



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA – UFPB
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

CAIO ROMMEL FALCÃO FRANÇA

**PROJETO DA PONTA DE EIXO DO PROTÓTIPO FUFPB04 DA EQUIPE
FÓRMULA UFPB**

**JOÃO PESSOA
2018**

CAIO ROMMEL FALCÃO FRANÇA

**PROJETO DA PONTA DE EIXO DO PROTÓTIPO FUFPPB04 DA EQUIPE
FÓRMULA UFPB**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica de João Pessoa do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba como requisito parcial da obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Dr. Koje Daniel Vasconcelos Mishina.

**JOÃO PESSOA
2018**

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

F814p Franca, Caio Rommel Falcao.

Projeto da Ponta de Eixo do Protótipo FUFPB04 da Equipe
Fórmula UFPB / Caio Rommel Falcao Franca. - João
Pessoa, 2018.

74 f. : il.

Orientação: Kojé Vasconcelos Mishina.
Monografia (Graduação) - UFPB/CT.

1. Fórmula SAE. 2. Fórmula UFPB. 3. Suspensão. 4. Ponta
de Eixo. 5. HUB. I. Vasconcelos Mishina, Kojé. II.
Título.

UFPB/BC

CAIO ROMMEL FALCÃO FRANÇA

**PROJETO DA PONTA DE EIXO DO PROTÓTIPO FUFPB04 DA EQUIPE
FÓRMULA UFPB**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica de João Pessoa do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba como requisito parcial da obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

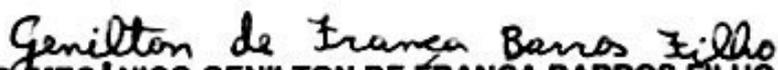
Orientador: Dr. Koje Daniel Vasconcelos Mishina.

DATA DA APROVAÇÃO: 08 DE NOVEMBRO DE 2018.

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. KOJE DANIEL VASCONCELOS MISHINA
(ORIENTADOR)


Prof. Dr. JACQUES CESAR DOS SANTOS
(AVALIADOR)


ENG. MECÂNICO GENILTON DE FRANÇA BARROS FILHO
(AVALIADOR)

**Dedico esse trabalho aos meus pais, que
abandonaram seus sonhos e sonham os
meus desde que existo.**

AGRADECIMENTOS

Não foi fácil chegar até aqui. E não foram poucas as pessoas que me ajudaram nessa árdua caminhada.

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus, que mesmo sem precisar, mostrou sua existência em muitos momentos da minha vida. Toda honra e glória a Ele.

Na pessoa do meu orientador, Professor Dr. Koje Daniel Mishina, do Professor Dr. Jacques Cesar Dos Santos, e do meu colega Genilton, agradeço a todos os professores e colaboradores que se mostraram verdadeiros mestres e contribuíram de diversas formas na minha formação como pessoa e profissional.

Além dos professores, gostaria de agradecer ao projeto Fórmula UFPB, que mesmo não sendo mais integrante, sempre me acolheu de braços abertos. Meu muito obrigado ao capitão Bruno Paulino e toda a equipe EDA.

Agradeço também aos meus pais, Clovis França da Silva e Cláudia Falcão França, e a todos os meus familiares que contribuíram sempre com palavras de apoio e orações. Entre eles: meus tios Carlos Tarcisio e Josinilda; meus primos Raquel, Érika e Tarcisio; e meus avós Severino, Josué, Zuleide e Lindalva.

Um muito obrigado a minha namorada Aline, que sempre me deu forças e acreditou em mim.

Sou grato a todos os meus amigos de escola e faculdade, que fizeram parte de cada passo que dei nessas duas etapas da minha vida, sempre dividindo as conquistas e dificuldades.

Por fim, gostaria de agradecer a todos que colaboram de alguma forma para que eu chegasse até aqui.

**“Give me my badge and gun
Give me that road that I may run
Give me that peaceful, wandering free I used
to know”
John Mayer**

RESUMO

O projeto de uma ponta de eixo é de considerável importância no contexto de uma suspensão de um veículo de Formula SAE, visto que a taxa de quebras nesse componente é relativamente alta em competições da SAE pelo mundo. Portanto, a motivação para esse trabalho é trazer e expor o caminho seguido pelo autor ao projetar uma nova ponta de eixo para o projeto Formula UFPB, tentando assim facilitar o entendimento desse tipo de projeto de forma mais direcionada a conjuntura a qual esse HUB foi aplicado. Para isso, fez-se uso de um breve estudo da instituição SAE, assim como se abordou as regras criadas por essa para as competições de Formula SAE, buscou-se fundamentação teórica em autores como o Milliken e Shigley, e, por fim, desenvolveu-se o projeto através desses conhecimentos e do software SolidWorks. Os resultados encontrados foram positivos e puderam ser aplicados, concluindo que os aprendizados puderam ser usados com eficiência.

Palavras-chave: Formula SAE. Formula UFPB. Suspensão. Ponta de Eixo. HUB.

ABSTRACT

Since the rate of breaks in this component is relatively high in SAE competitions around the world, the design of a HUB has considerable importance in the context of a Formula SAE vehicle suspension. Therefore, the motivation for this monography is to bring and expose the path followed by the author when designing a new HUB for the Formula UFPB project, trying to facilitate the understanding of this kind of project in a way more applied to the conjuncture which this HUB was created. For that, a brief study of the SAE institution was made, as well as the rules created by it for the Formula SAE competition. Also works from authors as Milliken and Shigley were studied and exposed in a way to justify the HUB that was designed, and finally the Project was developed through this knowledge and by the use of the SolidWorks software. The results were positive and could be applied, concluding that the learning was efficient.

Palavras-chave: Formula SAE. Formula UFPB. Suspension. HUB.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – UFSC Puma e UFSC Jaguar, ambos participantes da etapa 2013 da competição Baja SAE Brasil	18
Figura 2 – Aero modelo vencedor da competição SAE Brasil na categoria Advanced da equipe Leviatã	19
Figura 3 – Protótipo da equipe da CSUN na competição americana de Lincoln - NE	20
Figura 4 – Protótipo da equipe Formula UFPB realizando testes	24
Figura 5 – Suspensão do Mercedes AMG 007 em ação no autódromo de Suzuka ..	27
Figura 6 – Diferença entre suspensão independente e não independente	28
Figura 7 – Suspensão McPherson.....	29
Figura 8 – Suspensão Duplo-A	30
Figura 9 – Suspensão multilink	31
Figura 10 – Push-rod	33
Figura 11 – Pull-rod.....	34
Figura 12 – Suspensão pull-rod no F2012	35
Figura 13 – Posicionamento da terceira mola e barra anti rolagem	36
Figura 14 – Cambagem.....	37
Figura 15 – Caster.....	38
Figura 16 – Ângulo do pino mestre.....	38
Figura 17 – Toe in e Toe out.....	39
Figura 18 – Ilustração das variáveis da equação de deflexão.....	42
Figura 19 – Ponta de Eixo de bólido da equipe Ferrari na Formula 1.....	48
Figura 20 – Ponta de Eixo de um Formula SAE	49
Figura 21 – Montagem da suspensão dianteira do Formula UFPB de 2014	50
Figura 22 – Montagem da suspensão traseira do Formula UFPB de 2014	51
Figura 23 – Ponta de Eixo dianteira do FUFPPB de 2014	51
Figura 24 – Ponta de Eixo traseira do FUFPPB de 2014	52
Figura 25 – Seções da Ponta de Eixo dianteira de 2014 da equipe Formula UFPB ..	53
Figura 26 – Flange de encaixe da roda	53
Figura 27 – Flange de acoplamento do sistema de freio	54

Figura 28 – Seções da Ponta de Eixo traseira de 2014 da equipe Formula UFPB ...	54
Figura 29 – Flange de transmissão de torque	55
Figura 30 – Esboço da Ponta de Eixo dianteira de 2014	57
Figura 31 – Esboço da Ponta de Eixo traseira de 2014	57
Figura 32 – Ponta de Eixo dianteira proposta	58
Figura 33 – Ponta de Eixo traseira proposta	58
Figura 34 – Seções da Ponta de Eixo dianteira proposta	59
Figura 35 – Seções da Ponta de Eixo traseira proposta	60
Figura 36 – Esboço da Ponta de Eixo dianteira proposta	62
Figura 37 – Esboço da Ponta de Eixo traseira proposta	63
Figura 38 – Simulação da Ponta Dianteira Engastada	64
Figura 39 – Resultados da Simulação da Ponta Dianteira Engastada	64
Figura 40 – Simulação de Frenagem da Ponta de Eixo Dianteira	65
Figura 41 – Resultados da Simulação de Frenagem da Ponta Dianteira	65
Figura 42 – Resultados da Simulação de Fadiga da Ponta Dianteira	66
Figura 43 – Simulação de Torque da Ponta de Eixo Traseira	67
Figura 44 – Resultados da Simulação de Torque da Ponta Traseira	67
Figura 45 – Simulação da Ponta Traseira Engastada	68
Figura 46 – Resultados da Simulação da ponta traseira engastada	69
Figura 47 – Resultados da Simulação de Fadiga da Ponta Traseira	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Provas estáticas.....	21
Tabela 2 – Provas dinâmicas	23
Tabela 3 – Propriedades Aço 4340	56
Tabela 4 – Resumo das características das pontas antigas	56
Tabela 5 – Propriedades Aço 1045	61
Tabela 6 – Resumo das características das pontas	62

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 JUSTIFICATIVA	14
1.2 OBJETIVOS	15
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	15
2 SAE	16
2.1 SAE INTERNATIONAL	16
2.2 SAE BRASIL	17
2.3 COMPETIÇÃO FORMULA SAE.....	20
2.3.1 Histórico	20
2.3.2 Regras e Etapas	21
2.4 FÓRMULA UFPB	24
2.4.1 Subequipes	25
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	26
3.1 SUSPENSÃO VEICULAR	26
3.1.1 Tipos de suspensão veicular	28
3.1.2 Suspensão do tipo duplo-A num carro de formula	31
3.2 PROJETO DE EIXO	39
3.2.1 Seleção de material	40
3.2.2 Critérios de Deflexão	41
3.2.3 Critério Estático	42
3.2.4 Critério de Fadiga	43
3.2.5 Velocidade Crítica	44
3.2.6 Eixo Vazado	45
4 PROJETO DA PONTA DE EIXO	47
4.1 PONTA DE EIXO	47
4.2 DISPOSIÇÃO DOS COMPONENTES DAS SUSPENSÕES TRASEIRA E DIANTEIRA DO FORMULA UFPB 2014.....	50
4.3 PROJETO ANTERIOR DA PONTA DE EIXO	51
4.3.1 Geometria	52
4.3.2 Material	55
4.4 PROJETO DA PONTA DE EIXO DO ANO DE 2015	57
4.4.1 Geometria	59

4.4.2 Material	61
4.5 SIMULAÇÃO PROJETO DA PONTA DE EIXO	63
4.5.1 Simulações nas Pontas de Eixo Dianteiras	63
4.5.2 Simulações nas Pontas de Eixo Traseiras	66
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	71
REFERÊNCIAS	73

1 INTRODUÇÃO

Em um projeto de qualquer componente de um veículo automotor, é necessário que se avalie as condições às quais esse carro vai ser submetido. Não é diferente na criação de uma peça mecânica para um veículo de competição do tipo fórmula SAE.

Ao pensar na geometria e dimensionamento de uma ponta de eixo, o projetista leva em consideração a influência das situações propostas pela SAE nas competições e busca traduzir isso em decisões tomadas na concepção do componente, dadas as ferramentas que ele e sua equipe possuem para tal.

Portanto, nesse trabalho tenta-se expor todas as fases da criação de ponta de eixo para o monoposto de 2015 da equipe Fórmula UFPB, assim como as situações que o veículo e o componente estudado nessa monografia serão expostos.

1.1 JUSTIFICATIVA

A exposição do projeto da ponta de eixo através desse trabalho de conclusão de curso se justifica pela falta de artigos ou literatura nesse sentido. São muitos os livros que abordam o assunto da dinâmica veicular e até da análise de elementos mecânicos, porém, nota-se que ao ser desafiado a projetar um componente de um veículo do tipo Fórmula SAE, a exemplo do que é apresentado neste presente trabalho, não se encontram muitas fontes bibliográficas específicas. Isso pode ser explicado pela rivalidade entre equipes de Fórmula SAE, que por disputarem um campeonato anualmente, não se torna interessante o compartilhamento de todos os passos do processo do projeto da peça.

Por outro lado, também foi importante a realização desse projeto devido à necessidade de resolução de problemas que foram causados pelos erros do projeto anterior. Situações em que não foi possível substituir as rodas do veículo por problemas na ponta de eixo foram comuns, por exemplo; e esse TCC procura expor cada falha que essa peça possuía e suas consequências para o carro, além de mostrar solução encontrada para essas falhas.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo do autor nesse texto é expor o contexto em que um estudante de graduação em Engenharia Mecânica está inserido como membro da subequipe de suspensão de um projeto de Fórmula SAE. Fazendo isso através da exposição do processo de idealização de uma nova ponta de eixo.

Nesse trabalho será mostrado que o projeto de um componente dentro de uma equipe de Fórmula SAE nem sempre pode ser baseado na busca pelo projeto mais avançado e com o material mais adequado para tal. A realidade de um projeto numa universidade pode se mostrar ainda mais desafiador. Em uma circunstância como essa, o estudante tem uma imensa barreira representada pelo orçamento da equipe e pelas ferramentas que possui para que se construa essa peça. Logo, ao discorrer sobre a forma com que a nova peça foi pensada, o autor tentará justificar cada escolha tomada em coerência com as possibilidades dentro de suas condições.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Esse trabalho será dividido em três capítulos. No primeiro, será dissecada toda a estrutura da SAE, desde a SAE International até a equipe Fórmula UFPB. Já o segundo, servirá de fundamentação teórica, expondo o embasamento necessário para que se tenham condições de projetar uma ponta de eixo. E, por último, o projeto antigo será exposto com os seus problemas, assim como o novo projeto proposto, suas soluções e as devidas simulações para se comprovar sua funcionalidade.

2 SAE

Nesse capítulo será abordada a estrutura da entidade responsável pela administração da competição Fórmula SAE. Essa instituição possui vasta importância para as equipes e estudantes de engenharia automotiva e os mesmos devem estar sempre a par de sua hierarquia e suas funcionalidades. Nesse momento será exposta de forma não aprofundada a história da SAE, sua importância para indústria e para o âmbito acadêmico, além de suas atribuições nesses meios. Em seguida, irá se discorrer sobre a filial brasileira da SAE e o evento da categoria Fórmula. Por fim, será dissecada a estrutura da equipe Fórmula UFPB, explorando seus subsistemas e abordando o de suspensão de forma especial, visto que, entender esse subsistema é fundamental para que se compreenda a fundamentação teórica para o projeto de uma ponta de eixo, exposta no capítulo seguinte.

2.1 SAE INTERNATIONAL

A SAE International é uma organização internacional, com 138 mil associados, fundada em 1905 por nomes como Henry Ford e Thomas Edison, responsável pela criação e padronização de várias normas que competem aos setores automotivo e aeroespacial no mundo todo. Esses associados são agraciados pela organização com conteúdo técnico de qualidade e padrões consensuais voluntários desenvolvidos pela SAE (Society of Automotive Engineers). Esse conteúdo e padrões chegam aos associados através de revistas da organização, como a *Automotive Engineering International*, *Aerospace Engineering* e *Off Highway Engineering*, que em conjunto com as publicações técnicas, históricas e estatísticas que seus clientes têm acesso, informam a comunidade da mobilidade sobre os avanços recentes nesse setor.¹

Além de se dispor como uma excelente geradora de conteúdo e fonte para consumo do mesmo, a SAE International tem uma ramificação que busca incentivar estudantes de diversos níveis escolares a se interessar pelo conhecimento científico e matemático e pela engenharia. No campo universitário, a

¹ SAE BRASIL. **SAE no mundo**. Disponível em: <<http://portal.saebrasil.org.br/programas-estudantis/baja-sae-brasil>> Acesso em: 12 de julho de 2018. n.p.

SAE organiza 12 eventos que possibilitam que estudantes de diversas graduações testem e coloquem em prática seus aprendizados, possibilitando que eles projetem, criem e testem veículos. Dentre as competições da SAE estão a Formula SAE, SAE Mini Baja e AeroDesign SAE.²

Em 1991, a SAE fundou a sua primeira filial, a SAE Brasil, que já iniciou suas atividades com 1500 membros e com um congresso anual.³

2.2 SAE BRASIL

O ponto inicial para que se criasse a instituição SAE Brasil foi dado por empresários dos setores automotivo e aeroespacial, entre eles: Carlos Buechler, Luc de Ferran, Bernd Wiedmann, Ferdinand Panik, Flaminio Leme e Fábio Braga. Isso se deu graças à consciência desses executivos de que o Brasil precisava de uma organização que gerasse conhecimento para os profissionais e estudantes das mobilidades terrestre, aeroespacial e ferroviária.⁴

A missão, a visão e os valores da SAE Brasil estão bem definidas em seu site oficial. A missão da mesma é promover a disseminação da tecnologia e o progresso da mobilidade. Já sua visão é se tornar referência na tecnologia da mobilidade, e para isso busca incentivar os estudantes a se aperfeiçoarem na teoria e na prática, além de qualificar os profissionais da área; realiza eventos e estimulando publicações para que aja um alastramento do conhecimento e da normalização; cria políticas públicas e estratégias em geral; e propicia o networking. Por fim, seus valores são: excelência, aprimoramento, consenso, foco no cliente, transparência, ética, networking e respeito ao meio ambiente.⁵

Uma importante vertente da SAE Brasil é a organização de eventos que fomentam o aprendizado e a disseminação de conhecimentos referentes à engenharia automotiva e tantos outros temas, inclusive ligados à gestão. Através dessas competições, a organização interliga estudantes de todas as regiões do país para disputarem entre si, provocando um intercâmbio natural de informações entre eles e capacitando os mesmos para o mercado de trabalho através da aplicação na

² Ibidem.

³ Ibidem.

⁴ SAE BRASIL. **SAE no Brasil**. Disponível em: <<http://portal.saebrasil.org.br/a-instituicao/sae-no-mundo>> Acesso em: 17 de julho de 2018. n.p.

