



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

RANIEL FERREIRA DA COSTA

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROJETO DE SISTEMA DE SUSPENSÃO
TRASEIRA APLICADO A UM PROTÓTIPO DE VEÍCULO DE COMPETIÇÃO
ESTILO MOTO3**

JOÃO PESSOA

2019

RANIEL FERREIRA DA COSTA

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROJETO DE SISTEMA DE SUSPENSÃO
TRASEIRA APLICADO A UM PROTÓTIPO DE VEÍCULO DE COMPETIÇÃO
ESTILO MOTO3**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba como parte das exigências para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Jean Pierre Veronese

JOÃO PESSOA

2019

RANIEL FERREIRA DA COSTA

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROJETO DE SISTEMA DE SUSPENSÃO
TRASEIRA APLICADO A UM PROTÓTIPO DE VEÍCULO DE COMPETIÇÃO
ESTILO MOTO3**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado à banca examinadora do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba como parte das exigências para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em, ____ de Agosto de 2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Jean Pierre Veronese

Departamento de Engenharia Mecânica / Centro de Tecnologia / UFPB
(Orientador)

Prof. Dr. Naor Moraes de Melo

Departamento de Engenharia Mecânica / Centro de Tecnologia / UFPB
(Examinador)

Prof. Dr. João Pereira Leite

Departamento de Engenharia Mecânica / Centro de Tecnologia / UFPB
(Examinador)

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

C837d Costa, Raniel Ferreira da.

DESENVOLVIMENTO DE UM PROJETO DE SISTEMA DE SUSPENSÃO
TRASEIRA APLICADO A UM PROTÓTIPO DE VEÍCULO DE
COMPETIÇÃO ESTILO MOTO3 / Raniel Ferreira da Costa. -
João Pessoa, 2019.
59 f. : il.

Orientação: Prof Dr Jean Pierre Veronese.
Monografia (Graduação) - UFPB/CT.

1. Motostudent. 2. Suspensão traseira. 3. Processo de
Desenvolvimento de Produtos. 4. Adams. 5. Solidworks.
I. Prof Dr Jean Pierre Veronese. II. Título.

UFPB/BC

Dedico este trabalho aos meus pais, Ronaldo Messias da Costa e Maria de Lourdes Ferreira da Costa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço de coração aos meus pais, Ronaldo e Maria de Lourdes, não somente por todo o esforço dispensado em prol dos meus estudos, mas principalmente pelo exemplo repassado de amor, dignidade e humildade;

As minhas irmãs, Laiana e Luana, e minha namorada Maria José, pela união, carinho e companheirismo em cada etapa da minha vida;

Ao professor Jean Pierre que aceitou prontamente o convite de orientação, e que pacientemente me auxiliou na elaboração deste trabalho;

A UFPB, prezada instituição que me promoveu a formação em Engenharia Mecânica;

Aos amigos que compõem o projeto Motorius;

A Residência Universitária (RUMF), que foi não somente de um espaço físico que me apoiou na permanência na universidade, como também um ambiente que me trouxe um intercâmbio cultural e social de grande valor;

A equipe Formula SAE UFPB por ceder o *software* Adams® e ao Laboratório de Expressão Gráfica da UFPB por ceder o *software* Solidworks®;

A todos os meus amigos que sem dúvidas contribuíram direta ou indiretamente, meu muito obrigado.

“— Seu José, mestre carpina, e que interesse, me diga, há nessa vida a retalho que é cada dia adquirida? espera poder um dia comprá-la em grandes partidas? — Severino, retirante, não sei bem o que lhe diga: não é que espere comprar em grosso tais partidas, mas o que compro a retalho é, de qualquer forma, vida.”

João Cabral de Melo Neto – *Morte e Vida Severina*

RESUMO

Competições universitárias de engenharia são iniciativas de fundamental importância para promoção da pesquisa científica e da difusão e intercâmbio de conhecimentos, proporcionando experiências valorizadas pelo mercado de trabalho e constituindo uma oportunidade concreta de direcionamento dos alunos para suas futuras carreiras. Dentre as disputas universitárias, destaca-se a Competição Internacional Motostudent, que é um desafio entre equipes universitárias de todo o mundo, inspirado na categoria Moto3 do Campeonato Mundial de Motovelocidade. Neste cenário, o objetivo deste trabalho é desenvolver um projeto de sistema de suspensão traseira para um protótipo de motocicleta da equipe Motorius Racing Team da Universidade Federal da Paraíba, participante da competição Motostudent, de forma que o mesmo sirva apoio teórico à materialização de componentes de suspensão que integrarão os futuros protótipos de motocicletas da equipe. Para isso, serão apresentados assuntos pertinentes ao projeto do sistema de suspensão, utilizando como suporte literaturas reconhecidas na área, e em seguida será aplicada a metodologia baseada em conhecimentos de Processo de Desenvolvimento de Produtos, a qual separa as atividades necessárias ao projeto do sistema de suspensão em quatro fases: Planejamento do Projeto, Projeto Conceitual, Projeto Preliminar e Projeto Detalhado. Em apoio ao desenvolvimento do projeto serão utilizados os *softwares* Adams® e Solidworks®. A aplicação de tal metodologia trouxe relevantes contribuições não somente no projeto de sistema de suspensão, mas também como proceder no desenvolvimento do projeto de qualquer produto desejado.

Palavras-Chave: Motostudent. Suspensão traseira. Processo de Desenvolvimento de Produtos. Adams®. Solidworks®.

ABSTRACT

University engineering competitions are initiatives of fundamental importance for the promotion of scientific research and the diffusion and exchange of knowledge, providing valuable experiences in the work's market and providing a concrete opportunity to direct the students to their future careers. Among the university disputes, there is the International Motostudent Competition, which is a challenge among university teams from around the world, inspired by the Moto3 category of the World Motorcycle Championship. In this scenario, the objective of this work is to develop a project of rear suspension for a motorcycle prototype of the Motorius Racing Team of the Federal University of Paraíba, participant of the Motostudent competition, so that it serve as a theoretical support to the materialization of suspension's components that will be part of the team's future motorcycle prototypes. To this end, subjects pertaining to the design of the suspension system will be presented, using literature recognized in the area, and then will be applied the methodology based in knowledge of Process of Product Development, which separates the activities needed to design the suspension system in four phases: Project Planning, Conceptual Design, Preliminary Design and Detailed Design. In support of the project development, Adams® and Solidworks® softwares will be used. The application of such methodology has made relevant contributions not only at suspension system design, but also how to proceed in the design development of any desired product.

Keywords: Motostudent. Rear suspension. Product Development Process. Adams®. Solidworks®.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Motocicleta Hildebrand & Wolfmüller 1894 – Primeira fabricada em série.....	17
Figura 2: Motocicleta Norton Manx 1948 utilizando uma suspensão tipo êmbolo.....	18
Figura 3: Descrição do funcionamento do sistema de suspensão traseira tipo êmbolo.....	19
Figura 4: Motocicleta Guzzi G.T. Norge 1928 utilizando sistema de suspensão pivotado.....	19
Figura 5: Sistema de suspensão da Guzzi G.T. Norge	20
Figura 6: Balança traseira	21
Figura 7: Balança de braço duplo e estrutura simétrica.....	22
Figura 8: Balança de braço duplo assimétrica com transmissão por eixo cardan	22
Figura 9: Balança de braço duplo triangulada acima dos braços principais.....	23
Figura 10: Balança monobraço.....	23
Figura 11: Massa suspensa e não-suspensa	24
Figura 12: Unidade mola-amortecedor.....	25
Figura 13: Sistema de conexão direta.....	26
Figura 14: Rigidez do sistema de suspensão	27
Figura 15: Sistema de conexão indireta.....	28
Figura 16: Fluxograma do método	30
Figura 17: Protótipo de motocicleta da equipe Motorius, ainda em fase desenvolvimento	33
Figura 18: Descrição gráfica do teste de segurança	34
Figura 19: Principais dimensões geométricas	37
Figura 20: Arranjo mola-amortecedor Uni-Trak (esquerda) e Pro-Link (direita).....	40
Figura 21: Biela	40
Figura 22: Montagem do sistema de suspensão traseira no software Adams®	42
Figura 23: Reação da unidade mola-amortecedor vs deslocamento vertical da roda traseira..	45
Figura 24: Representação 3D da balança	46
Figura 25: Representação 3D do balancim.....	46
Figura 26: Diagrama de corpo livre da balança.....	47
Figura 27: Detalhe da malha gerada para a balança	48
Figura 28: Detalhe da malha gerada para o balancim	49
Figura 29: Análise de tensão no suporte de apoio do eixo da roda traseira	50
Figura 30: Análise de tensão na estrutura de alojamento dos rolamentos da balança.....	50
Figura 31: Análise de tensão nos suportes do eixo de conexão da balança com o balancim ...	51

Figura 32: Análise de tensão no balancim.....	51
Figura 33: Representação 3D da montagem do sistema de suspensão traseira completo	53
Figura 34: Desenho 2D do balancim	54
Figura 35: Desenho 2D da balança.....	55
Figura 36: Representação 3D do sistema de suspensão montado no chassi do protótipo	
Motorius	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Especificações do sistema de suspensão	37
Tabela 2: Concepção do projeto	41
Tabela 3: Posições das uniões dos elementos do sistema de suspensão no software Adams®	43
Tabela 4: Posições iniciais das uniões a otimizar no software Adams®.....	43
Tabela 5: Posições das uniões biela-balancim e balancim-balança analisadas no software Adams®	44

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Características dos componentes disponíveis.....	35
Quadro 2: Especificações da biela.....	52

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
1.1 OBJETIVO GERAL	15
1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO	15
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
2.1 CONCEITO DE SUSPENSÃO VEICULAR.....	16
2.2 EVOLUÇÃO DOS SISTEMAS DE SUSPENSÃO TRASEIRA DE MOTOCICLETAS	17
2.3 COMPONENTES DOS SISTEMAS DE SUSPENSÃO TRASEIRA ATUAIS	21
2.3.1 Balança	21
2.3.2 Arranjo mola-amortecedor	24
2.4 PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS	28
3 METODOLOGIA.....	30
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS	32
4.1 FASE DE PLANEJAMENTO DO PROJETO	32
4.2 FASE DE PROJETO CONCEITUAL.....	38
4.3 FASE DE PROJETO PRELIMINAR.....	41
4.4 FASE DE PROJETO DETALHADO.....	53
5 CONCLUSÃO.....	57
REFERÊNCIAS	58

1 INTRODUÇÃO

A Moto Engineering Foundation e o TechnoPark MotorLand promovem a Competição Internacional Motostudent, que se trata de um desafio entre equipes de universidades de todo o mundo. O objetivo da competição é que estudantes universitários apliquem conhecimentos adquiridos durante seus estudos em um projeto industrial real, desenvolvendo um protótipo de moto de corrida, que será avaliado e testado no Circuito Motorland, em Aragón na Espanha. Tal protótipo deve ser construído obedecendo parâmetros descritos no regulamento da competição, cujos moldes são inspirados na categoria Moto3 do Campeonato Mundial de Motovelocidade, organizado pela Federação Internacional de Motociclismo (FIM), a qual também utiliza motores de combustão interna monocilíndricos de quatro tempos e 250cc.

Um grupo de estudantes da Universidade Federal da Paraíba sob orientação do professor do Departamento de Engenharia Mecânica da mesma universidade, Prof. Dr. Jean Pierre Veronese, reuniram-se para participar da competição Motostudent, nascendo assim a equipe Motorius Racing Team.

Para enfrentar o desafio, a equipe dividiu suas atividades segundo os subsistemas do veículo, sendo eles: suspensão, sistema de freios, motor/transmissão, chassi e carenagem. Dentre as ações realizadas em cada subsistema, destaca-se a elaboração de estudos visando a materialização dos componentes que integram seus protótipos. Neste contexto, surgiu a necessidade da reunião de informações sobre o projeto de suspensão traseira e foi este fato que justificou o presente trabalho.

Autores como Cossalter (2006) e Foale (2002) explicam a importância do sistema de suspensão nas motocicletas devido a sua influência direta na dirigibilidade do veículo, aderência dos pneus na estrada, conforto do piloto, longevidade e confiabilidade mecânica. Portanto, um projeto de um sistema de suspensão próprio da equipe Motorius tem o potencial de trazer relevantes informações, as quais elevarão o nível de conhecimento da equipe acerca de projetos de motocicletas.

A teoria do Processo de Desenvolvimento de Produtos será utilizada como metodologia de forma a racionalizar e melhorar o desenvolvimento das atividades, separando-as em quatro fases: Planejamento do Projeto, Projeto Conceitual, Projeto Preliminar e Projeto Detalhado. A importância da aplicação de tal metodologia para o projeto de um sistema de suspensão da equipe Motorius trará relevantes contribuições não somente para o projeto de sistema de suspensão, mas também sobre como projetar todo e qualquer componente da motocicleta.

Para as diversas etapas propostas, prevê-se o dimensionamento cinemático e dinâmico do sistema de suspensão, executado com auxílio do *software* Adams®. À luz da resistência dos materiais, os componentes serão modelados com auxílio do *software* Solidworks®, resultando no desenho detalhado dos mesmos.

1.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem por objetivo elaborar um projeto de um sistema de suspensão traseira de uma motocicleta padrão Motostudent.

1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

Especificamente, será desenvolvido um projeto de suspensão traseira para o atual protótipo de motocicleta da equipe Motorius, o qual encontrasse em fase de construção. O conteúdo deste trabalho deve servir de apoio teórico à equipe Motorius para a concretização de sistemas de suspensão que integrarão seus futuros protótipos de motocicletas em suas participações nas próximas edições da competição Motostudent.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo reúne informações teóricas relevantes ao assunto abordado. Será apresentado o conceito de suspensão veicular, um breve histórico sobre a evolução do sistema de suspensão traseira de motocicletas bem como o detalhamento dos seus componentes. Também serão realizados comentários sobre o processo de desenvolvimento de produtos.

2.1 CONCEITO DE SUSPENSÃO VEICULAR

Veículos em geral transitam sobre superfícies muitas vezes irregulares estando sujeitos, portanto, a solavancos os quais, segundo Foale (2002) não conferem grandes problemas em baixa velocidade, porém à medida que esta aumenta, a intensidade dos solavancos sofridos torna-se mais pronunciada, causando prejuízos no conforto do piloto e passageiros assim como na capacidade de manobra e tração do veículo. Para amenizar o problema, são intercalados mecanismos entre as rodas e o restante da estrutura do veículo. O conjunto de tais mecanismos é chamado de suspensão veicular.

Segundo Cossalter (2006), suspensão veicular pode ser definida como um conjunto mecânico que tem por finalidade permitir que as rodas sigam o perfil da estrada sem transmitir vibração excessiva ao piloto, lhe oferecendo assim uma condução confortável, além de garantir a aderência das rodas no plano da estrada, a fim de transmitir as condições de condução e tração necessárias para o movimento e o comportamento desejado do veículo sob várias condições operacionais.

