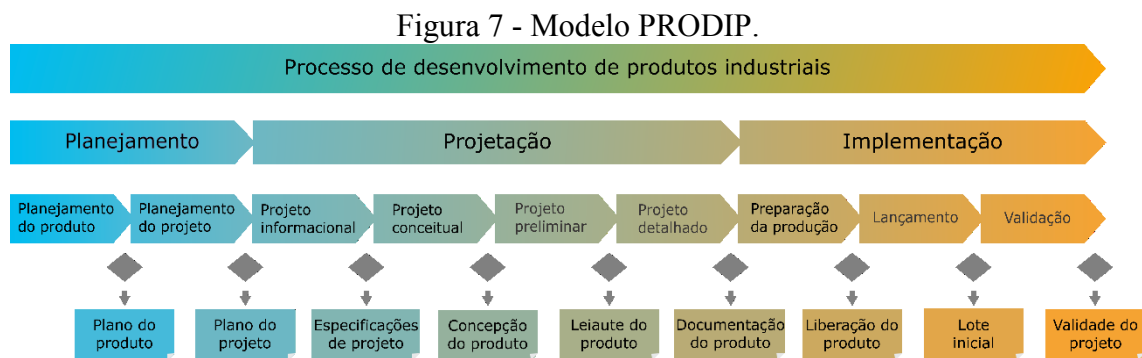
85% do custo final do produto é função das escolhas tomadas no início do ciclo de desenvolvimento do produto.

Desenvolver um componente sem um caminho para ter como base pode deixar lacunas abertas no processo de desenvolvimento de produtos. Diversos modelos e metodologias de projeto de produto foram e vêm sendo desenvolvidas para servirem de referência a engenheiros, projetistas, equipes de desenvolvimento e indústrias. Segundo Rozenfeld et al. (2006), o sucesso de muitas empresas no desenvolvimento de produtos está relacionado a modelo de desenvolvimento de produto e nas práticas de gestão utilizadas.

Na sequência é apresentado o Processo de Desenvolvimento Integrado de Produto (PRODIP). Este é um modelo de desenvolvimento de produto completo, pois compreende as etapas de planejamento, desenvolvimento e implementação do produto (ROMANO, 2003).

2.3.1 Processo de Desenvolvimento Integrado de Produto - PRODIP

O modelo PRODIP foi criado com base em pesquisas e práticas desenvolvidas pelo Núcleo de Desenvolvimento Integrado de Produtos (NeDIP) da Universidade Federal de Santa Catarina. Esse modelo permite uma visão completa do processo de desenvolvimento de produto, busca tornar mais formal e sistemático o desenvolvimento de produtos para os profissionais que fazem uso do modelo (BACK et al., 2008). Na Figura 7 está representado o modelo PRODIP atual.



Fonte: Adaptado de Back et al., (2008).

O processo de desenvolvimento integrado do produto é dividido em três grandes macrofases denominadas planejamento, projetação e implementação, divididas em fases, o resultado de cada fase do projeto é oriundo da realização de tarefas por parte dos envolvidos em cada etapa do projeto. No decorrer deste trabalho é destacado a utilização de algumas dessas etapas no projeto do flange de acoplamento da coroa.

Conforme descrito por Romeiro Filho et al. (2010), na primeira macrofase, que corresponde ao planejamento, a empresa determina os componentes que serão desenvolvidos, os projetos que não serão continuados, o mercado de atuação e o lançamento do produto.

De acordo com Romano (2003), a segunda macrofase denominada projeção é a etapa de elaboração do projeto do produto e do processo de manufatura. A projeção é decomposta nas fases de projeto informacional, conceitual, preliminar e detalhado, que serão apresentados nas próximas seções e representam o maior foco deste trabalho.

A terceira e última macrofase do modelo PRODIP se refere a implementação do projeto do produto. Decomposta em três fases, sendo elas, a fase de preparação da produção que visa a mobilização de recursos para fabricação do produto, a fase de lançamento do produto no mercado e a fase de validação do produto junto aos usuários onde se monitora a desempenho do produto em operação (BACK et al., 2008).

2.4 PROJETO INFORMACIONAL

“A fase de projeto informacional destina-se à definição das especificações de projeto do produto” (BACK et al., 2008, p.75). Estas especificações são os objetivos que o produto a ser desenvolvido deve atender.

O projeto informacional se inicia com a pesquisa de informações sobre o tema de projeto, segue com a identificação das necessidades dos clientes que correspondem a todos os envolvidos no ciclo de vida do produto, a partir das necessidades dos clientes são estabelecidos os requisitos dos clientes, com base neles são definidos os requisitos do produto, os quais são hierarquizados para permitir a identificação dos requisitos que melhor satisfazem os clientes e a fase se encerra com a definição das especificações de projeto que irão orientar o desenvolvimento técnico do produto (ROMANO, 2003).

Uma técnica que auxilia a geração das especificações de projeto do produto é a aplicação da matriz casa da qualidade do método Desdobramento da Função Qualidade (QFD) (ROZENFELD et al, 2006). De acordo com Back et al. (2008), essa ferramenta abrange a maior parte das etapas do projeto informacional e tem recebido grande atenção de pesquisadores e profissionais da indústria.

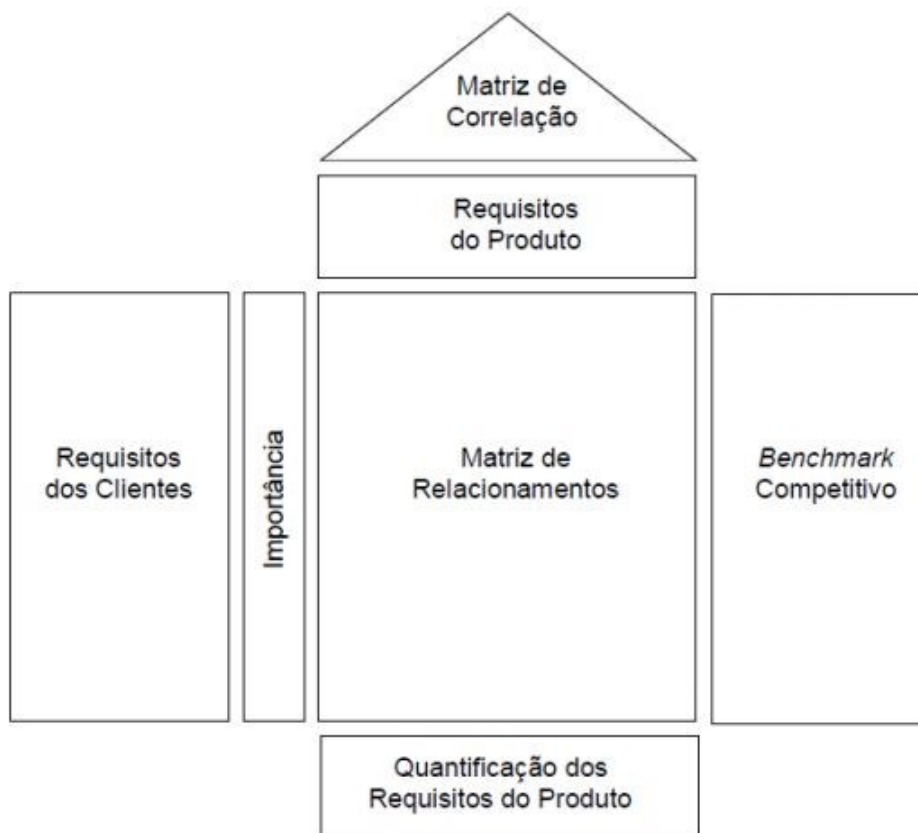
A construção da matriz casa da qualidade é útil em todos os tipos de problemas de projeto, garante que o problema seja bem entendido e resulta em um conjunto claro de requisitos de clientes e parâmetros de engenharia associados. A técnica auxilia na redução do

tempo de projeto e estimula um pensamento profundo sobre o problema onde a partir dele estabelecem as bases para geração de conceitos. (ULLMAN, 2010)

2.4.1 Matriz Casa da Qualidade

A matriz casa da qualidade é a primeira matriz do método QFD e sua estrutura é apresentada na Figura 8.

Figura 8 - Matriz Casa da Qualidade.



Fonte: Rosenfeld et al. (2006).

O primeiro passo para iniciar a elaboração da casa da qualidade é identificar quem são os clientes e o que eles desejam que o produto faça. As necessidades dos clientes são preenchidas no primeiro campo da matriz na forma de requisitos dos clientes. Existem diferentes maneiras de identificar as necessidades dos clientes algumas delas são por meio de questionários estruturados, pesquisas em bases de dados, observações diretas, entrevistas, grupos focos ou usando qualquer outro método de interagir com os clientes. (ROZENFELD et al., 2006)

Identificado o desejo dos clientes é necessário saber qual o nível de importância de cada requisito para se ter uma ideia de quanto esforço investir para atingir tal requisito. O peso de cada requisito é inserido no segundo campo da matriz.

Segundo Ullman (2010), uma maneira de obter a importância dos requisitos é aplicando o método da Soma Fixa, onde o cliente recebe 100 pontos e precisa distribuí-los entre todos os requisitos. Rosenfeld et al. (2006), afirma que um método mais sistemático e que depende menos a opinião pessoal do cliente ou equipe de projeto é o Diagrama de Mudge, o qual determina a importância a partir da comparação dos requisitos aos pares.

O próximo passo da construção da casa da qualidade é identificar como o problema é resolvido pelos concorrentes ou produtos similares da própria empresa e avaliar com o que os clientes desejam.

Essa etapa corresponde ao terceiro campo da matriz e permite identificar possíveis melhorias no produto (ROZENFELD et al., 2006). Como forma de avaliação de como os produtos existentes satisfazem cada requisito dos clientes são aplicadas notas em uma escala de 1 a 5 cuja descrição é apresentada no Quadro 1 a seguir.

Quadro 1 - Notas para avaliação dos concorrentes.

Nota	Descrição
1	Não atende o requisito
2	Atende fracamente o requisito
3	Atende um pouco o requisito
4	Atende em sua maior parte o requisito
5	Atende completamente o requisito

Fonte: Ullman (2010).

O quarto campo da matriz é destinado aos requisitos do produto, os quais são parâmetros mensuráveis determinados pela equipe de projeto a partir de seções de *brainstorming*, elaboração de checklist ou informações de projetos anteriores, para atender os requisitos dos clientes (ROZENFELD et al., 2006).

O centro da casa da qualidade estabelece a correlação entre os requisitos do produto e os requisitos dos clientes dado pela matriz de relacionamento. A intensidade dessa relação varia de acordo com a combinação dos requisitos em cada célula da matriz sendo apresentada na forma de símbolos ou números de acordo com o Quadro 2 a seguir.

Quadro 2 - Intensidade de relacionamento dos requisitos.

Símbolo	Número	Descrição
⊖	9	Relacionamento forte
○	3	Relacionamento médio
▲	1	Relacionamento fraco
Em Branco	0	Nenhum relacionamento

Fonte: Ullman (2010).

O porão da casa da qualidade corresponde a quantificação dos requisitos do produto, nele são estabelecidas as especificações de projeto do produto. De acordo com Ullman (2010), as mesmas servem como uma visão de produto ideal e são usadas como critérios para decisões de projeto.

O telhado da casa da qualidade é formado pela interação entre os requisitos do produto. Permite identificar a dependência entre eles no início do projeto e garantir que a equipe de projeto obtenha consciência de que ao atender um requisito pode ter um efeito negativo ou positivo em outro.