⁵ Ibidem.

prática dos conhecimentos aprendidos em sala de aula. As competições organizadas pela SAE, em nível de estudantes de graduação, são a Baja SAE, Formula SAE (FSAE) e AeroDesign SAE.

O projeto Baja SAE (Figura 1) surgiu no Brasil em 1994 e já no ano seguinte teve sua primeira competição. É a mais antiga competição de engenharia organizada pela SAE no Brasil e possui, inclusive, ramificações regionais do evento, que já foram realizadas em vários estados do país. Nessas competições, o participante do projeto de sua instituição de ensino superior tem chance de projetar, construir, testar e competir com veículo do tipo off road.⁶

Figura 1 – UFSC Puma e UFSC Jaguar, ambos participantes da etapa 2013 da competição Baja SAE Brasil



Fonte: <http://noticias.ufsc.br/2013/03/equipe-ufsc-baja-sae-conquista-vaga-para-o-mundial-nos-estados-unidos/> acesso em 19/07/2018

Já a competição AeroDesign SAE (Figura 2) induz os estudantes das equipes participantes a estudar e conhecer os princípios da engenharia aeronáutica, utilizando-os na construção de aeromodelos projetados para transportar um certo peso, dependendo da categoria do protótipo. Assim como em outras competições organizadas pela SAE no Brasil, os participantes precisam gerir o projeto em todos os seus aspectos, inclusive o financeiro, fazendo os conhecimentos aprendidos irem

⁶ SAE BRASIL. **Baja SAE Brasil**. Disponível em: <<http://portal.saebrasil.org.br/a-instituicao/sae-no-mundo>> Acesso em: 19 de julho de 2018. n.p.

além da engenharia e se tornando um conhecimento extracurricular importante na formação do engenheiro.⁷

Figura 2 – Aero modelo vencedor da competição SAE Brasil na categoria Advanced da equipe Leviatã



Fonte: <http://www.ita.br/noticias/equipeleviatvencesaeerodesignnaclasseadvanced/> acesso em 19/07/2018

Por fim, a competição Fórmula SAE visa submeter os estudantes das equipes participantes a pensar, projetar, construir e defender seu projeto de um veículo do tipo fórmula, tanto na pista quanto em provas estáticas, e apresentar relatórios. Nessa competição, não é julgado apenas o melhor carro, mas os juízes especializados avaliam também a possibilidade e a viabilidade da produção desses protótipos para comercialização. Na Figura 3 está ilustrado um protótipo de um Fórmula SAE.

⁷ PORTAL ITA. **Equipe Leviatã vence SAE Aero design na classe Advanced**. Disponível em: <<http://www.ita.br/noticias/equipeleviatvencesaeerodesignnaclasseadvanced/>> Acesso em: 19 de julho de 2018. n.p.

Figura 3 – Protótipo da equipe da CSUN na competição americana de Lincoln - NE



Fonte: <https://csunshinetoday.csun.edu/university-news/matador-motorsports-finishes-12th-at-formula-sae-competition/> acesso em 19/07/2018

2.3 COMPETIÇÃO FORMULA SAE

Entender as motivações, a iniciação e o funcionamento da competição a qual a equipe Fórmula UFPB participa anualmente, é de fundamental importância para que se saiba o que se almeja na construção, no projeto e até mesmo na compra de uma peça ou componente de um Fórmula SAE. Portanto, essas informações são importantes para a construção lógica deste trabalho.

2.3.1 Histórico

A história da Fórmula SAE começou em 1981 devido a uma carência de engenheiros automotivos nos Estados Unidos. Em consequência disso, as grandes montadoras de veículos americanas na época; General Motors, Chrysler e Ford; decidiram criar uma competição visando absorver engenheiros especializados e qualificados para atuar na área. A iniciativa deu tão certo que o apoio e a satisfação da empresa com os engenheiros contratados foram se fortalecendo com o tempo, gerando na empresa o interesse de investir ainda mais na competição, incentivando as mesmas a criar produtos destinados especialmente para o Fórmula SAE.⁸

⁸ SAE BRASIL. **Fórmula SAE Brasil**. Disponível em: < <http://portal.saebrasil.org.br/programas-estudantis/formula-sae-brasil> > Acesso em: 24 de julho de 2018. n.p.

Com o passar do tempo, a competição foi se expandindo e eventos em outros países, como Itália e Alemanha, foram criados. No Brasil, a competição existe desde 2004 e acontece atualmente em Piracicaba – SP no autódromo do ECPA (Esporte Clube Piracicabano de Automobilismo).⁹

Em 2012, a categoria de carros elétricos foi adicionada a competição.

2.3.2 Regras e Etapas

Visto que a SAE, ao avaliar as equipes participantes, toma como base a contratação de uma equipe de Fórmula SAE por uma empresa fictícia com o objetivo de produzir em massa os protótipos, é razoável que se crie uma série de regras as quais esse novo veículo deve seguir e que algumas avaliações sejam pensadas com o objetivo de medir as qualidades desse monoposto.

Essas regras estão todas dispostas em um documento liberado pela SAE anualmente para cada competição. Nela, são exibidas tanto as condições e pré-requisitos os quais o carro deve se submeter para se mostrar apto a participar da competição, como também as etapas as quais o protótipo e os participantes das equipes vão competir para serem avaliados pelos juízes. Além disso, algumas exigências constadas na regra são feitas aos estudantes para que possam participar da competição, como por exemplo, ser associado a SAE e estar matriculado em um curso de graduação ou pós-graduação.

As Etapas da competição são divididas em provas estáticas – envolvendo inspeções e apresentações - e provas dinâmicas.

As provas estáticas e suas pontuações estão mostradas na Tabela 1.

Tabela 1 – Provas estáticas

Etapa	Pontos
Inspeção técnica	0 pontos
Custos e Manufatura	100 pontos
Apresentação	75 pontos
Design	200 pontos

Fonte: <https://www.fsaeonline.com/content/2017-18%20FSAE%20Rules%209.2.16a.pdf> acesso em

26/10/2018

⁹ Ibidem.

A inspeção técnica é uma etapa da competição que não soma pontos pois, não é de caráter classificatório, ou seja, o protótipo da equipe precisa cumprir os pré-requisitos para que possa continuar normalmente na competição. Caso o protótipo não cumpra as restrições, ele não poderá disputar as provas dinâmicas. Essa etapa é a primeira realizada pelas equipes e é subdividida em Inspeção elétrica e mecânica; Tilt Table, em que o carro é submetido a uma inclinação de 45° para que se garanta que não há vazamento de fluido, e depois, a uma inclinação de 60° para se avaliar a possibilidade de capotagem; Teste de ruído; Teste de frenagem; entre outros. A inspeção técnica tem como principal objetivo garantir que as equipes projetaram e construíram seu carro de acordo com as regras impostas pela SAE.

Já na Prova de Custos e Manufatura as equipes e seus integrantes devem preparar um relatório no qual estão expostos todos os gastos referentes aos processos de manufatura e compra de materiais realizados na fabricação do Fórmula. Primeiramente, a equipe deve enviar o relatório para a organização da competição para que ele seja analisado previamente; na competição os juizes se juntam aos integrantes da equipe ao redor do carro para discutir o preço do carro e para testar a habilidade deles em costear os processos; e por ultimo, os estudantes serão submetidos a um desafio relacionado ao custeamento ou manufatura do seu veículo. Essa etapa pode ser bastante dispendiosa para as equipes devido ao alto nível de detalhamento exigido no relatório de custos, principalmente para subequipes mais complexas. Os integrantes da equipe responsáveis pelo feitiço desse relatório devem levar em conta o custo do tarugo maciço e do material perdido na usinagem de um eixo, por exemplo; e tudo isso é cobrado para que os integrantes busquem um projeto o mais benéfico possível e evitem ao máximo o desperdício de material.

Na etapa de Apresentação a equipe vai tentar provar aos juizes, que nessa ocasião estarão simulando executivos de uma empresa, que o monoposto que idealizaram e construíram é rentável para uma suposta fabricação em massa e colocação no mercado. Obviamente, nessa etapa, os estudantes devem seguir em coerência com o que foi apresentado na prova de custos e design.

Por fim, a etapa estática mais importante em termos de pontuação, a Prova de Design. Ela consiste em avaliar as habilidades dos participantes das equipes como engenheiros projetistas, analisando o desempenho do veículo e seu

custo geral de fabricação, relacionando-os com a posição em que ele será inserido no mercado. A equipe deve enviar à organização da competição o Relatório de Design para que os juízes possam analisá-lo previamente. Esse documento deve conter uma descrição do veículo discutindo suas novidades e conceitos, tentando explicar o que foi pensado e o embasamento utilizado pelos integrantes para justificar as tomadas de decisões. Também devem estar contidos nesse documento desenhos do veículo de cima, baixo e da lateral. Além do relatório de Design, é exigido também das equipes o Design Spec Sheet, folha que expõe as características gerais do carro como dimensões, centro de massa e massa.

As provas dinâmicas e suas pontuações estão mostradas na Tabela 2.

Tabela 2 – Provas dinâmicas

Etapa	Pontos
Aceleração	100 pontos
Skid Pad	75 pontos
Autocross	125 pontos
Eficiência	100 pontos
Endurance	225 pontos

Fonte: <https://www.fsaeonline.com/content/2017-18%20FSAE%20Rules%209.2.16a.pdf> acesso em 26/10/2018

A prova de aceleração avalia a capacidade do carro em acelerar em linha reta. O carro percorre 75 metros, partindo do repouso, e aquele que completar o percurso em menos tempo terá a melhor pontuação na prova. Além disso, seu tempo servirá de referência para calcular a pontuação das outras equipes.

No Skid Pad, o carro fará um percurso predeterminado numa pista em formato de “8”. O objetivo dessa prova é avaliar a capacidade do monoposto em fazer curvas de raio constante e as equipes são pontuadas de acordo com o tempo que completam a prova.

Já o Autocross tem como objetivo testar o veículo em condições dinâmicas de pista como aceleração, frenagem e curvas. O piloto vai ter que mostrar que o carro está bem equilibrado e que ele tem total domínio sobre ele. Para isso, ele tem que marcar um bom tempo de volta e se manter na pista, que chega a ter largura de três metros e meio em alguns trechos, sem derrubar ou deslocar nenhum cone – evitando ser penalizado. Cada equipe terá duas chances de realizar a prova

com cada piloto (dois pilotos poderão competir nessa etapa), e a volta com melhor tempo final será utilizada como referência para definir pontuação da equipe.

A principal etapa do evento é o Endurance, em que o carro é levado às condições mais críticas, tendo suas qualidades e defeitos, muito provavelmente, expostos. O piloto deve levar o carro até o fim da prova de vinte e dois quilômetros sem que ele sofra nenhum tipo de pane, inclusive pane seca; ou tenha peça solta na pista para que consiga uma boa pontuação.

A prova de Eficiência é feita em paralelo com o Endurance. Ao final dessa etapa, será medida a quantidade de combustível consumido para que se sinalize o carro mais eficiente, que naturalmente vence a prova.

2.4 FÓRMULA UFPB

A equipe Fórmula UFPB foi fundada em 2008, por estudantes do curso de engenharia mecânica da Universidade Federal da Paraíba, com o objetivo de aprimorar seus conhecimentos na área de engenharia automotiva. O primeiro protótipo foi construído para a competição de 2010 e desde então a equipe vem tentando aprimorar sua estrutura e projetos para crescer na competição. O modelo do ano de 2016 está exposto na Figura 4.

A equipe é dividida em três áreas: projeto, manufatura e administração; e a área de projeto, responsável pelo conhecimento técnico e por “pensar” o monoposto é subdividida em cinco subequipes.

Figura 4 – Protótipo da equipe Formula UFPB realizando testes



Fonte: <http://equipeformulaufpb.wixsite.com/formulaufpb/quem-somos> acesso em 26/10/2018

2.4.1 Subequipes

A equipe responsável pela realização dos projetos é dividida em:

- **Estrutura:** Equipe responsável pela parte estrutural e aerodinâmica do protótipo. Desde o início do projeto, optou-se pelo uso de uma estrutura tubular em detrimento do monocoque, principalmente por ser a opção mais barata.
- **Suspensão:** Os integrantes dessa subequipe são responsáveis pelo projeto da geometria de suspensão, bandejas, montantes, balancins, pontas de eixo, entre outros componentes da suspensão em si. Além disso, o projeto da direção do Fórmula também é pensado por esses estudantes. O principal objetivo na concepção desse subsistema é buscar manter sempre o contato dos pneus com o solo, visando segurança e máxima possibilidade de tração e frenagem do carro.
- **Freio:** Subsistema responsável por parar o carro com eficiência que deve ser capaz de travar as quatro rodas do carro numa frenagem mais brusca, isso para que o carro consiga passar pela prova de frenagem exigida pela SAE.
- **Transmissão:** Subequipe encarregada de selecionar a motorização e ajustar alguns componentes ligados ao motor, como os sistemas de admissão e transmissão.
- **Elétrica:** Os integrantes da equipe do sistema elétrico são incumbidos do projeto, compra e/ou programação de todos os itens elétricos e eletrônicos do protótipo. O projeto de um sistema de câmbio automatizado, por exemplo, é naturalmente idealizado pela subequipe de elétrica.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para que se possa chegar ao projeto em si da ponta de eixo, são necessários que alguns assuntos sejam explorados a título de fundamentação teórica. Isso para que as decisões tomadas pelo projetista sejam todas alicerçadas, fazendo sentido de acordo com os conceitos expostos nesse capítulo.

O primeiro ponto a ser apresentado para esse fim é a teoria sobre suspensão automotiva, apresentando-se os tipos e se aprofundando mais no estudo da suspensão utilizada no veículo da Fórmula UFPB. Em seguida, serão apontados alguns comentários acerca da dinâmica veicular, de forma a esclarecer sucintamente as forças atuantes num veículo durante aceleração, frenagem, curvas e até uma combinação entre duas dessas situações. Por último, tenta-se mostrar o passo a passo de um projeto de eixo para que possa servir de suporte para as simulações por software no dimensionamento da ponta de eixo.

3.1 SUSPENSÃO VEICULAR

A suspensão de um carro, seja de rua ou de competição, explicando-se de forma informal, tem duas funções: a de suspender o veículo do solo impedindo que ele tenha contato com o mesmo (pelo menos em conjunturas mais conservadoras), e a de manter os pneus sempre em contato com o solo para que a aderência seja adequada em situações de aceleração, frenagem e curvas. Porém, especialmente em tempos mais recentes, as funções desse complexo sistema vêm se tornando ainda mais amplas e de extrema importância para o carro e seu projeto.

No âmbito de carros do tipo fórmula, é indubitável a relevância da suspensão para o comportamento do carro. Fatores de dinâmica veicular como equilíbrio e rigidez são em grande parte definidos a partir desse projeto.

Para ilustrar ainda mais a importância de um bom e sólido projeto de suspensão, é importante se expor que, no projeto de um Fórmula SAE, o subsistema de referência no projeto é o de suspensão. Ou seja, a equipe responsável pelo projeto da suspensão do veículo deve fixar os pontos da geometria de suspensão antes que qualquer outra subequipe possa definir seus projetos.

É importantíssimo também, que ao ler este trabalho, o leitor entenda que o projeto aqui apresentado é de uma equipe estudantil em nível de graduação e

busca adequar-se ao que foi lido na literatura disponível, ao know-how da própria equipe, e ao que se analisou de outros projetos. Sendo assim, algumas coisas aqui relatadas podem não estar em total acordo com o que acontece em categorias de automobilismo como a Fórmula 1 e até mesmo em uma situação prática de uma competição de Fórmula SAE, por exemplo.

Como se pode ver na Figura 5, logo abaixo, ao contrário do que foi dito anteriormente nesta monografia, o bólido toca o solo e isso não representa necessariamente uma falha da equipe Mercedes na construção de seu carro (campeão do mundo no ano da foto, inclusive). Isso pode acontecer devido a uma série de fatores, entre eles o próprio projeto do veículo pode ter sido pensado para que o mesmo toque o solo em condições críticas de transferência de carga ou até por imposição da regra.

No caso da fotografia, o engenheiro chefe da Mercedes, Andy Shovlin, explicou o fato evidenciando que as faíscas vêm tanto do assoalho do carro como da asa dianteira; e que numa situação como essa, em que o bólido está a mais de 230 km/h, em curva, passando por uma ondulação da pista, a reação do carro é relativamente normal em condições de corrida.¹⁰

Figura 5 – Suspensão do Mercedes AMG 007 em ação no autódromo de Suzuka



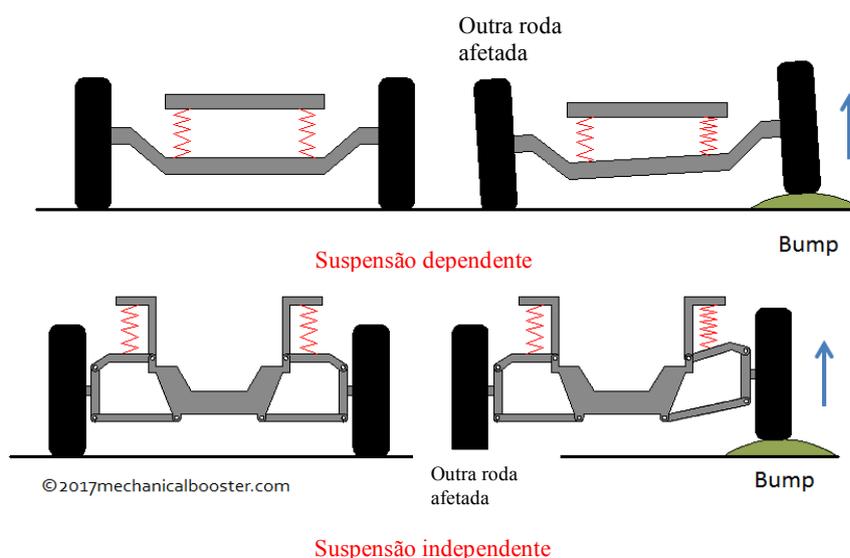
Fonte: (Peter Fox, 2016)

¹⁰ AUTOCAR. **The Story Behind one of Formula 1's greatest photos**. Disponível em: <<https://www.autocar.co.uk/car-news/motorsport-f1-2016/story-behind-one-formula-1s-greatest-photos>> Acesso em: 08 de agosto de 2018. n.p.