Ainda de acordo com Oliveira *et al.* (2014) o sistema de suspensão de um veículo é diretamente responsável por filtrar as acelerações impostas pelas imperfeições dos pavimentos e de outras fontes de excitação, além e contribuir com a estabilidade, dirigibilidade e performance.

As propriedades de uma suspensão que importam à dinâmica do veículo estão relacionadas principalmente com o seu comportamento cinemático (movimento) e sua resposta às forças e momentos que são transmitidos dos pneus ao chassi. Além disso, outras características consideradas no projeto são o custo, o peso, o espaço, fabricação, facilidade de montagem, entre outros (GILLESPIE, 1992).

2.2 EVOLUÇÃO DOS SISTEMAS DE SUSPENSÃO TRASEIRA DE MOTOCICLETAS

De acordo com Fitzgerald (2010), em 1894 os irmãos Hildebrand e Wolfmüller apresentaram em Munique na Alemanha o que seria a primeira motocicleta fabricada em série. O modelo apresentado na Figura 1, fabricado pela empresa Hildebrand & Wolfmüller, manteve-se em produção até 1897 e estimasse que mais de dois mil exemplares foram produzidos.

Tal como aconteceu com os pioneiros fabricantes de veículos motorizados de duas rodas, os irmãos utilizaram em seu modelo um motor de combustão interna, desenvolvido juntamente com o engenheiro alemão Alois Wolfmüller e seu mecânico Hans Geisenhof, montado em uma estrutura rígida, muito parecida com um quadro de bicicleta padrão.

Naquele modelo não havia um sistema de suspensão real, o qual por definição é composto por componentes que proporcionam conforto ao piloto e melhoria na dirigibilidade do veículo. Apenas molas foram adicionadas sob os assentos afim de melhorar o conforto do piloto, porém não ofereciam melhorias na condução do veículo.

Figura 1: Motocicleta Hildebrand & Wolfmüller 1894 – Primeira fabricada em série



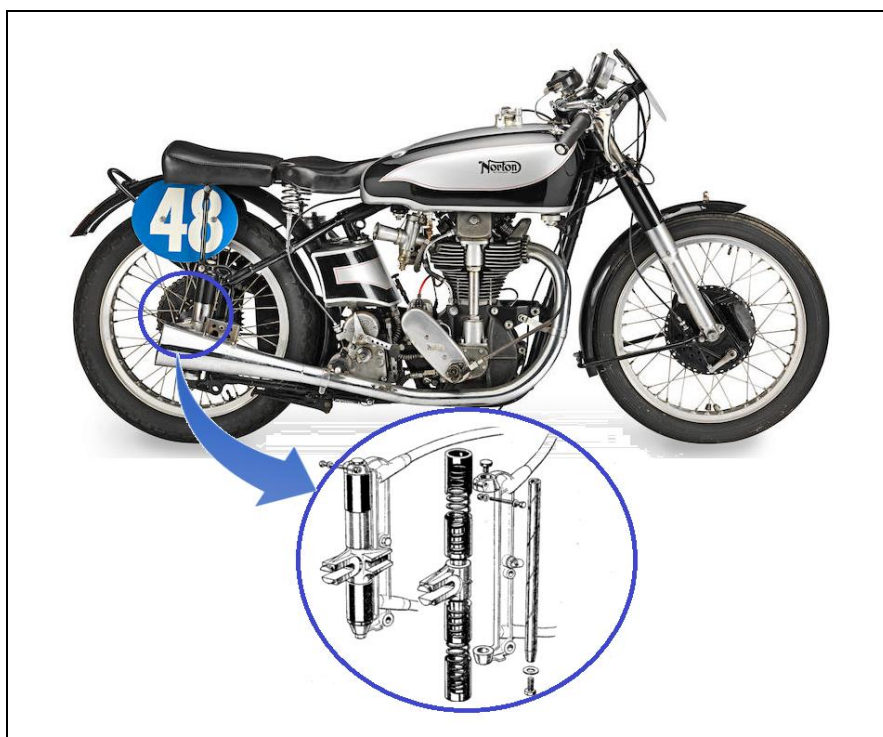
Fonte: Hemmings¹

Segundo Foale (2002) dentre os sistemas iniciais de suspensão traseira desenvolvidos, o modelo de êmbolo foi o primeiro a ganhar ampla aceitação devido aos sucessos de sua utilização nas motos de corrida da BMW e Norton, e porque, para os fabricantes da época, era o tipo de sistema de suspensão que mais facilmente era implementado em seus modelos de

¹ Disponível em: < <https://www.hemmings.com/blog/article/1894-hildebrand-wolfmüller-recreation/> >. Acesso em: 27 jul. 2019.

chassis rígidos. Tais sistemas, como apresentado na Figura 2 utilizavam apenas molas atuando na parte inferior e superior do eixo da roda traseira as quais eram constantemente comprimidas e estendidas devido as perturbações causadas pelas irregularidades solo durante o movimento da motocicleta. Apenas o atrito dos elementos do sistema durante seu movimento era responsável pelo amortecimento.

Figura 2: Motocicleta Norton Manx 1948 utilizando uma suspensão tipo êmbolo

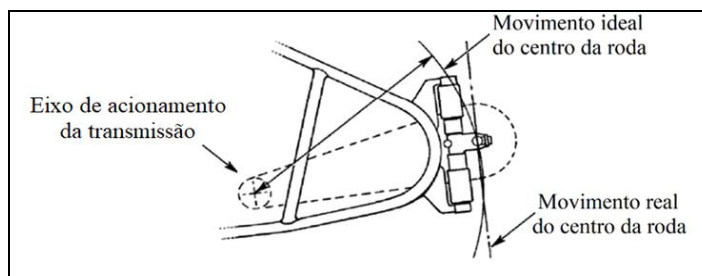


Fonte: Bohams², adaptado pelo autor (2019)

Foale (2002) e Arias-Paz (2003) salientam que com a suspensão traseira do tipo êmbolo, o movimento da roda acontecia em linha reta como mostrado na Figura 3, tensionando demasiadamente a corrente ou correia nos extremos do seu curso, estabelecendo assim um limite para o movimento da roda traseira. Em contraste, o movimento ideal do centro da roda deveria acontecer ao longo de um arco cujo centro seria o eixo de saída de acionamento da transmissão. Tal fato configurou-se como um problema funcional do sistema pois, conforme explica Arias-Paz (2003), os componentes de transmissão da época apresentavam mau funcionamento principalmente quando submetidos a variações de tensão.

² Disponível em: < <https://www.bonhams.com/auctions/25383/lot/141/> >. Acesso em: 27 jul. 2019.

Figura 3: Descrição do funcionamento do sistema de suspensão traseira tipo êmbolo



Fonte: FOALE, 2002, p. 1-21, adaptado pelo autor (2019)

Originalmente, diversos projetos de suspensão traseira foram desenvolvidos, mas ainda era um item raro nas motocicletas e frequentemente causava efeitos adversos na estabilidade dos veículos.

Embora poucos fabricantes estivessem interessados em alterar seus rígidos modelos de chassi, ainda em 1928 Carlo Guzzi e seu irmão Giuseppe Guzzi, produziram uma motocicleta, nomeada Moto Guzzi G.T. Norge (Figura 4), na qual incorporaram um sistema de suspensão que articulava a estrutura do chassi e o tornaram elástico.

Figura 4: Motocicleta Guzzi G.T. Norge 1928 utilizando sistema de suspensão pivotado



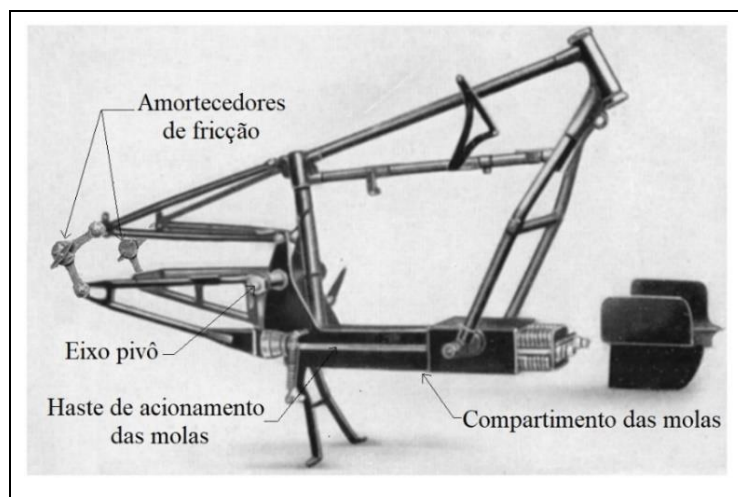
Fonte: Sheldon's EMU³

O sistema de suspensão projetado pelos irmãos Guzzi (Figura 5), triangulava a estrutura que dava suporte a roda traseira, de modo a conseguir a rigidez necessária do elemento, e permitia que o mesmo girasse devido uma conexão pivotada na parte traseira do chassi, próximo ao eixo de saída de potência do motor, o que permitiu um amplo movimento da roda sem o inconveniente problema com a transmissão, apresentado nos sistemas com

³ Disponível em: < <https://cybermotorcycle.com/gallery/moto-guzzi-1920s/Moto-Guzzi-1928-GT-Norge-50a0.htm> > Acesso em: 27 jul. 2019.

êmbolo abordado anteriormente. O movimento articulado da estrutura acionava dois amortecedores de fricção localizados entre a estrutura móvel e o chassi, assim como quatro molas localizadas em uma caixa de aço embaixo do motor.

Figura 5: Sistema de suspensão da Guzzi G.T. Norge



Fonte: Ingegneria D'Epoca⁴, adaptado pelo autor (2019)

No entanto, segundo Fallon (2017), a ideia de um quadro elástico era muito avançada para o mundo das motocicletas, sendo muito conservador na época, e o marca Moto Guzzi ainda era modesta e impopular para obter reconhecimento pelos méritos de sua criação.

Ainda segundo o autor, para provar a capacidade de inovação da marca demonstrando a eficiência de seu sistema de suspensão desenvolvido, Giuseppe Guzzi se comprometeu a uma desafiadora jornada de 6400 quilômetros rumo ao Círculo Polar Ártico pilotando uma G.T. Norge que, apesar das péssimas condições das estradas europeias da época, alcançou o destino em quatro semanas.

Com a divulgação do sucesso da viagem, o sistema de suspensão desenvolvido pelos irmãos Guzzi foi imediatamente adotado por grande parte dos fabricantes que, como afirma Arias-Paz (2003), com seu aperfeiçoamento praticamente todas as motocicletas em desenvolvimento da época puderam dispor de um sistema que evitava todos os problemas causados devido a perda de tração, pois possibilitava uma maior eficiência no contato dos pneus com o solo como também um aumento de comodidade para o piloto.

⁴ Disponível em: <http://www.ingegneriadepoca.com/pagine.web/inglese/telaistica.htm>. Acesso em: 27 jul. 2019.

Atualmente todos os sistemas de suspensão traseira são baseados nesta solução, os quais também utilizam o mesmo princípio de articular a estrutura do chassi e inserir elementos que proporcionem elasticidade e amortecimento, sobretudo visando proporcionar maior estabilidade e conforto aos usuários.

2.3 COMPONENTES DOS SISTEMAS DE SUSPENSÃO TRASEIRA ATUAIS

De modo geral, pode-se dividir os sistemas de suspensão traseira de motocicletas atuais em duas partes básicas: balanço e o arranjo mola-amortecedor.

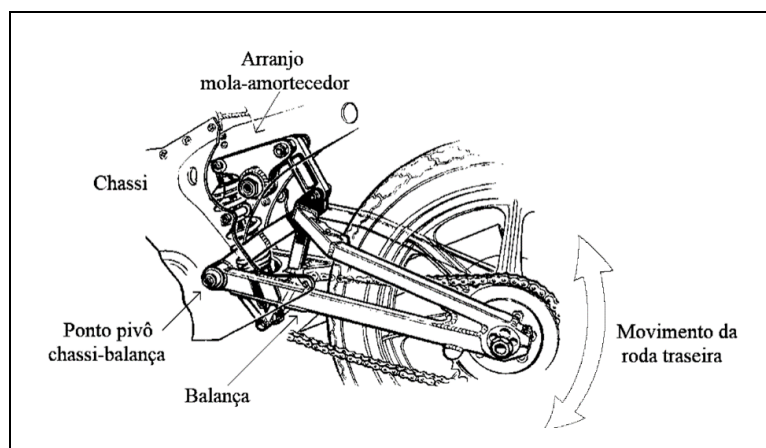
2.3.1 Balança

Conforme apontam Foale (2002) e Cossalter (2006), a balanço é um componente que tem a função principal de unir a roda traseira e o arranjo mola-amortecedor ao chassi.

Na estrutura da balanço (Figura 6) há um ponto pivô o qual comporta geralmente rolamentos que permitem o seu giro livre. O eixo do ponto pivô é fixado na parte traseira do chassi e na sua extremidade oposta encontra-se o suporte onde é fixada a roda traseira, de modo a permitir um movimento circular desta em torno do ponto pivô. O giro da balanço permite que o sistema de suspensão, fixado em sua estrutura através de juntas articuladas, atue de forma a absorver as colisões da estrada.

Atualmente as balanços podem ser encontradas nos mais variados formatos, porém tais características são comuns entre os diversos modelos.

Figura 6: Balança traseira



Fonte: FOALE, 2002, p. 8-7, adaptado pelo autor (2019)

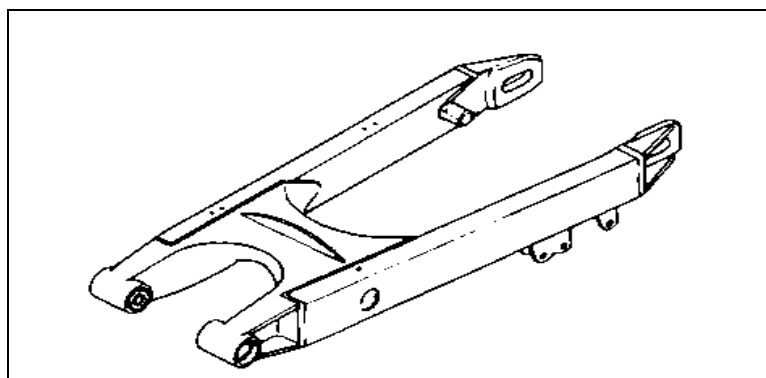
Este elemento se encontra sujeito a numerosos esforços estruturais, sendo os mais importantes os esforços de torção (ao fazer curvas), estáticos (o peso da massa suspensa), dinâmicos (ao passar por irregularidades no terreno assim como nas acelerações e desacelerações) e esforços causados pelo sistema de transmissão.

De acordo com suas características construtivas, pode-se classificar balanças em dois grupos: braço duplo e braço único (ou monobraço).

Atualmente, as balanças mais utilizadas são aquelas com dois braços, sendo as mesmas construídas em várias ligas férreas como também em ligas de alumínio e fibra de carbono, que possuem menor peso.