Uma forma de mostrar que dois requisitos de produto dependem, é usar um (+) para denotar que uma melhora no atendimento de um requisito melhorará o outro e usar (-) quando desejar mostrar que ao beneficiar um requisito pode prejudicar o outro, ou ainda (++) e (--) caso desejar mostrar uma forte dependência (ULLMAN, 2010).

Ao fim da construção da casa da qualidade a equipe de projeto tem em mãos a quantificação dos requisitos do produto que auxiliam na priorização das atividades de desenvolvimento e uma rica quantidade de informações a respeito do projeto que podem ser usadas nas tomadas de decisões em etapas posteriores (ROZENFELD et al., 2006).

2.4.1.1 Diagrama de Mudge

O diagrama de Mudge como mencionado anteriormente é uma ferramenta que permite quantificar os requisitos dos clientes a partir da comparação par a par, assim é possível saber quão importante cada requisito é para os clientes e então alimentar esse valor na casa da qualidade. Na Figura 9 a seguir é apresentado um exemplo desse diagrama.

Figura 9 - Diagrama de Mudge.

Intensidade		2	3	4	5	Soma	%
A	5						
B	4	1B	1A	1A	1B	18	56
C	3	2	2D	2D	5C	4	13
D	2		3	4D	3C	3	9
E	1			4	5D	2	6
					5	5	16
					Total	32	100

Fonte: NICKEL et al., (2010).

Para construção do diagrama em cada comparação são realizadas duas perguntas: “Qual requisito é mais importante para o sucesso do produto? Quanto mais importante é esse requisito?” (ROZENFELD et al., 2006, p. 222).

As respostas dessas perguntas são apresentadas na forma alfa numérica nas células centrais do diagrama. Como exemplo no primeiro campo do diagrama a resposta ‘1B’ significa que o requisito ‘1’ é mais importante que o requisito ‘2’, e possui intensidade ‘4’ que correspondente a letra ‘B’.

A coluna da soma equivale ao valor da soma das intensidades associado aos requisitos da diagonal na linha e coluna correspondente. Completando a diagrama é feito a ponderação da soma de cada requisito da diagonal em relação ao total, obtendo os valores percentuais de cada requisito.

2.5 PROJETO CONCEITUAL

Encerrado a etapa do projeto informacional é iniciado o projeto conceitual. “Esta fase destina-se ao desenvolvimento da concepção do produto” (BACK et al., 2008, p. 77).

No projeto conceitual definimos a função global do produto, bem como suas subfunções. A partir das mesmas, são estabelecidos princípios de solução, a combinação dos princípios de solução forma as concepções alternativas de solução para o projeto. Essas concepções alternativas passam por um processo de seleção que compara umas às outras, no intuito de identificar a concepção que melhor atende as especificações de projeto do produto. (BACK et al., 2008)

Existem diferentes métodos que auxiliam o desenvolvimento do conceito do produto, esses métodos são baseados no conhecimento das funções do produto e contam com a criatividade dos envolvidos no projeto. Back et al. (2008), classifica os métodos em dois grupos, os intuitivos e os sistemáticos, os quais alguns deles são apresentados no Quadro 3 a seguir.

Quadro 3 - Métodos de obtenção do conceito do produto.

Métodos Intuitivos	Métodos Sistemáticos
<i>Brainstorming</i>	Matriz morfológica
Método de Delphi	TRIZ
Método 635	Análise de valor
Listagem de atributos	Síntese funcional
Método sinergia	

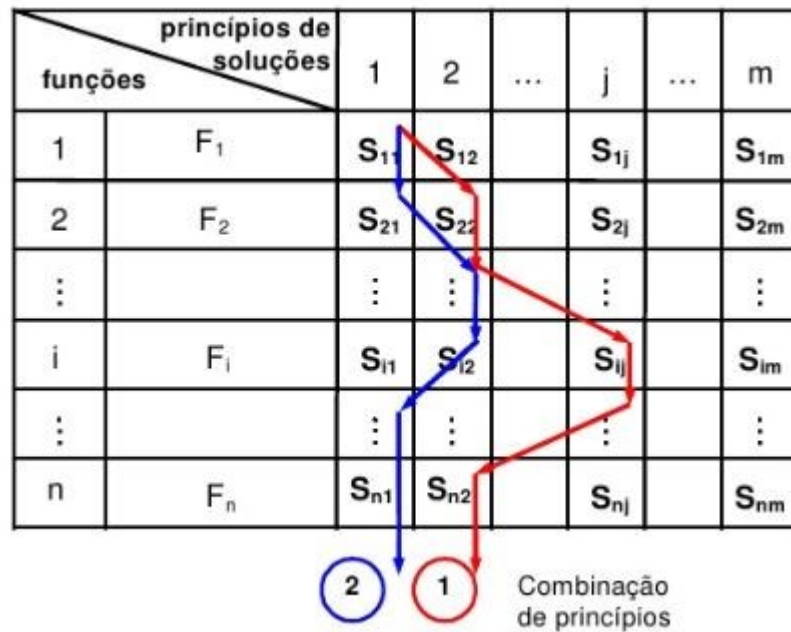
Fonte: Back et al., (2008).

De acordo com Ullman (2010), um projetista experiente irá fazer uso de quantos forem necessários para obter a solução de projeto.

2.5.1 Método da Matriz Morfológica

“O método da matriz morfológica consiste em uma pesquisa sistemática de diferentes combinações de elementos ou parâmetros, com objetivo de encontrar uma nova solução para o produto” (BACK et al., 2008, p. 264). A matriz resultante é um estudo das possíveis formas que o produto pode adquirir, na Figura 10 é apresentado um exemplo dessa matriz.

Figura 10 - Matriz morfológica.



Fonte: Rosenfeld et al., (2006).

De acordo com Back et al. (2008), o procedimento para elaboração da matriz morfológica consiste nos seguintes passos:

1. Identificar as funções essenciais do produto;
2. Preencher o campo da matriz com as funções identificadas;
3. Listar os possíveis princípios de solução para cada função de forma independente, esses podem possuir forma literal ou gráfica;
4. Estabelecer concepções alternativas para o produto a partir da combinação dos princípios de solução de cada linha;
5. Avaliar as concepções e selecionar a melhor solução para o problema de projeto, esta etapa é descrita na subseção seguinte;
6. Estabelecer o leiaute e descrever a concepção selecionada.

2.5.1.1 Avaliação e seleção da concepção

Esta etapa do projeto conceitual visa escolher a melhor concepção dentre as alternativas geradas na matriz morfológica, a qual será transformada no produto final. Tendo em vista a responsabilidade desta decisão a utilização de um método que auxilie nesta tarefa é muito importante.

De acordo com Back et al. (2008), a avaliação das concepções alternativas pode ser realizada verificando se as mesmas atendem a função do produto, se são física e economicamente viáveis, ou por meio de um método mais sistemático como o Método de Pugh ou Método da Matriz de Decisão, também apresentado por Rosenfeld et al. (2006) e Ullman (2010).

O método de Pugh consiste numa matriz que compara uma concepção escolhida como referência, essa pode ser um produto anterior já existente, um produto concorrente ou uma preferência do projetista, com todas as outras alternativas de concepção.

Para a aplicação do método são estabelecidos critérios de avaliação, os quais podem ser os requisitos de projeto do produto. Em seguida é identificado os pesos de importância dos critérios, esta etapa pode ser realizada com ferramentas já discutidas anteriormente. A comparação com o conceito de referência é feita pela adição de notas, se o conceito avaliado não atender ao critério tão bem quanto o de referência é atribuído a nota (-1), se for melhor que o de referência recebe a nota (+1) e se for igual recebe nota zero.

A nota total atribuída para cada conceito é dada pela soma do produto entre o peso de importância de cada critério com a nota atribuída ao princípio de solução do conceito. O resultado da matriz não deve ser tomado como medidas absolutas, mais sim como orientação, cabe ao projetista analisar o conceito com maior pontuação e verificar em que aspectos é melhor que o de referência, para então definir o conceito final do produto, que será a base de trabalho para as etapas seguintes do desenvolvimento do produto (ULLMAN, 2010). Na Figura 11 a seguir é apresentado a forma construtiva de uma matriz de Pugh.

Figura 11 - Forma construtiva de uma matriz de Pugh.

Critério de Avaliação	Peso	Alternativa 1		Alternativa 2		Alternativa 3	
		Nota 1	Produto 1	Nota 2	Produto 2	Nota 3	Produto 3
Critério 1	20	0	0	1	20	1	20
Critério 2	40	1	40	1	40	0	0
Critério 3	30	-1	-30	1	30	0	0
Critério 4	10	1	10	-1	-10	1	10
Soma Total Produtos			20		80		30

Fonte: O Autor (2020).

2.6 PROJETO PRELIMINAR

Definido o conceito do produto é iniciado a fase de projeto preliminar, na qual determina-se a forma do produto, bem como suas dimensões, posição de trabalho, o material que será produzido e o processo de fabricação. Essas definições são decididas com base nas especificações de projeto do produto, levando em conta aspectos de segurança, ergonomia, manutenção, econômicos e ambientais (BACK et al., 2008).

O uso de ferramentas computacionais como CAD (*Computer-Aided Design*) e CAE (*Computer-Aided Engineering*) nesta etapa de projeto é fortemente aplicado para construção, análise e otimização do componente.

2.6.1 Seleção de materiais

Cada produto é constituído por um ou mais materiais. No ponto de vista de aplicação, se seleciona os materiais que proporcionem características físicas e econômicas para melhor atender os requisitos de projeto. A seleção do material é uma etapa muito importante no desenvolvimento do produto, uma vez que a seleção errada pode levar a falha do componente em serviço ou torná-lo caro inviabilizando sua comercialização.

De acordo com Rozenfeld et al. (2006), a seleção do material nem sempre ocorre de uma forma criteriosa e minuciosa, muitas vezes decisões são tomadas com base na experiência e práticas anteriores, o que nem sempre proporciona a melhor solução. A aplicação de técnicas mais sistemáticas permite analisar uma maior variedade de materiais, selecionar bons candidatos e compara-los com os requisitos de projeto, com objetivo de escolher o material que melhor satisfaz o problema de projeto.

2.6.2 Materiais e processos de fabricação

Nesta subseção é apresentado as características, processos de fabricação, propriedades e exemplos de aplicação na indústria e competições de Fórmula SAE, dos materiais com potencial para serem utilizados no projeto do flange de acoplamento da coroa.

2.6.2.1 Alumínio

A aplicação do alumínio na indústria automotiva vem crescendo nos últimos anos, estudos indicam que em 2025 o consumo médio do alumínio nos veículos norte-americanos chegará em 250 Kg/veículo, na indústria automotiva europeia esse valor será de 180 kg/veículo até 2020. (REVISTA ALUMINIO, 2018).

O alumínio possui características desejáveis para aplicação neste trabalho, a baixa densidade desse material, aliado a boas propriedades mecânicas de algumas ligas, permitem a redução de massa do veículo. Segundo Kotthaus (1972), o tratamento térmico de endurecimento por precipitação proporciona a determinadas ligas de alumínio resistência comparas a aços comuns de construção e em materiais fundidos a do ferro fundido cinzento.

Por outro lado, o processo de obtenção do alumínio requer grande quantidade de energia e gera diversos impactos ambientais, fato que acaba exigindo consciência na aplicação desse material em projetos de engenharia (SCA, 2019).