3.1.1 Tipos de suspensão veicular

Atualmente, três tipos de suspensões independentes dominam o mercado, tanto de automóveis comerciais quanto de veículos de corrida e protótipos. Primeiro, é razoável que se diferencie uma suspensão independente de uma não independente para que se possa seguir a discriminação dos tipos de suspensão dentro do grupo das independentes.

Figura 6 – Diferença entre suspensão independente e não independente



Fonte: <http://www.mechanicalbooster.com/2017/12/suspension-system.html> acesso em 26/08/2018;
traduzido pelo autor

Através da leitura da Figura 6, fica claro que existem vantagens de uma suspensão independente em relação a uma não independente. A principal delas é relacionada à estabilidade e segurança. No caso de uma suspensão não independente, por ter as duas molas conectadas, ao passar por uma irregularidade da pista, uma roda tende a “subir” ou “descer”, fazendo com que a oposta também se incline, ganhando cambagem positiva ou negativa, afetando seu equilíbrio dinâmico. Além disso, esse tipo de suspensão também tem um comportamento desvantajoso em curvas, pois a transferência de carga entre rodas pelo eixo torna o veículo menos responsivo nessa circunstância.

Já no fator segurança, para entender a desvantagem desse sistema, basta que se imagine um carro rígido, como um veículo do tipo fórmula ao passar

por uma inconstância da pista levando em conta que ele possui uma suspensão não independente – em consequência tem um eixo ligando às rodas direitas as esquerdas. Naturalmente que essa alteração de regularidade da pista vai causar uma insegurança e perda de controle no manejo de carro, podendo até, em situações críticas, ocorrer um provável capotamento.¹¹

Já dentro das suspensões independentes, três são os tipos dominantes nos veículos atualmente: McPherson, Multilink e Duplo-A.¹²

A suspensão McPherson, ilustrada na Figura 7, é a mais empregada atualmente em veículos de rua, sendo largamente utilizada na indústria de automóvel. Sua amplitude de aplicação vai de carros mais simples até modelos esportivos, como o Porsche 911. Toda essa capacidade de atuar em diferentes tipos de carro deve-se a sua simplicidade estrutural e eficiência, se mostrando uma solução barata quando comparada as outras. Esse componente é dividido em braço transversal, amortecedor, mola helicoidal e barra estabilizadora.¹³

Figura 7 – Suspensão McPherson



Fonte: <http://turbonsk.ru/chto-takoe-mcpherson/> acesso em 26/10/2018

¹¹ WHEELZINE. **Advantages and disadvantages of independent front suspension.** Disponível em: <<https://wheelzine.com/advantages-disadvantages-of-independent-front-suspension>> Acesso em: 08 de agosto de 2018. n.p.

¹² QUATRO RODAS. **Quais as diferenças entre os tipos de suspensão independente?** Disponível em: <https://quatrorodas.abril.com.br/auto-servico/quais-as-diferencas-entre-os-tipos-de-suspensao-independente/> Acesso em: 08 de agosto de 2018. n.p.

¹³ Ibidem.

Já a suspensão do tipo Duplo-A (Figura 8) se destaca por garantir um alto nível de independência entre as rodas e tem como desvantagem a complexidade de projeto, resultado principalmente dos altos esforços que ela impõe a estrutura. Em relação a forma como estão dispostas as peças, ela apresenta uma bandeja a mais em relação a McPherson, que é a bandeja superior; e tem como importante vantagem a possibilidade de inserir alguns elementos como conjunto mola-amortecedor, barra antirolagem e terceira mola dentro da estrutura do carro, favorecendo a aerodinâmica do veículo. Esse modelo de suspensão independente é quase unanimidade em veículos do tipo Fórmula, inclusive é usado no protótipo da equipe Fórmula UFPB.

Figura 8 – Suspensão Duplo-A



Fonte: <https://www.formulaufmg.com.br/single-post/2016/07/05/Saiba-mais-sobre-a-Suspensao-de-um-Formula> acesso em 26/10/2018

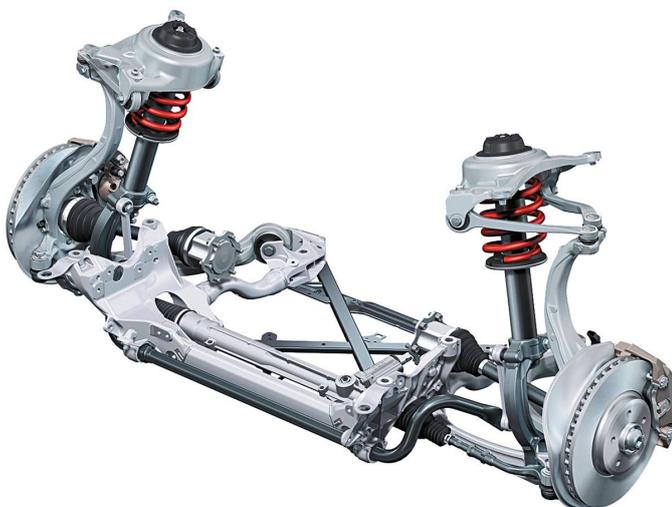
Para fechar, é importante falar de outro modelo bastante utilizado na contemporaneidade, o sistema Multilink (Figura 9). Essa se apresenta como uma evolução do sistema Duplo-A e se caracteriza por dar mais liberdade ao projetista em definir os pontos da sua geometria, graças ao fato da suspensão ligar a manga de eixo à estrutura através de vários braços. Tem como vantagem proporcionar ao carro um melhor domínio dos movimentos das rodas.¹⁴ As desvantagens desse conjunto são sua alta complexidade de projeto e ajuste, principalmente quando se

¹⁴ QUATRO RODAS. **Quais as diferenças entre os tipos de suspensão independente?**

Disponível em: <<https://quatorrodas.abril.com.br/auto-servico/quais-as-diferencas-entre-os-tipos-de-suspensao-independente/>> Acesso em: 08 de agosto de 2018. n.p.

sabe que o veículo vai ser usado em estradas sem confiabilidade como as brasileiras; e alto custo.¹⁵

Figura 9 – Suspensão multilink



Fonte: [https://quatorrodas.abril.com.br/auto-servico/qual-a-diferenca-entre-suspensao-multilink-e-por-eixo-de-torcao/](https://quatorrodas.abril.com.br/auto-servico/qual-a-diferenca-entre-suspensao-multilink-e-por-eixo-de-torca/) acesso em 26/10/2018

Apresentados os tipos mais comuns de suspensões, e apontados os mais utilizados, cabe ao autor agora que se aprofunde na tipo duplo-A, já que o mesmo é utilizado pela equipe Fórmula UFPB. Além disso, serão apresentadas algumas configurações adotadas por essa equipe em sua suspensão, que são fundamentais para para entender o projeto da ponta de eixo, apresentado no próximo capítulo.

3.1.2 Suspensão do tipo duplo-A num carro de formula

Como já foi mencionado nesse trabalho, o uso de uma suspensão do tipo duplo-A é quase uma unanimidade em veículos do tipo fórmula. Na principal categoria de automobilismo, a Fórmula 1, por exemplo, salvo algumas pequenas modificações pontuais, todos os bólidos usam esse modelo. Isso se deve, primeiramente, a grande independência que é gerada entre as rodas através do uso desse tipo de mecanismo, a possibilidade de customização de alguns parâmetros

¹⁵ QUATRO RODAS. **Qual a diferença entre suspensão multilink e por eixo de torção?**. Disponível em: <<https://quatorrodas.abril.com.br/auto-servico/qual-a-diferenca-entre-suspensao-multilink-e-por-eixo-de-torcao/>> Acesso em: 08 de agosto de 2018. n.p.

para cada pista mesmo após o carro estar todo pronto, e boa liberdade na escolha dos pontos de geometria.

É significativo que se diga que o conteúdo aqui demonstrado sobre as particularidades da suspensão apresentada em seguida, que é a do protótipo da equipe Fórmula UFPB no ano de 2014, será abordado sem que se entre no mérito de justificar as decisões e escolhas tomadas pelos projetistas das peças, exceto a ponta de eixo. Isso se deve ao fato de que isso não faz parte do tema central deste trabalho fundamentar o projeto de toda suspensão, mas apenas apontar algumas particularidades e diferenciá-la de outras.

As características principais da suspensão a qual a ponta de eixo que é tema central dessa monografia faz parte são: Tipo duplo-A, uso do aço 1020 nas bandejas, Pull-rod, mola amortecedor da marca Fox, montante usinado e de material Alumínio 7075-T6, e não possuir barra antirolagem e terceira mola. As características da ponta de eixo serão abordadas no próximo capítulo em detalhes, já que são tema central desse trabalho.

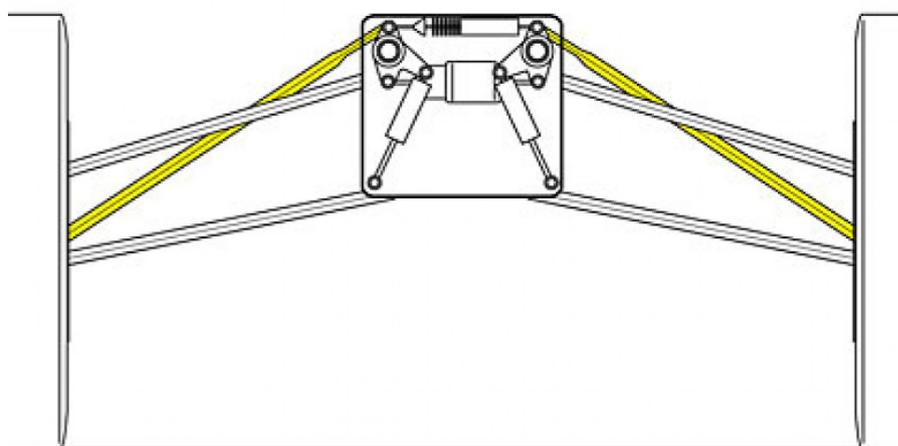
O fato de maioria dos carros do tipo formula usarem a suspensão do tipo duplo-A já foi abordado e repetido neste trabalho, inclusive seus motivos foram esclarecidos. O que cabe agregar de informação sobre esse tipo de suspensão é que esta propicia, pelo uso de uma bandeja superior menor que a inferior, um ganho de cambagem de forma a beneficiar a dinâmica do carro em curvas, trazendo mais aderência através do maior contato dos pneus com o solo.

Já em relação ao material das bandejas, o que se pondera na escolha do mesmo são as tensões as quais estas vão sofrer, além das análises de fadiga nas simulações feitas por softwares. Com base nos valores encontrados através desses programas, o projetista escolhe o seu material, obviamente levando em conta seu orçamento. Outra forma que pode ser empregada no projeto de uma bandeja de suspensão é através da escolha prévia do material, ou seja, o componente deve ser desenhado já pensando no material que será usado. Obviamente, para pensar num projeto usando essa segunda “estratégia”, o projetista deve ter a experiência suficiente para não definir um material totalmente fora de contexto e tornar o projeto inviável. O material escolhido para ser usado nas bandejas da Suspensão do FUFPEB de 2014 foi o aço 1020 cujas principais propriedades são excelentes conformabilidade e soldabilidade; e são comumente utilizados em engrenagens, eixos e tubos. Além disso, é um dos aços mais usados, pois, possui uma excelente

relação custo-benefício. Características essas que são completamente coerentes com as necessidades de uma bandeja de suspensão, as quais foram construídas através da soldagem de tubos de Aço 1020.¹⁶

Em relação à escolha do sistema Pull-rod, é importante que se diferencie ele do Push-rod (Figura 10), que é inclusive mais comum. Em relação às diferenças práticas entre ambas, a principal é a forma em que o pneu transfere o movimento, ao passar por uma ondulação, para a mola; e na disposição do *Rod* em relação ao chassi e à manga de eixo: como é explicitada no nome, a Pull-rod puxa o balancim e consequentemente a mola, ao sofrer com um bump; e a Push-rod, empurra; já em relação ao posicionamento das peças, em caso de uma suspensão Push-rod, o braço de suspensão liga a parte inferior da manga de eixo à superior do chassi, na Pull-rod o contrário acontece, a parte inferior do chassi é ligada à superior da manga de eixo pelo braço de suspensão. A principal vantagem do uso de um sistema Push-rod é que leva o piloto a sentir melhor a transferência de peso ao esterçar o volante, além de os pneus absorverem melhor as irregularidades do terreno e o acesso ao sistema para manutenção ou ajustes ser geralmente mais fácil, devido a este se posicionar na parte de cima do bico do carro.

Figura 10 – Push-rod

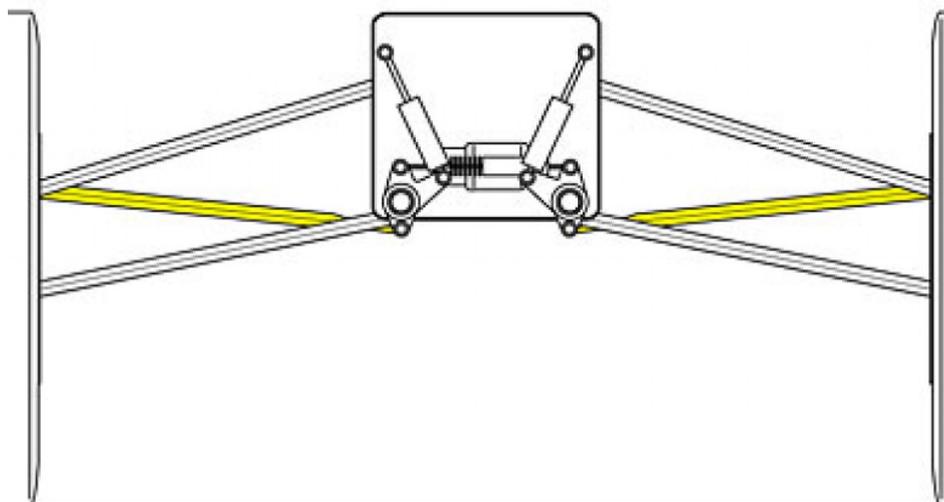


Fonte: <https://www.autosport.com/f1/feature/4222/the-pros-and-cons-of-ferrari-pullrod-design> acesso 03/09/2018

¹⁶ GELSON LUZ. **Aço SAE 1020: Propriedades Mecânicas**. Disponível em: <<https://www.materiais.gelsonluz.com/2017/10/aco-sae-1020-propriedades-mecanicas.html>> Acesso em: 08 de agosto de 2018. n.p.

Por outro lado, ao escolher ativar as molas pelo sistema Pull-rod (Figura 11), o projetista privilegia a aerodinâmica do bólido e ainda consegue abaixar o centro de massa do mesmo.

Figura 11 – Pull-rod



Fonte: <https://www.autosport.com/f1/feature/4222/the-pros-and-cons-of-ferrari-pullrod-design> acesso 03/09/2018

Para ilustrar essa diferença no âmbito de mais alto nível automobilístico, usa-se o exemplo da *Scuderia Ferrari* na Fórmula 1. No ano de 2012, o diretor técnico da equipe, Pat Fry, surpreendeu a todos do meio com o projeto da sua suspensão daquele ano, mostrado na Figura 12, anunciando o carro com uma suspensão dianteira do tipo Pull-rod, diferente de todos os outros projetos, e que não era vista em um veículo de Fórmula 1 desde a Minardi de 2001. Na época, essa decisão parecia ser visivelmente irracional por conta da disposição do bico, que era muito elevado em relação ao solo, fazendo com que o Pull-rod ficasse praticamente numa posição horizontal. Apesar de todas as teorias acerca do porque dos engenheiros terem feito essa escolha, como a de usar um centro de gravidade mais baixo ou de se dispor melhor com os tubos do sistema de freio, a mais aceita é de que foi uma decisão tomada para beneficiar a aerodinâmica do carro e principalmente a passagem de ar da asa dianteira para as laterais do veículo, o que

faz muito sentido dada a importância dada na Fórmula 1 à interação do bólido com o ar.¹⁷

Figura 12 – Suspensão pull-rod no F2012



Fonte: ferrari.com acesso 03/09/2018

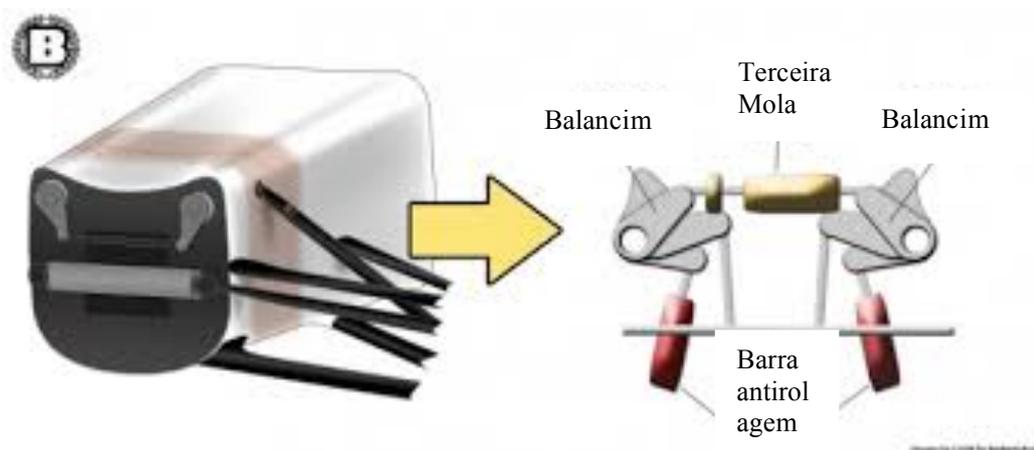
Por fim, é necessário que se esclareça que o projeto do F2012 acabou sendo um insucesso, apesar de disputar o campeonato até a última corrida. O projeto de usar pull-rod na suspensão dianteira continuou até 2015, quando em 2016 foi substituído pelo tipo de suspensão que é unanimidade no grid: push-rod. Um outro item de extrema importância no contexto de uma suspensão do tipo *Double Wishbone* é o conjunto mola-amortecedor. Esse componente é responsável por boa parte absorção e atenuação dos “impactos” aplicados pelo solo nos pneus do automóvel; mantendo assim o contato dos pneus com o solo e trazendo segurança e estabilidade ao bólido. A escolha do conjunto ideal para um Fórmula deve ser feita embasada nas necessidades do mesmo em relação aos esforços e na frequência a que esses esforços serão aplicados. A partir daí, a equipe será capaz de selecionar a peça ideal para o protótipo. E, assim como na escolha do material para as bandejas, certa experiência por parte da equipe de suspensão é muito bem-vinda ao projeto, visto que o conhecimento de modelos usados em projetos passados ou até outras equipes pode ajudar bastante. No modelo de 2014 da equipe fórmula UFPB, foi usado um amortecedor da marca Fox.