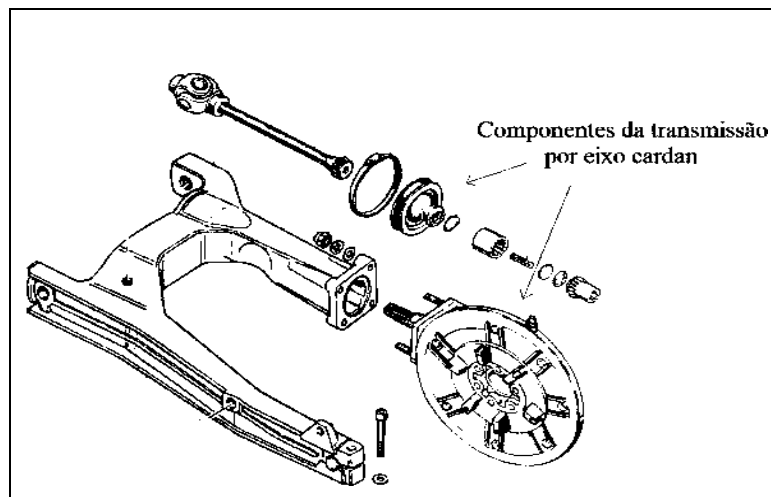
Este tipo de balança geralmente é constituído de duas vigas retas de estrutura simétrica (Figura 7), quando a transmissão utilizada é por corrente ou correia, como também de duas vigas assimétricas (Figura 8), quando a transmissão utilizada é por eixo cardan.

Figura 7: Balança de braço duplo e estrutura simétrica



Fonte: Parts.Fo, adaptado pelo autor (2019)

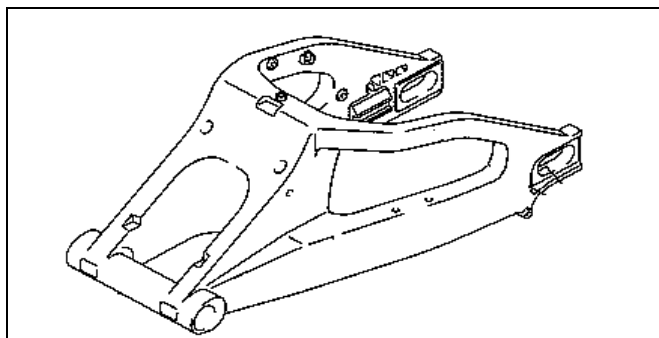
Figura 8: Balança de braço duplo assimétrica com transmissão por eixo cardan



Fonte: Fowles Parts, adaptado pelo autor (2019)

Para aumentar a rigidez à flexão, as balanças de braço duplo podem apresentar estrutura triangulada acima ou abaixo dos braços principais, como mostrado na Figura 9, abaixo.

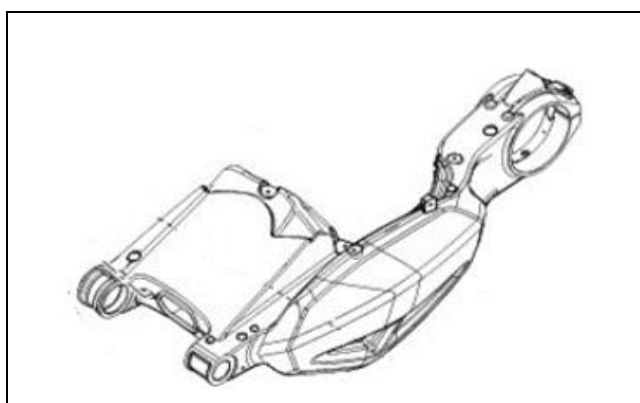
Figura 9: Balança de braço duplo triangulada acima dos braços principais



Fonte: Suzuki GSX-R Owners & Service Manuals, adaptado pelo autor (2019)

Com relação a balança de braço único (Figura 10), Foale (2002) destaca que essa opção foi utilizada inicialmente em pequenos ciclomotores e scooters e, em seguida, passou a ser considerado como uma opção para motocicletas esportivas e de competição devido a facilidade de troca do pneu.

Figura 10: Balança monobraço



Fonte: Officina Desmoriders⁵, adaptado pelo autor (2019)

Ainda sobre a balança monobraço, Foale (2002) afirma que, devido às suas características construtivas, a mesma é submetida a uma torção elevada que a obriga a apresentar uma alta rigidez. Embora facilite a troca da roda, este tipo de balança dificulta bastante o design e a fabricação da união com a roda traseira. Tudo isso aumenta o peso do componente e torna

⁵ Disponível em: < <http://officina.desmoriders.it/>>. Acesso em: 28 jul. 2019.

sua construção mais cara exigindo também altos níveis de manutenção. Geralmente, por estas razões, seu uso ainda é restrito.

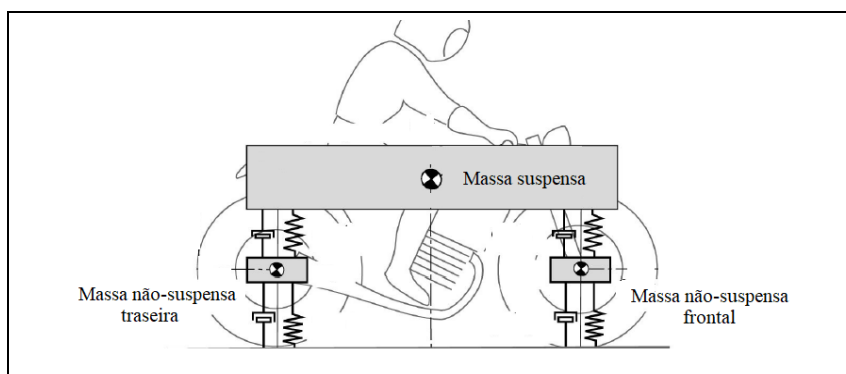
Como os dois tipos de balança podem ser projetados para obter um comportamento estrutural satisfatório, a decisão sobre qual tipo escolher geralmente será baseada em outras considerações. Foale (2002) ressalta que a facilidade da substituição da roda, inovação e estética podem ser pontos a favor da balança de braço único, mas outras considerações tais como custo, tradição, manutenção, facilidade de ajuste da corrente e fabricação, justificam a predominância do uso de balanças de braço duplo.

É importante salientar que nas mais variadas classes de motocicletas existentes, é inumerável as geometrias assumidas por suas balanças, porém todas elas derivam dos dois grupos aqui apresentados.

2.3.2 Arranjo mola-amortecedor

Foale (2002) e Cossalter (2006) afirmam que uma motocicleta com suspensão pode ser considerada um corpo rígido ligado às rodas por sistemas elásticos que são eles, o sistema de suspensão dianteira e traseira. O corpo rígido é comumente denominado de massa suspensa (chassi, motor, tanque, caixa de direção, piloto), enquanto as rodas e as massas presas a ela (componentes do sistema de suspensão dianteiro e traseiro), são chamadas massas não-suspensas. A Figura 11 apresenta graficamente a ideia de massa suspensa e não-suspensa.

Figura 11: Massa suspensa e não-suspensa



Fonte: COSSALTER, 2006, p. 207, adaptação do autor (2019)

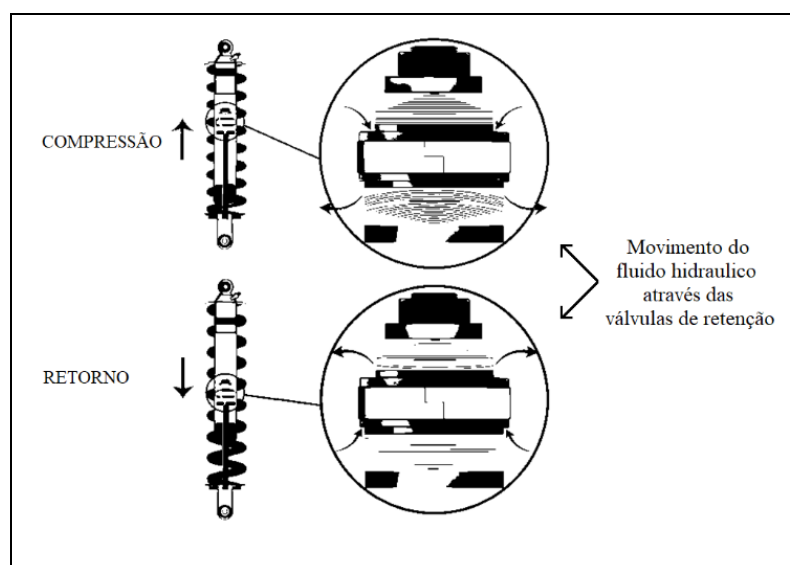
O elemento que proporciona a elasticidade ao sistema de suspensão é a mola que, segundo Collins (2006), pode ser definida como estrutura ou dispositivo que exibe deformação elástica quando carregado, e que recupera a sua configuração inicial quando a carga é removida.

Imaginando que a mola de um sistema de suspensão hipotético seja comprimida ao passar por um solavanco, nesse instante energia potencial é armazenada na mesma. À medida que a mola retorna ao seu comprimento estático, ela libera essa energia que, se não houvesse amortecimento, seria transferida inteiramente para a massa suspensa da motocicleta na forma de energia cinética. Isto faria com que a suspensão se estendesse bem além de sua posição de equilíbrio, transferindo a energia cinética de volta para a energia potencial, que então repetiria todo o processo novamente na direção oposta. Assim, depois de qualquer perturbação, os veículos prosseguiriam produzindo movimentos verticais ao longo das superfícies de rolamento.

Como discutido por Foale (2002), para que a energia transmitida à mola pelo impacto fosse eliminada, houve a introdução de um componente mecânico afim de proporcionar amortecimento, o qual, inicialmente utilizava atrito de materiais como forma de conversão da energia mecânica em calor, por isso chamados de amortecedores por fricção.

Utilizando o princípio de que a resistência ao movimento oferecida pelo fluido a um objeto vibrando em seu meio faz com que a energia mecânica seja dissipada, em sua maior parte na forma de calor, foram desenvolvidos as unidades mola-amortecedor atuais que, como representado na Figura 12, geralmente é composta por um êmbolo que é movimentado no interior de um cilindro quando a mola é comprimida ou estendida. Este movimento força a passagem de fluido hidráulico através de válvulas de retenção, transformando energia cinética em calor.

Figura 12: Unidade mola-amortecedor

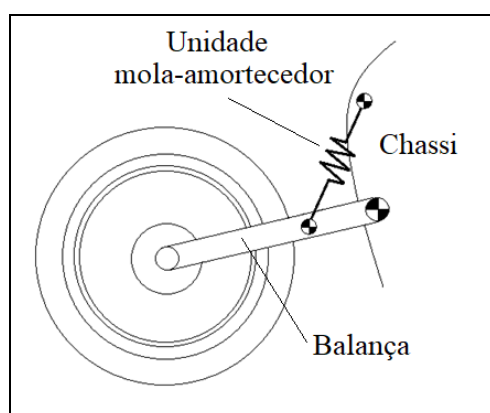


Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Existem uma infinidade de modos como os fabricantes de motocicletas arranjam a unidade mola-amortecedor nos sistemas de suspensão. Será estudado aqui dois tipos de arranjos, sendo eles: sistema de conexão direta, sistema conexão indireta.

O sistema de conexão direta, também chamado de sistema clássico, é amplamente utilizado devido a sua simplicidade. Consiste basicamente em uma unidade mola-amortecedor conectada diretamente entre o chassi e a balanço sem qualquer elemento intermediário. Na Figura 13 este conceito de sistema de conexão direta é ilustrado.

Figura 13: Sistema de conexão direta

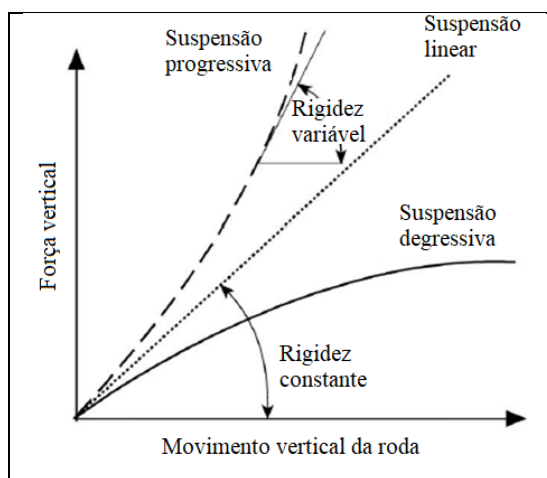


Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Como afirma Foale (2002), desde o início dos anos 1970 se intensificaram estudos visando a melhoria dos sistemas de suspensão traseira, particularmente no campo das competições de motovelocidade. Um dos avanços obtidos foi a introdução de mecanismos de ligação entre a balanço, chassi e unidade mola-amortecedor que tinham como objetivo comum, variar por métodos geométricos a curva de rigidez do sistema de suspensão.

A curva de rigidez é um parâmetro característico dos sistemas de suspensão, a qual representa a força elástica contra o deslocamento vertical da roda traseira. Seu gráfico pode ser reto, aumentar ou diminuir progressivamente, conforme mostrado na Figura 14. Nestes casos a suspensão é chamada, respectivamente, de linear, progressiva e regressiva. Numa suspensão de rigidez linear, o movimento vertical da roda é diretamente proporcional à força (ou carga) a que ela é submetida. Para uma suspensão não-linear (progressiva ou regressiva), a força aplicada sobre a roda é uma função não-linear do deslocamento da mesma.

Figura 14: Rigidez do sistema de suspensão



Fonte: COSSALTER, 2006, p. 181, adaptado pelo autor (2019)

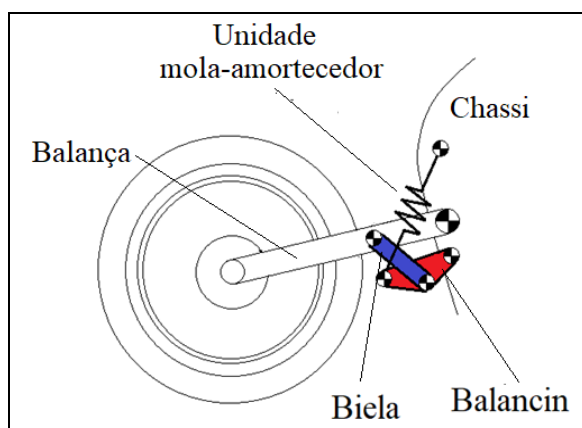
Como discutido por Cossalter (2006), em termos de conforto, é conveniente que a rigidez da suspensão seja tão baixa quanto possível. Porém o uso de molas de baixa rigidez causa grande transferência de massa na moto, principalmente ao passar por irregularidades do terreno, durante a transição de movimento retilíneo para o curvo e nas fases de aceleração e frenagem, o que acontece em menor grau em suspensões mais duras. Por outro lado, suspensões mais rígidas, além de reduzirem drasticamente o conforto, podem causar problemas de aderência no pneu traseiro durante a aceleração e dianteiro durante a frenagens.