A equipe brasileira de Fórmula SAE V8 Racing Facens, aplica no seu projeto de flange da coroa uma liga de alumínio 7075-T6 fabricada por usinagem, a mesma pode ser vista na Figura 12 a seguir.

Figura 12 - Sistema *Drivetrain* Equipe V8 Racing Facens.



Fonte: O Autor (2020).

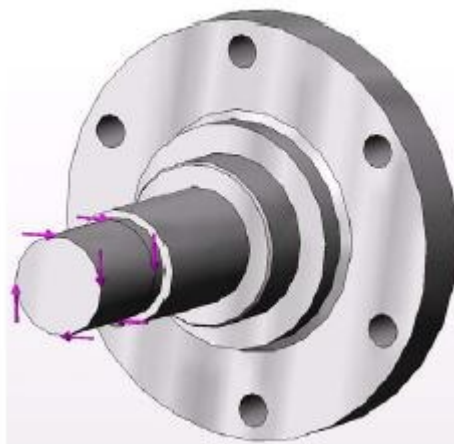
Esta liga de alumínio se destaca pela excelente usinabilidade, alta resistência mecânica e elevada dureza.

2.6.2.2 Aço e suas ligas

Nas competições de Fórmula SAE muitas equipes optam pela utilização de ligas de aço comerciais, mais baratas do que ligas específicas, as ligas de aço 4140 e 4340 são as mais comuns. Estes são aços de baixa liga para construção mecânica, aplicados na indústria automotiva para fabricação de eixos, engrenagens de transmissão, entre outros elementos.

De acordo com Silva e Mei (2010), normalmente estes tipos de aço passam por tratamento térmico após serem processados no consumidor, para adquirir as propriedades mecânicas finais. Birrento (2008), utilizou em seu projeto de tulipa a liga de aço AISI 4140, a Figura 13 mostra a tulipa.

Figura 13 - Tulipa.



Fonte: Birrento (2008).

Este elemento foi fabricado por usinagem e passou por tratamento térmico de tempera em óleo e revenimento. No entanto, este elemento também pode ser fabricado através do processo de fundição onde o metal fundido é vazado em moldes e após a solidificação adquire a forma da cavidade do molde.

2.6.2.3 Aço fundido

Segundo Chiaverini (2008), o emprego da fundição de aço deve-se a capacidade de se obter peças com grande variabilidade de geometrias e dimensões, razoável resistência mecânica, a custos relativamente baixos. Entre os tipos existentes de aços fundidos, os com médio teor de carbono são os mais aplicados na indústria automotiva.

Comparado ao ferro fundido cinzento, o aço fundido possui maior resistência ao impacto, a aplicação desse material no projeto do flange garante que o componente irá suportar os esforços recebidos pela coroa. Por outro lado, verter o aço é muito mais difícil, sua fluidez é menor que a do ferro, além de ser mais reativo com o material do molde, possui uma taxa de contração maior exigindo mais material para preencher a cavidade do molde, o aço fundido também é mais susceptível a formação de vazios na peça que quando em uso pode ocasionar na falha do componente (FOUNDRY, 2020).

O processo de fundição exige uma série de equipamentos e ferramentas para garantir a qualidade do produto fundido, sendo necessário a parceria entre empresa e o projeto para fabricação do componente. A cidade de Joinville-SC é privilegiada por acolher grandes metalúrgicas que atendem principalmente o setor automotivo com fundidos dos mais variados tipos de ferro fundido, tornando essa liga apreciada no projeto do flange da coroa.

2.6.2.4 Ferro fundido nodular austemperado - ADI

Obtido por meio do tratamento térmico de austêmpera em ferro fundido nodular, aquele em que a grafita apresenta-se na forma esferoidal, o *Austempered Ductile Iron* (ADI) é um material de engenharia que apresenta uma atrativa combinação entre resistência mecânica e alongamento, além de possuir boa resistência a fadiga e ao desgaste, e também dispor de uma menor sensibilidade ao entalhe que a dos aços, ideal para o projeto do flange tendo em vista a complexidade de sua geometria (RODRIGUES, 2016).

O ADI destaca-se por ser 10% menos denso que o aço (RODRIGUES, 2016). A elevada resistência mecânica permite a fabricação de peças com finas espessuras, garantindo a otimização de componentes que fazem uso deste material. Segundo Nofal e Jekova (2009), quando se compara as propriedades mecânicas, a densidade e custo, a aplicação do ADI torna-se mais vantajosa que a do alumínio.

Na indústria automotiva em sistemas de transmissão este material é aplicado em engrenagens e carcaças da caixa planetária do diferencial (RODRIGUES, 2016). Para o processo de seleção do material será analisado a liga de ferro fundido nodular ao Cu-Ni estudada por Rodrigues (2016), contendo 3,7%C, 2,02%Si, 0,58%Cu, 0,04%Ni, e outros elementos de liga em menores proporções.

A usinabilidade do ADI após tratamento térmico é ruim comparada aos outros materiais apresentados, Rodrigues (2016), recomenda a usinagem antes do tratamento térmico.

2.6.3 Método de elementos finitos

O método de elementos finitos (MEF), permite a discretização do componente analisado em pequenos elementos de tamanhos finitos, conectados entre si por pontos discretos, chamados de nós. Estes elementos por serem de geometria simples e conhecida podem ser calculados, como a geometria discretizada é constituída pela união desses elementos dando origem a malha de elementos finitos, sabendo como cada elemento se comporta é possível simular de forma aproximada o comportamento da estrutura a ser projetada (ALVES FILHO, 2000).

O uso do método permite a análise de todo tipo de geometria, permitindo assim resolver problemas complexos que são difíceis ou até mesmo impossíveis de serem solucionados por métodos clássicos de resistência dos materiais. Assim é possível obter uma aproximação das tensões e deformações em qualquer região do componente, para um dado conjunto de condições de contorno e carregamentos aplicados nos nós da estrutura (NORTON, 2013).

A técnica exige a solução de um número elevado de equações, sendo necessário a utilização de um computador e software adequado para solução do problema. É responsabilidade do engenheiro de simulação determinar o tipo de elemento que seja mais adequado ao problema, sua quantidade e distribuição na estrutura, afim de obter precisão nos resultados e otimizar o tempo de processamento.

2.7 PROJETO DETALHADO

Finalizado o projeto preliminar inicia-se a última etapa da macrofase de projeção, o projeto detalhado, no qual ocorre a aprovação do protótipo físico e/ou virtual, finalização

das especificações dos componentes, detalhamento do plano de manufatura e elaboração da solicitação de investimento. (BACK et al., 2008).

Nesta etapa é apresentado a elaboração do desenho técnico do produto, especificação do processo de fabricação, bem como o detalhamento das etapas de fabricação do componente a partir da construção de um roteiro de fabricação.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada as etapas de desenvolvimento do projeto do flange de acoplamento da coroa aplicado ao sistema de transmissão do veículo a combustão da equipe de competição Fórmula CEM.

Para uma empresa ser competitiva no mercado é necessário que o desenvolvimento de produto seja um processo eficiente e eficaz. O desempenho desse processo depende da metodologia utilizada como referência no desenvolvimento de produtos. (ROZENFELD et al., 2006)

Dentre as metodologias de projeto de produto existentes podemos citar: o funil de desenvolvimento, o desenvolvimento *lean* de produtos e o processo de desenvolvimento integrado de produto. A primeira parte de muitas ideias que vão sendo afuniladas a partir de processos de seleção e detalhamento até obter de forma concreta o produto que será desenvolvido. A segunda foca no atendimento das necessidades dos clientes desenvolvendo produtos de excelência com agilidade e baixo custo. A última foi apresentada em detalhes anteriormente neste trabalho.

O modelo de desenvolvimento de produto utilizado neste trabalho para o projeto do flange de acoplamento da coroa é o Processo de Desenvolvimento Integrado de Produto (PRODIP). O mesmo foi escolhido pois além de apresentar a robustez necessária ao projeto do flange é o método que vem sendo utilizado na equipe de competição Fórmula CEM. No Quadro 4 a seguir é apresentado as etapas de projeto que são desenvolvidas no decorrer deste trabalho com seus respectivos objetivos.

Quadro 4 - Etapas do desenvolvimento de projeto do flange.

Etapas de projeto	Objetivo
Projeto Informacional	Determinar as especificações de projeto do flange.
Projeto Conceitual	Determinar o novo conceito do flange.
Projeto Preliminar	Realizar a modelagem da geometria em software CAD.
	Selecionar o material do flange.
	Realizar a simulação numérica por MEF do flange.
Projeto detalhado	Elaborar o desenho técnico mecânico do flange.

Fonte: O Autor (2020).

As etapas de projeto apresentadas no Quadro 4, correspondem a macrofase de projeção do modelo PRODIP, foco deste trabalho.

4 ESTUDO DE CASO

O estudo de caso deste trabalho visa documentar a concepção, o desenvolvimento e a otimização do projeto do flange de acoplamento da coroa, que foi desenvolvido no ano de 2016, o qual na atualidade equipa o protótipo de veículo a combustão modelo 2020 da equipe Fórmula CEM, e então deixar uma referência de consulta aos atuais e futuros integrantes da equipe no intuito de encurtar o tempo de aprendizado e instigar a evolução técnica da equipe, para que a mesma consiga alcançar bons resultados nas competições de Fórmula SAE.

Na sequência são executadas as etapas de desenvolvimento de projeto do flange conforme modelo PRODIP e ao final é realizado um diagnóstico de falha do elemento em uso, a fim de avaliar a integridade do flange após 4 anos de trabalho, no intuito de identificar possíveis avarias que impeçam a equipe de continuar utilizando o componente no veículo.

4.1 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO INFORMACIONAL

Nesta etapa de projeto busca-se determinar as especificações de projeto do flange da coroa. Para isso, será aplicado a matriz casa da qualidade a qual foi apresentada anteriormente neste trabalho.

4.1.1 Requisitos dos clientes

A construção da matriz casa da qualidade requer o levantamento de informações a respeito dos envolvidos no ciclo de vida do flange da coroa. Considera-se como clientes do produto os integrantes da equipe Fórmula CEM, os parceiros que contribuem na obtenção do objeto físico, como, fornecedores de peças e serviços de fabricação e também os juizes da competição.

Os requisitos dos clientes foram estabelecidos a partir das necessidades da equipe Fórmula CEM para com a competição nacional de Fórmula SAE, de experiências obtidas pelo autor deste trabalho no período em que foi membro atuante do setor de *drivetrain* da equipe, o qual teve contato direto com o produto e patrocinadores.

No Quadro 5 abaixo estão elencados os requisitos dos clientes estabelecidos para o projeto do flange da coroa junto com uma breve descrição.

Quadro 5 - Requisitos dos clientes.

Número	Requisito	Descrição
1	Ser resistente	Selecionar o material para o projeto do flange que permita com que o mesmo suporte os esforços impostos pelo sistema de transmissão.
2	Ser leve	Reduzir a massa do componente sem comprometer sua segurança.
3	Possuir fácil manufatura	Possuir geometria simples evitando a necessidade de processos de fabricação complexos.
4	Possuir fácil manutenção	Facilitar o acesso de ferramentas para manutenção do componente e seus agregados.
5	Ser seguro	Possuir elementos de segurança, presando pelo bem-estar do piloto e demais pessoas próximas ao veículo.
6	Ser durável	Desenvolver um flange que não necessite ser substituído a cada competição.
7	Ser barato	Desenvolver um flange da coroa que possua baixo custo de produção.
8	Ser confiável	Garantir que o elemento não apresente falhas em serviço.
9	Ser ambientalmente amigável	Especificar o material e processo de fabricação que minimizem a degradação do meio ambiente e garantam a reciclagem do componente após o fim de sua vida útil.