¹⁷ AUTOSPORT. **The pros and cons of a Ferrari pullrod design.** Disponível em: <<https://www.autosport.com/f1/feature/4222/the-pros-and-cons-of-ferrari-pullrod-design>> Acesso em: 08 de agosto de 2018. n.p.

A manga de eixo, por ser um item que tem como função “juntar” as bandejas de suspensão e ponta de eixo, deve ser pensada de forma a otimizar as relações “massa x propriedades do material” e “custo x benefício”. A respeito do montante usado no protótipo do ano de 2014, o mesmo foi projetado de forma a ser fabricado pelo processo de usinagem e o material escolhido foi o alumínio aeroespacial 7075-T6, caracterizado por ser leve (um terço do peso específico do aço), ter boa usinabilidade, resistência à corrosão e boa resistência.¹⁸

Os últimos componentes abordados na conjuntura de uma suspensão veicular do tipo duplo-a nesse trabalho são: terceira mola e barra antirolagem (Figura 13), ambos não estando presentes no protótipo de 2014 da equipe Fórmula UFPB. Suas funções são parecidas, porém, em situações diferentes, ambas auxiliam o conjunto mola amortecedor a manter o equilíbrio do carro, enquanto a barra antirolagem atua em situações de transferência lateral de carga, em que uma roda de um lado do carro sofre uma carga num sentido oposto a roda do outro lado, como numa curva; a terceira mola é solicitada em ocorrências em que duas rodas - esquerda e direita - sofrem a mesma carga no mesmo sentido, evitando assim que a mola chegue num fim de curso, por exemplo.

Figura 13 – Posicionamento da terceira mola e barra anti rolagem



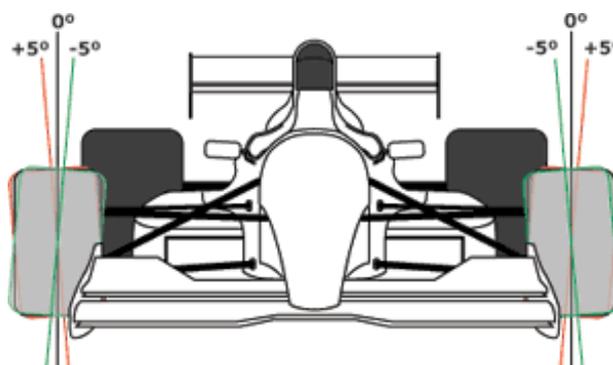
Fonte: <http://kimskloset.co/f1-suspension-diagram.html> acesso 26/10/2018; traduzido pelo autor

Para finalizar esse subcapítulo, abordam-se alguns parâmetros escolhidos pelo projetista ao definir a geometria de suspensão:

¹⁸ COPPERMETAL. **Informações técnicas: Alumínio 7075 T651**. Disponível em: <http://www.coppermetal.com.br/pdf/aluminio/info-tec-copp_alumi7075.pdf> Acesso em: 08 de agosto de 2018. n.p.

- Cambagem (Figura 14): trata-se da angulação do pneu em relação a uma reta normal ao solo quando visto de uma posição frontal ao veículo. É negativa quando a parte superior do pneu aponta para dentro do carro e positiva quando aponta para fora. Para veículos que vão estar expostos a situações de circuitos, é natural que haja uma leve cambagem negativa; isso, porque ao sofrer a transferência lateral de carga numa curva, o pneu externo tende a sofrer uma tendência a ganhar cambagem positiva, equilibrando a angulação do pneu e mantendo o máximo contato do pneu com o solo nesse momento crítico.¹⁹

Figura 14 – Cambagem



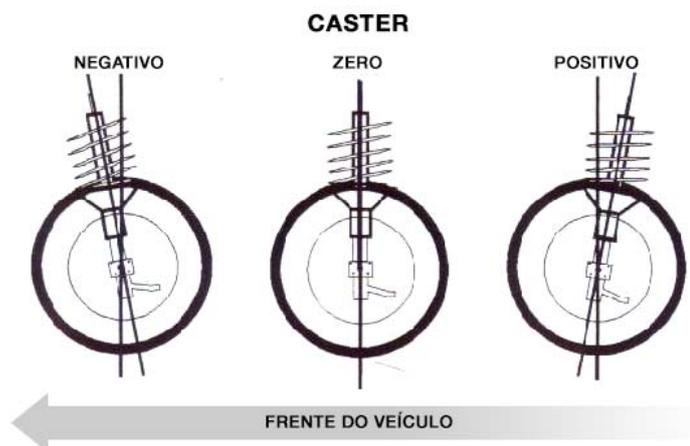
Fonte: http://www.tirerack.com/images/tires/tiretech/diag_camber.gif acesso 26/10/2018

- Caster (Figura 15): É a angulação do “pino mestre” (linha formada pela ligação dos pontos de fixação das bandejas ao montante) em relação a uma linha normal ao solo numa vista lateral ao carro. Quando a parte superior do pino mestre está angulada em direção à frente do carro o caster é positivo, caso contrário o caster será negativo. É importante afirmar também que a existência de ângulo de caster num veículo aumenta a região de contato entre o pneu e o solo.²⁰

¹⁹ MILLIKEN, W. F.; MILLIKEN, D. L. **Race Car Vehicle Dynamics**. Warrendale, PA, EUA: Society of Automotive Engineers, 1995. p. 46.

²⁰ MILLIKEN, W. F.; MILLIKEN, D. L. **Race Car Vehicle Dynamics**. Warrendale, PA, EUA: Society of Automotive Engineers, 1995. p. 651.

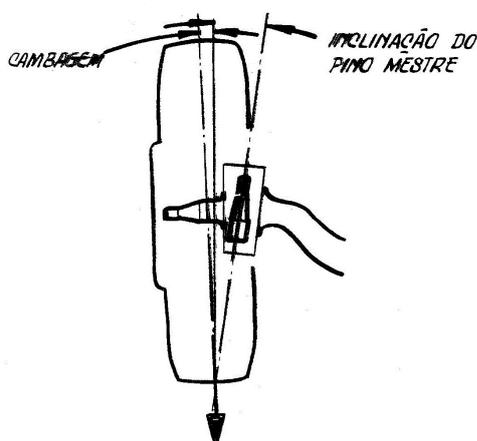
Figura 15 – Caster



Fonte: <http://ingopneus.com.br/blog/angulo-de-caster-suspensao/> acesso 26/10/2018

- Ângulo do pino mestre (Figura 16): É a angulação do “pino mestre” em relação a uma linha normal ao solo numa vista frontal ao carro. Essa angulação proporciona ao veículo uma dinâmica de esterçamento diferente, visto que a linha de referência – que é o próprio pino mestre - tende a mudar.²¹

Figura 16 – Ângulo do pino mestre

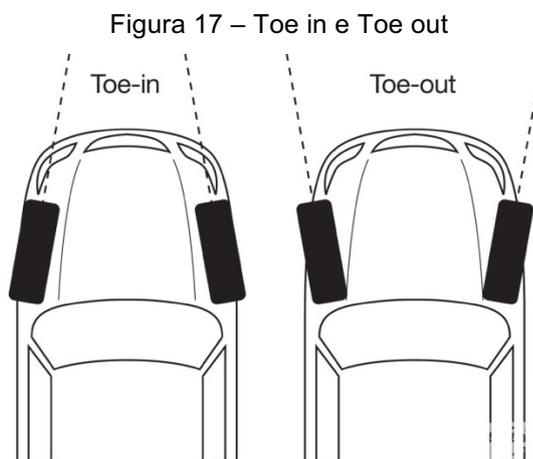


Fonte: <https://sites.google.com/site/carlaotrucks/inclinacao-do-pino-mestre-kpi> acesso 26/10/2018

- Divergência e convergência (Toe out e Toe in): Como vista na Figura 17, é caracterizado pelo ângulo entre a linha que passa por todo o centro do pneu e uma linha vertical, numa vista superior ao carro. É natural que veículos de

²¹ Ibidem.

competição do tipo fórmula apresentem uma leve convergência nas rodas dianteiras. É importante afirmar, também, que o uso de divergência, principalmente nas rodas traseiras, deve ser evitado.²²



Fonte: <http://www.superstreetonline.com/how-to/wheels-tires/sstp-1004-camber-caster-toe-wheel-alignment/> acesso 26/10/2018

3.2 PROJETO DE EIXO

Apesar de se fundamentar a viabilidade do projeto da ponta de eixo através de uma simulação pelo programa computacional SolidWorks, esse TCC também busca introduzir alguns conceitos relacionados à projetos de eixos apresentados no sétimo capítulo do livro Elementos de Máquinas de Shigley (oitava edição), dos autores Richard G. Budynas e J. Keith Nisbett. Também foi usado como bibliografia para a construção desse subcapítulo as notas de aula da disciplina Elementos de Máquinas I, ministrada na UFPB pelo professor Dr. João Bosco de Aquino Silva.

Isso para que o leitor possa ter o embasamento necessário para a compreensão e interpretação dos resultados apresentados em simulação por software.

Primeiramente, é essencial que se entenda a definição do que vem a ser um eixo. E, de acordo com os autores Richard G. Budynas e J. Keith Nisbett:

O eixo é um membro rotativo, usualmente de seção transversal circular, usado para transmitir potência ou movimento. Ele provê o eixo de rotação ou oscilação, de

²² SMITH, Carrol. **Tune to Win**. Fallbrook, CA, EUA: Aero Publishers, Inc, 1978. p. 62.

*elementos tais como engrenagens, polias, volantes, manivelas, rodas dentadas e similares, e controla a geometria de seus movimentos.*²³

Dito isso, se estabelece na literatura uma ordem que o projetista deve seguir para definir as características do eixo que ele deseja projetar, como material e diâmetro. Esses critérios a serem seguidos, que serão abordados em detalhe nas próximas seções, são:²⁴

1. Critérios de Deflexão
2. Critério Estático
3. Critério de Fadiga
4. Velocidade Crítica

Além desses critérios de dimensionamento, outros pontos que compõe o corpo de análises recomendadas no projeto de um eixo também serão levantados a seguir.

3.2.1 Seleção de material

A seleção do material a ser usado num projeto de eixo deve ser feita de forma dinâmica, isto é, o projetista deve iniciar seus cálculos usando um aço barato no projeto. E de acordo com o que ele apresentar de respostas após as análises e ao ser submetido aos critérios, esse aço pode ficar no projeto ou ser substituído por um mais resistente.²⁵

Isso se dá por conta da relação entre os critérios de deflexão e os critérios estáticos e de fadiga. A deflexão de um eixo tem uma relação bem mais definida com sua rigidez, representada pelo módulo de elasticidade, que com sua resistência. Visto isso e somando ao fato de que o módulo de elasticidade é praticamente constante para todos os aços, a recomendação é que se as considerações de resistência forem mais críticas que a as de deflexão, deve-se substituir o aço por um

²³ BUDYMAS, Richard G; NISBETT, J. Keith. **Elementos de máquinas de Shigley: projeto de engenharia mecânica**. 8. ed. Porto Alegre, RS: AMGH, 2011. n.p.

²⁴ DE AQUINO SILVA, João Bosco. Elementos de máquinas I. 09 jul. 2018, 04 nov. 2018. Notas de Aula.

²⁵ BUDYMAS, Richard G; NISBETT, J. Keith. **Elementos de máquinas de Shigley: projeto de engenharia mecânica**. 8. ed. Porto Alegre, RS: AMGH, 2011. n.p.

mais resistente e diminuir o diâmetro do mesmo até que a deflexão seja um problema.²⁶

Outro ponto importante relacionado ao projeto de eixos é que se tenha conhecimento das forças que agem no eixo e das reações nos mancais, visto que esses dados serão essenciais para o cálculo dos critérios seguintes, assim como para qualquer tomada de decisão relacionada ao dimensionamento do eixo.

3.2.2 Critérios de Deflexão

Em relação a esse critério, podemos abordá-lo de dois pontos de vista diferentes. Numa primeira abordagem, é ideal que se tenha o diâmetro do eixo pretendido predefinido e pela equação abaixo se calcula a deflexão sofrida nos mancais:

$$\delta_A = \frac{1}{6EI} \left\{ \left[\sum F_i b_i (b_i^2 - l^2) + \sum M_i (3a_i^2 - 6a_i l + 2l^2) \right]_H^2 + \left[\sum F_i b_i (b_i^2 - l^2) + \sum M_i (3a_i^2 - 6a_i l + 2l^2) \right]_V^2 \right\}^{1/2} \quad 27$$

Num segundo caso, quando se busca projetar um eixo maciço de seção circular em que se conhece a máxima deflexão permitida no projeto (δ_{All}), pode-se usar a equação seguinte para encontrar o diâmetro adequado para suprir as necessidades desse critério:

$$d = \left| \frac{32n_d}{3\pi EI \delta_{A,all}} \left\{ \left[\sum F_i b_i (b_i^2 - l^2) + \sum M_i (3a_i^2 - 6a_i l + 2l^2) \right]_H^2 + \left[\sum F_i b_i (b_i^2 - l^2) + \sum M_i (3a_i^2 - 6a_i l + 2l^2) \right]_V^2 \right\}^{1/2} \right|^{1/4} \quad 28$$

Dado que:

$d \rightarrow$ *diâmetro*

²⁶ Ibidem.

²⁷ DE AQUINO SILVA, João Bosco. **Elementos de máquinas I**. 09 jul. 2018, 04 nov. 2018. Notas de Aula.

²⁸ Ibidem.

$n_d \rightarrow$ coeficiente de segurança

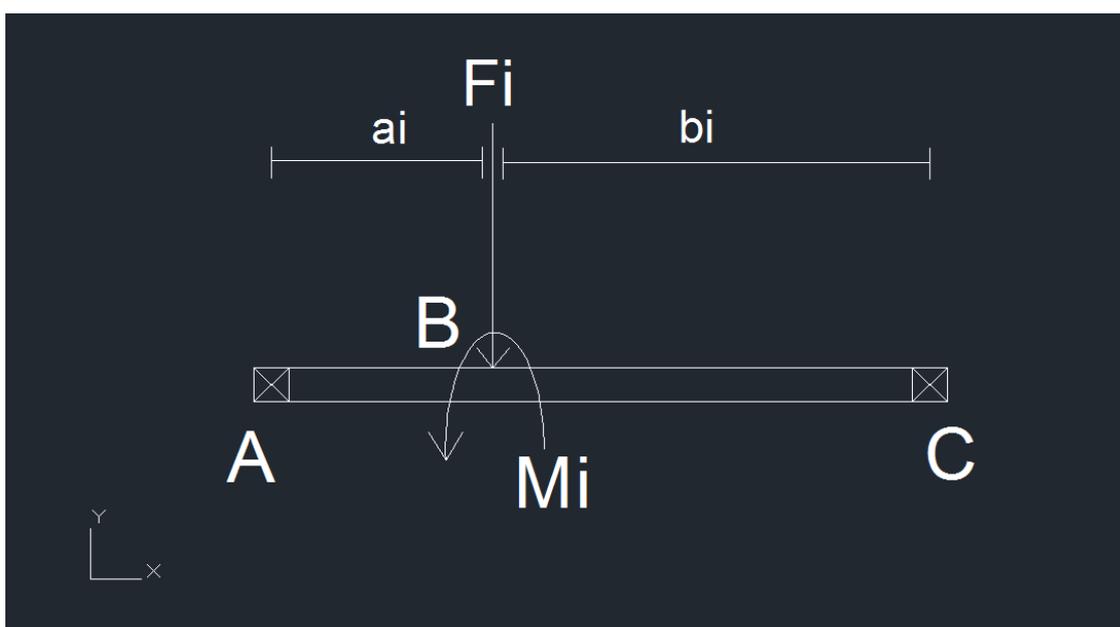
$E \rightarrow$ resistência mecânica

$I \rightarrow$ momento de inércia

$l \rightarrow$ largura do eixo

Alguns termos podem ser mais facilmente compreendidos através da Figura 18.

Figura 18 – Ilustração das variáveis da equação de deflexão



Fonte: Autor

Dessa forma, podemos avaliar de forma adequada a viabilidade ou não de certo material e diâmetro de acordo com esse critério.

3.2.3 Critério Estático

Sobre o critério estático, duas análises precisam ser feitas para que se garanta que esse eixo não falhe estaticamente. A primeira análise é em relação ao critério de Von Misses (DE):

$$d = \left[\frac{16n}{\pi S_y} (4M^2 + 3T^2)^{1/2} \right]^{1/3} \quad 29$$

A segunda abordagem que precisa ser feita é a do critério da tensão de cisalhamento máxima ($\tau_{m\acute{a}x}$):

$$d = \left[\frac{32n}{\pi S_y} (M^2 + T^2)^{1/2} \right]^{1/3} \quad 30$$

Dado que:

$d \rightarrow$ diâmetro

$S_y \rightarrow$ limite de resistência ao escoamento

$T \rightarrow$ torção

$n \rightarrow$ coeficiente de segurança

$M \rightarrow$ momento

Feitas ambas as abordagens estáticas, toma-se o maior diâmetro mínimo encontrado e toma-se como o diâmetro mínimo dado pelo critério estático.

3.2.4 Critério de Fadiga

Para uma análise de dimensionamento de eixo pelo critério de fadiga, pode-se escolher alguns caminhos a serem tomados para a tomada de decisão do diâmetro mínimo, esses caminhos podem ser: Critério de Soderberg, critério de Goodman, critério de Gerber e ASME, que é o escolhido a ser mais aprofundado nesse TCC.