Como solução para ambos os casos, surgiram os sistemas progressivos, que permitem que a motocicleta seja adaptada a cada tipo de uso. Esses sistemas têm duas vantagens claras: a suspensão possui comportamento macio em face de pequenos ressaltos e, portanto, pequenos deslocamentos da roda, enquanto é firme contra grandes movimentos da roda devido a irregularidades mais pronunciadas. Assim, há um aumento do conforto do piloto e minimização variações na geometria e transferência de massa da motocicleta.

Os sistemas de conexão direta oferecem uma rigidez constante pelo fato de que neles o movimento da roda traseira é proporcional a compressão da unidade mola-amortecedor. Já nos sistemas de conexão indireta há a introdução de mecanismos que fazem com que o curso de compressão da unidade mola-amortecedor não seja linear em relação ao deslocamento vertical da roda traseira possibilitando a obtenção da curva de rigidez progressiva desejada.

Sistemas de conexão indireta são baseados fundamentalmente em mecanismos de quatro barras e distinguidos entre si apenas pelo ponto de fixação diferente da unidade mola-amortecedor, que pode ser exemplificado pela Figura 15.

Figura 15: Sistema de conexão indireta



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

O balancim é o elemento de ligação ternário da suspensão traseira da motocicleta. Ele pode fazer conexão entre o chassi, a unidade mola-amortecedor e as bielas ou entre a balança, a unidade mola-amortecedor e as bielas. As bielas são as juntas entre dois elementos da motocicleta, sendo estes elementos a balança e o balancim ou o chassi e o balancim. A posição e as dimensões da biela e balancim são parâmetros determinantes com relação a progressividade do sistema de suspensão.

Suspensões de conexão indireta compõem a maioria dos sistemas utilizados em motocicletas de alto desempenho, pois possibilitam um comportamento progressivo e são facilmente modificáveis e ajustáveis, o que os torna ideais para este campo.

2.4 PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS

O Processo Desenvolvimento de Produtos (PDP), segundo Clark e Fujimoto (1991) pode ser definido um conjunto de atividades por meio das quais se busca chegar ao total detalhamento de um produto e de seu processo de produção possibilitando sua manufatura, atendendo as necessidades do mercado e respeitando as restrições tecnológicas.

Para encontrar melhores soluções no desenvolvimento de produtos criaram-se procedimentos sistemáticos denominados metodologias de projeto que, de acordo com Munari (1998), são definidas como uma série de operações necessárias, dispostas por ordem lógica ditadas pela experiência, cujo objetivo é o de se atingir o melhor resultado com o menor esforço e tempo possível.

Barbosa (2009) destaca que para alguns profissionais, seguir um método para o desenvolvimento de uma solução voltada a determinado problema de engenharia significa impor bloqueio a sua criatividade.

[...] podemos dizer que alguns profissionais se lançam a buscar soluções sem a definição e um método projetual. Alguns destes defendem tal condição como sendo a máxima expressão da criatividade, da capacidade inventiva, que o método apenas serve como uma camisa de força para a expressão [...] (BARBOSA, 2009, p.19).

Autores como Barbosa (2009) e Munari (1998) discordam do pensamento de tais profissionais, argumentando que a utilização de um determinado método projetual para desenvolvimento de um produto não é absoluto nem definitivo, mas sim algo que pode modificar-se a partir da capacidade criativa do projetista, o qual utilizando sua personalidade pode encontrar outros valores objetivos que melhorem o método.

Para Pahl e Beitz, *et al* (2005) os métodos para desenvolvimento de produtos são modelos de procedimentos apropriados para definir racionalmente o procedimento necessário para contextos complexos e, assim, tornarem compreensível e transparente a complexidade do processo. Ainda segundo os autores, para o desenvolvimento de um produto é crucial a análise do problema e um subsequente processo de síntese de ações técnicas que obedeçam a uma lógica operacional para o desenvolvimento passo a passo da solução.

Uma lógica operacional proposta por Pahl e Beitz, *et al* (2005) para o processo de desenvolvimento de produtos divide as atividades em quatro fases principais, sendo elas: planejamento, concepção, projeto e detalhamento.

Na fase de planejamento deve-se haver o esclarecimento da tarefa e a definição informativa das condições iniciais do projeto. Na fase de concepção acontece a definição preliminar de possíveis soluções para o projeto. Na fase de projeto há a definição preliminar da configuração da solução escolhida para o projeto. Na fase de detalhamento acontece a definição final da solução de forma a possibilitar seu processamento e consequente materialização.

3 METODOLOGIA

Utilizando conhecimentos relacionados ao Processo de Desenvolvimento de Produtos de modo a auxiliar no projeto do sistema de suspensão, foi adotado um método projetual baseado nos estudos de Pahl e Beitz, *et al* (2005), o qual desdobra o processo de desenvolvimento do projeto do sistema de suspensão em quatro fases. O fluxograma apresentado na Figura 16 ilustra o método utilizado neste trabalho. Cada uma das etapas será descrita a seguir.

Figura 16: Fluxograma do método



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

As atividades do presente trabalho, como em qualquer projeto de desenvolvimento de produtos, se iniciaram com o recebimento de uma tarefa, que neste caso tratou-se da necessidade de realização de um projeto de sistema de suspensão traseira, decidida em reunião com lideranças da equipe Motorius.

Na fase de Planejamento do Projeto foram levantados os requisitos do sistema de suspensão traseira a partir das necessidades da equipe Motorius. Também foram identificadas as restrições do projeto que surgiram em função de fatores técnicos e econômicos limitantes que deviam ser respeitados. Os requisitos e restrições formaram as especificações do projeto do sistema de suspensão que constituíram as entradas para a fase de Projeto Conceitual, definidos em estreita colaboração de membros da equipe Motorius.

A fase de Projeto Conceitual teve como objetivo principal elaborar a concepção do sistema de suspensão por meio da busca e seleção de soluções capazes de atender as especificações do projeto e estabelecer sua estrutura funcional. Nesse processo, buscaram-se as

melhores soluções para cada parte do sistema de suspensão utilizando teoria estudada afim de, com a união das mesmas, gerar um conceito do produto no final do processo.

Na fase de Projeto Preliminar, determinou-se a configuração do sistema de suspensão, utilizando as soluções encontradas no projeto conceitual. Aqui, a geometria do sistema de suspensão foi definida utilizando o *software* Adams® visando atender as características dinâmicas desejadas. O mesmo *software* foi utilizado para simular o teste de segurança, o qual a motocicleta será submetida, afim de obter as forças que atuam em cada articulação do sistema de suspensão. Com o auxílio do *software* Solidworks® foi realizada a modelagem das peças do sistema de suspensão, examinando a compatibilidade espacial dos componentes com o chassi e, posteriormente, realizou-se a análise de tensão de forma a garantir a integridade de cada elemento sobre as piores condições de carregamento as quais estarão sujeitas.

Na fase de Projeto Detalhado foi elaborado o detalhamento do sistema de suspensão por meio de representações em desenhos técnicos da forma definitiva de todos os componentes a serem fabricados. Após a execução desta fase, obteve-se um produto definido, cuja documentação torna possível sua fabricação.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Foi proposto como objetivo deste trabalho o desenvolvimento de um projeto de sistema de suspensão traseira para uma motocicleta da equipe Motorius Racing Team, participante da competição internacional Motostudent. O conteúdo do trabalho servirá de apoio teórico à equipe Motorius para a concretização de sistemas de suspensão que integrarão seus futuros protótipos de motocicletas em suas participações nas próximas edições da competição Motostudent.

Para isto, foi aplicado o método de Processo de Desenvolvimento de Produtos de apresentado por Pahl e Beitz, *et al* (2005) que divide as atividades necessárias ao desenvolvimento de produtos em quatro fases as quais foram inicialmente descritas de forma concisa. Posteriormente o método apresentado foi aplicado para o desenvolvimento do projeto sistema de suspensão traseira da equipe Motorius.

O desenvolvimento do projeto utilizando a metodologia apresentada resultou em um sistema de suspensão traseira totalmente detalhado, atendendo as características construtivas e funcionais especificadas pela equipe Motorius, cuja documentação torna possível sua fabricação. A aplicação do método trouxe racionalidade ao procedimento para o desenvolvimento do projeto tornando-o, através de sua lógica, prático e eficaz.

A seguir, são apresentados os resultados das fases de Planejamento do Projeto, Projeto Conceitual, Projeto Preliminar e Projeto Detalhado, propostas na metodologia deste trabalho.

4.1 FASE DE PLANEJAMENTO DO PROJETO

Requisitos do projeto

O projeto do sistema de suspensão, de acordo com o interesse da equipe Motorius, foi destinado ao seu atual protótipo de motocicleta em desenvolvimento, apresentado na Figura 17 o qual utiliza um chassi tipo “diamante” cuja denominação é devida as formas triangulares implementadas em sua geometria. Nesse tipo de chassi o motor não está somente suportado pela estrutura, mas também é um item estrutural que compõe a mesma.

Figura 17: Protótipo de motocicleta da equipe Motorius, ainda em fase desenvolvimento



Fonte: Elaborada pelo autor (2019)

No caso de uma competição similar à que será enfrentada, é desejável o uso de suspensões com características de rigidez progressiva, onde a sua resposta com o deslocamento da roda traseira seja suave no início do curso, a fim de absorver pequenas irregularidades do terreno, e rígida na parte final do curso, de modo que em grandes solavancos a motocicleta responda com firmeza. Também é desejável que o sistema seja regulável, permitindo a adaptação da suspensão às necessidades do condutor. Portanto, foi estabelecido como requisitos no projeto da suspensão que a mesma apresentasse características progressivas e que permitissem regulação de maneira simples.

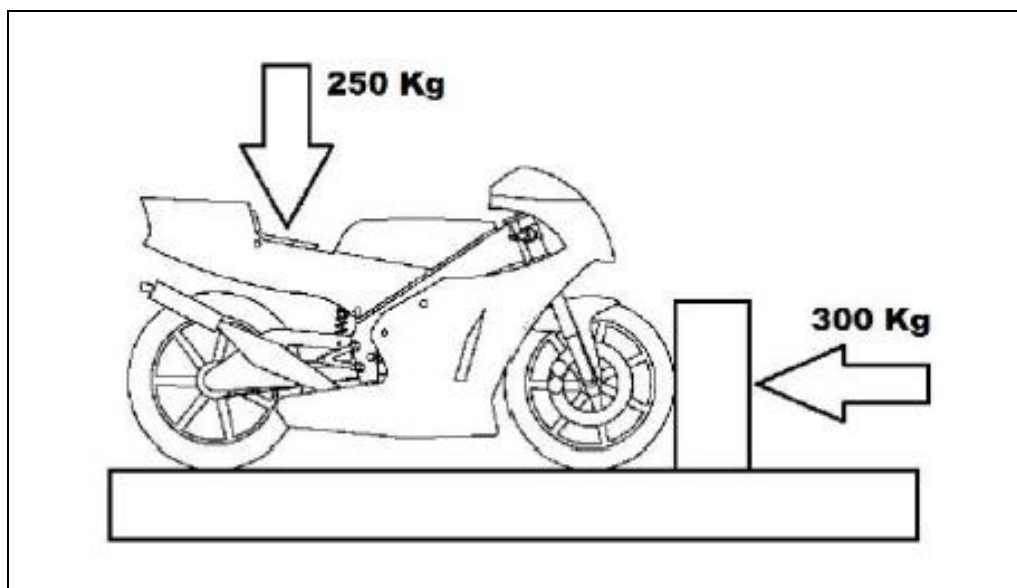
Todo o sistema de suspensão foi projetado para que se realizasse de forma fácil a montagem e desmontagem de todos os elementos que o compõem utilizando ferramentas padrão, assim como deveu-se respeitar condições que assegurassem total manufatura dos componentes pela equipe Motorius.

Com relação a estética, foi importante que o design do sistema de suspensão combinasse com o chassi afim de causar boa impressão para o público em geral.

Todo o conjunto foi projetado para que fosse capaz de suportar as solicitações durante os testes de segurança realizado pela organização da competição, onde será imposto sobre a motocicleta um carregamento horizontal progressivo de 300 kgf e vertical de 250 kgf em uma bancada de testes para verificar a rigidez da estrutura e montagem adequada dos componentes da motocicleta. A Figura 18 ilustra o teste de carregamento.

Ao longo do teste de segurança, deve ser verificado que a motocicleta se mantenha íntegra sem que nenhum tipo de falha ou rachadura apareça nos elementos estruturais.

Figura 18: Descrição gráfica do teste de segurança



Fonte: Regulamento da competição Motostudent

Restrições do projeto

A equipe da Motorius possui recursos financeiros limitados, oriundos basicamente de ações realizadas pelos membros para levantar fundos, patrocinadores e bolsas concedidas pela universidade. Não foi estipulado um limite mínimo ou máximo para financiamento do projeto, porém deveu-se buscar itens que, atendendo a todos os requisitos necessários, fossem os mais econômicos possíveis.

Com a diminuição da relação peso/potência há um aumento no desempenho do veículo, justificado pelo fato de que cada unidade de potência do motor impulsionará menos peso. Dito isto, foi de interesse da equipe Motorius que o projeto de suspensão buscasse materiais de construção e componentes que respeitando as condições econômicas, tivessem menor peso possível.

Segundo o regulamento da competição, o peso mínimo total da motocicleta sem piloto deve ser de 95 kgf, não havendo considerações a respeito do peso do conjunto motocicleta-piloto. Sendo assim, estimou-se o peso da motocicleta como sendo de 110 kgf e o peso do piloto como sendo 70 kgf, totalizando assim 180 kgf.

A organização exige o uso do material por ela fornecida, tais como motor, pinças de freio, aros, pneus, manetes. Dentre esses itens, ressalta-se a importância das características do pneu e aro traseiros para o desenvolvimento do projeto de suspensão traseira.

