CENTRO UNIVERSITÁRIO RITTER DOS REIS

FACULDADE DE ENGENHARIA

BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

GABRIEL PINTO DA MOTTA

ANÁLISE DOS PONTOS CRÍTICOS EM SISTEMAS DE SUSPENSÃO DE BICICLETAS DE ALTA PERFORMANCE: Estudo de caso

Canoas

2022

GABRIEL PINTO DA MOTTA

ANÁLISE DOS PONTOS CRÍTICOS EM SISTEMAS DE SUSPENSÃO DE BICICLETAS DE ALTA PERFORMANCE: Estudo de caso

Projeto Final de Conclusão de Curso, apresentado ao Centro Universitário Ritter dos Reis, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Jean de Dieu Briand Minsongui Mveh, Dr.

Canoas

2022

GABRIEL PINTO DA MOTTA

ANÁLISE DOS PONTOS CRÍTICOS EM SISTEMAS DE SUSPENSÃO DE BICICLETAS DE ALTA PERFORMANCE: Estudo de caso

Este Projeto Final de Conclusão de Curso foi julgado adequado à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário Ritter dos Reis.

_____, _____ de _____ de 20____.
Local dia mês ano

_____

Prof. e orientador Jean de Dieu Briand Minsongui Mveh, Dr.
Centro Universitário Ritter dos Reis

_____

Prof. Sérgio Luiz Telles Bartex, Dr.
Centro Universitário Ritter dos Reis

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela minha vida, e por permitir que eu tivesse saúde e determinação para não desanimar durante a realização deste projeto.

Aos meus familiares, pelo auxílio e incentivo nos momentos difíceis. Pela compreensão da minha ausência enquanto eu me dedicava à realização deste trabalho. Um agradecimento especial a minha mãe, meu avô e minha avó (*in memoriam*), pelo amor, cuidado e suporte durante minha formação acadêmica e em todos os momentos da vida.

Aos amigos, que sempre estiveram ao meu lado, pela amizade incondicional e pelo apoio demonstrado ao longo de todo o período de tempo em que me dediquei a este trabalho.

À minha namorada, por sua compreensão, carinho e companheirismo durante esta jornada.

Ao professor Dr. Jean de Dieu Briand Minsongui Mveh, por ter sido meu orientador e ter desempenhado tal função com dedicação e amizade.

Aos demais professores, pelas correções e ensinamentos que me permitiram apresentar um melhor desempenho no meu processo de formação profissional ao longo do curso.

Aos meus colegas de curso, com quem convivi intensamente durante os últimos anos, pelo convívio e pela troca de experiências que me permitiram crescer não só como pessoa, mas também como formando.

À instituição de ensino Centro Universitário Ritter dos Reis, essencial no meu processo de formação profissional, pela dedicação, e por tudo o que aprendi ao longo dos anos do curso.

A todos que participaram, direta ou indiretamente no desenvolvimento deste projeto de pesquisa, enriquecendo o meu processo de aprendizado.

RESUMO

O presente exposto apresenta um estudo dos elementos mecânicos, pneumáticos e hidráulicos que compõem os sistemas de suspensão traseiro e dianteiro das *mountains bikes,* bem como a análise dos principais pontos de fadiga e desgaste que incidem nas partes dos elementos suspensivos. Para tal feito, foi realizado um estudo de caso em três oficinas mecânicas da região metropolitana de Porto Alegre, analisando as soluções aplicadas nos principais componentes de desgaste, afim de verificar a melhora da durabilidade dos sistemas de suspensão. Este trabalho também apresenta uma análise vibratória, realizada através de um ensaio de campo em Porto Alegre utilizando uma *mountain bike,* afim de analisar as frequências de excitação, amplitude vibracional e frequência de ressonância que incide sobre o sistema de suspensão. Através do estudo de caso realizado nas oficinas mecânicas, foi visto que as falhas e desgastes que as suspensões apresentam ao longo do tempo estão estreitamente relacionadas a falta de manutenção e ao uso inadequado da bicicleta pelos usuários. Com base nisso, criou-se um plano de manutenção preventiva para o sistema de suspensão das bicicletas, com frequência que varia de 5 a 200 horas, de acordo com o tipo de serviço a ser efetuado. No ensaio de vibração realizado, concluiu-se que para alcançar o valor crítico de ressonância, a velocidade na passagem dos obstáculos necessita alcançar a faixa dos 126 m/s, valor muito superior as velocidades médias exercidas durante provas de ciclismo profissionais, que permeiam a faixa dos 9 m/s. Com isso em vista, nota-se que as *mountain bikes* são seguras quando utilizadas em pistas e terrenos adequados, observando as instruções de uso descritas nos manuais de cada fabricante.

Palavras chave: *Mountain bike*. Ciclismo. Sistemas de suspensão. Vibração. Manutenção.

ABSTRACT

This article presents a study of the mechanical, pneumatic, and hydraulic elements that make up the rear and front suspension systems of bikes, as well as the analysis of the main points of failure and abrasion that affect the parts of the suspension elements. For this purpose, a case study was carried out in three mechanical workshops in the Metropolitan Region of Porto Alegre, analyzing the solutions applied to the main deterioration components to verify the improvement of the durability of the suspension systems. This work also presents a vibrational analysis, carried out through a field trial in Porto Alegre using a mountain bike, to analyze the excitation frequencies, vibrational amplitude, and resonance frequency that affects the suspension system. Through the case study carried out in the mechanical workshops, it was seen that the failures and abrasion that the suspensions present over time are equivalent to the lack of maintenance and the inappropriate use of the bicycle by users. Based on this, a preventive maintenance plan was created for the bicycle suspension system, with a frequency ranging from 5 to 200 hours, according to the type of service to be performed. The vibration test ascertained that to reach the critical resonance value, the speed in the passage of obstacles needs to achieve the range of 126 m/s, a value much higher than the average speeds exercised during professional cycling events, which permeate the range of 7.8 m/s. With this in mind, it is worth mentioning that mountain bikes are safe when used on suitable terrain and tracks, observing the instructions for use described in the manuals of each manufacturer.