Segundo esse critério, o diâmetro mínimo se dá por:

$$d = \left\{ \frac{16n}{\pi} \left[4 \left(\frac{K_f M_a}{S_e} \right)^2 + 3 \left(\frac{K_{fs} T_a}{S_e} \right)^2 + 4 \left(\frac{K_f M_m}{S_y} \right)^2 + 3 \left(\frac{K_{fs} T_m}{S_y} \right)^2 \right] \right\}^{1/3} \quad 31$$

Dado que:

$d \rightarrow$ diâmetro do eixo

²⁹ Ibidem.

³⁰ Ibidem.

³¹ Ibidem.

- n → coeficiente de segurança
 K_f → fator de entalhe para torção
 M_a → momento alternado
 K_{fs} → fator de entalhe para flexão
 T_a → torção alternada
 M_m → momento médio
 T_m → torção média
 S_e → limite de resistência a fadiga
 S_y → limite de resistência ao escoamento

Dito isso, somente mais uma análise é necessária para que se possa definir com segurança o diâmetro para que o eixo possa ser fabricado.

3.2.5 Velocidade Crítica

O ultimo passo na definição do diâmetro de um eixo maciço é a análise da velocidade crítica do mesmo. Isso é necessário porque um material que rotaciona a uma velocidade correspondente a de sua frequência natural produz vibrações, o que é indesejado num projeto, portanto, deve-se evitar.³²

Através da equação seguinte pode-se saber qual é essa frequência e, poder assim, evitá-la:

$$w = \left(\frac{\pi}{l}\right) \sqrt{\frac{gEI}{Ay}}^{33}$$

Dado que:

- w → velocidade crítica
 l → comprimento do eixo
 g → aceleração da gravidade
 E → módulo de elasticidade
 I → momento de inércia

³² Ibidem.

³³ Ibidem.

$A \rightarrow$ área da seção transversal

$\gamma \rightarrow$ peso específico

Caso a velocidade crítica coincida com a velocidade de aplicação do eixo, cabe ao engenheiro responsável realizar as mudanças necessárias para que a velocidade crítica do eixo seja mudada.

3.2.6 Eixo Vazado

Nessa seção, discute-se a possibilidade do uso de um eixo vazado no projeto. Tomar essa decisão pode ser tanto vantajoso como desvantajoso, e isso só pode ser analisado com segurança em um caso específico através da realização dos cálculos e da comparação dos resultados.

O mais simples nessa questão é definir o diâmetro interno e externo desse eixo vazado, que são dados pelas equações:

$$d = d_o(1 - K^4)^{1/3} \quad 34$$

$$K = \frac{d_i}{d_o} = 0,7 \quad 35$$

Dado que:

$d \rightarrow$ diâmetro do eixo maciço

$d_o \rightarrow$ diâmetro externo do eixo vazado

$K \rightarrow$ constante para definir o diâmetro externo

$d_i \rightarrow$ diâmetro interno do eixo vazado

Definido o material e o diâmetro mínimo do eixo, ou os diâmetros – caso seja um eixo vazado –, cabe ao projetista levar em consideração alguns outros fatores para concretizar seu projeto. Entre esses fatores estão as máquinas e ferramentas disponíveis para fabricação e como vai ser montado o eixo.

³⁴ Ibidem.

³⁵ Ibidem.

Ao idealizar a geometria de um eixo, um projetista deve levar em consideração alguns fatores além do diâmetro mínimo que este deve possuir. Primeiro, o mesmo deve levar em conta as máquinas que estarão dispostas para a fabricação desse, ao fim do projeto, e a complexidade de geometria que estas conseguem atingir na produção dele. Isso é muito importante visto que o projeto de um eixo fora da realidade do potencial de fabricação de uma empresa ou universidade, por exemplo, pode resultar num projeto final adaptado ou até dado como inválido. De mesma relevância é a análise de como a montagem do eixo vai ocorrer, que deve ser avaliada durante o projeto do eixo para que ele seja útil e possa exercer a função pela qual ele foi fabricado. Levar esses fatores em conta é importantíssimo para que se evite o fracasso total do projeto.

Dito isso, se tem as informações básicas referentes ao projeto de um eixo qualquer e se proporciona ao leitor a capacidade de compreender o projeto de uma ponta de eixo através de software, além de capacitá-lo a entender os resultados das simulações desse projeto.

4 PROJETO DA PONTA DE EIXO

Uma ponta de eixo, ou HUB, como é mais comumente conhecida, é parte integrante de um projeto de suspensão. E assim como faz parte da tarefa do projetista da suspensão definir geometrias, materiais, ferramentas de encaixe, processos de fabricação de peças como montantes, bandejas e balancins; também será de responsabilidade dele a escolha de todos esses fatores em relação à ponta de eixo. Processo esse, que este capítulo tentará abordar com clareza e relativa riqueza de detalhes.

Por ser uma peça da suspensão que se interliga com diversas outras do subsistema e, também, de outros subsistemas como de freio e de transmissão, imagina-se que o HUB deve naturalmente possuir uma geometria complexa para suprir a necessidade de encaixe de todos esses componentes na mesma, além de sofrer os esforços advindos dessas diversas partes.

Portanto, cabem ao engenheiro considerar todas essas questões, buscando sempre soluções para diminuir os efeitos negativos causados por essas exigências; e através dos projetos previamente recebidos, como da geometria de suspensão, bandejas e montante, pensar na sua ponta de eixo e projetá-la.

4.1 PONTA DE EIXO

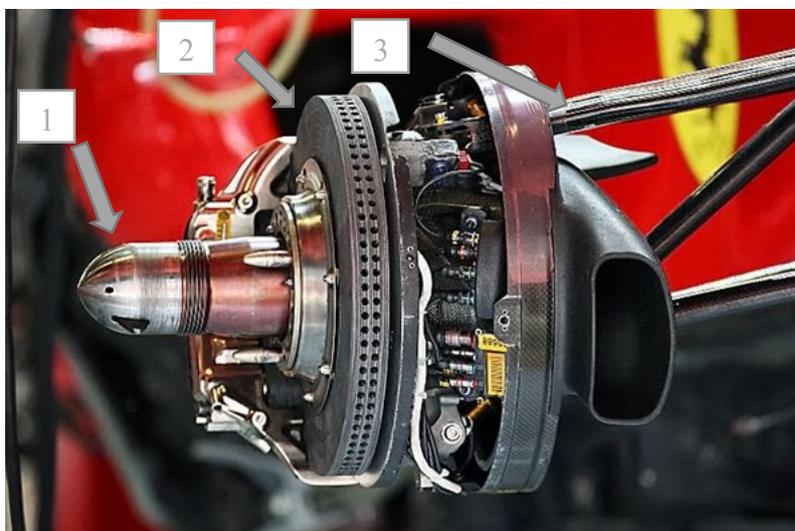
Um hub é o projeto de um eixo que faz parte do sistema de suspensão de um veículo qualquer e é responsável por acoplar a roda ao disco de freio, à transmissão e ao montante, ou seja, é a peça que interliga os sistemas de transmissão, freio e suspensão. Dada essa importância, fica claro que uma falha na ponta de eixo impossibilita a continuidade de funcionamento de um carro. E por esse motivo, deve ter sua relativa importância dentro de uma equipe de fórmula SAE.

Portanto, sabe-se que os esforços advindos desses subsistemas tendem a causar tensões nesse componente. E através dos métodos de equações mostrados no capítulo anterior e dos métodos computacionais, o engenheiro pensa nesse projeto e realiza uma nova ponta de eixo. Além de, obviamente, ser necessário que ele domine os conceitos relacionados à suspensão veicular como alguns dos apresentados no capítulo anterior.

Para exemplificar uma ponta de eixo moderna e com grande quantidade de tecnologia de ponta agregada, pode-se observar na Figura 19 o acoplamento da ponta de eixo dianteira com o disco e pastilha de freio, e com o sistema de suspensão através das bandejas. Em “1” está indicada a ponta de eixo em si, em “2” a pastilha de freio, juntamente com o disco de freio, e em “3” as bandejas dianteiras.

Sobre esse contexto cabe reiterar que algumas características de funcionamento e motivos pelo qual o projeto foi feito dessa forma, é muito difícil de ser abordado quando se fala de Fórmula 1. Isso se dá pelo motivo de que esses projetos não são divulgados e só podem ser analisados, por quem não faz parte da equipe, por fotos como essa. Por isso, busca-se apenas indicar as componentes dessa montagem nesse trabalho.

Figura 19 – Ponta de Eixo de bólido da equipe Ferrari na Formula 1



Fonte: https://paginas.fe.up.pt/~projfeup/submit_14_15/uploads/poster_1M05_3.pdf acesso em 26/10/2018; editada pelo autor

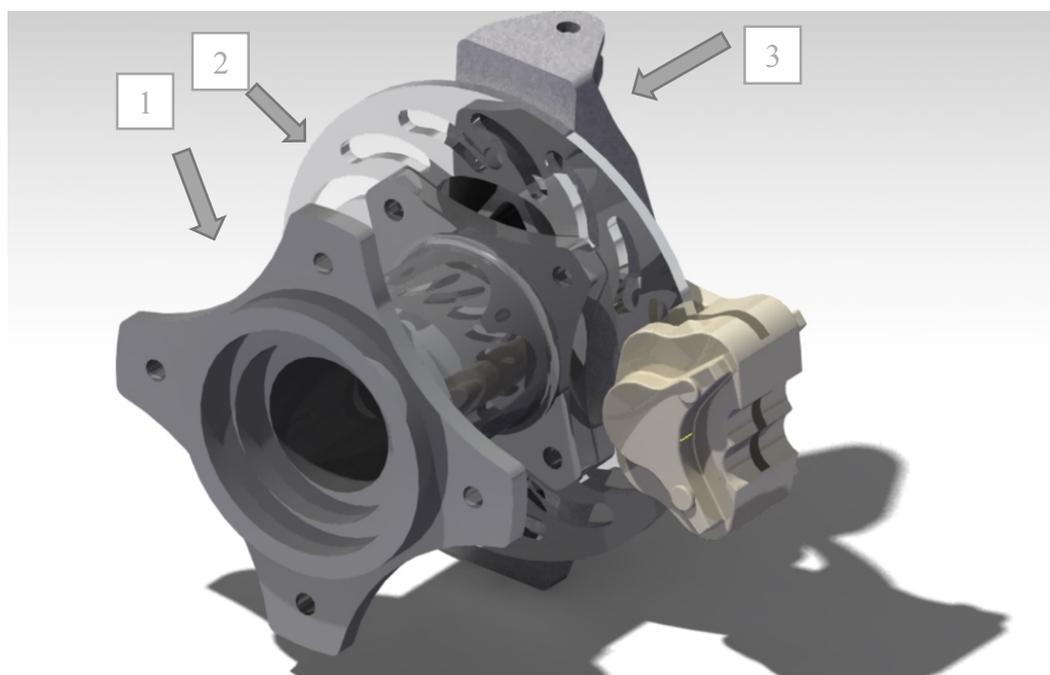
Outro exemplo, que se enquadra mais na conjuntura desse TCC, é a ponta de eixo de uma equipe de Fórmula SAE. É importante que se exponha um projeto de mesmo componente do que será aqui explicado, para que o leitor possa ter uma referência de HUB ao ler sobre a ponta de eixo que será apresentada nesse capítulo.

Na figura 20, tem-se uma montagem de alguns componentes em conjunto com uma ponta de eixo. Nesse caso, como se tem acesso ao projeto das peças num programa de computador, é bem mais possível que se tenha condições de fazer

uma análise do processo de escolhas e decisões tomadas pelos engenheiros ao projetar esses itens.

Uma característica que pode ser enfatizada nesse conjunto é que exceto a pinça de freio, disco de freio e montante, todo o resto é parte do corpo único da ponta de eixo. E isso é um interessante ponto de comparação com o componente da equipe Fórmula UFPB, pois expõe as diferentes condições de fabricação de um eixo. Através dos pontos “1” e “2” da figura abaixo fica claro que as fixações do disco de freio e da roda são direto na ponta de eixo (sem necessidade de nenhum apetrecho extra na montagem para que aconteça esse encaixe), e isso infere que seria inviável a produção desse eixo unicamente pelo processo de usinagem num torno comum. E que quando isso não é possível, deve-se buscar por alternativas, como o uso de flanges para fixação do disco de freio e da roda.

Figura 20 – Ponta de Eixo de um Formula SAE



Fonte: Grabcad

4.2 DISPOSIÇÃO DOS COMPONENTES DAS SUSPENSÕES TRASEIRA E DIANTEIRA DO FORMULA UFPB 2014

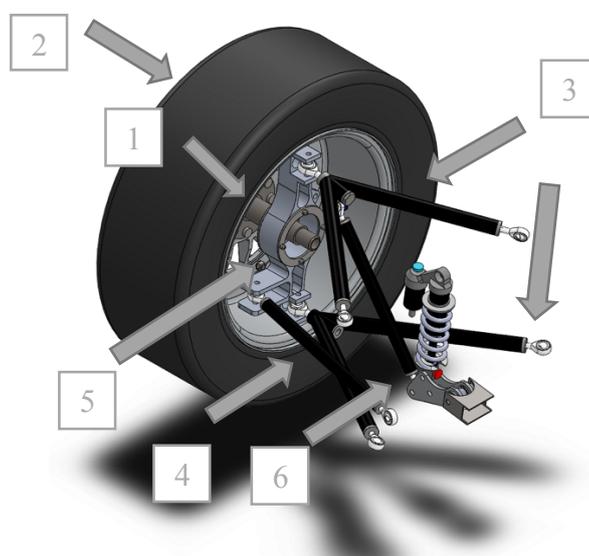
Antes de se falar nas pontas de eixo em particular, como peça única, é interessante situá-las no contexto em que vão ser inseridas; e para isso cabe uma rápida amostragem do projeto de suspensão do ano de 2014 da equipe Fórmula UFPB como forma de contextualizar o conteúdo dos próximos subcapítulos no projeto maior de suspensão.

É também importante inferir que a intenção inicial no projeto da nova ponta de eixo era manter todos os outros itens do projeto de suspensão, a fim de que se resolvessem todos os problemas relacionados à ponta de eixo com a substituição somente dessa peça.

Nas figuras seguintes (21 e 22), é possível ver os projetos de suspensão dianteiro e traseiro da equipe Fórmula UFPB de 2014 e avaliar seus respectivos componentes e suas funções no mecanismo completo.

Apontando os componentes participantes desse projeto, começando pela avaliação da suspensão dianteira, tem-se a ponta de eixo do ano de 2014 indicada em “1”; em “2” a roda e o pneu, na sequência as bandejas (“3”); e o tie rod (“4”), responsável pela transmissão do movimento de esterçamento dos pneus e por regular a convergência ou divergência desses. Além disso, estão discriminados o montante e o conjunto mola amortecedor como “5” e “6” respectivamente.

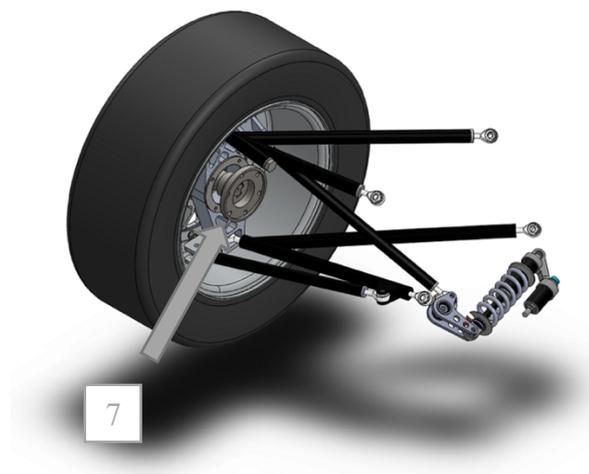
Figura 21 – Montagem da suspensão dianteira do Formula UFPB de 2014



Fonte: Acervo da equipe Fórmula UFPB; editada pelo autor

Já na montagem traseira, apresentada na figura abaixo, além de todos os itens citados acima, tem-se a flange que transfere a tração da junta homocinética para a ponta de eixo em “7”.

Figura 22 – Montagem da suspensão traseira do Formula UFPB de 2014



Fonte: acervo da equipe Fórmula UFPB; editada pelo autor

4.3 PROJETO ANTERIOR DA PONTA DE EIXO

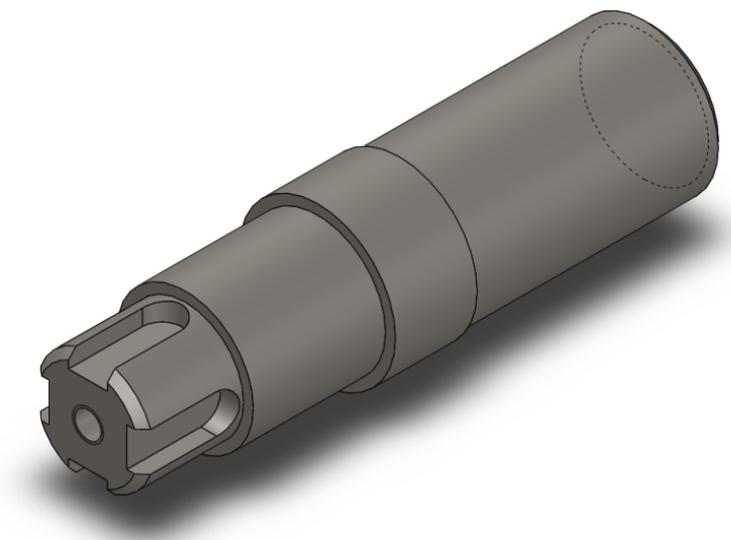
Dado que agora é possível entender a dinâmica e posicionamento de cada componente de suspensão no seu contexto, faz-se possível uma análise dedicada apenas a ponta de eixo. Primeiramente, é importante expor ambas nas Figura 23 e 24

Figura 23 – Ponta de Eixo dianteira do FUFPB de 2014



Fonte: Acervo da equipe fórmula UFPB

Figura 24 – Ponta de Eixo traseira do FUFPB de 2014



Fonte: Acervo da equipe Fórmula UFPB

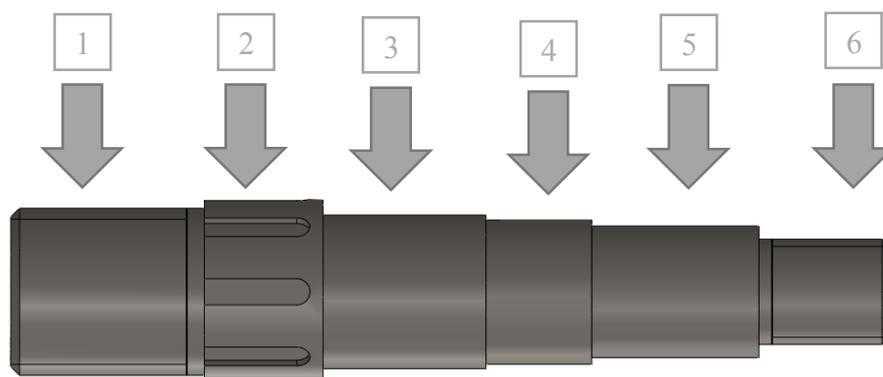
Já que esse trabalho é focado no projeto de uma nova ponta de eixo, e não faz sentido projetar um novo componente com o antigo estando perfeitamente funcional, nesse subcapítulo, haverá um foco nos problemas dessa ponta que fizeram a equipe de suspensão do projeto formula UFPB tomar a decisão de produzir outra. Os critérios relacionados ao projeto em si e que serão abordados aqui são: Geometria e Material.