Também nos interessou os itens fornecidos pela equipe Motorius, sendo eles o eixo da roda traseira e rolamentos do eixo da balança. As características dos itens citados que influenciaram no projeto do sistema de suspensão estão apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1: Características dos componentes disponíveis

Elemento	Características
Pneu traseiro 	Diâmetro externo: 601,3 mm Largura: 115,1 mm
Roda traseira 	Largura do centro da roda: 200 mm *Considerando as dimensões da coroa, disco de freio e espaçadores.
Eixo da roda traseira 	Diâmetro do eixo da roda traseira: Ø 14 mm
Eixo da balança 	Diâmetro do eixo da balança: Ø 14 mm

Rolamentos da balança 	Diâmetro interno do rolamento: Ø 14 mm Diâmetro externo do rolamento: Ø 32 mm Largura: 9 mm
Unidade mola- amortecedor 	Rigidez: $k = 105 \text{ N/mm}$ Amortecimento: $c = 5 \text{ N.s/mm}$ Curso: 60 mm Entre eixos: 268 mm Diâmetro dos eixos: Ø 10 mm

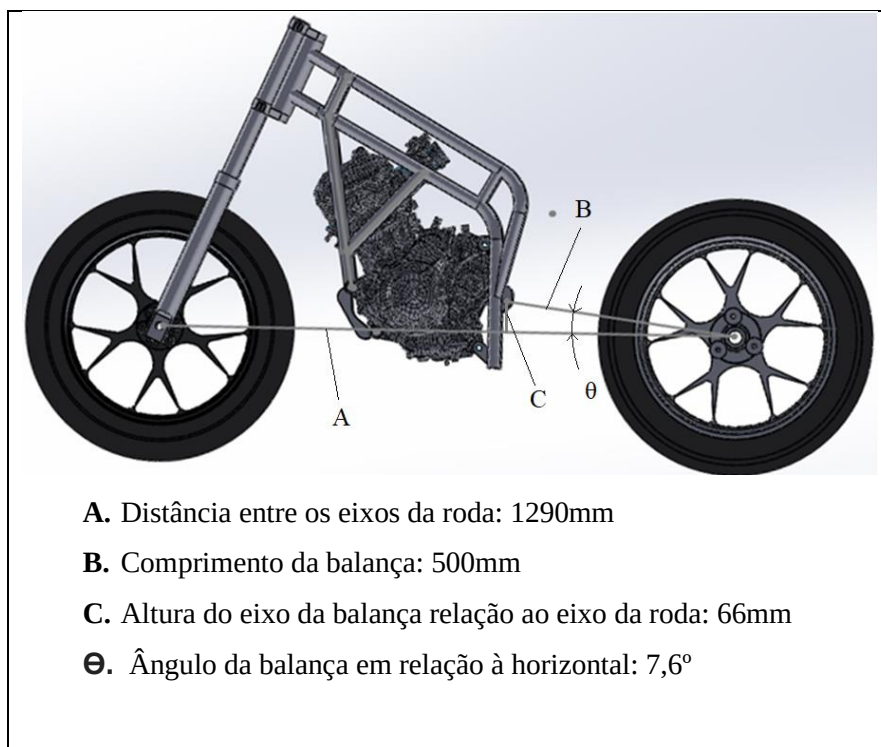
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Segundo o regulamento, o uso de uma balança comercial ou mesmo de uma unidade modificada não é permitido. Deve ser feito um novo protótipo de balança de fabricação própria. Com relação a materiais de fabricação, o regulamento proíbe o uso de titânio e qualquer liga que o contenha.

Sendo o sistema de suspensão apenas parte da motocicleta, as decisões tomadas para sua concepção tiveram que ser coordenadas com o projeto já em fase de construção do chassi, afim de garantir que todos os elementos atendessem às especificações e que não surgissem problemas na fase de montagem.

As principais dimensões geométricas foram previamente acordadas com membros do subsistema de chassi, as quais estão representados na Figura 19.

Figura 19: Principais dimensões geométricas



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

A Tabela 1 traz um resumo das informações da fase de Planejamento do Projeto, as quais constituem as especificações do sistema de suspensão.

Tabela 1: Especificações do sistema de suspensão

Item	Especificações	Descrição
1	Destino do sistema de suspensão	Destinado ao atual protótipo em desenvolvimento pela equipe Motorius, implicando em restrições geométricas impostas principalmente pelo projeto do chassi
2	Orçamento	Buscar itens que, atendendo a todos os requisitos, sejam os mais econômicos
3	Segurança	Elementos dimensionados de forma a suportar o teste de segurança realizado pela organização da competição
4	Peso	Menor possível
5	Manufatura	Sistema de suspensão manufaturável pela equipe Motorius
6	Montagem	Fácil montagem com ferramentas padrão
7	Balança	Fabricação própria com restrição do titânio como material de fabricação

8	Componentes	Adaptar ao projeto os componentes já definidos no Quadro 1
9	Características de funcionamento do sistema	Suspensão progressiva e de fácil ajustagem
10	Estética	Combinação com o design do chassi e transmissão de segurança

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

4.2 FASE DE PROJETO CONCEITUAL

Solução para balança

A balança do tipo monobraço, devido às suas características construtivas, é submetida a um torque elevado que obriga a apresentar uma rigidez alta. Embora facilite a troca da roda, este tipo de balança dificulta o design e a fabricação da união com o pneu traseiro. Tudo isso aumenta o peso do componente e torna sua construção mais cara. Por estas razões desconsiderou-se esta opção.

A balança de braço duplo tornou-se então como a melhor opção devido sua maior facilidade de fabricação implicando em menor custo (atendendo aos itens de especificações 2 e 5 mostrados na Tabela 1).

Dentro das balanças de braço duplo, também existem opções diferentes em relação à escolha do material como fibra de carbono, alumínio e aço. O titânio está fora das opções devido restrições do regulamento. Devido ao alto custo da fibra de carbono, adotou-se o alumínio e o aço como principais alternativas.

Uma balança de alumínio permitiria reduzir o peso e evitaria o problema da corrosão. No entanto, as desvantagens surgem quando se trata de fabricação. Existem três processos de fabricação possíveis: usinagem, fundição e soldagem. A usinagem de uma peça grande a partir de um material bruto requer um grande número de horas de máquina, e isso se traduz em um aumento significativo no preço final. A fundição de alumínio, geralmente acompanhada por uma usinagem subsequente diminui a quantidade de horas de máquina e é geralmente mais utilizada neste tipo de aplicação, porém a tecnologia requerida para o processo está fora do alcance da equipe. Como última opção, a balança poderia ser confeccionada com alumínio utilizando perfis dobrados e soldados. Este é um processo relativamente barato, mas ao mesmo

tempo delicado, já que o alumínio requer uma soldagem muito controlada com o equipamento apropriado e um soldador habilidoso.

O uso do aço é restrito a balanças com perfis tubulares. Como processos de fabricação necessários, pode-se destacar a dobragem e soldagem. É importante proteger adequadamente balanças de aço contra a corrosão, uma vez que sua construção esteja concluída, pois o aço oxida facilmente, o que pode levar a rachaduras e até mesmo à falha da peça.

Dentre todas estas opções, adotou-se a balança de aço tubular pois sua fabricação é a mais econômica (atendendo ao item de especificações 2 da Tabela 1) e a obtenção de matéria prima e mão de obra são mais facilitadas. Com isso pode-se garantir a qualidade nos acabamentos e, sendo o chassi construído também em aço tubular, consegue-se manter um design coeso do ponto de vista estético (atendendo ao item de especificações 10 da Tabela 1), embora com o maior peso em comparação ao alumínio e à fibra de carbono. A liberdade de moldar sua geometria permitiu-se evitar interseções com outros elementos como a corrente e adaptar à geometria do chassi de maneira simples (atendendo ao item de especificações 1 da Tabela 1).

Visando garantir a rigidez adequada, projetou-se uma balança com uma estrutura triangulada sob os dois braços principais (atendendo ao item de especificações 3 da Tabela 1).

Solução para o arranjo mola-amortecedor

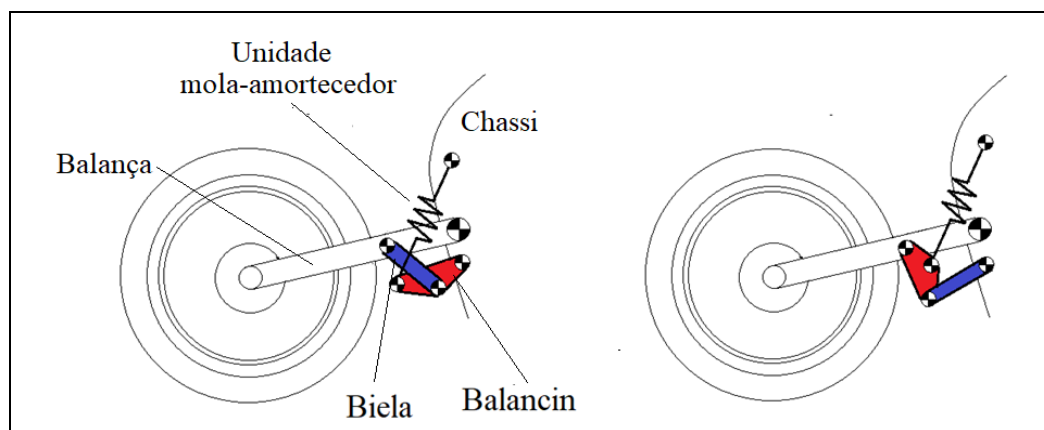
O principal problema apresentado pela unidade mola-amortecedor, como a fornecida pela organização, é a sua resposta linear de compressão em relação ao deslocamento, o que significa que a mesma é comprimida identicamente no início e final do curso, ou seja, não apresenta comportamento progressivo.

Devido a necessidade de um arranjo mola-amortecedor com características progressivas, escolheu-se o sistema de conexão indireta com links, que, como viu-se, é o tipo de sistema que facilita a obtenção da progressividade pois utilizam de mecanismos (balancins e bielas) que fazem com que o curso de compressão da unidade mola-amortecedor não seja linear em relação ao deslocamento vertical da roda traseira.

Dentro dos sistemas de ligação indireta encontrasse por sua vez, diferentes configurações de arranjos possíveis, todas igualmente válidas. Normalmente em competições os arranjos mais utilizados são o *Uni-Trak* e o *Pro-Link* (Figura 20), os quais diferem entre si

apenas pela posição do balancim, sendo o mesmo conectado diretamente ao chassi, no primeiro arranjo, e conectado a balanço, no segundo arranjo.

Figura 20: Arranjo mola-amortecedor *Uni-Trak* (esquerda) e *Pro-Link* (direita)



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

De acordo com os estudos de Fernández (2016), o qual observou o comportamento de ambos os arranjos mola-amortecedor, foi constatado que o sistema *Pro-Link* é geralmente mais fácil de regular, já que com pequenas mudanças no comprimento dos componentes articulados, obtêm-se curvas diferentes e em sua maioria progressivas. Já com o sistema *Uni-Trak*, com pequenas variações, torna-se mais imprevisível, podendo mudar de um comportamento progressivo para regressivo facilmente. Por esse motivo escolheu-se o sistema *Pro-Link*.

A variação de qualquer dimensão da biela ou balancim provoca mudanças na curva característica de rigidez, o que é ideal quando se trata de conseguir uma suspensão ajustável.

Existem bielas normalizadas como a apresentada na Figura 21, as quais são constituídas por cabeças articuladas idênticas chamadas rótulas, unidas por uma haste roscada e sextavada. Devido a facilidade de atuar na regulagem do seu comprimento escolheu-se esse item como o elemento responsável pelo ajuste da suspensão (atendendo ao item de especificações 9 da Tabela 1). Atuando sobre o mesmo, pode-se alterar a geometria da suspensão de modo a conseguir diferentes curvas de rigidez.

Figura 21: Biela



Fonte: Big Bike Tech⁶, adaptado pelo autor (2019)

⁶ Disponível em: <<https://bigbiketech.com/collections/t-rex-racing>> Acesso em: 01 ago. 2019.

Na Tabela 2 é apresentada a solução básica escolhida, a qual define a concepção projeto do sistema de suspensão.

Tabela 2: Concepção do projeto

Elemento	Especificação	
Balança	Tipo: Balança de braço duplo triangulada de aço tubular Processo de fabricação: Usinagem, dobragem e soldagem	
Arranjo mola-amortecedor	Tipo: <i>Pro-Link</i>	
	Biela	Tipo: Comprimento regulável - item normalizado
	Balancim	Processo de fabricação: Usinagem

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

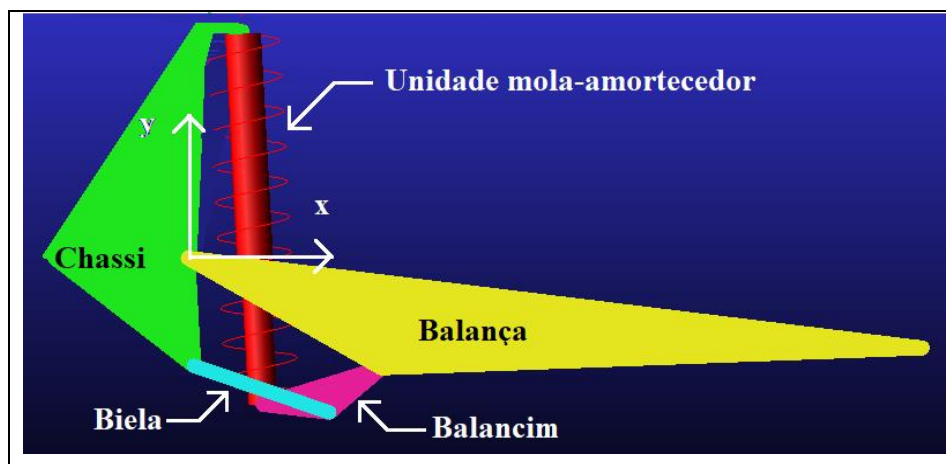
4.3 FASE DE PROJETO PRELIMINAR

Desenvolvimento cinemático e dinâmico

Para modelar a geometria do sistema de suspensão, utilizou-se o *software* de simulação multicorpo Adams®, o qual possibilita a análises cinemáticas e dinâmicas de modelos virtuais mecânicos. Neste primeiro momento, obteve-se as curvas da força de reação da unidade mola-amortecedor em função do movimento vertical da roda traseira e analisou-se como ela varia, modificando a geometria dos elementos do sistema de suspensão. O objetivo da simulação foi a obtenção das dimensões da biela e balancim que possibilitam ao sistema de suspensão o comportamento progressivo.

A Figura 22 mostra a montagem do sistema de suspensão traseira no software Adams®, a qual foi realizada de acordo com as seguintes considerações:

Figura 22: Montagem do sistema de suspensão traseira no *software* Adams®



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

1. Origem do sistema de coordenadas: Utilizou-se como referência do sistema de coordenadas o ponto de conexão entre a balança e o chassi;
2. Balança: Seu comprimento (500 mm) e ângulo com a horizontal ($7,6^\circ$) foram definidos na Figura 19 mostrada anteriormente. Uma junta de revolução foi usada para simular a rotação relativa entre a balança e o chassi, cuja união ocorre na posição (0 mm, 0 mm);
3. Unidade mola-amortecedor: O *software* Adams® permite que o usuário defina diretamente os parâmetros deste elemento, inserindo valores de comprimento, rigidez e amortecimento. Os dados de rigidez do elemento (105 N / mm), amortecimento (5 N*s/mm), comprimento (268 mm) já foram definidos no Quadro 1. Seu ângulo com a vertical foi fixado como sendo 2° . Respeitando o projeto do chassi, o qual já possui o ponto de união com a unidade mola amortecedor, as coordenadas de tal ponto ficaram definidas como sendo (40 mm, 167mm). Portanto a partir desses dados o segundo ponto de união da unidade mola-amortecedor, o qual é realizado com o balancim, ficou automaticamente definido como sendo (50 mm, -100 mm). Foi necessário atentar ao fato de que o fim de curso da unidade mola-amortecedor não deve ser atingido com a compressão máxima afim de evitar que a suspensão apresente comportamento indesejado. Juntas de revolução foram usadas para simular a rotação relativa entre este elemento e o chassi e balancim;
4. Biela: O ponto de união com o chassi foi estabelecido como sendo (5mm, -70 mm). A posição do seu segundo ponto de conexão, o qual é realizado com o balancim foi um dos parâmetros a otimizar. Juntas de revolução foram utilizadas para simular a rotação relativa entre este elemento e o chassi e balancim;

5. Balancim: Seu ponto de união com a unidade mola amortecedor, como observou-se anteriormente, foi estabelecido como sendo (50 mm, -100 mm). Seu segundo ponto de união, o qual é conectado com a biela é dependente do posicionamento desta última e como já discutido, foi um parâmetro otimizado. Seu terceiro ponto de união, o qual é conectado a balança não possui uma posição definida, portanto foi um dos parâmetros que deveu-se otimizar.