Fonte: O Autor (2020).

O requisito de resistência foi estabelecido pelo fato de que o flange da coroa sofre a ação de grandes esforços para que o veículo possa se movimentar, os quais geram tensões em toda sua estrutura, fazendo com que seja necessário especificar um material que resista a esses esforços. Já o requisito de leveza está relacionado com a otimização da eficiência do veículo, um baixo peso proporciona melhor desempenho em aceleração e economia de combustível, dois aspectos avaliados em competições de Fórmula SAE.

Nas competições de Fórmula SAE os veículos são avaliados pela concepção técnica e viabilidade comercial, tendo como base a produção anual de mil unidades, desta forma surge a necessidade de um projeto de flange que possua fácil manufatura uma vez que se trata de um elemento com alto volume de produção. Outro aspecto importante relacionado a geometria do componente corresponde a dificuldade de encontrar parcerias para fabricação dos componentes do veículo, quanto mais complexa a geometria maior é a dificuldade de conseguir patrocinadores.

O modelo de flange utilizado pela equipe no ano de 2015 será utilizado como base de comparação no decorrer deste trabalho, o mesmo proporciona dificuldade na realização de manutenções, uma vez que possui grande quantidade de parafusos, alguns de tamanho

reduzido e difícil acesso, acarretando em um elevado tempo para realização de reparos, fato este que culminou na elaboração do requisito de fácil manutenção.

Como o flange da coroa é uma peça rotativa, o requisito de segurança fortalece a necessidade da busca de soluções seguras para o projeto do componente de modo a evitar acidentes quando o veículo está em movimento.

Tendo em vista a dificuldade de aquisição de patrocínio para a fabricação de componentes, não é interessante a substituição do flange da coroa a cada competição. Outro aspecto a se levar em consideração é que para desenvolver um veículo competitivo, os componentes que o constituem precisam ser testados e a partir de dados reais serem redimensionados, o que leva tempo, assim se faz necessário a definição do requisito de durabilidade.

É almejado pela equipe evitar desperdícios de matéria prima na produção do veículo e utilizar materiais de engenharia que afetem pouco o meio ambiente, desta forma estabeleceu-se o requisito de ser ambientalmente amigável.

O custo de produção do veículo é avaliado na competição de Fórmula SAE através da prova de custos e manufatura, onde o veículo com menor custo de produção é o vencedor. Desta maneira estabeleceu-se o requisito ser barato para contribuir com a necessidade global da equipe de redução do custo do projeto.

A falha do elemento em uma prova de enduro de resistência por exemplo, elimina o veículo da competição, fazendo com que a equipe perca pontos importantes e conseqüentemente posições no placar de classificação, desta forma estabeleceu-se o requisito ser confiável.

4.1.2 Aplicação do diagrama de Mudge

A fim de quantificar os requisitos dos clientes aplicou-se o diagrama de Mudge, o qual é apresentado na Figura 14.

Figura 14 - Diagrama de Mugde aplicado ao projeto.

Ser Resistente	Ser Leve	Possuir Fácil Manufatura	Possuir Fácil Manutenção	Ser Seguro	Ser Durável	Ser Barato	Ser Confiável	Ser Ambientalmente Amigável		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	Soma	Percentual
1	2B	1A	1B	5A	1A	1B	1A	1C	14	13,2%
	2	2C	2C	5B	2A	2C	2A	2C	25	23,6%
		3	4B	5B	3A	3A	8A	3C	7	6,6%
			4	5B	4A	4B	8B	4C	12	11,3%
				5	5A	5C	5A	5C	22	20,8%
					6	6B	8A	6C	8	7,5%
						7	8B	7C	5	4,7%
							8	8C	13	12,3%
								9	0	0,0%
								Total	106	100,0%

Fonte: O Autor (2020).

Os números de 1 a 9 correspondem aos requisitos dos clientes e as letras A, B, C são os níveis de importância adotados, sendo que A significa “um pouco mais importante” e sua intensidade tem valor 1, B significa “medianamente mais importante” cuja intensidade é 3 e C significa “muito mais importante” e possui intensidade 5.

Na Tabela 1 a seguir são apresentados os requisitos dos clientes em ordem hierárquica.

Tabela 1 - Hierarquia dos requisitos dos clientes.

Requisito	Percentual
Ser leve	23,6%
Ser seguro	20,8%
Ser resistente	13,2%
Ser confiável	12,3%
Fácil manutenção	11,3%
Ser Durável	7,5%
Fácil manufatura	6,6%
Ser barato	4,7%
Ser ambientalmente amigável	0,0%

Fonte: O Autor (2020).

Com base nos resultados apresentados na Tabela 1, os cinco principais atributos que agregam valor para os clientes no flange de acoplamento da coroa são: leveza, segurança, resistência, confiabilidade e fácil manutenção.

4.1.3 Requisitos do produto

Os requisitos do produto foram estabelecidos a partir de *brainstorming* com os integrantes do setor de *drivetrain* e líderes da equipe Fórmula CEM, de modo a satisfazer as demandas dos clientes. Para cada um definiu-se valores meta, os quais são apresentados no Quadro 6 a seguir.

Quadro 6 - Requisitos do produto.

Requisitos do Produto	Valor Meta
Limite de escoamento	Maior do que 137,8 MPa
Massa	Redução 30%
Tempo de manufatura	Máximo 30 dias
Tempo de manutenção	Máximo 40 minutos
Fator de segurança	Maior do que 1
Quantidade de competições	Mínimo duas
Custo de produção	Menor do que R\$ 130,00

Fonte: O Autor (2020).

O valor meta de limite de escoamento corresponde a tensão de cisalhamento estimada no estriado involuta do flange para um carregamento de torque máximo. Como trata-se de uma região crítica em que não há possibilidade de uma grande mudança das dimensões, tomou-se como referência a tensão nessa área.

Já a especificação de redução de 30% da massa do flange é um espelho da meta global estipulada pela equipe para todo o veículo. A meta de fator de segurança maior do 1 foi estabelecido tem do em vista que na etapa de dimensionamento é analisado um caso extremo, onde no âmbito da competição dificilmente atinge-se tal nível de esforço.

O valor de R\$ 130,00 corresponde ao custo de produção fictício do flange modelo 2015, este valor é estimado a partir da planilha de custo elaborada conforme o regulamento da competição nacional de Fórmula SAE.

As especificações de tempo de manufatura, tempo de manutenção e quantidade de competições foram determinadas em uma reunião com os integrantes da equipe Fórmula CEM. Onde 30 dias é o período máximo estipulado para produzir o flange, 40 minutos é o

tempo máximo admissível para substituir o componente em uma manutenção e duas competições é a quantidade mínima necessária para ter retorno do investimento do projeto e poder realizar testes.

Atingindo os valores meta estabelecidos garante-se que o novo flange que está em desenvolvimento supere o flange modelo 2015 e seja competitivo em relação as soluções apresentadas por concorrentes nas competições de Fórmula SAE.

4.1.4 Aplicação da casa da qualidade

Após o levantamento das informações necessárias para a utilização da casa da qualidade, iniciou-se a introdução dos dados na matriz. Primeiramente foram adicionados os requisitos dos clientes e seus níveis de importância correspondentes extraídos do diagrama de Mugde.

Em seguida, comparou-se o projeto do flange de acoplamento da coroa modelo 2015 para saber quanto atende esses requisitos. Para tal, realizou-se uma avaliação criteriosa do componente, onde aferiu-se sua massa sendo a mesma igual a 1,114Kg, valor este considerado elevado, desta forma atribui-se nota 2 no requisito de ser leve. Na sequência identificou-se que o flange auxiliar sofreu deformação aparente na região dos parafusos de fixação da coroa, caracterizando a falha do componente, desta forma atribuiu-se nota 1 para os requisitos de resistência e durabilidade.

Continuando a avaliação, observou-se a falta de apoio e fixação para a tulipa, a qual em altas rotações colide no flange e desacopla do diferencial interrompendo o fluxo de torque para roda, impedindo o movimento do veículo. Deste modo, atribuiu-se notas baixas para confiabilidade e segurança.

Por fim, realizou-se uma simulação de manutenção onde identificou-se dificuldade neste procedimento, devido ao flange modelo 2015 possuir muitos parafusos de difícil acesso e tamanho reduzido que atrapalha a operação. Todas as observações levantadas são aspectos que podem ser melhorados, o que confirma a necessidade do novo projeto do flange.

Finalizada a comparação preencheu-se os requisitos do produto, os valores meta e realizou-se a correlação entre as demandas dos clientes e os requisitos do produto. Também se avaliou a dependência entre requisitos. A matriz casa da qualidade completa pode ser vista na Figura 15 a seguir.

Figura 15 - Matriz Casa da Qualidade aplicada ao projeto do flange.

Sentido da Melhoria		x	▼	▼	▼	x	▲	▼	
Importância	Requisitos Produto	Limite de Escoamento	Massa	Tempo de Manufatura	Tempo de Manutenção	Fator de Segurança	Quantidade de competições	Custo de Produção	Análise Comparativa Flange 2015
	Requisitos Clientes								
14	Ser resistente	⊖	⊖	⊖		⊖	⊖	⊖	1
25	Ser leve	⊖	⊖			⊖		⊖	2
7	Possuir fácil manufatura			⊖				⊖	3
12	Possuir fácil manutenção				⊖		⊖		1
22	Ser Seguro	⊖	⊖			⊖	⊖		1
8	Ser durável	⊖				⊖	⊖		1
5	Ser barato	▲	⊖	⊖				⊖	3
13	Ser confiável	⊖			⊖	⊖	⊖		1
0	Ser ambientalmente amigável		⊖					⊖	3
Especificações de Projeto		Maior do que 137,8MPa	Redução de 30%	Máximo 30 dias	Máximo 40 min.	Maior do que 1	Mínimo duas	Menor do que R\$ 130,0	
Peso Relativo		25,1	21,3	4,5	5,6	22,2	12,8	8,5	

Fonte: O Autor (2020).

Como resultados da matriz temos os pesos relativos dos requisitos de projeto considerando as correções entre si e entre os requisitos dos clientes. Na Tabela 2 é apresentado em ordem decrescente a importância de cada requisito do produto.

Tabela 2 - Importância dos requisitos do produto.

Requisitos do Produto	Peso relativo
Limite de Escoamento	25,1
Fator de Segurança	22,2
Massa	21,3
Quantidade de competições	12,8
Custo de Produção	8,5
Tempo de manutenção	5,6
Tempo de manufatura	4,5

Fonte: O Autor (2020).

Cada requisito tem seu valor meta associado que são as especificações de projeto do produto. A hierarquia dos requisitos apresentada na Tabela 2, indica a direção na determinação do conceito do flange e na tomada de decisões futuras.

4.2 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO CONCEITUAL

Para a definição do conceito do flange de acoplamento da coroa utilizou-se do método da matriz morfológica por se julgar mais apropriado para o tipo de projeto. A aplicação da técnica iniciou-se pela definição da função global, na sequência definiu-se suas subfunções apresentadas no Quadro 7 a seguir.

Quadro 7 - Função global e subfunções do flange de acoplamento da coroa.