4.3.1 Geometria

Ao dissecar essa peça, a primeira característica abordada, devido a sua importância enorme num projeto de HUB, é a geometria adotada pelo projetista.

Vendo as figuras 25 e 28 abaixo, infere-se que a geometria da ponta não é de difícil fabricação, já que as máquinas disponíveis não são capazes de produzir peças mais complexas. Por outro lado, é notável que essa ponta de eixo possua diversos concentradores de tensão, principalmente a dianteira, e como isso tende a ser desvantajoso, é um ponto negativo do projeto.

Figura 25 – Seções da Ponta de Eixo dianteira de 2014 da equipe Formula UFPB



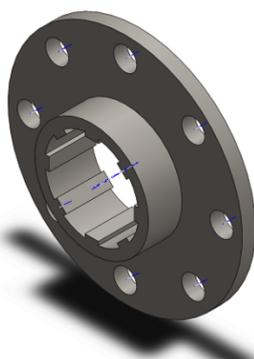
Fonte: Acervo da equipe Fórmula UFPB; editada pelo autor

Mesmo sabendo que a geometria escolhida não é a ideal, é importante que se entenda o porquê dela ter sido escolhida para que se possa usar como fundamento para a nova ponta de eixo. A imagem acima (Figura 26) se trata da vista lateral da ponta de eixo dianteira e nela foram pontuadas as seções para que se possa explicar suas funções uma por uma.

Na seção numerada “1”, existe uma rosca para o encaixe da center lock, é ela que vai fazer a fixação da roda na ponta.

Já a “2” é responsável pelo encaixe de um flange (Figura 26), que, além de impedir que a roda fique “solta” na ponta, transfere o torque vindo da roda para a ponta através de estrias. Essa peça é soldada a ponta de eixo no carro da equipe Fórmula UFPB 2014.

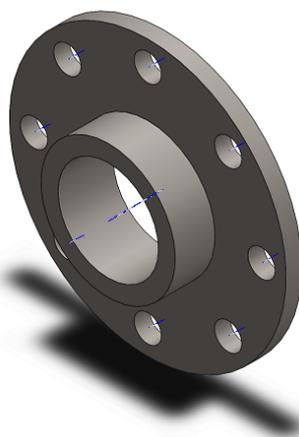
Figura 26 – Flange de encaixe da roda



Fonte: Acervo da equipe Fórmula UFPB

A seção “4”, assim como a “2”, serve para a fixação de um flange, dessa vez da Figura 27. Esse flange tem a ela acoplado o sistema de freio (disco de freio e pinça) e é soldada a ponta de eixo. Assim, a tração vinda do disco é transferida para a ponta através desse mecanismo de fixação, o que se mostra outro importante defeito do projeto.

Figura 27 – Flange de acoplamento do sistema de freio

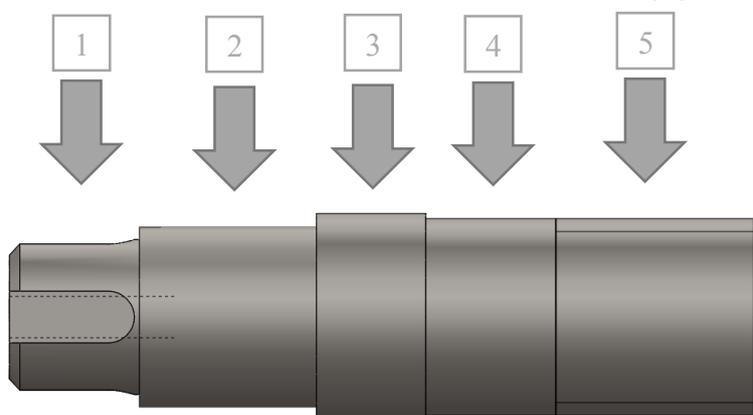


Fonte: Acervo da equipe Fórmula UFPB

O número “5” indica a região onde é acoplada o montante pelo rolamento de 30 mm (diâmetro interno).

A última seção é a “6”, que possui uma rosca para encaixe de uma porca que impede o movimento do rolamento e do montante, fechando o mecanismo.

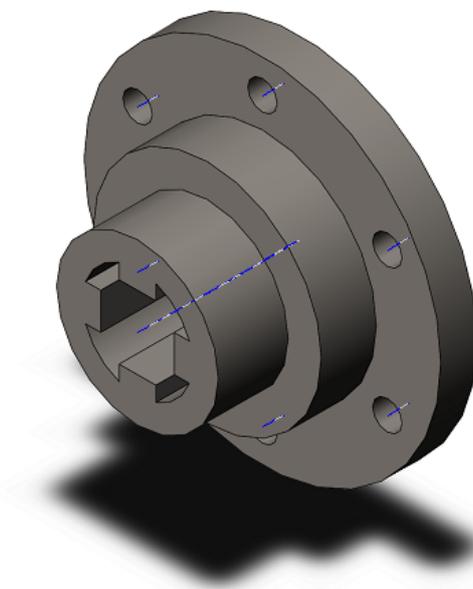
Figura 28 – Seções da Ponta de Eixo traseira de 2014 da equipe Formula UFPB



Fonte: Acervo da equipe Fórmula UFPB; editado pelo autor

Já na ponta de eixo traseira, o numero “1” representa a seção que acopla o flange (Figura 29) responsável pela transmissão do movimento da junta homocinética para a ponta.

Figura 29 – Flange de transmissão de torque



Fonte: Acervo da equipe Fórmula UFPB

O numero “2” indica a região onde é encaixado o montante através do rolamento.

O espaço “4” acopla um flange nos moldes do da Figura 27, adaptado para suas medidas, e assim será responsável por fixar e centrar a roda na ponta de eixo. Portanto, mais um erro é evidenciado, visto que a transmissão de torque por soldagem não é indicada.

Por outro lado, o número “5” indica uma rosca para acoplamento da center lock.

4.3.2 Material

O aço usado na ponta de eixo do carro da equipe Fórmula UFPB 2014 é o SAE 4340. Esse é ligado ao cromo-níquel-molibdênio e é usado em diversos componentes mecânicos como eixos, engrenagens, colunas e cilindros. Algumas de suas características são: resistência mecânica média, resistência à fratura e elevada

resistência à fadiga. No geral, é um aço de alto valor no mercado quando comparado aos mais comuns.³⁶

Na tabela 3, têm-se as principais propriedades do aço 4340 pelo software SolidWorks.

Tabela 3 – Propriedades Aço 4340

Módulo elástico	205000 N/mm ²
Coefficiente de Poisson	0.32
Massa específica	7850 kg/m ³
Resistência de tração	1110 N/mm ²
Limite de escoamento	710 N/mm ²
Coefficiente de expansão térmica	1.23x10 ⁻⁵ /K
Condutividade térmica	44.5 W/(m·K)
Calor específico	475 J/(kg·K)

Fonte: SolidWorks

Por último, cabe que se resuma a análise feita nesse subcapítulo na tabela 4 para que fique de fácil comparação com o projeto da nova ponta de eixo.

Tabela 4 – Resumo das características das pontas antigas

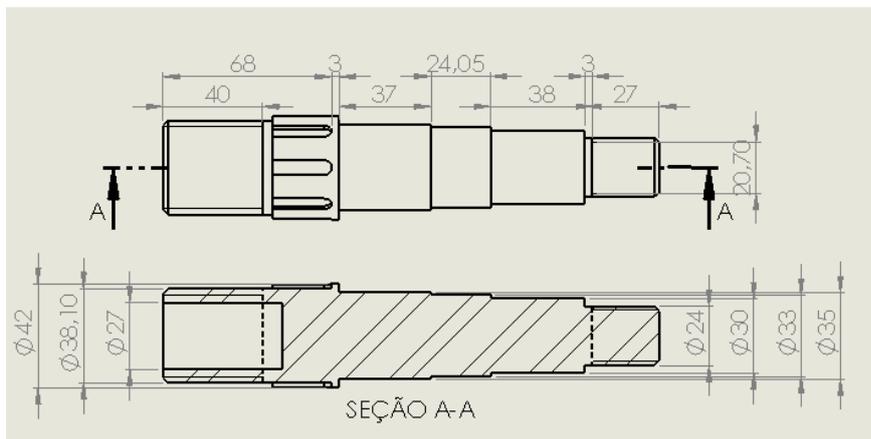
Geometria	Muitos concentradores de tensão
Encaixe de flange de roda	Estrias e soldas
Encaixe de flange de disco de freio	Solda
Material	Aço 4340
Roscas	Diferentes

Fonte: SolidWorks

Além disso, é importante também conhecer as medidas de cada seção dessa ponta de eixo, já que a seguinte será projetada para ser aplicada na mesma situação. Abaixo, as figuras 30 e 31 com as pontas cotadas.

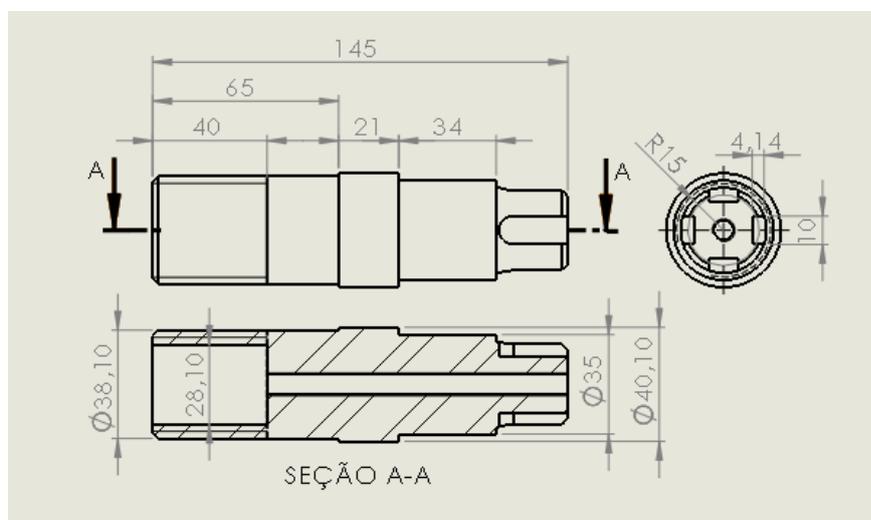
³⁶ GGD METALS. **SAE 4340**. Disponível em: <<http://www.ggdmetals.com.br/produto/sae-4340/>> Acesso em: 26 out. 2018. n.p.

Figura 30 – Esboço da Ponta de Eixo dianteira de 2014



Fonte: Acervo da equipe Fórmula UFPB

Figura 31 – Esboço da Ponta de Eixo traseira de 2014



Fonte: Acervo da equipe Fórmula UFPB

4.4 PROJETO DA PONTA DE EIXO DO ANO DE 2015

Enfim, o projeto de uma ponta de eixo para o protótipo FUFPB04 é solicitado à equipe de suspensão. Os principais motivos dessa mudança se devem as razões expostas na tabela 6. E cabe a um integrante dessa equipe pensar e realizar esse novo projeto.

Nas figuras abaixo (Figura 32 e 33), apresenta-se os projetos finais das pontas de eixo dianteiras e traseiras, respectivamente. E da mesma forma que foi

dividido o subcapitulo anterior, irá ser dividido este, para que fique mais claro o entendimento das soluções escolhidas pelo projetista para cada problema.

Figura 32 – Ponta de Eixo dianteira proposta



Fonte: (Autor, 2018)

Figura 33 – Ponta de Eixo traseira proposta



Fonte: (Autor, 2018)

4.4.1 Geometria

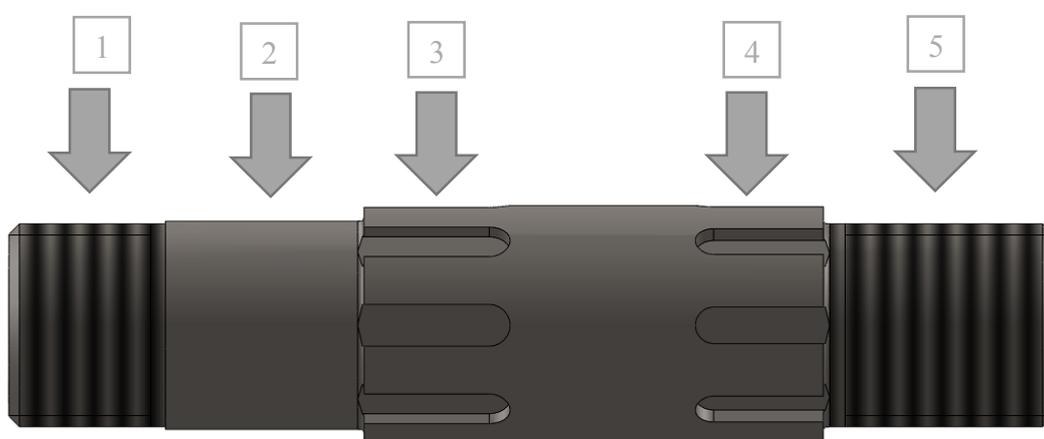
Os problemas centrais relacionados à geometria são quatro: grande quantidade de concentradores de tensões, transmissão de movimentos, fixação de componentes por solda em alguns pontos e roscas de diâmetros diferentes.

Sobre o problema de excesso de concentradores de tensões na ponta de eixo dianteira, pode-se observar pela imagem seguinte uma clara redução. A vantagem principal dessa redução é uma diminuição no número de pontos de alta tensão, e conseqüentemente, diminuição os pontos com baixo coeficiente de segurança.

Talvez a característica que mais tenha motivado a liderança do projeto de suspensão a alterar a ponta de eixo usada tenha sido a solda com único mecanismo de fixação do flange de frenagem com a ponta dianteira e de transmissão do torque da ponta traseira para as rodas traseiras. Esse panorama foi visto como um erro de projeto para a equipe, e por isso devia ser consertado o mais rápido possível.

A última questão a ser resolvida que envolve a estrutura do projeto é de facilitação para a equipe. Nesse novo projeto (Figuras 34 e 35), é interessante que tenha roscas de mesmo diâmetro para que se diminua a quantidade de peças diferentes na estrutura.

Figura 34 – Seções da Ponta de Eixo dianteira proposta



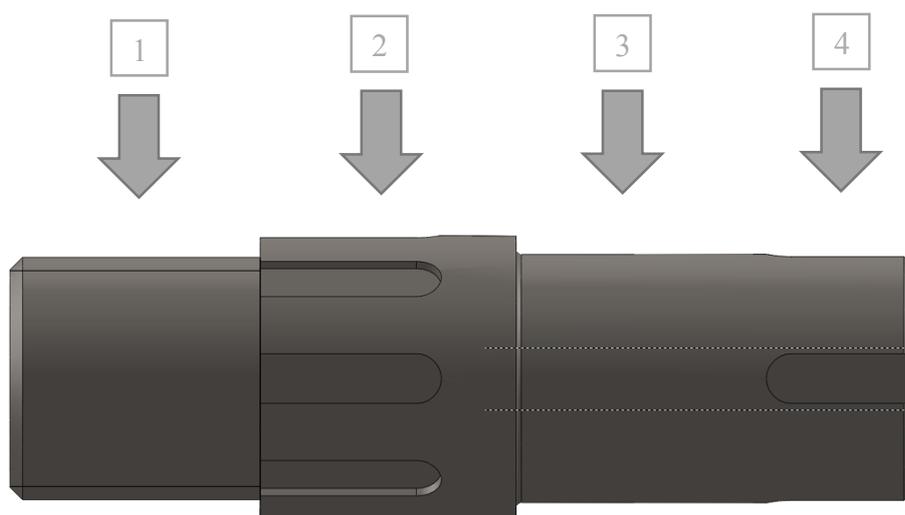
Fonte: (Autor, 2018)

Na nova ponta dianteira, o que fica mais evidente numa primeira análise é a maior uniformidade do corpo, diminuindo assim os concentradores de tensão.

Essa geometria menos agressiva só foi possível graças à algumas atitudes tomadas no projeto. A primeira sendo a mudança do diâmetro interno do rolamento para 40mm, visto em “2”; e a mudança das duas roscas para M39X4.0 em “1” e “5”.

Outra adição interessante foi a de estrias em “3” para ajudar na fixação do flange de freio e assim ser responsável pela transmissão do seu torque. É interessante dizer também que nessa formatação não é necessário o uso de solda em nenhum ponto da ponta, já que a porca apertada em “5” impede a movimentação do flange em “4”; e o montante em “2” impede a movimentação do flange em “3”.

Figura 35 – Seções da Ponta de Eixo traseira proposta



Fonte: (Autor, 2018)

Como uniformidade de geometria não era o problema na ponta de eixo traseira antiga, ela continuou uniforme; porém, com uma mudança de diâmetro da rosca em “1” para M39x4.0, deixando assim uniforme com as roscas das pontas de eixo dianteiras.