A Tabela 3 apresenta um resumo das informações acima discutidas sobre as posições das uniões dos elementos do sistema de suspensão.

Tabela 3: Posições das uniões dos elementos do sistema de suspensão no software Adams®

Uniões	Posição X,Y (mm)
Chassi-Balança	(0,0)
Chassi-Biela	(5,-70))
Chassi-Unidade mola-amortecedor	(40,167)
Balancim-Unidade mola-amortecedor	(50,-100)
Balancim-biela	(95,-105)
Balancim-Balança	(130,-75)

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Portanto, as únicas conexões que não possuem sua posição restringida pela geometria de outros elementos são as uniões biela-balancim e balancim-balança. Como condições iniciais definiu-se suas posições como sendo:

Tabela 4: Posições iniciais das uniões a otimizar no software Adams®

Conexão	Posição X,Y (mm)
Biela-balancim	(95,-105)
Balancim-balança	(130,-70)

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Também se fez necessário definir as condições iniciais de carregamento sobre as quais o sistema de suspensão estará submetido. Com já discutido, estimou-se o peso total da motocicleta mais piloto como sendo de 180 kgf. Uma consideração razoável é que tal peso está

igualmente distribuído em ambas as rodas, portanto definiu-se como 90 kgf a carga inicial aplicada no eixo da roda traseira.

Para analisar a influência da posição das conexões (o que também definiu as dimensões finais da biela e balancim) na rigidez da suspensão, realizou-se o processo experimental, no qual cada posição dos elementos foi deliberadamente manipulada. Utilizou-se uma faixa de 20 mm dentro da qual a coordenada horizontal da posição das conexões a serem otimizadas deveriam variar, podendo assumir três valores: $x - 20$ mm, x , $x + 20$ mm. Desta forma, foi coberta uma margem ampla o suficiente para apreciar mudanças significativas no comportamento da rigidez do sistema.

Sendo duas variáveis (posição da conexão biela-balancim e balancim-balança) com três valores possíveis para cada um ($x - 20$, x , $x + 20$ mm), obteve-se um total de nove combinações de posições, como apresentado na Tabela 5.

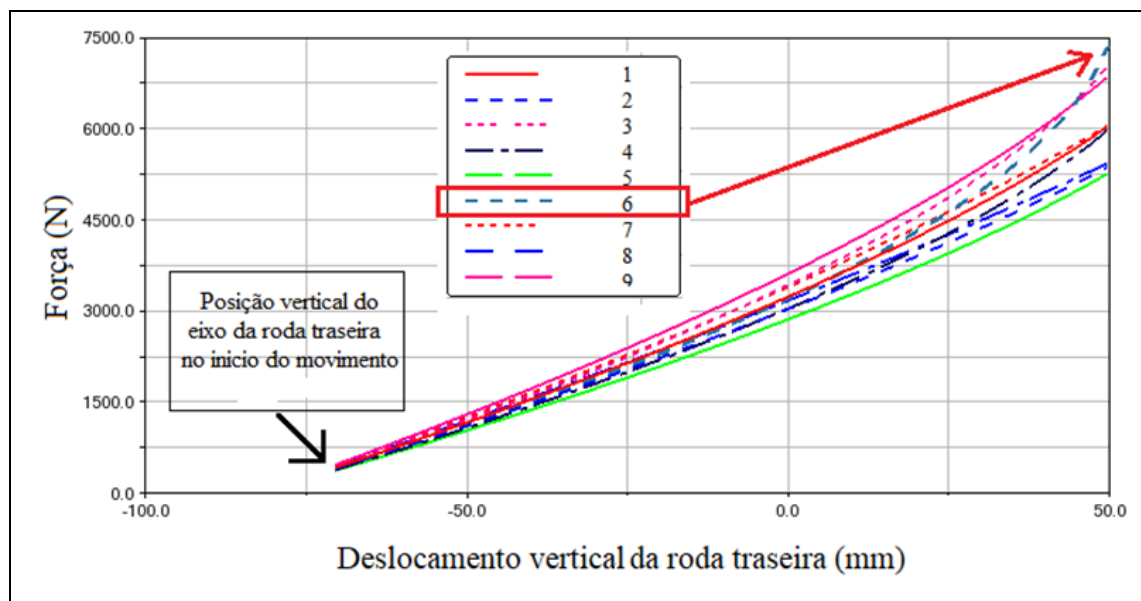
Tabela 5: Posições das uniões biela-balancim e balancim-balança analisadas no software Adams®

Nº	Posição da conexão biela-balancim X,Y (mm)	Posição da conexão balancim-balança X,Y (mm)
1	(95,-105)	(130,-70)
2	(95,-105)	(120,-70)
3	(95,-105)	(140,-70)
4	(85,-105)	(130,-70)
5	(85,-105)	(120,-70)
6	(85,-105)	(140,-70)
7	(105,-105)	(130,-70)
8	(105,-105)	(120,-70)
9	(105,-105)	(140,-70)

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Os gráficos da Figura 23 representam a força de reação da unidade mola-amortecedor de acordo com o deslocamento vertical da roda traseira para cada combinação das posições da conexão biela-balancim e balancim-balança, elencadas na Tabela 5.

Figura 23: Reação da unidade mola-amortecedor vs deslocamento vertical da roda traseira



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

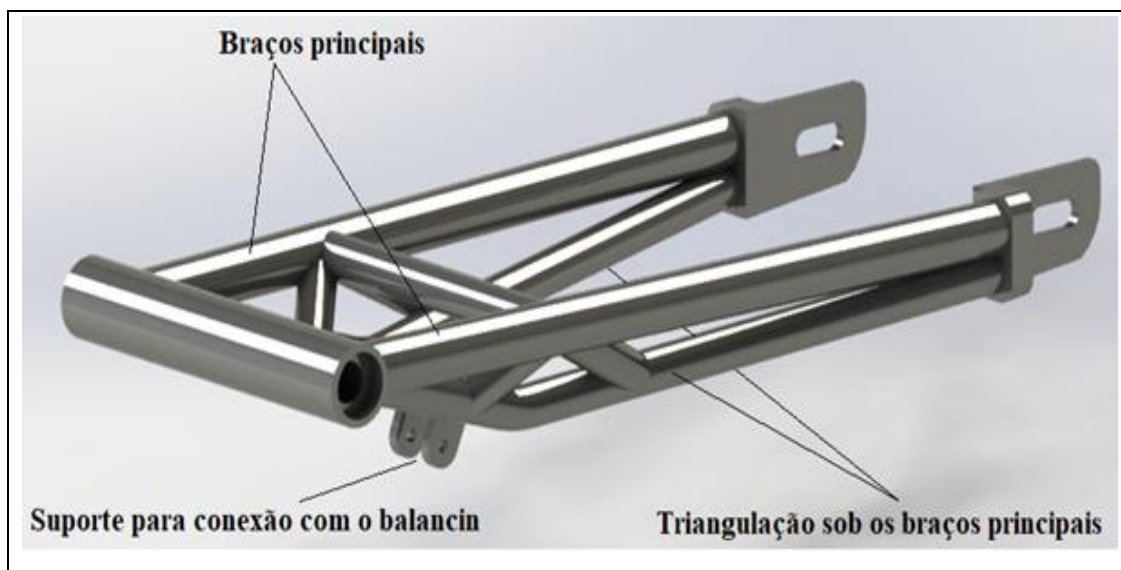
Em primeira análise, constatou-se que em maior e menor grau, todas as combinações estudadas obtiveram um comportamento de rigidez progressiva, porém a combinação 6, apresentou a maior progressividade, sendo a terceira menor rigidez no início do deslocamento da roda, e a maior rigidez no fim do deslocamento da roda, portanto sua configuração foi a escolhida para o projeto do sistema de suspensão.

Modelagem das peças

Definidas as dimensões do sistema de suspensão, elaborou-se o modelo 3D dos seus componentes utilizando o *software* Solidworks®.

A Figura 24 apresenta o desenho 3D da balança. A triangulação abaixo dos braços principais foi elaborada de forma que servisse tanto de reforço à estrutura quanto de apoio aos suportes de conexão com o balancim.

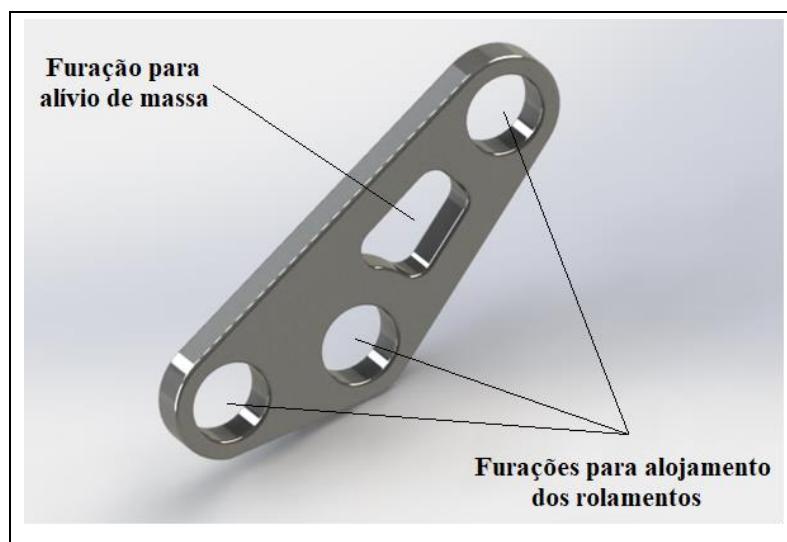
Figura 24: Representação 3D da balança



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

A Figura 25 apresenta o desenho 3D do balancim, o qual possui forma triangular com furos de alojamento de rolamentos em cada extremidade. No seu centro foi realizada uma furação para alívio de massa afim de diminuir a massa total do conjunto projetado.

Figura 25: Representação 3D do balancim



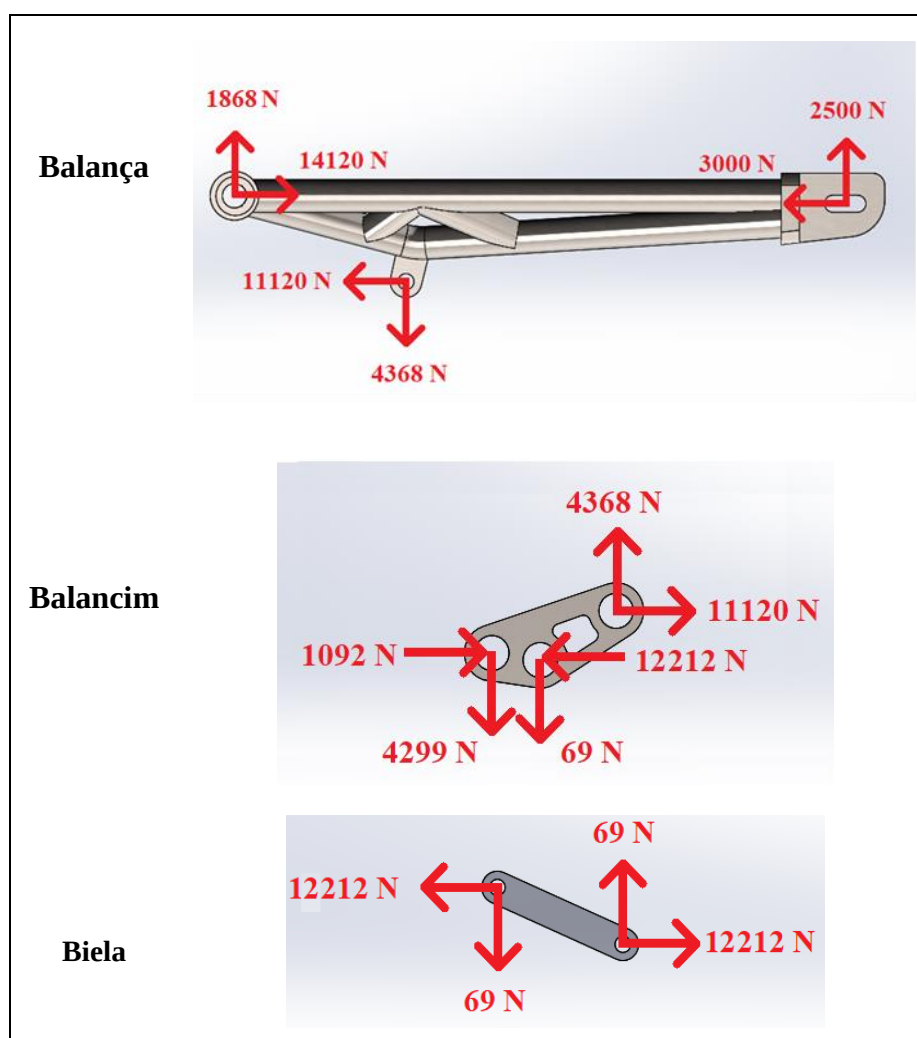
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Cálculo do carregamento

Uma das verificações técnicas realizadas pela organização da competição é a prova de segurança, na qual a motocicleta será submetida a um carregamento horizontal de 250 kgf e um carregamento vertical de 300 kgf. Deveu-se dimensionar os elementos de modo a suportarem tais solicitações. Para isso, inicialmente utilizou-se o *software* Adams® o qual permitiu simular o teste de segurança e obter as forças que atuam em cada articulação dos componentes.

A Figura 26 representa o diagrama de corpo livre da balança, balancim e biela, cujos componentes de forças foram obtidos através do *software* Adams®

Figura 26: Diagrama de corpo livre da balança



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Análise de tensão

A última etapa do projeto Preliminar constituiu-se da validação das peças frente aos esforços aos quais estarão sujeitas que, como discutido anteriormente, os componentes do sistema de suspensão terão que ser capazes de suportar todas as cargas aplicadas durante o teste de segurança. Isso se traduz no fato de que a tensão máxima suportada em qualquer ponto dos elementos deve ser inferior ao limite de escoamento do material em que são constituídos.

Utilizando o método dos elementos finitos⁷ através do o *software* Solidworks®, os corpos dos componentes projetados foram subdivididos em pequenos elementos. Os pontos de encontro entre tais elementos são chamados de nós e o conjunto de todos nós é chamado de malha.

O aumento no número de nós acarreta em um maior número de equações analisadas pelo *software*, portanto o refinamento da malha gera uma solução mais precisa para o modelo. Sendo assim, optou-se por utilizar uma malha fina cuja qualidade foi determinada como alta pelo *software* Solidworks® para a balança e balancim como mostrado na Figura 27 e 28 respectivamente.