Função Global	Subfunções
Transmitir Torque	Resistir esforços mecânicos
	Acoplar a coroa
	Fixar a coroa
	Acoplar no diferencial
	Acoplar o rolamento suporte do sistema
	Fixar rolamento suporte do sistema
	Garantir apoio e movimento da Tulipa
	Fixar apoio da Tulipa

Fonte: O Autor (2020).

Na sequência, iniciou-se a construção da matriz morfológica preenchendo a coluna referente às subfunções. Em seguida levantou-se princípios de solução para cada subfunção a partir de um *brainstorming* com os integrantes do setor de *drivetrain* da equipe, as quais estão apresentadas no Quadro 8 a seguir.

Quadro 8 - Matriz morfológica aplicada ao projeto do flange.

Subfunções	Princípios de solução				
Resistir esforços mecânicos	Metal	Polímero	Compósito	Cerâmica	-
Acoplar a coroa	Flange auxiliar e flange principal	Coroa usinada no flange	Flange única com aba maior	Flange na carcaça do diferencial	-
Fixar a coroa	Solda	Parafuso	Rebite	-	-
Acoplar no diferencial	Chaveta	Solda	Estria	Pino trava	Parafuso trava
Acoplar o rolamento suporte do sistema	Geometria de eixo circular	-	-	-	-
Fixar rolamento suporte do sistema	Cola	Ajuste de interferência pesado	Anel elástico	Anel batente com parafuso	Anel batente com pino
Garantir apoio e movimento da Tulipa	Bucha de Náilon	Mancal auto lubrificante	Bucha H	Rolamento	-
Fixar apoio da Tulipa	Chapa com parafuso	Cola	Ajuste de interferência pesado	Anel elástico	-

Fonte: O Autor (2020).

Após o levantamento dos princípios de solução, estabeleceu-se três concepções alternativas de solução a partir da combinação dos princípios de solução. As mesmas são apresentadas no Quadro 9 abaixo, juntamente com a concepção utilizada no protótipo de veículo a combustão modelo 2015 que será utilizada como referência de comparação.

Quadro 9 - Concepções alternativas de solução do projeto do flange.

Concepção Alternativa 1	Concepção Alternativa 2	Concepção Alternativa 3	Concepção Referência
Metal	Metal	Metal	Metal
Coroa usinada no flange	Flange única com aba maior	Flange na carcaça do diferencial	Flange auxiliar e flange principal
Rebite	Parafuso	Solda	Parafuso
Estria	Estria	Peça monolítica	Estria
Geometria de eixo circular	Geometria de eixo circular	Geometria de eixo circular	Geometria de eixo circular
Ajuste de interferência pesado	Anel elástico	Anel batente com parafuso	Anel elástico
Bucha H	Rolamento	Bucha de Náilon	-
Chapa com parafuso	Anel elástico	Cola	-

Fonte: O Autor (2020).

Utilizando uma matriz de Pugh avaliou-se as alternativas de concepção, as quais foram comparadas com a concepção de referência, adotando os requisitos dos clientes como critério de avaliação, juntamente com os respectivos pesos de importância obtidos no diagrama de Mudge anteriormente. A matriz construída está apresentada na Tabela 3 a seguir.

Tabela 3 - Matriz de Pugh para determinação do conceito do flange.

Critérios de Avaliação	Pesos	Concepção Alternativa 1		Concepção Alternativa 2		Concepção Alternativa 3	
		Nota	Produto 1	Nota	Produto 2	Nota	Produto 3
Ser leve	23,6	1	23,6	1	23,6	1	23,6
Ser seguro	20,8	1	20,8	1	20,8	-1	-20,8
Ser resistente	13,2	0	0	0	0	0	0
Ser confiável	12,3	0	0	1	12,3	1	12,3
Fácil manutenção	11,3	-1	-11,3	1	11,3	1	11,3
Ser Durável	7,5	-1	-7,5	1	7,5	1	7,5
Fácil manufatura	6,6	-1	-6,6	0	0	-1	-6,6
Ser barato	4,7	-1	-4,7	0	0	-1	-4,7
Ser ambiental	0	0	0	0	0	0	0
Soma Total Produtos			14,3		75,5		22,6

Fonte: O Autor (2020).

A concepção alternativa com maior nota, ou seja, que a soma total resultou em 75,5 é, portanto, a selecionada para o projeto do flange de acoplamento da coroa. O conceito selecionado resolve aspectos determinantes para bom funcionamento do sistema de transmissão do veículo, como o apoio radial e fixação axial da tulipa. Este conceito monolítico de flange elimina a necessidade de um flange auxiliar para acoplar a coroa, reduzindo quantidade de parafusos e tempo de fabricação.

As boas características da concepção de referência foram mantidas, como o acoplamento no diferencial por estrias, a fixação da coroa por parafusos, alojamento e fixação do rolamento suporte do sistema.

4.3 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO PRELIMINAR

Nas subseções seguintes serão determinados a forma, dimensões principais, posição de trabalho, seleção do material e processo de fabricação do flange de acoplamento da coroa.

4.3.1 Geometria, dimensões e posição

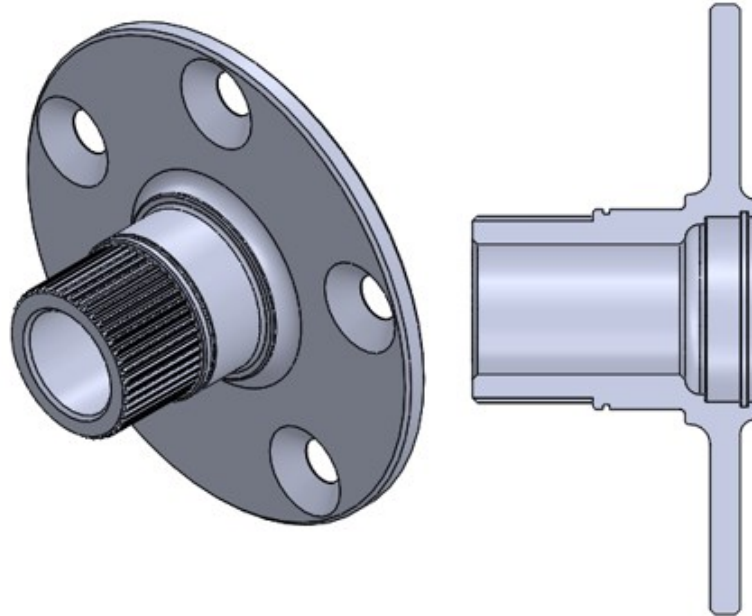
O flange trabalha com seu eixo axial alinhado com a linha de tração das rodas traseiras e eixo radial paralelo ao eixo longitudinal do veículo.

A geometria do elemento foi modelada com auxílio da ferramenta CAD SolidWorks 2015, a mesma possui diversas restrições dimensionais e de forma. Se faz necessário um furo passante de 26 mm para que o eixo da tulipa acople no diferencial, a estria involuta segue o padrão comercial do diferencial Torsen, diâmetro maior e primitivo sendo de 37,31mm e 36,51 mm respectivamente, 46 dentes, ângulo de pressão 30° e comprimento de 24 mm.

As dimensões dos alojamentos dos rolamentos acoplados na peça e anéis elástico de fixação seguem o recomendado pelos fabricantes. Tomou-se cuidado em alojar o rolamento suporte do sistema o mais próximo das estrias com objetivo de reduzir o balanço na região garantindo que as mesmas sofram mais esforços de cisalhamento.

O diâmetro da aba maior foi estabelecido como o necessário para acoplar com segurança a coroa comercial de 39 dentes passo 5/8" modelo padrão da motocicleta Honda CBX Twister 2008. O comprimento do flange é limitado pela inclinação do semieixo, portanto o especificado foi um compromisso entre ângulo máximo de trabalho das juntas homocinética e deslizante, performance na transmissão de torque e alojamento dos componentes periféricos. Na Figura 16 a seguir é possível visualizar a geometria modelada.

Figura 16 - Geometria CAD do flange de acoplamento da coroa.



Fonte: O Autor (2020).

A geometria apresentada na Figura 16 conta com raios de adoçamento em todas as mudanças de seção, a fim de reduzir a concentração de tensão nessas regiões e também chanfros para evitar acidentes no manuseio do elemento, além disso, os chanfros servem como guias facilitando o acoplamento em outras peças.

4.3.2 Seleção do material

A seleção do material para fabricação do flange de acoplamento da coroa ocorreu a partir da elaboração de uma matriz de decisão. Os critérios de avaliação utilizados foram os requisitos do produto com seus respectivos pesos de importância, além dos requisitos estabeleceu-se como critério de avaliação a disponibilidade de parceria no fornecimento da matéria prima e o peso atribuído a este critério foi a média dos pesos dos requisitos.

Os materiais avaliados foram: a liga de alumínio 7075-T6, os aços para construção mecânica SAE 4340 temperado em óleo e revenido á 520°C e 4140 fundido temperado em óleo e revenido á 425°C, por fim o ferro fundido nodular austemperado á 320°C. Na Tabela 4 a seguir são apresentadas algumas propriedades importantes desses materiais.

Tabela 4 - Propriedades mecânicas dos materiais analisados.

Material	Escoamento [MPa]	Resistência [MPa]	Alongamento [%]	Densidade [g/cm³]
ADI	889,5	1036,5	4,80	7,077
7075 - T6	630	590	11	2,81
SAE 4340	1089,55	1175,95	11,47	7,85
4140 Fundido	1345	1450	15	7,85

Fonte: O Autor com base em: Alrase Metais (2020); Rodrigues (2016); Especiais (2020).

O aço SAE 4340 foi atribuído como o material de referência da análise comparativa, uma vez que é o material aplicado no flange principal do protótipo modelo 2015. A matriz de decisão elaborada é apresentada na Tabela 5 a seguir.

Tabela 5 - Matriz de Pugh para seleção do material do flange.

Crítérios de Avaliação	Pesos	ADI		7075-T6		4140 Fundido	
		Nota	Produto 1	Nota	Produto 2	Nota	Produto 3
Limite de escoamento	25,1	0	0	0	0	0	0
Massa	21,3	1	21,3	1	21,3	0	0
Tempo de manufatura	4,5	1	4,5	0	0	1	4,5
Tempo de manutenção	5,6	0	0	0	0	0	0
Fator de segurança	22,2	0	0	0	0	0	0
Quantidade de competições	12,8	0	0	0	0	0	0
Custo de produção	8,5	1	8,5	0	0	1	8,5
Aquisição matéria prima	14,3	1	14,3	0	0	0	0
Soma Total Produtos			48,6		21,3		13

Fonte: O Autor (2020).

O material com maior nota, portanto, o selecionado para o projeto do flange de acoplamento da coroa foi o ferro fundido nodular austemperado. A aplicação do ADI contribui para o requisito de redução de massa almejado no projeto, a nova geometria do flange com este material possui apenas 641g, comparado ao projeto de 2015 equivale a uma redução de 42% superando a meta do projeto.