A principal mudança, porém, foi no acoplamento do flange de fixação da roda em “2”, que era feito por solda na ponta de eixo antiga. Na nova ponta de eixo traseira também não é necessário o uso de solda para fixar nenhum componente.

Em relação ao rolamento, foi feita uma troca no diâmetro interno do mesmo para se colaborar na uniformidade da geometria e na padronização dos componentes usados.

4.4.2 Material

O aço usado na nova ponta de eixo foi um fator que já estava predefinido antes do projeto. Devido à falta de recursos no projeto, não se tornou viável o uso do aço 4340, apesar de ser o mais indicado ao projeto de um eixo devido a sua alta resistência a fratura e a fadiga.

A substituição desse aço foi pelo SAE 1045, que é bastante comum na indústria e tem seu uso muito geral. Apresenta boas propriedades, como boa relação entre resistência mecânica e resistência à fratura, além também de ser adequado para uso em eixos.³⁷

Outro ponto de importante comparação e que está diretamente relacionado com o material, é a massa de cada componente projetado. Isso visto que o alívio de massa deve ser um dos pilares centrais de projetos de componentes de automóveis. Por outro lado, no caso desse, os problemas estruturais eram tão claros – como, por exemplo, a dificuldade para retirar a roda do carro – que era esperado pelo projetista que houvesse um considerável aumento de massa nas pontas de eixo do protótipo FUFPB04. Porém, ao analisar-se a tabela 6, nota-se que o resultado se mostrou melhor do que o esperado, pois a nova ponta dianteira ainda consegue ser mais leve que a antiga, somando-se o alívio de massa a todas as outras vantagens já apresentadas das novas pontas.

Na tabela 5, têm-se as principais propriedades do aço 1045 pelo software SolidWorks.

Tabela 5 – Propriedades Aço 1045

Coefficiente de Poisson	0.29
Módulo de cisalhamento	80000 N/mm ²
Massa específica	7850 kg/m ³
Resistência de tração	625 N/mm ²
Limite de escoamento	530 N/mm ²
Módulo elástico	205000 N/mm ²

Fonte: SolidWorks

³⁷ GGD METALS. **SAE 1045**. Disponível em: < <http://www.ggdmetals.com.br/produto/sae-1045/> > Acesso em: 26 out. 2018. n.p.

Para finalizar, cabe uma última análise nas diferenças entre as pontas antiga e nova através da tabela 6.

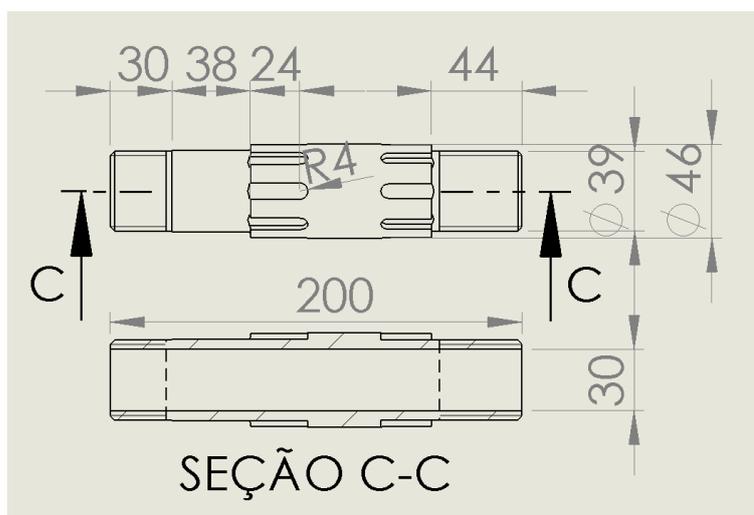
Tabela 6 – Resumo das características das pontas

Característica	Antiga ponta de eixo	Nova ponta de eixo
Geometria	Muitos concentradores de tensão	Diminuição nos concentradores de tensão
Encaixe de flange de roda	Estrias / Solda	Estrias
Encaixe de flange de disco de freio	Solda	Estrias
Material	Aço 4340	Aço 1045
Roscas	Diferentes	Iguais (40 mm)
Massa da ponta de eixo dianteira	1210,53 g	1028,75 g
Massa da ponta de eixo traseira	924,14 g	1036.87 g

Fonte: (Autor, 2018)

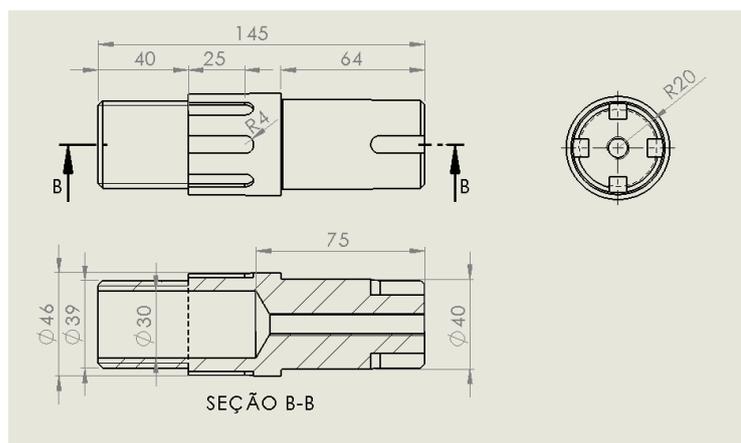
Abaixo, as figuras 36 e 37 com as novas pontas cotadas.

Figura 36 – Esboço da Ponta de Eixo dianteira proposta



Fonte: (Autor, 2018)

Figura 37 – Esboço da Ponta de Eixo traseira proposta



Fonte: (Autor, 2018)

4.5 SIMULAÇÃO PROJETO DA PONTA DE EIXO

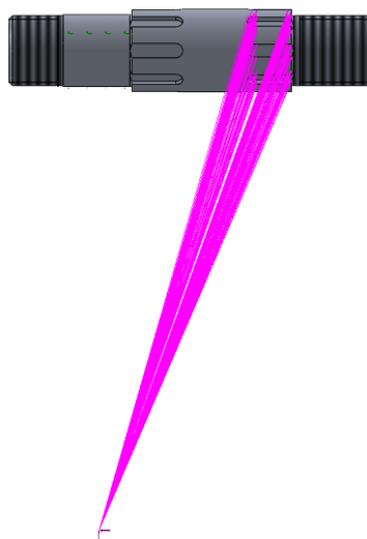
Ao encontrar as pontas de eixo desejadas para serem fabricadas, cabe ao projetista consolidar a viabilidade do uso desses projetos através de simulações pelo software SolidWorks. Esse software foi escolhido devido à simplicidade das simulações, que não demandam uso de um software mais complexo.

Nesse subcapítulo, subdividem-se as simulações na ponta eixo dianteira e traseira para que se facilite a análise dos valores encontrados em ambas separadamente.

4.5.1 Simulações nas Pontas de Eixo Dianteiras

A primeira simulação, como se pode notar na Figura 38, realizada na ponta de eixo dianteira, leva em conta os esforços sofridos pela ponta estaticamente ao passar por uma situação de bump e realizando curva. Usou-se a ferramenta de “carga remota” (em lilás) para representar a força vinda do centro do pneu até a região de contato entre o flange de fixação do pneu e a ponta de eixo. Outra ferramenta do software foi usada para simular a fixação do rolamento na ponta, essa foi a “articulação fixa” (em verde).

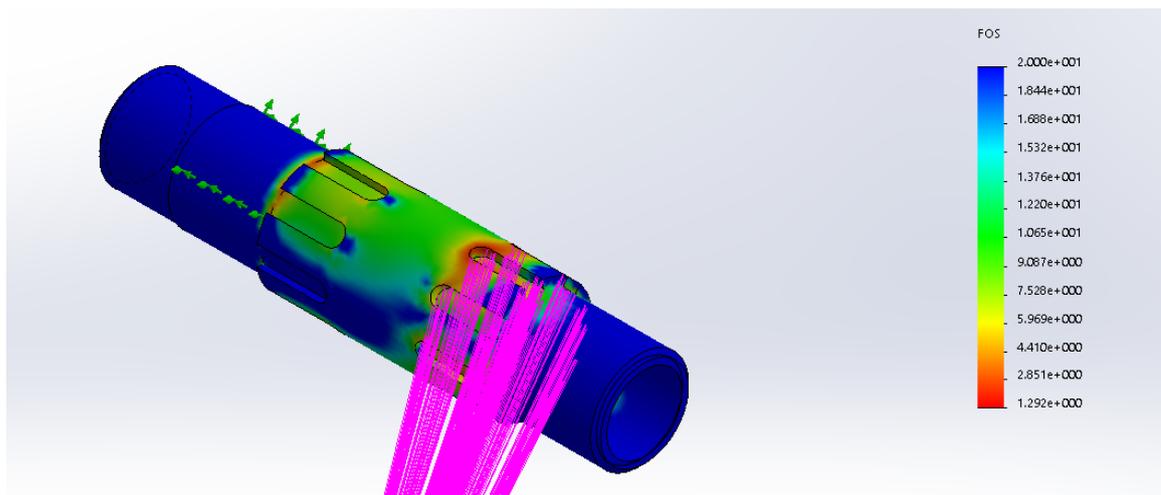
Figura 38 – Simulação da Ponta Dianteira Engastada



Fonte: (Autor, 2018)

Os resultados dessa simulação por software estão expostos na figura 39.

Figura 39 – Resultados da Simulação da Ponta Dianteira Engastada



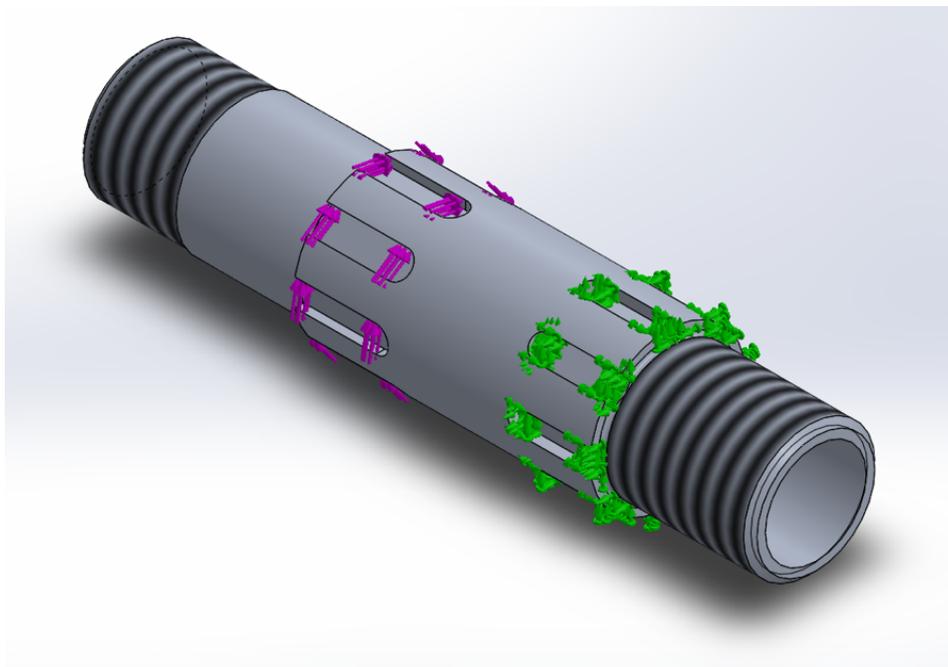
Fonte: (Autor, 2018)

Como visto, os pontos mais críticos possuem um coeficiente de segurança de aproximadamente 1.3.

O estudo seguinte (Figura 40) foi realizado para analisar os esforços atuantes, também estaticamente, no HUB dianteiro em uma situação de frenagem. Para este, considera-se uma “geometria fixa” (em verde) no contato entre o flange

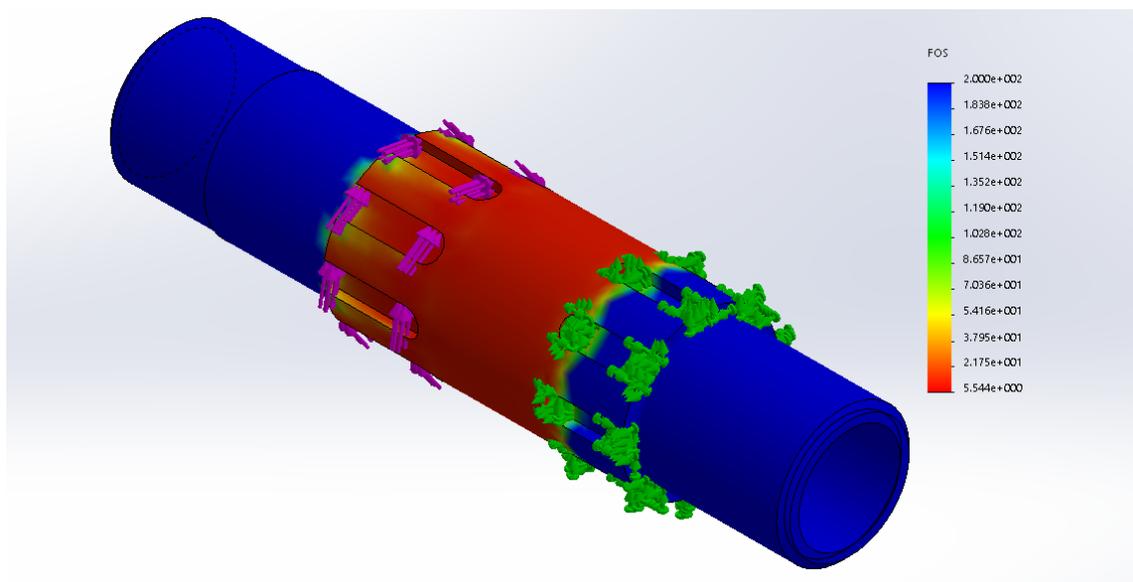
de fixação da roda e a ponta, e um torque de frenagem (em lilás) no contato entre o flange de frenagem e a ponta. Seus dados estão expostos na figura 41.

Figura 40 – Simulação de Frenagem da Ponta de Eixo Dianteira



Fonte: (Autor, 2018)

Figura 41 – Resultados da Simulação de Frenagem da Ponta Dianteira

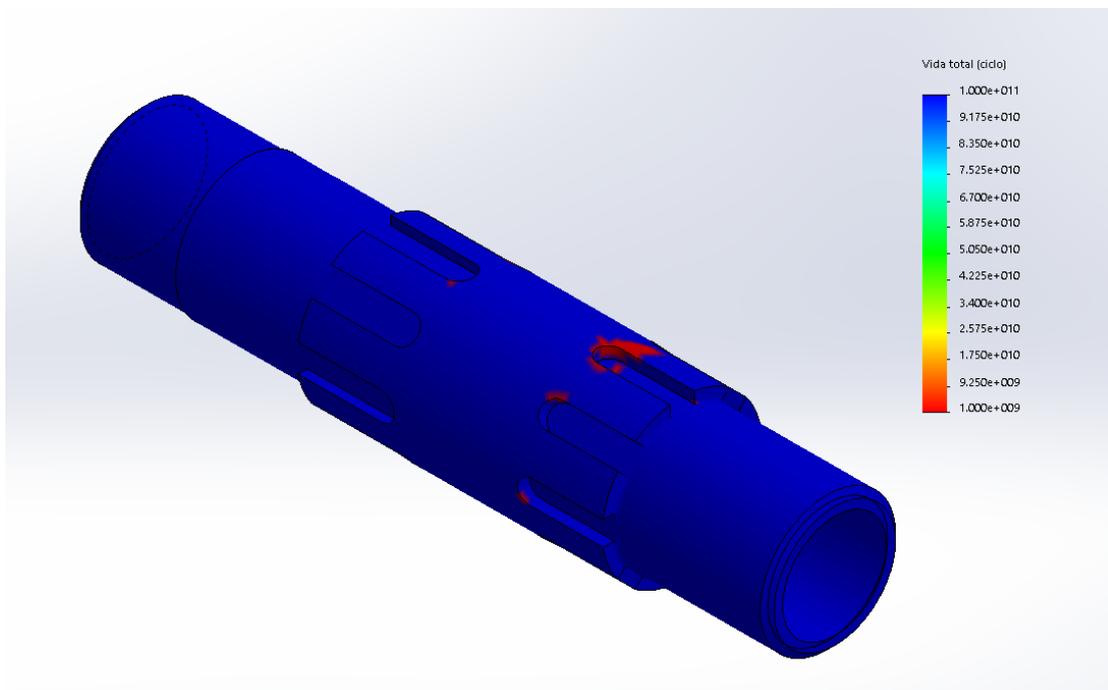


Fonte: (Autor, 2018)

Nessa simulação, observa-se que o fator de segurança é de aproximadamente 5.5. Portanto, infere-se que a frenagem não gera esforços críticos no F3rmula UFPB de 2015.

O último ensaio é o de fadiga; e seus resultados relacionados à vida da ponta de eixo estão apresentadas na figura 42.