Figura 27: Detalhe da malha gerada para a balança



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

⁷ É um método para resolver equações diferenciais, que consiste em discretizar o sistema sob análise em vários elementos conectados entre si em pontos comuns (nós), resolver as equações para cada elemento e depois combiná-las, podendo então obter respostas do modelo sob o fenômeno que está se estudando.

Figura 28: Detalhe da malha gerada para o balancim



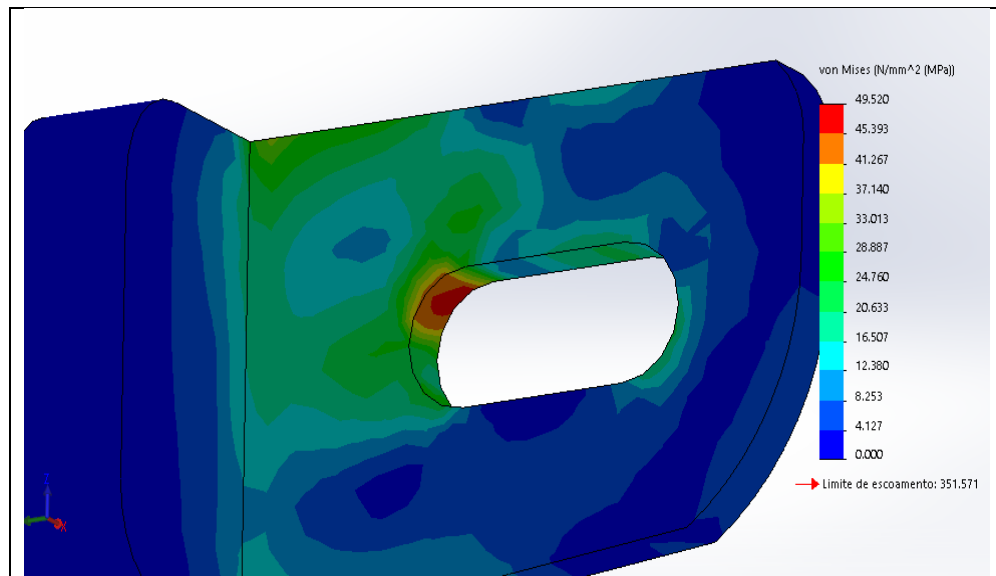
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Escolheu-se o material de construção da balança e balancim como sendo o aço 1020, cujo limite de escoamento equivale a 351 N/mm^2 .

O resultado da simulação de carregamento no *software* Solidworks® é apresentado em termos de tensão de Von Mises, a qual descreve as tensões resultantes no corpo do elemento devido o carregamento. Seu valor máximo deve ficar abaixo do limite de escoamento do material de fabricação do elemento estudado afim de garantir que o mesmo não apresente uma deformação plástica sob o carregamento.

A Figura 29 representa a análise de tensão na peça da balança que dá suporte ao eixo da roda traseira. O valor máximo de tensão no elemento foi de aproximadamente 49 N/mm^2 na parede interna do oblongo que serve como curso tensionador da corrente na situação mais desfavorável onde o eixo da roda traseira estaria encostado na parede interna do oblongo.

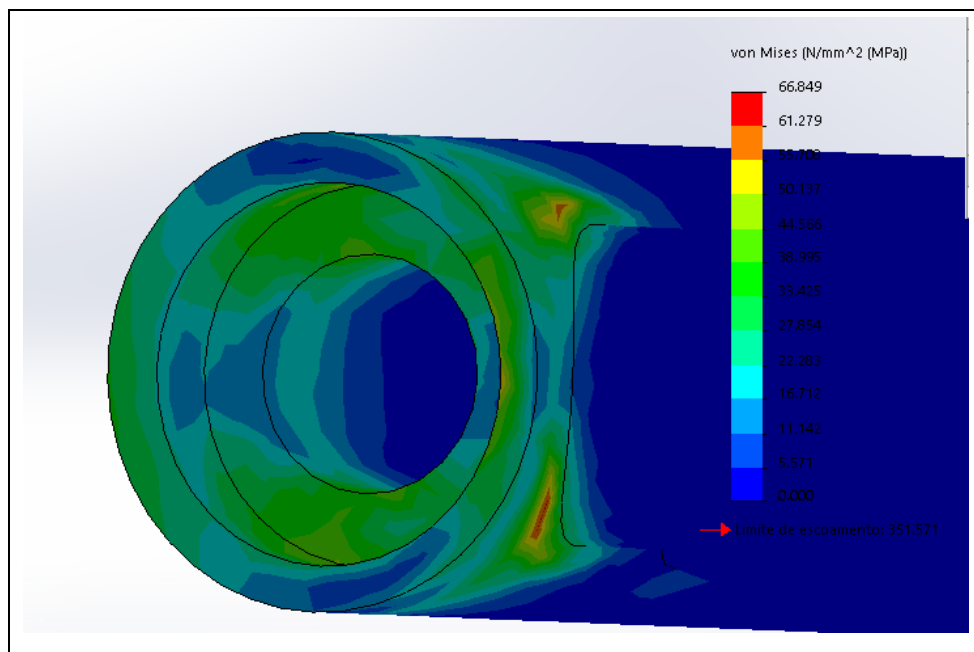
Figura 29: Análise de tensão no suporte de apoio do eixo da roda traseira



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Nas Figura 30, pode-se observar a estrutura de suporte dos rolamentos do eixo da balança, o qual faz conexão com o chassi. O suporte resiste ao carregamento sem nenhum problema, com o pico de tensão em torno de 67 N/mm² próximo a região de solda com os tubos estruturais da balança.

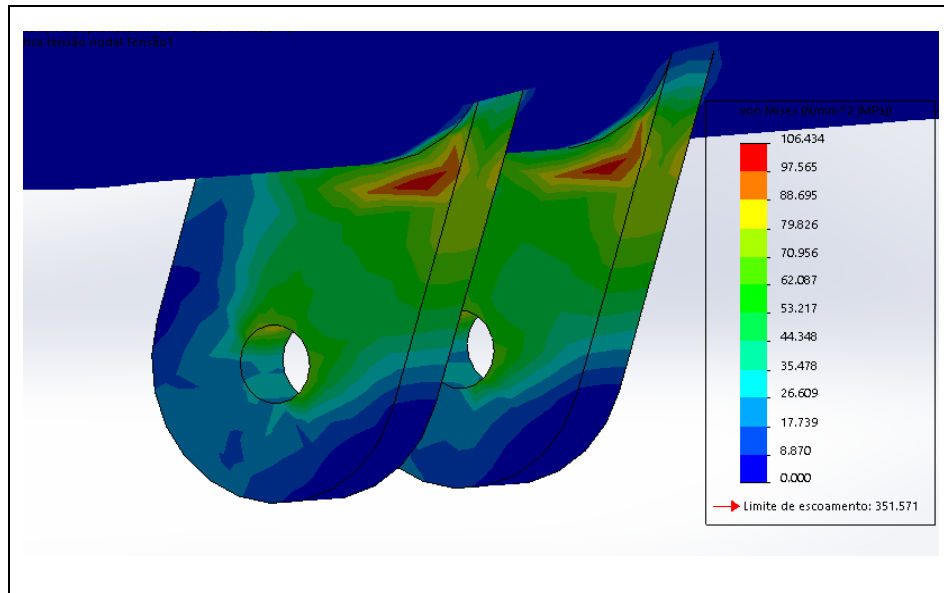
Figura 30: Análise de tensão na estrutura de alojamento dos rolamentos da balança



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

A Figura 31 apresenta a análise de tensão nos suportes do eixo de conexão da balança com o balancim, apresentando um pico de tensão em torno de 106 N/mm^2 , estando abaixo do limite de escoamento do material.

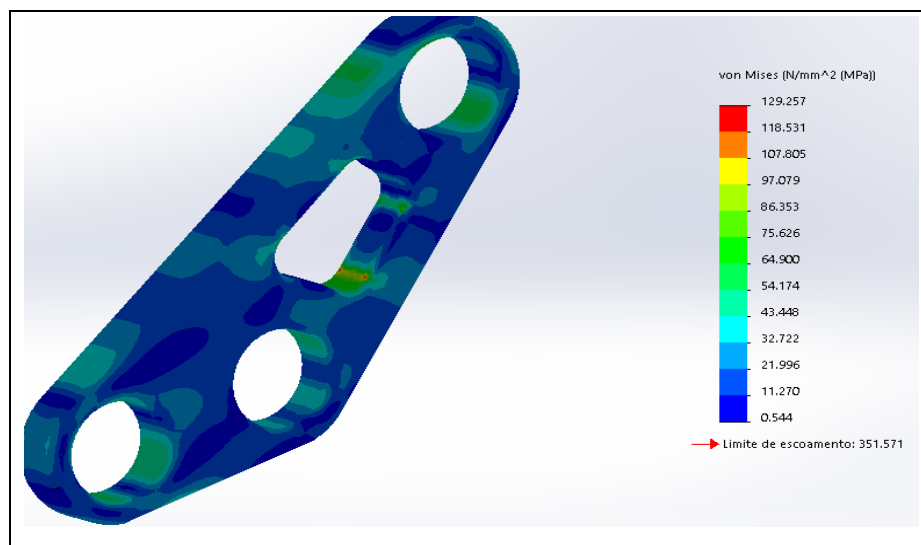
Figura 31: Análise de tensão nos suportes do eixo de conexão da balança com o balancim



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

A Figura 32 representa a análise de tensão do balancim. O pico de tensão, em torno de 130 N/mm^2 , aconteceu na superfície interna do furo de alívio de massa, ficando abaixo do limite de escoamento do material.

Figura 32: Análise de tensão no balancim



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

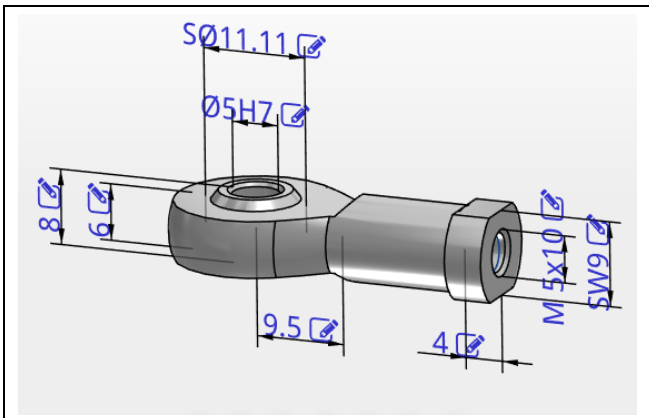
Toda análise realizada no *software* Solidworks® forneceu dados de tensão máxima abaixo do limite de escoamento do material, atestando que a geometria dos elementos projetado são capazes de suportar todas as cargas aplicadas durante o teste de segurança.

Seleção da biela

Como foi decidido que a biela fosse um item normalizado, utilizou-se catálogos de fornecedores para sua seleção, observando os valores de carregamento a que este item é submetido. Importante notar que, como foram utilizadas duas bielas no sistema de suspensão, o carregamento que cada uma deve suportar corresponde à metade do carregamento apresentado na Figura 26, portanto o componente foi selecionado atendendo a uma carga axial de aproximadamente 6 kN.

O Quadro 2 apresenta as especificações da biela selecionada cujas informações foram retiradas do catálogo do fornecedor Kipp, fabricante de componentes de fixação normalizados.

Quadro 2: Especificações da biela



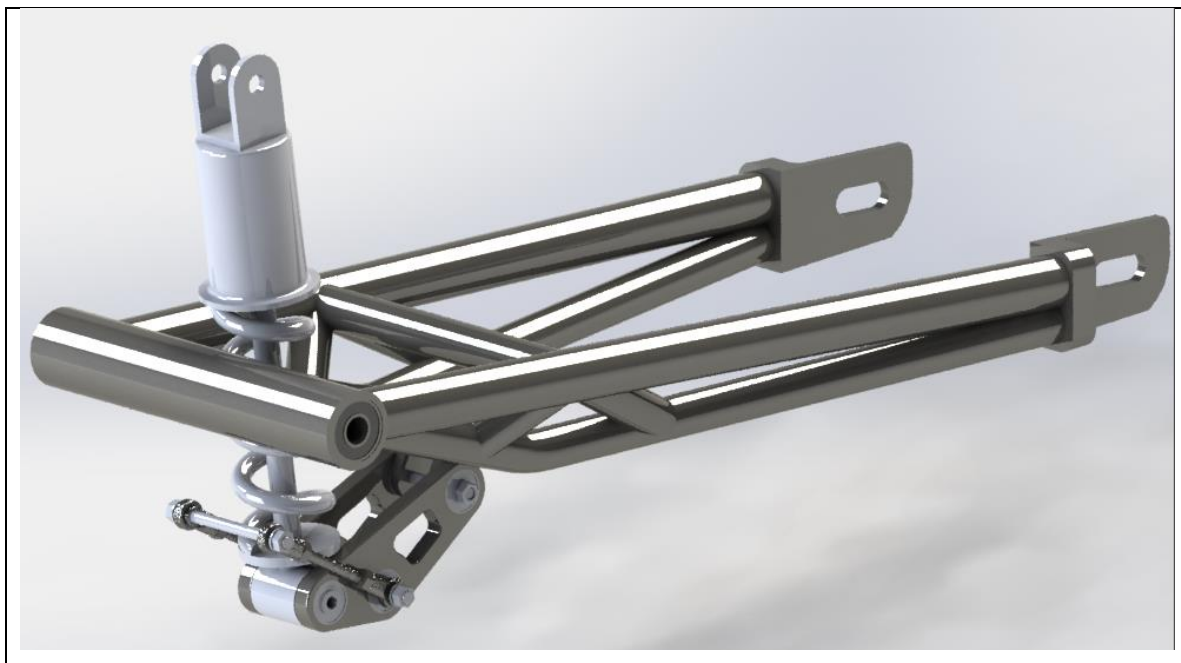
Código do elemento	K0721.05
Capacidade de carga	11,8 kN

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Montagem completa dos componentes projetados

Tendo todos os componentes do sistema de suspensão dimensionados foi possível, utilizando o *software* Solidworks®, realizar a montagem completa do sistema de suspensão traseira como destacado na Figura 33.