Em relação ao aço SAE 4340 os pontos positivos são a possibilidade de reduzir a massa do componente uma vez que a densidade do ADI é menor que a do aço, a aplicação

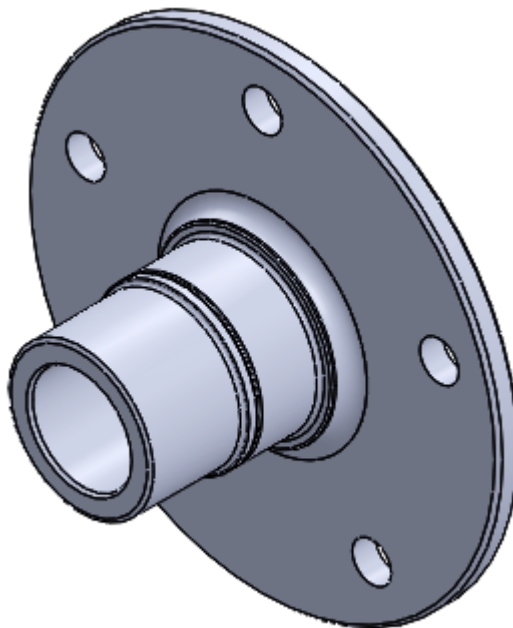
do ADI permite a produção em grandes quantidades do componente, reduzindo tempo de produção e quantidade de cavaco produzido na usinagem, uma vez que o processo de fundição garante a matéria prima próxima das dimensões reais da peça. E devido ao fato da equipe Fórmula CEM possuir uma sólida parceria com uma metalúrgica Joinvillense, fica livre de gastos com a matéria prima.

4.3.3 Simulação numérica por MEF

Para verificar a integridade estrutural do flange com o material selecionado, realizou-se uma análise numérica utilizando o software ANSYS.

Primeiramente realizou-se o tratamento da geometria, a qual removeu-se as estrias da peça e o escareado dos parafusos de fixação da coroa, no intuito de evitar problemas no processamento da malha. Na Figura 17 a seguir é possível visualizar a geometria para simulação.

Figura 17 - Geometria CAD do flange para simulação.



Fonte: O Autor (2020).

Na sequência definiu-se o carregamento aplicado no elemento, considerando um caso de torção pura, a partir da equação 1 foi estimado o torque aplicado no componente. Onde o máximo torque obtido foi de 864,9 Nm. Os parâmetros de entrada considerados para o cálculo do carregamento estão apresentados na Tabela 6 a seguir.

Tabela 6 - Parâmetros para o cálculo do carregamento.

Parâmetros de entrada	Valor
Torque máximo do motor (Fabricante)	58,4 Nm
Relação primária	2,083
Relação da primeira marcha	2,5
Relação de transmissão final	3
Eficiência Global	94,8%

Fonte: O Autor (2020).

Considerou-se uma análise estática e as condições de contorno atribuídas ao modelo numérico foram: um engaste na região dos furos dos parafusos de fixação da coroa e a aplicação do torque máximo na região das estrias. Essa hipótese aproximasse da realidade quando o veículo está sendo testado em dinamômetro de rolo, no momento em que é dada a partida com os freios do equipamento acionados a flange experimenta esse carregamento até o momento em que a inércia do rolo é vencida.

Após a aplicação das condições de contorno, iniciou-se a geração da malha, a qual contou com a utilização de elementos tetraédricos de primeira ordem, esta forma de elemento se adequa melhor a geometria do flange. Assim iniciou-se um processo de convergência de malha, com objetivo de encontrar a malha que retorne à distribuição de tensão no componente o mais próximo da modelagem realizada.

A primeira malha foi gerada de forma automática a qual retornou um valor de tensão de 170MPa, em seguida aplicou-se um controle de tamanho de elemento de 6 mm, valor este igual a espessura de algumas regiões do componente, obtendo uma tensão de 184,62 MPa. A redução global de tamanho do elemento e solução prosseguiu para 5mm, depois 4 mm, em seguida 3 mm e depois 1,5 mm, onde para o último a tensão encontrada foi de 173,45 MPa.

O tamanho de elemento de 1,5 mm é próximo da dimensão dos menores detalhes do flange, então decidiu-se por aplicar um refino de malha nas regiões dos raios de adoçamento nas mudanças de seção, nessas regiões o tamanho do elemento foi reduzido para 1 mm e obteve-se uma tensão de 177,25 MPa. Como ainda não havia convergido a malha, reduziu-se o tamanho do elemento para 0,5 mm nos raios resultando numa tensão de 188,23 MPa.

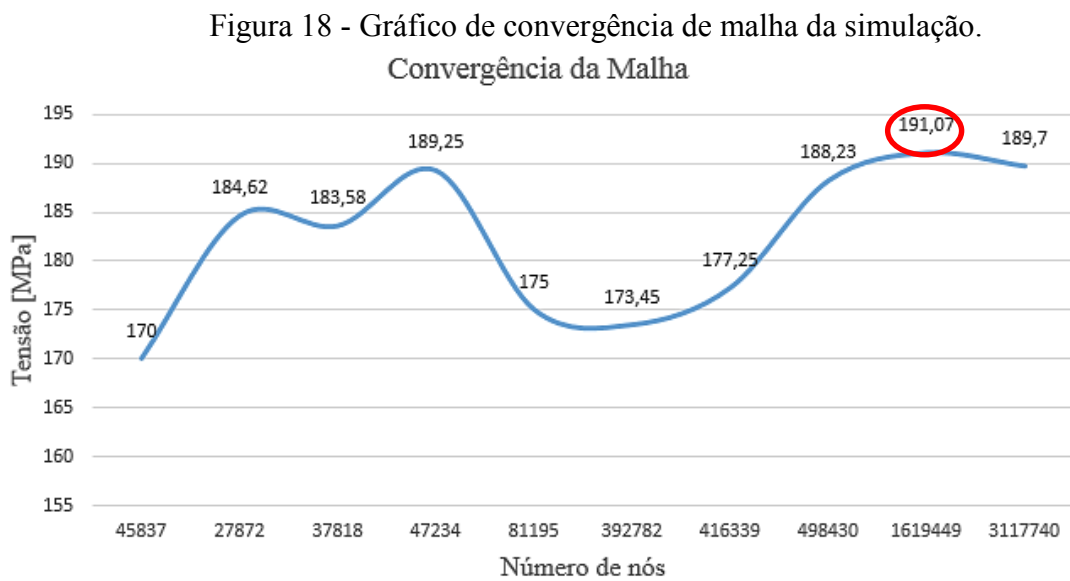
Na sequência gerou-se uma malha global de 1mm e refino de 0,25 nos raios, obtendo uma tensão de 191,07 MPa. Por fim reduziu-se o tamanho de elemento da malha global para 0,75 mm mantendo o refino dos raios como o anterior, o qual retornou uma tensão de 189,7 MPa. Na Tabela 7 a seguir é possível observar melhor o processo iterativo de convergência da malha.

Tabela 7 – Malhas avaliadas para o modelo numérico.

Malha	Tamanho Máximo de Elemento Global	Tamanho Máximo de Elemento Regiões de Refino	Máxima Tensão Principal [MPa]	Erro
1	Automático	-	170	-
2	6mm	-	184,62	7,9%
3	5mm	-	183,58	0,6%
4	4mm	-	189,25	3,0%
5	3mm	-	175	8,1%
6	1,5mm	-	173,45	0,9%
7	1,5mm	1mm	177,25	2,1%
8	1,5mm	0,5mm	188,23	5,8%
9	1mm	0,25mm	191,07	1,5%
10	0,75mm	0,25mm	189,7	0,7%

Fonte: O Autor (2020).

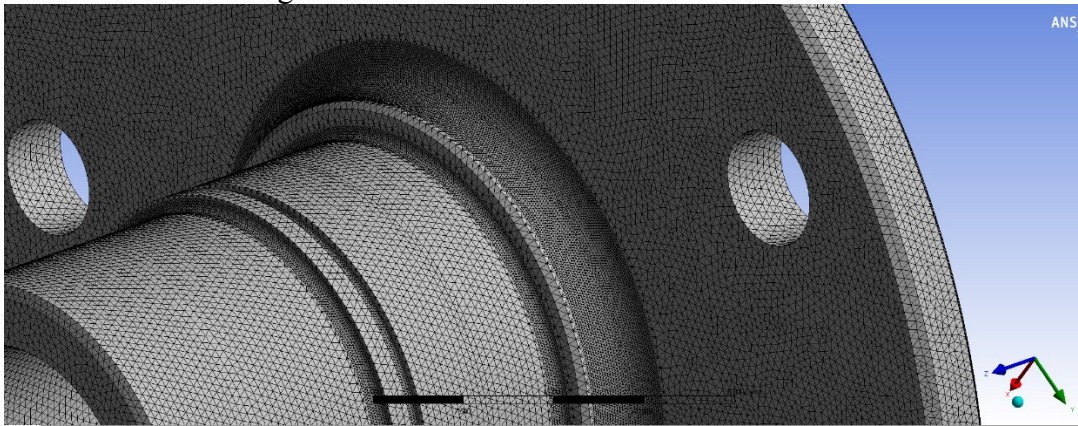
O comportamento da tensão pode ser observado no gráfico da Figura 18 a seguir, onde a máxima tensão principal obtida foi 191,07 MPa ocorrida na penúltima iteração.



Fonte: O Autor (2020).

Como o erro calculado com base nos últimos três resultados de tensão é menor do que 3%, conclui-se que a malha convergiu e os resultados podem ser analisados. Na Figura 19 a seguir é apresentado a malha final gerada no modelo numérico.

Figura 19 - Malha final do modelo numérico.

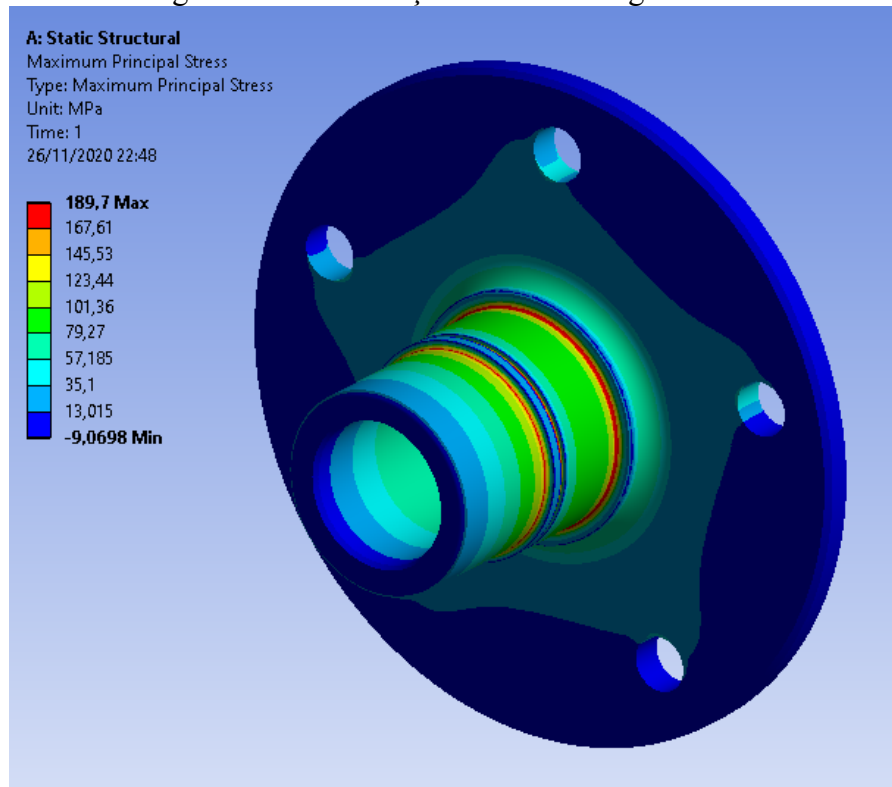


Fonte: O Autor (2020).