Figura 42 – Resultados da Simulação de Fadiga da Ponta Dianteira



Fonte: Fonte: (Autor, 2018)

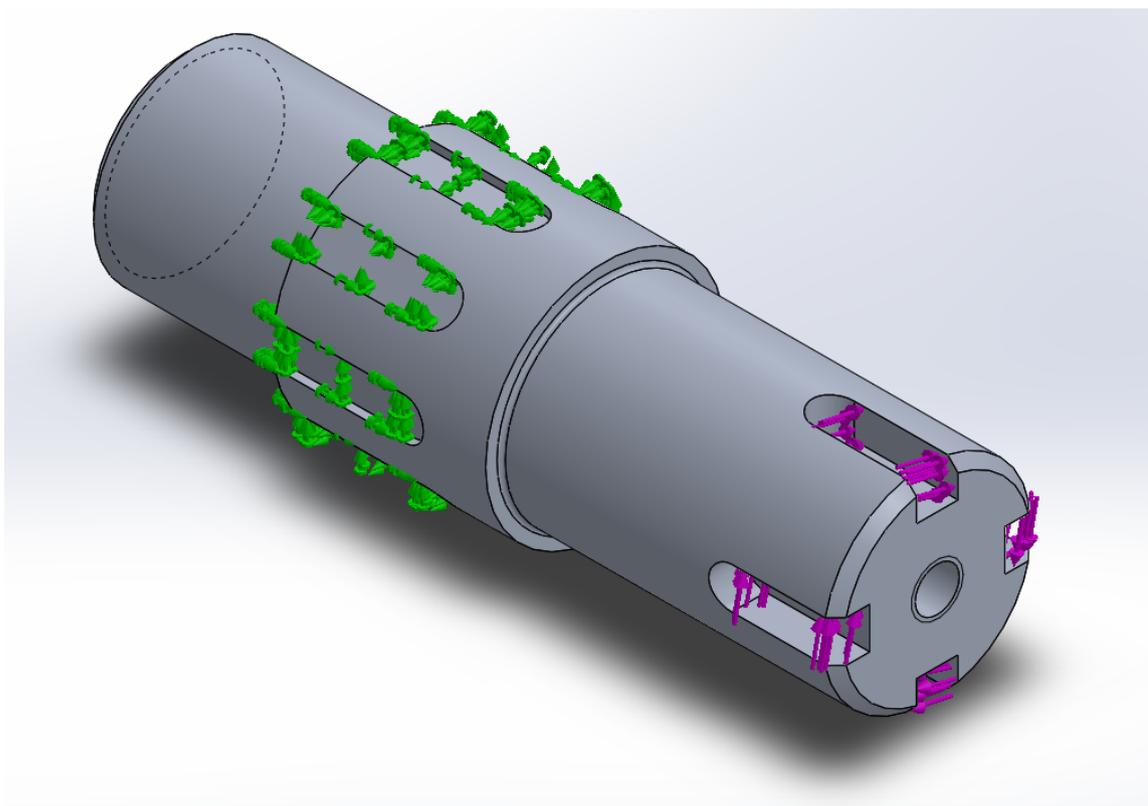
Os resultados encontrados apontam que a vida total mínima nessa ponta de eixo é de 10^9 ciclos, e sabendo que esse valor apresenta uma vida infinita para aços, conclui-se que é viável o uso dessa ponta de eixo no contexto do veículo Fórmula UFPB na competição da SAE.³⁸

4.5.2 Simulações nas Pontas de Eixo Traseiras

Por se tratar da ponta de eixo responsável por receber o torque do motor e transmitir as rodas, a primeira simulação feita (Figura 43) foi da ponta de eixo recebendo toda essa carga (em lilás) enquanto a roda está estática. Por isso a “geometria fixa” no contato entre o flange de fixação da roda e a ponta de eixo (em verde), simulando assim uma situação de arranque com torque máximo. Na figura 44, os resultados estão apresentados.

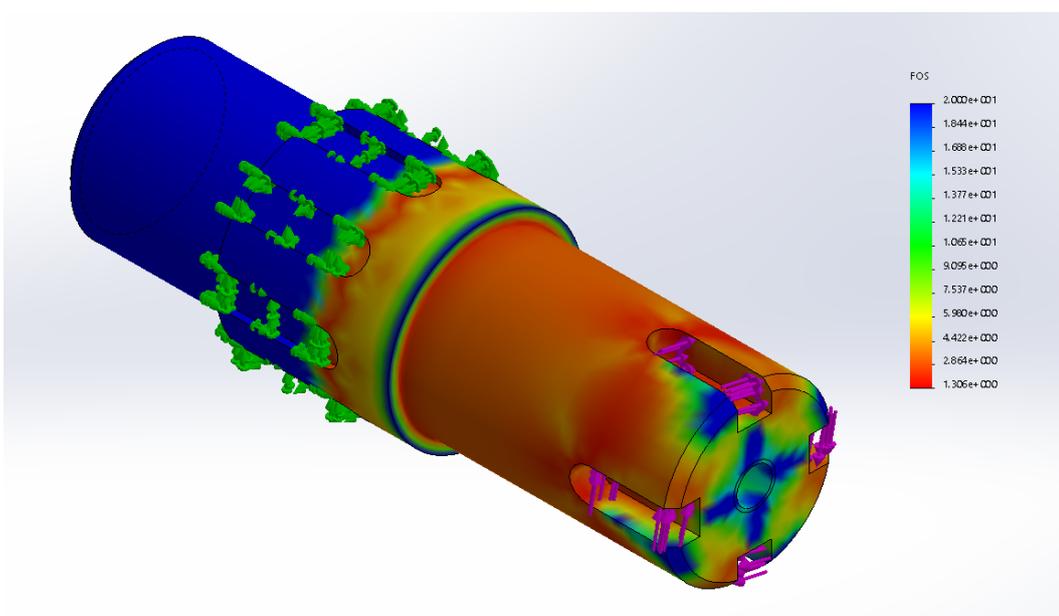
³⁸ BUDYMAS, Richard G; NISBETT, J. Keith. **Elementos de máquinas de Shigley: projeto de engenharia mecânica**. 8. ed. Porto Alegre, RS: AMGH, 2011. n.p.

Figura 43 – Simulação de Torque da Ponta de Eixo Traseira



Fonte: (Autor, 2018)

Figura 44 – Resultados da Simulação de Torque da Ponta Traseira

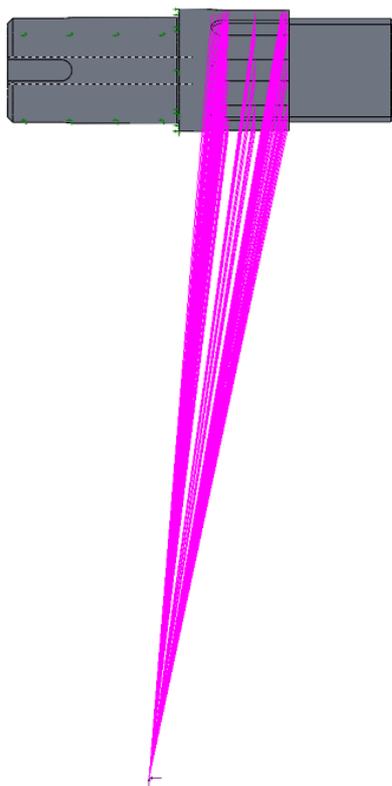


Fonte: (Autor, 2018)

Pode-se inferir que o coeficiente de segurança nesse estudo é de 1.3 nos pontos mais críticos, e que na ponta traseira eles são muito mais evidentes que na dianteira.

Em seguida, a simulação feita na ponta de eixo traseira foi análoga à primeira feita na ponta dianteira. Usou-se das ferramentas de “carga remota” e “articulação fixa” novamente, como se pode ver na Figura 45.

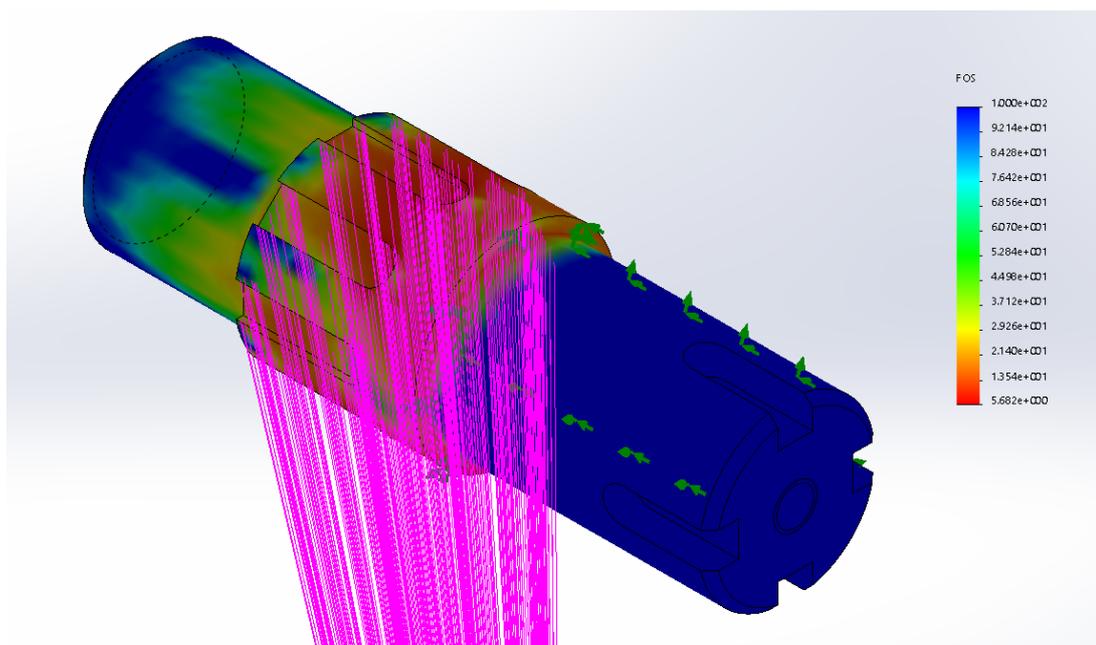
Figura 45 – Simulação da Ponta Traseira Engastada



Fonte: (Autor, 2018)

Os resultados dessa simulação estão apresentados na Figura 46.

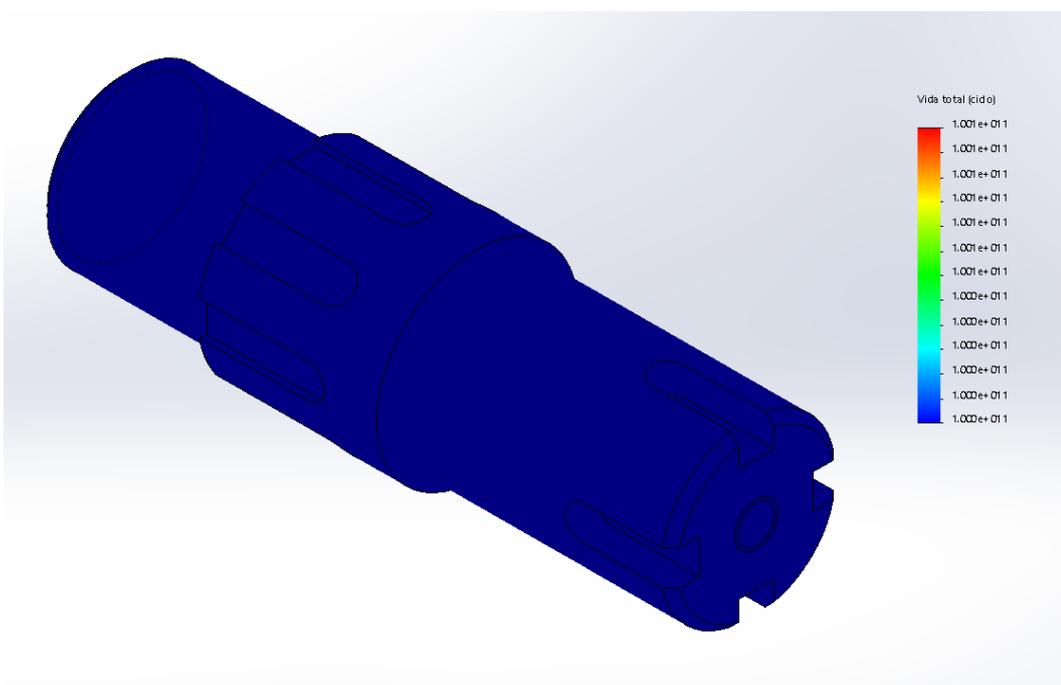
Figura 46 – Resultados da Simulação da ponta traseira engastada



Fonte: (Autor, 2018)

Já o último ensaio é o de fadiga; e seus resultados relacionados à vida da ponta de eixo estão apresentados na figura 47.

Figura 47 – Resultados da Simulação de Fadiga da Ponta Traseira



Fonte: (Autor, 2018)

Mais uma vez, a ponta tem uma vida considerada infinita para aços, e não tende a falhar por fadiga.

Obtidos todos os resultados desse estudo, o autor conclui que as respostas foram satisfatórias e que faz sentido que a peça seja liberada para produção e levada para a etapa de testes no carro da equipe Fórmula UFPB.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O processo de projeto de qualquer componente veicular tende a atender uma metodologia mais ou menos delimitada em diversos contextos. Na equipe Fórmula UFPB, os novos componentes são projetados seguindo alguns passos para que se garanta certa excelência das propostas apresentadas por seus integrantes. E baseado nesses passos esse TCC foi estruturado.

Primeiro, é necessário que se conheça a estrutura da equipe a qual se é participante, assim como a organização SAE e a competição em que os componentes projetados serão testados. Em seguida, faz-se importante a absorção de todos os conhecimentos que serão necessários para que se projete uma peça, nesse caso, o entendimento do que é uma ponta de eixo e de como projetar um eixo. Por fim, cabe ao autor mostrar sua forma de ver todos os conteúdos expostos e explicar o que pensou ao realizar o projeto da nova ponta de eixo.

Através dos resultados obtidos por resultados em software, é possível inferir que o projeto é aplicável à situação e comporia o veículo e exerceria suas funções sem problemas. Portanto, podemos inferir que se obteve relativo sucesso nesse projeto, dado o contexto de recursos disponíveis.

Em relação aos objetivos propostos no início desse trabalho, o autor tenta explicitar ao máximo a situação à qual está inserido ao expor seus pensamentos em relação ao projeto e busca expor, clarear e separar ao máximo cada parte do projeto a fim de que o entendimento do assunto para que quem deseja também projetar uma ponta de eixo num contexto parecido possa entender cada passo e assim desenvolver mais facilmente sua própria forma de pensar esse projeto.

Os resultados dos estudos foram positivos e, em ensaios estáticos tiveram coeficiente de segurança sempre maior que um, já em simulações de fadiga apresentaram vida infinita para as duas pontas.

Em adição, algo que pode ser mais explorado e ainda assim se manter no tema abordado é a análise de onde o projetista podia chegar no projeto de uma ponta de eixo para o mesmo protótipo se não tivesse tantas limitações. Seria uma análise bastante interessante e que complementaria o conteúdo aqui exposto, e prepararia o leitor para situações mais complexas e de maior precisão.

Por fim, em geral, a proposta apresentada aqui cumpre seu papel de situar o leitor que não está acostumado a ter contato com um projeto de Fórmula

SAE e, também, de guiar os que estão buscando realizar seu projeto de ponta de eixo e nunca tiveram contato com um.

REFERÊNCIAS

AUTOCAR. **The Story Behind one of Formula 1's greatest photos**. Disponível em: <https://www.autocar.co.uk/car-news/motorsport-f1-2016/story-behind-one-formula-1s-greatest-photos>> Acesso em: 08 de agosto de 2018.

AUTOSPORT. **The pros and cons of a Ferrari pullrod design**. Disponível em: <https://www.autosport.com/f1/feature/4222/the-pros-and-cons-of-ferrari-pullrod-design>> Acesso em: 08 de agosto de 2018.

BUDYMAS, Richard G; NISBETT, J. Keith. **Elementos de máquinas de Shigley: projeto de engenharia mecânica**. 8. ed. Porto Alegre, RS: AMGH, 2011.

COPPERMETAL. **Informações técnicas: Alumínio 7075 T651**. Disponível em: http://www.coppermetal.com.br/pdf/aluminio/info-tec-copp_alumi7075.pdf> Acesso em: 08 de agosto de 2018.

DE AQUINO SILVA, João Bosco. **Elementos de máquinas I**. 09 jul. 2018, 04 nov. 2018. Notas de Aula.

GELSON LUZ. **Aço SAE 1020: Propriedades Mecânicas**. Disponível em: <https://www.materiais.gelsonluz.com/2017/10/aco-sae-1020-propriedades-mecanicas.html>> Acesso em: 08 de agosto de 2018.

GGD METALS. **SAE 1045**. Disponível em: <http://www.ggdmetals.com.br/produto/sae-1045/>> Acesso em: 26 out. 2018.

GGD METALS. **SAE 4340**. Disponível em: <http://www.ggdmetals.com.br/produto/sae-4340/>> Acesso em: 26 out. 2018.

MILLIKEN, W. F.; MILLIKEN, D. L. **Race Car Vehicle Dynamics**. Warrendale, PA, EUA: Society of Automotive Engineers, 1995.

PORTAL ITA. **Equipe Leviatã vence SAE Aero design na classe Advanced**. Disponível em: <http://www.ita.br/noticias/equipeleviatvencesaeaaerodesignnaclasseadvanced>> Acesso em: 19 de julho de 2018.

QUATRO RODAS. **Quais as diferenças entre os tipos de suspensão independente?**. Disponível em: <https://quatorrodas.abril.com.br/auto-servico/quais-as-diferencas-entre-os-tipos-de-suspensao-independente/>> Acesso em: 08 de agosto de 2018.

QUATRO RODAS. **Quais as diferenças entre os tipos de suspensão independente?**. Disponível em: <https://quatorrodas.abril.com.br/auto-servico/quais-as-diferencas-entre-os-tipos-de-suspensao-independente/>> Acesso em: 08 de agosto de 2018.

QUATRO RODAS. **Qual a diferença entre suspensão multilink e por eixo de torção?**. Disponível em: <https://quatorrodas.abril.com.br/auto-servico/qual-a>

diferenca-entre-suspensao-multilink-e-por-eixo-de-torca/> Acesso em: 08 de agosto de 2018.

SAE BRASIL. **Baja SAE Brasil**. Disponível em:<<http://portal.saebrasil.org.br/a-instituicao/sae-no-mundo>> Acesso em: 19 de julho de 2018.

SAE BRASIL. **Fórmula SAE Brasil**. Disponível em:<<http://portal.saebrasil.org.br/programas-estudantis/formula-sae-brasil>> Acesso em: 24 de julho de 2018.

SAE BRASIL. **SAE no Brasil**. Disponível em:<<http://portal.saebrasil.org.br/a-instituicao/sae-no-mundo>> Acesso em: 17 de julho de 2018.

SAE BRASIL. **SAE no mundo**. Disponível em:<<http://portal.saebrasil.org.br/programas-estudantis/baja-sae-brasil>> Acesso em: 12 de julho de 2018.

SMITH, Carrol. **Tune to Win**. Fallbrook, CA, EUA: Aero Publishers, Inc, 1978.

WHEELZINE. **Advantages and disadvantages of independent front suspension**. Disponível em <https://wheelzine.com/advantages-disadvantages-of-independent-front-suspension>> Acesso em: 08 de agosto de 2018.