Figura 33: Representação 3D da montagem do sistema de suspensão traseira completo

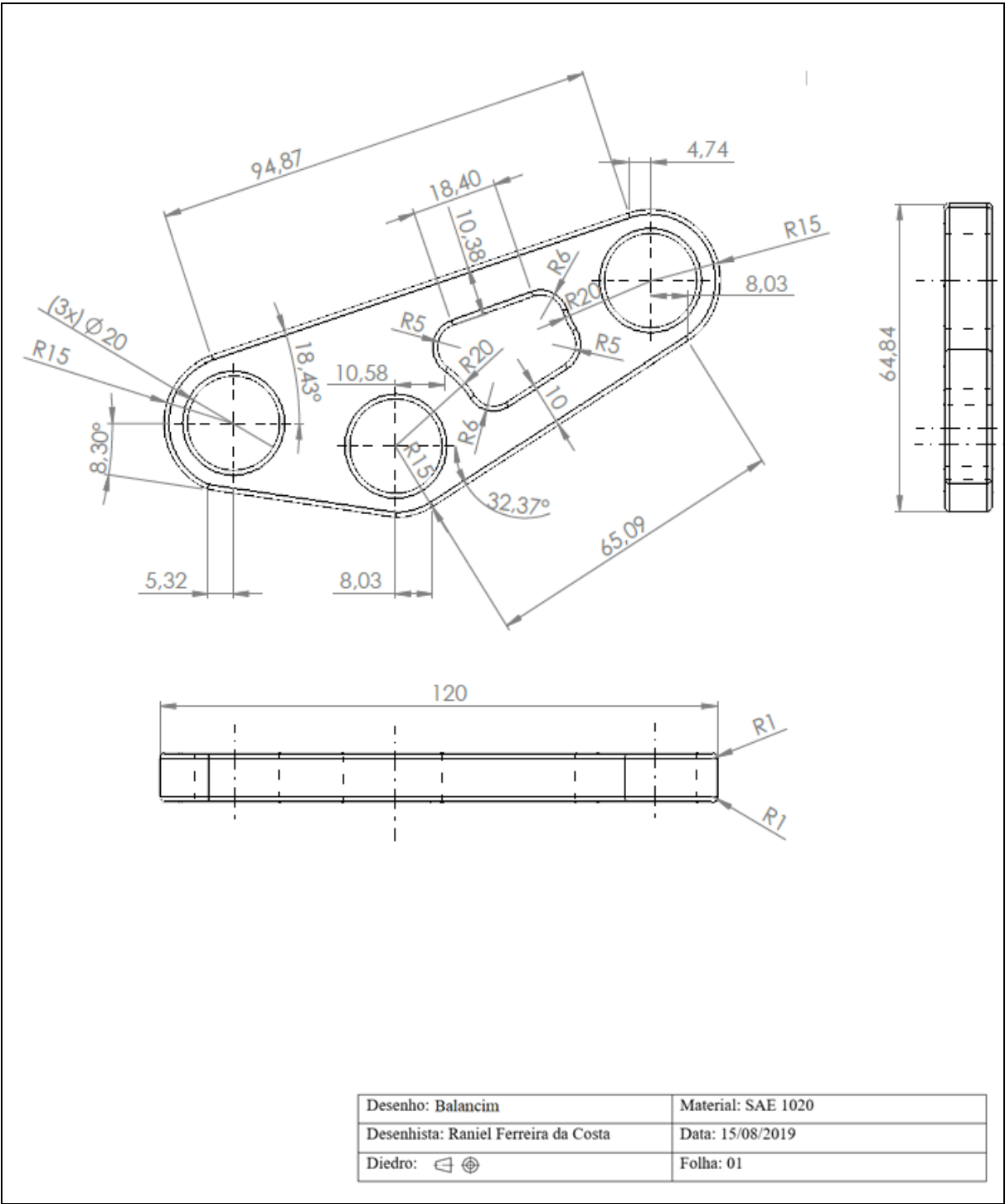


Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

4.4 FASE DE PROJETO DETALHADO

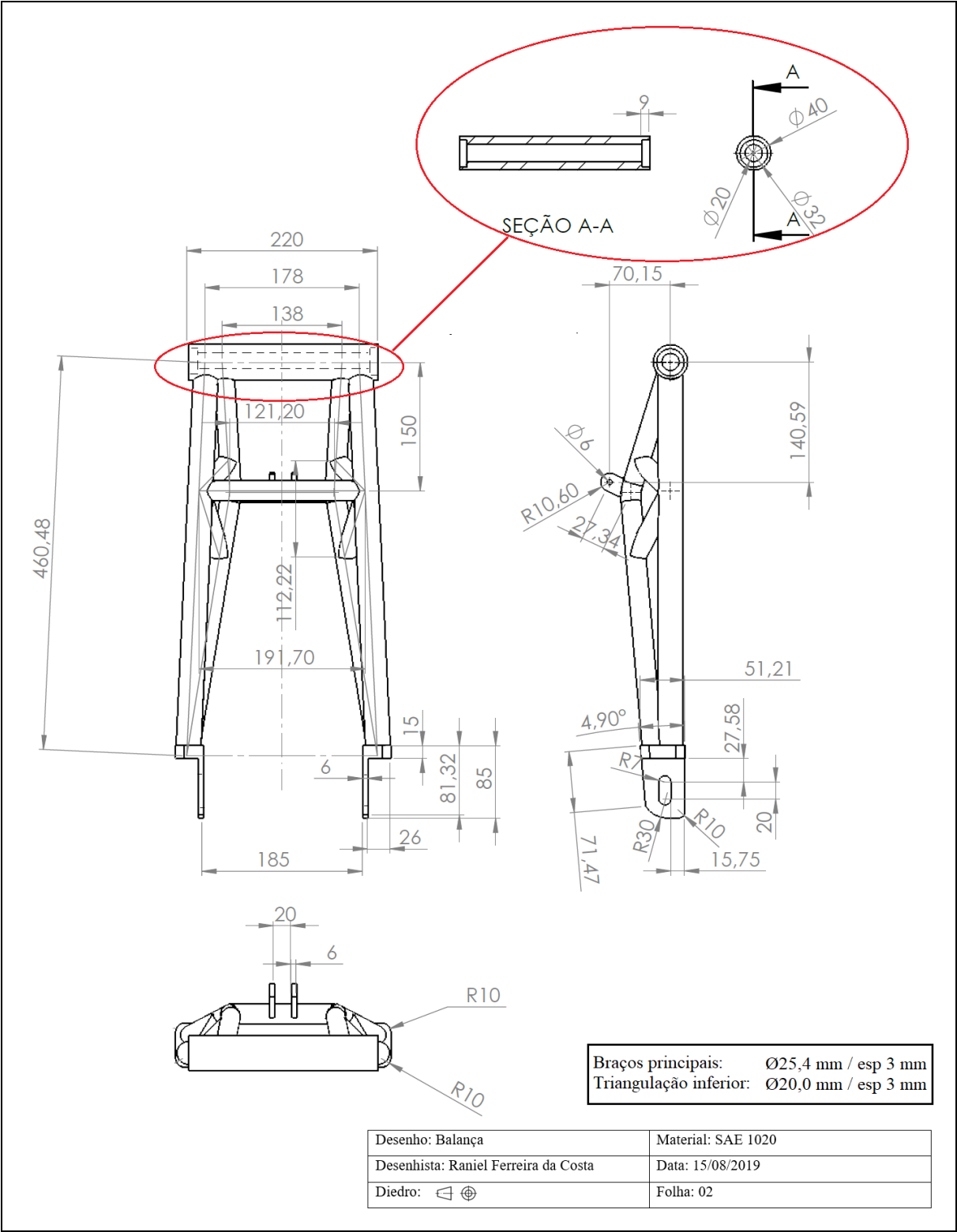
Com todos os componentes do sistema de suspensão dimensionados, utilizando o *software* Solidworks® foi possível a realização do detalhamento dos elementos a serem fabricados. A Figura 34 e 35 representam o desenho técnico 2D do balancim e da balança respectivamente.

Figura 34: Desenho 2D do balancim



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

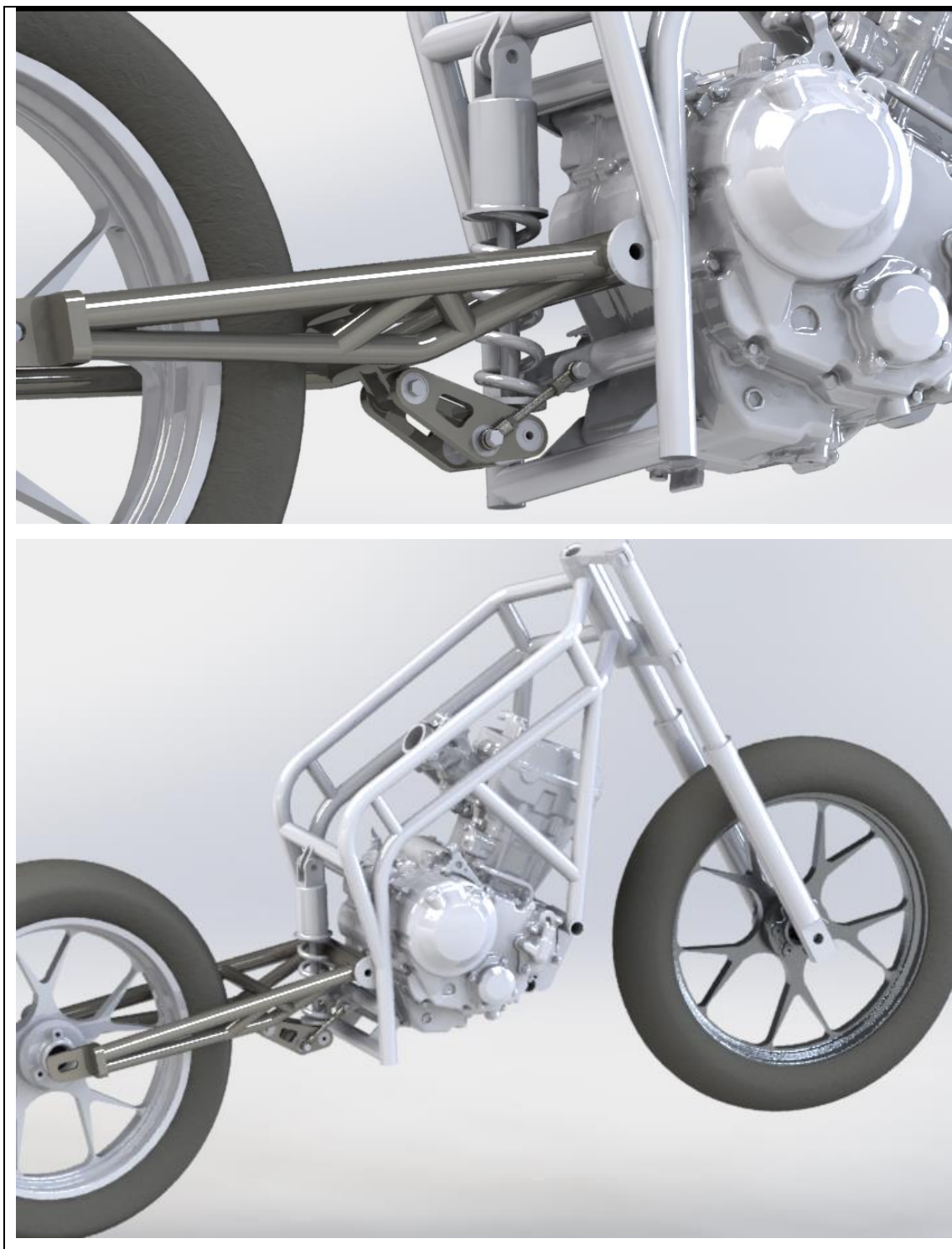
Figura 35: Desenho 2D da balança



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

A Figura 36 representa a montagem do sistema de suspensão desenvolvido, juntamente com o restante dos componentes da motocicleta.

Figura 36: Representação 3D do sistema de suspensão montado no chassi do protótipo Motorius



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho alcançou com sucesso o seu objetivo principal através do projeto completo de um sistema de suspensão traseira de motocicleta, de acordo com as especificações fixadas pela equipe Motorius, onde o adequado funcionamento e a integridade de cada elemento do sistema foram garantidos por meio das análises de dinâmica e de tensão realizadas. Seu conteúdo encontra-se a total disposição à equipe Motorius, a qual pode utilizar o mesmo como apoio teórico para a materialização de futuros sistemas de suspensão de seus protótipos. Aliada com os *softwares* Adams® e Solidworks®, já consolidados no meio industrial, a metodologia de desenvolvimento de produtos utilizada para o projeto do sistema de suspensão traseira provou ser uma importante ferramenta, estabelecendo uma lógica racional para as atividades necessárias, facilitando a compreensão da complexidade do assunto e a obtenção de soluções para os problemas.

REFERÊNCIAS

ARIAZ-PAZ, Manuel. **Motocicletas**. 32. ed. Madrid: Editora Dossat, 2003.

BARBOSA, Nunes F.. **Projeto e Desenvolvimento de Produtos**. São Paulo: Editora Atlas S.A., 2009.

CLARK, K. B. e FUJIMOTO, T. **Product Development Performance: Strategy, Organization and Management in the World Auto Industry**. 1. ed. Boston: Editora Harvard Business School Press, 1991.

COSSALTER, Vittore. **Motorcycle Dynamics**. 2. ed. Pádua: Editora Lulu.com, 2006.

FALLON, Ian. **The Complete Book of Moto Guzzi. Every Model Since 1921**. 1. ed. Minneapolis: Editora Quarto Group, 2017.

FITZGERALD, Craig. **1894 Hildebrand & Wolfmüller Recreation**. Disponível em: <<https://www.hemmings.com/blog/article/1894-hildebrand-wolfmiller-recreation/>> Acesso em: 14 de ago. 2019.

FOALE, Tony. **Motorcycle Handling and Chassis Design: The Art and The Science**. 8. ed. Espanha: Editora Tony Foale Designs, 2002.

GILLESPIE, Thomas D. **Fundamentals of Vehicle Dynamics**. Warrendale: Society of Automotive Engineers, Inc, 1992.

KIPP, **Catálogo de terminais de rótula com mancal de deslizamento e rosca fêmea**. Disponível em: <<https://www.kipp.com.br/br/pt/Produtos/Dispositivos-de-controle-Elementos-normalizados/Articula%C3%A7%C3%B5es/Terminais-de-r%C3%B3tula-com-mancal-de-deslizamento-e-rosca-f%C3%A2mea-em-a%C3%A7o-inoxid%C3%A1vel.html>> Acesso em: 30 jul. 2019.

KTM, **Manual 125 Sting**. Disponível em: <https://parts.fo/ktm/motorcycle/1998-125_lc2_100-76e866ae05-swingarm> Acesso em: 20 de ago 2019.

MOTOGUZZI, **Manual Nevada Classic IE 750**. Disponível em: < <https://www.fowlersparts.co.uk/parts/view/976941>>. Acesso em: 28 jul. 2019.

MUNARI, Bruno. **Das coisas nascem as coisas. 1. ed.** São Paulo: Editora Martins Fontes, 1998.

OLIVEIRA, José V.M.S. *et al.* **Sistema de Suspensão Veicular Otimizado por Meio de um Controle Eletromecânico do Conjunto Mola e Amortecedor**. Disponível em: < <https://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos14/40820461.pdf>>. Acesso em: 27 jul. 2019.

PAHL, Gehard e BEITZ, Wolfgang, *el at.* **Projeto na Engenharia**. 6. ed 2005. São Paulo: Editora Edgard Blücher. 2005.

SUZUKI, **Manual GSX-R 1000**. Disponível em: <http://www.suzukigsxr.org/rear_suspension_components-456.htmlz>. Acesso em: 28 jul. 2018.