4.3.3.1 Resultados da simulação

Para a análise dos resultados optou-se por avaliar as tensões principais no elemento, uma vez que o ADI possui características frágeis. A máxima tensão principal encontrada foi de 189,7 MPa, como pode ser visualizado na Figura 20 a seguir.

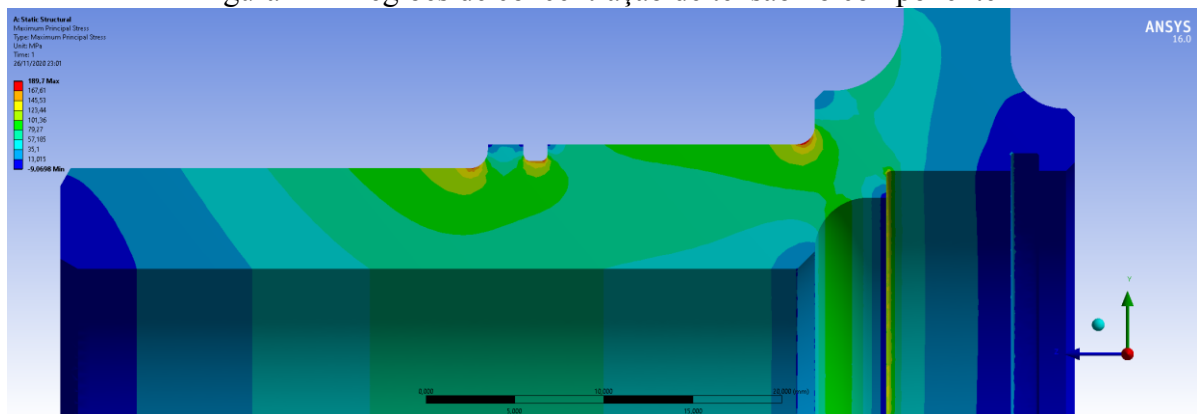
Figura 20 - Distribuição de tensão na geometria.



Fonte: O Autor (2020).

Fica claro a importância de raios de adoçamento nas mudanças de seção da peça, uma vez que as maiores tensões ocorrem nessas regiões, as quais são concentradoras de tensão. A Figura 21 a seguir detalha melhor essas regiões.

Figura 21 - Regiões de concentração de tensão no componente



Fonte: O Autor (2020).

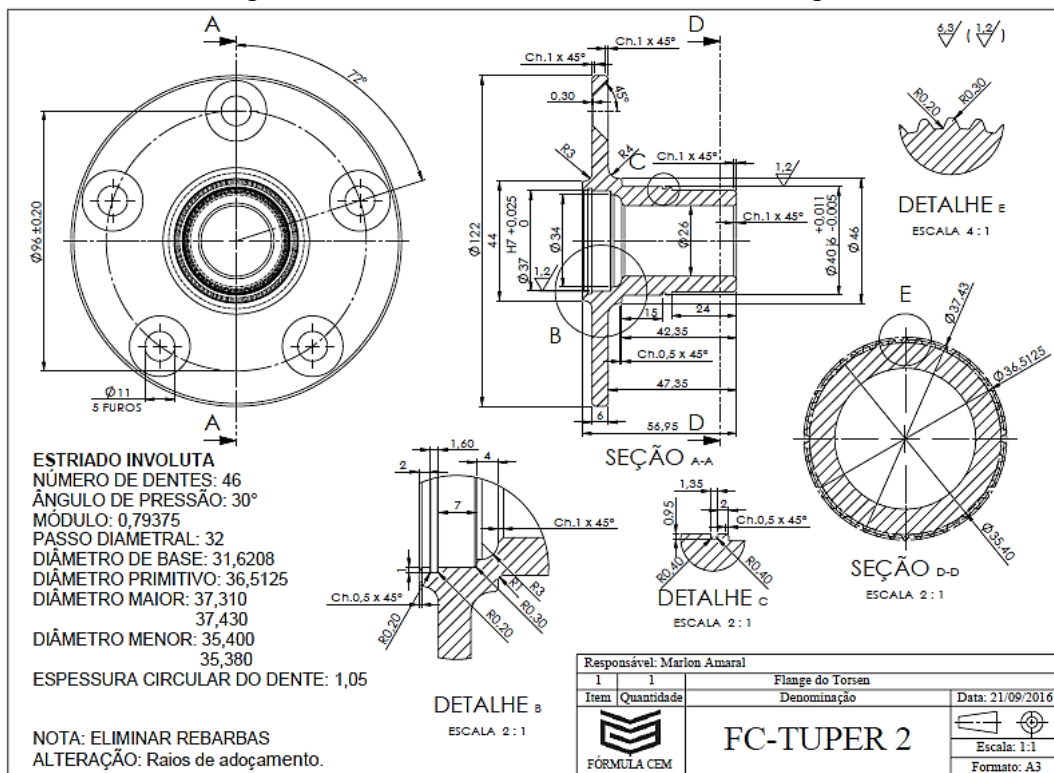
Para avaliar se o componente suporta os esforços aplicados, utilizou-se do critério de falha de Mohr modificado para materiais frágeis, onde pela aplicação da equação 3 obtive-

se um fator de segurança de 5,46. Portanto para a análise realizada é possível afirmar que o elemento suporta os esforços e está superdimensionado.

4.4 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO DETALHADO

Aprovado o protótipo virtual a partir da simulação numérica, iniciou-se o detalhamento do flange para fabricação. Na Figura 22 a seguir é apresentado o desenho técnico do produto.

Figura 22 - Desenho técnico mecânico do flange.



Fonte: O Autor (2020).

Como pode ser visto na Figura 22, tomou-se o cuidado em especificar as tolerâncias dimensionais para o estriado involuta, alojamento dos rolamentos e furações de parafusos, e também o controle de rugosidade na superfície da peça.

4.4.1 Roteiro de fabricação

A fabricação do flange por processo de fundição exigiu a produção de um modelo de fundição, o qual foi criado a partir das dimensões da geometria CAD realizando a

compensação de 0,6% devido a contração do material. O modelo de fundição foi fabricado por manufatura aditiva de Acrilonitrila butadieno estireno (ABS).

Em seguida foram fabricados os moldes de fundição pela indústria metalúrgica parceira, os quais foram produzidos em areia verde. Na sequência uma ligada de ferro fundido nodular ao Cu-Ni contendo 3,7%C, 2,02%Si, 0,58%Cu, 0,04%Ni, e outros elementos de liga em menores proporções foi preparada e vazada no molde, após a solidificação e limpeza se obteve o produto fundido apresentado na Figura 23 a seguir.

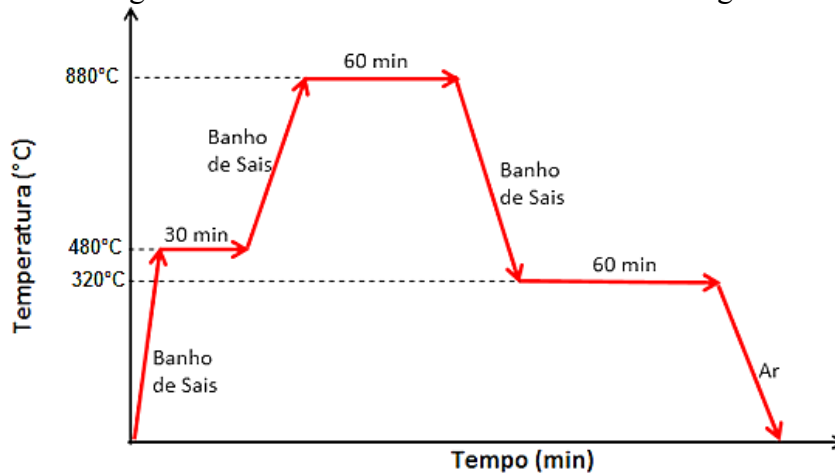
Figura 23 - Matéria prima fundida do flange.



Fonte: O Autor (2020).

Optou-se por realizar o tratamento térmico do fundido antes do processo de usinagem com objetivo de evitar as distorções na geometria final. A curva do tratamento térmico de austêmpera é apresentado na Figura 24 a seguir.

Figura 24 - Curva de tratamento térmico do flange.



Fonte: Adaptado de Rodrigues (2016).

O tratamento de austêmpera foi realizado com uma empresa parceira da equipe. Essa estratégia dificultou a etapa seguinte de usinagem convencional da geometria devido ao aumento da dureza da superfície do fundido.

Para a usinagem das estrias optou-se por utilizar o processo de eletroerosão por penetração, uma vez que somente é necessário a produção de duas peças, uma para aplicação no veículo e outra ficaria de reserva.

A utilização desse processo exigiu a fabricação de um eletrodo em cobre eletrolítico de diâmetro de 2" e comprimento de 30 mm. O perfil involuta da estria foi modelado em software CAD e enviado para empresa parceira de processo de usinagem por eletroerosão, onde por meio de eletroerosão a fio o perfil involuta da estria foi reproduzido na matéria prima de cobre considerando as folgas necessárias requeridas na eletroerosão por penetração.

Finalizado a produção do eletrodo, inicia-se o processo de eletroerosão por penetração.

Finalizado a etapa de eletroerosão por penetração tem-se a geometria final do produto totalmente produzida, esta pode ser vista na Figura 25 a seguir.

Figura 25 - Geometria final do flange produzido.



Fonte: O Autor (2020).

Com a geometria produzida resta realizar a pintura do componente, assim o flange está pronto para montagem no sistema de transmissão do veículo.

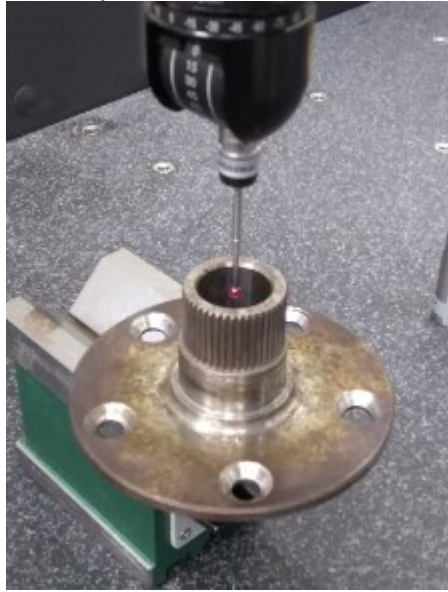
4.5 VERIFICAÇÃO DO ELEMENTO EM USO

Após quatro anos sendo aplicado no sistema de transmissão dos protótipos de veículo a combustão da equipe Fórmula CEM, decidiu-se por realizar uma inspeção no flange, afim de identificar possíveis avarias que impeçam a continuação de sua aplicação. Os testes realizados foram de concentricidade, empenamento, líquido penetrante, além de uma inspeção visual.

No processo de inspeção visual identificou-se uma fina camada de oxidação na peça, nenhuma outra avaria foi diagnosticada. Então realizou-se uma limpeza do elemento com uma palha de aço e um pano.

Finalizado a limpeza, iniciou-se o teste de concentricidade das seguintes regiões do flange: diâmetro maior das estrias, diâmetro do alojamento do rolamento suporte do sistema, diâmetro maior do flange, e diâmetro interno. Com o auxílio de uma máquina de medir por coordenadas modelo CRYSTA-PLUS M574, a mesma pode ser vista na Figura 26 a seguir.

Figura 26 - Avaliação de concentricidade do componente.



Fonte: O Autor (2020).

Adotando o diâmetro das estrias como referência da medição os resultados obtidos indicam um deslocamento de 0,3mm do centro das estrias em relação ao centro dos outros diâmetros da peça. Então trocou-se a região de referência para o diâmetro interno e realizando as medições novamente descartando a região das estrias, a variação de concentricidade foi de 0,01mm. Constatando assim uma possível falha no posicionamento do eletrodo no processo de eletroerosão por penetração.

Após os testes de concentricidade, o flange foi preso em um torno convencional e com o auxílio de um relógio comparador com base magnética verificou-se o empenamento da região onde a coroa é fixada.

Como resultado do teste foi diagnosticado uma variação de 0,1 mm da região mais alta em relação ao eixo longitudinal do flange. Essa variação não possui grande impacto na transmissão de potência por correntes de rolos.

O último teste realizado foi o teste de líquido penetrante utilizado para encontrar possíveis trincas no componente que não são visíveis a olho nu. Regiões da peça com ferrugem ou porosas podem revelar situação que não são reais, devido à dificuldade de remoção do penetrante da peça. Desta forma a região interna e na parte das estrias não foram analisadas.

O teste de líquido penetrante iniciou com a limpeza do flange, em seguida aplicou-se o penetrante visível lavável em água VP 30 sobre a superfície da peça e aguardou-se 10 minutos para a cura do produto.

Passados o tempo de cura, iniciou-se a limpeza da peça com água e pano limpo garantindo com que a mesma ficasse bem seca. Na sequência aplicou-se o produto revelador não aquoso D70 o qual exige um tempo de 30 minutos para reagir.

Passados o tempo de reação iniciou-se a inspeção visual da peça. A Figura 27 a seguir mostra a superfície do flange após 30 min da aplicação do revelador.

Figura 27 - Superfície do flange após a aplicação do revelador.



Fonte: O Autor (2020).

Não foi encontrado nenhuma trinca no componente, esse resultado já era esperado uma vez que materiais frágeis não avisam quando vão falhar, simplesmente entram em colapso se a tensão devido ao carregamento for superior à sua resistência. A respeito da Figura 27, as manchas sobre a peça são regiões de oxidação, as quais mesmo sendo limpas antes do teste absorvem o penetrante que depois revelado.

Após a realização de todos os testes é possível afirmar que para a aplicação do flange, a qual o veículo roda em média 40 km por ano não se faz necessário a substituição do componente devido as variações dimensionais da geometria.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho buscou apresentar a documentação da concepção, desenvolvimento e otimização do flange de acoplamento da coroa, desenvolvido no ano de 2016 para equipar o sistema de transmissão do veículo a combustão da equipe de competição universitária Fórmula CEM, onde na atualidade é aplicado no protótipo modelo 2020.

O trabalho visa principalmente a aplicação da metodologia de Processo de Desenvolvimento Integrado do Produto (PRODIP) para solução do estudo de caso, com foco na execução da macrofase de projeção, a qual é decomposta nas etapas de projeto informacional, conceitual, preliminar e detalhado. O trabalho também propôs avaliar a integridade do componente após 4 anos em serviço e determinar se o mesmo pode continuar sendo utilizado.

A aplicação do modelo PRODIP tornou mais formal e sistemático o desenvolvimento projeto do flange, garantindo com que o novo flange desenvolvido superasse o anterior modelo 2015. No Quadro 10 a seguir é apresentado um comparativo entre os dois modelos.

Quadro 10 - Análise comparativa entre os flanges modelo 2015 e 2016.

Característica/ Subfunção	Flange 2015	Flange 2016
Acoplar a coroa	Flange auxiliar e Flange principal	Flange única com aba maior
Fixar a coroa	Parafuso	Parafuso
Acoplar no diferencial	Estria	Estria
Acoplar o rolamento suporte do sistema	Geometria de eixo circular	Geometria de eixo circular
Fixar o rolamento suporte do sistema	Anel elástico	Anel elástico
Garantir apoio e movimento da tulipa	-	Rolamento
Fixar apoio da tulipa	-	Anel elástico
Material	SAE 4340 - Flange principal SAE 1020 - Flange auxiliar	Ferro Fundido Nodular Austemperado
Principal processo de fabricação	Usinagem	Fundição
Massa	1,114Kg	641g
Quantidade de competições utilizado	1	4

Fonte: O Autor (2020).

O novo conceito do flange eliminou a necessidade de um flange auxiliar para acoplamento da coroa, reduzindo a quantidade de componentes e fixadores do sistema de transmissão, além de facilitar as operações de manutenção do veículo. Com o apoio da tulipa por rolamento e fixação com anel elástico, obteve-se o aumento da segurança e garantia da funcionalidade do sistema de transmissão.

A seleção do ferro fundido nodular austemperado (ADI) como material do flange proporcionou uma redução de 42% da massa do componente, superando a meta de projeto. Outros benefícios proporcionados pela aplicação do ADI são possibilidade da produção em larga escala do componente e a redução da produção de cavaco já que a usinagem é apenas necessária no acabamento da peça.

A utilização de ferramentas computacionais como CAD e CAE contribuíram para a redução de custo e tempo de projeto, eliminando a necessidade de um protótipo físico para teste. No caso da ferramenta CAD foi possível fazer a modelagem da geometria do flange e analisar a sua interação com os demais componentes do sistema de transmissão. E no caso da ferramenta CAE, conseguiu-se realizar o dimensionamento do flange a partir da análise estática de elementos finitos, certificando-se de que o ADI garante a integridade estrutural do componente. A partir dos resultados da simulação numérica foi calculado o fator de segurança do flange, pelo critério de falha de Mohr Modificado para materiais frágeis, sendo o mesmo de 5,46, satisfazendo a meta de projeto, porém torna o componente superdimensionado.

Neste trabalho não foi levantado o custo de produção do componente desenvolvido. Também não se realizou o estudo de tempo gasto para substituição do componente em uma operação de manutenção, tão pouco foi quantificado o seu tempo de produção.

Por fim, da análise realizada do flange que está em operação do período de 2016 a 2020, observou-se apenas uma leve oxidação superficial, além de uma variação de 0,3 mm do centro do estriado para o centro dos demais ressaltos da peça e um leve empenamento de 0,1 mm na região mais alta onde é fixado a coroa. Essas variações dimensionais são consideradas insignificantes para aplicação em um veículo tipo Fórmula SAE, portanto, considera-se o flange apto para continuar sendo utilizado no sistema de transmissão do veículo.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros pode-se citar:

- Realizar uma análise aprofundada do custo de produção do componente;
- Avaliar a vida em fadiga do componente, por método de elementos finitos;
- Realizar testes experimentais no componente utilizando extensômetro.

REFERÊNCIAS

- ALVES FILHO, Avelino. **Elementos finitos: a base da tecnologia cae**. São Paulo: Érica, 2000.
- BACK, Nelson et al. **Projeto Integrado de Produtos: planejamento, concepção e modelagem**. Barueri, SP: Manole, 2008. 601 p.
- BIRCH, Tom; ROCKWOOD, Chuck. **MANUAL DRIVETRAINS AND AXLES**. 5. ed. Califórnia: Pearson Prentice Hall, 2008. 531 p.
- BIRRENTO, Ricardo Jorge Pernes. **PROJECTO DE UM SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE UM VEÍCULO DE COMPETIÇÃO FORMULA STUDENT**. 2008. 323 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial, Faculdade de Ciências e Tecnologia Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2008. Cap. 2.
- BRASIL, SAE. **Fórmula SAE Brasil**. Disponível em: <<http://portal.saebrasil.org.br/programas-estudantis/formula-sae-brasil>>. Acesso em: 23 abr. 2019.
- BRASIL, SAE. **SAE no Brasil**. Disponível em: <<http://portal.saebrasil.org.br/a-instituicao>>. Acesso em: 23 abr. 2019.
- BOSCH, R. Manual de tecnologia automotiva. Tradução da 25ª edição alemã. P. 738. São Paulo. Editora Blücher. 2005.
- BUDYNAS, Richard G.; NISBETT, J. Keith. **Elementos de Máquinas de SHIGLEY**. 10. ed. Porto Alegre: AMGH, 2016. 1073 p. Tradução: João Batista de Aguiar, José Manoel de Aguiar, José Benaque Rubert.
- CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros Fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos**. 7. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008. 599 p.
- CLAFFEY, Justin. **Motorcycle Drivetrain**. 2020. Disponível em: <https://in.pinterest.com/pin/507710557966945170/>. Acesso em: 14 abr. 2020.
- CROLLA, David A.. **Automotive Engineering: Powertrain, Chassis System and Vehicle Body**. New York: Elsevier, 2009. 827 p.
- ESPECIAIS, Tenax Aços. **SAE 4140**. 2020. Disponível em: <https://www.tenax.com.br/tenax/produtos/acos-para-construcao-mecanica/sae-4140/>. Acesso em: 15 nov. 2020.
- FOUNDRY, Reliance. **Cast Iron vs Cast Steel: what's the difference between cast iron and cast steel?**. Disponível em: <https://www.reliance-foundry.com/blog/cast-iron-vs-cast-steel#gref>. Acesso em: 26 mar. 2020.

GENTA, Giancarlo; MORELLO, Lorenzo. **The Automotive Chassi: Components Design**. Torino: Springer, 2009. 627 p.

KOTTHAUS, Hugo. **Técnica da Produção Industrial: materiais metálicos.materiais auxiliares**. 2. ed. São Paulo: Polígono, 1972. 205 p. Tradução: Eng. Hörst L. A. Daar.

NAUNHEIMER, Harald et al. **Automotive Transmissions: Fundamentals, Selection, Design and Application**. 2. ed. Berlin: Springer, 2011. 715 p.

NICKEL, Elton Moura et al. **Modelo multicritério para referência na fase de projeto Informacional do Processo de Desenvolvimento de Produtos**. 2010. 14 f. Artigo - Curso de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

NOFAL, A. A.; JEKOVA, L.; **Novel processing techniques and applications of austempered ductile iron**. Journal of the university of chemical technology and metallurgy V. 44, p213-228, 2009.

NORTON, Robert L. **Projeto de Máquinas: uma abordagem integrada**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 1028 p.

REVISTA ALUMÍNIO: Conteúdo, Inovação, Tecnologia e Sustentabilidade. São Paulo: Verbus Comunicação, n. 53, 13 jul. 2018. Quadrimestral. Disponível em: <https://revistaaluminio.com.br/edicao/edicao-53/>. Acesso em: 16 mar. 2020

RODRIGUES, Ronaldo Bandeira. **MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UM FERRO FUNDIDO NODULAR AO Cu E Ni+Cu SOB CONDIÇÕES VARIÁVEIS DE AUSTÊMPERA**. 2016. 105 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Engenharia Mecânica, Centro Universitário Sociesc – Unisociesc, Joinville, 2016.

ROMANO, Leonardo Nabaes. **Modelo de referência para o processo de desenvolvimento de máquinas agrícolas**. 2003. 266 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

ROMEIRO FILHO, Eduardo et al. **Projeto do Produto**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010. 376 p.

ROZENFELD, Henrique et al. **Gestão de Desenvolvimento de Produtos: uma referência para a melhoria do processo**. São Paulo: Saraiva, 2006. 542 p.

SCA. **The Environmental Impact of Aluminum: and why it's still better than plastic**. 2019. Disponível em: <https://www.thesca.org/connect/blog/environmental-impact-aluminum>. Acesso em: 17 mar. 2020.

SILVA, André Luiz V. da Costa e; MEI, Paulo Roberto. **Aços e ligas especiais**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2010. 646 p.

ULLMAN, David G. **The mechanical design process**. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2010.