Keywords: Mountain-bike. Cycling. Suspension systems. Vibration. Maintenance.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Bicicleta projetada por Da Vinci.....16
Figura 2 – Sistemas de transmissão esboçados por Da Vinci.....17
Figura 3 – Celerífero.....17
Figura 4 – Draisiana.....18
Figura 5 – Velocípede de Pierre Michaux.....19
Figura 6 – Bicicleta de James Starley.....20
Figura 7 – Bicicleta *Overman Victor Flyer*, de 1893.....21
Figura 8 – Bicicleta *Pinarello Dogma F12 Disk Time Ineos*.....24
Figura 9 – Bmx *Drb NewWay 2021*.....25
Figura 10 – *Specialized S-Works Stumpjumper EVO*.....26
Figura 11 – Componentes da bike *full suspension.*.....27
Figura 12 – Elementos da suspensão dianteira e traseira.....28
Figura 13 – Partes externas da suspensão dianteira.....29
Figura 14 – Partes internas da suspensão dianteira.....31
Figura 15 – Cursos de suspensão por modalidade.....31
Figura 16 – Suspensão *RockShox SID SL Ultimate Race Day Boost*.....33
Figura 17 – Bicicleta *Specialized Stumpjumper EVO Alloy 2020*.....34
Figura 18 – Especificação das partes da suspensão traseira.....34
Figura 19 – Componentes do amortecedor traseiro.....35
Figura 20 – Deformação de uma mola translacional.....41
Figura 21 – Deformação de uma mola torsional.....41
Figura 22 – Rigidez de uma mola linear.....42
Figura 23 – Rigidez de molas não lineares.....43
Figura 24 – Amortecimento histerético.....44
Figura 25 – Pneu clincher.....47
Figura 26 – Pneu tubular.....47
Figura 27 – Construção dos pneus.....48
Figura 28 – Suspensão *Rockshox Recon TK GOLD* em manutenção.....55
Figura 29 – Hastes *ND Tuned*.....56
Figura 30 – Suspensão *Fox 32 Float 29 Fit CTD* com hastes danificadas.....57
Figura 31 – Óleo lubrificante contaminado na coroa e canela da suspensão.....57
Figura 32 – Componentes internos das hastes com a borra.....58

Figura 33 – Haste do amortecedor *Fox Triad* fraturada.....59
Figura 34 – Nova haste em aço temperado e componentes do amortecedor.....59
Figura 35 – Instalação de haste nova e demais componentes.....60
Figura 36 – Amortecedor com trinca no corpo do *damper*.....60
Figura 37 – Novo corpo do *damper* usinado e tratado quimicamente..... 61
Figura 38 – Corpos submetidos ao processo de anodização.....62
Figura 39 – Amortecedor *RockShox Deluxe Nude RLC3*.....63
Figura 40 – Detalhe das ferramentas para revisão do amortecedor.....63
Figura 41 – Amortecedor *Fox Racing Shox DHX 5.0 AIR*.....64
Figura 42 – Detalhe da nova haste *Kashima Coat*.....65
Figura 43 – Amortecedor *Monarch RT3 HV*.....65
Figura 44 – Amortecedor e tubos da suspensão traseira.....66
Figura 45 – Suspensão *Rochshox Judy Gold* em revisão.....67
Figura 46 – Suspensão *RockShox Recon XC* em revisão.....68
Figura 47 – Suspensão *RockShox Recon Silver TK SL* em revisão.....68
Figura 48 – Óleo saturado e componentes internos da suspensão.....69
Figura 49 – Desgaste na haste da suspensão *GTA RX Gold*.....70
Figura 50 – Canela direita e cartucho hidráulico da suspensão *GTA RX Gold*.....70
Quadro 1 – Hastes da suspensão dianteira.....71
Quadro 2 – Hastes do amortecedor traseiro.....73
Quadro 3 – Corpo hidráulico do amortecedor traseiro.....74
Quadro 4 – Plano de manutenção preventiva do sistema de suspensão dianteiro.....76
Quadro 5 – Plano de manutenção preventiva do sistema de suspensão traseiro.....77
Figura 51 – Local do ensaio vibracional.....79
Figura 52 – Acelerômetro fixado no assento da bicicleta.....80
Figura 53 – Analisador de vibração *SV 106D*.....80
Figura 54 – Acelerômetro *SV 38V*.....81
Figura 55 – Primeira velocidade registrada no aplicativo *Strava*.....82
Quadro 6 – Dados extraídos do ensaio de vibração.....83
Quadro 7 – Grandezas de vibração mecânica.....83
Gráfico 1 – Relação entre frequências x Frequência de excitação.....85
Gráfico 2 – Aceleração x Tempo.....87
Quadro 8 – Ferramentas e materiais utilizados.....93
Quadro 9 – Formulário de vibrações mecânicas.....95

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

Abraciclo - Associação Brasileira dos Fabricantes de Bicicletas e Ciclomotores

Air Can - Câmara de ar do amortecedor traseiro

BMX - *Bicycle Moto Cross*

Damper - *Corpo hidráulico interno do amortecedor traseiro*

EPI - Equipamento de Proteção Individual

GDL - Graus de liberdade

IFP - *Internal floating piston*

ISO 2631-1 - Norma que define métodos para quantificar a vibração de corpo inteiro

MTB - *Mountain Bike*

UCI - União Ciclística Internacional

PSI - *Pound force per square inch*

RMS - *Root Mean Square*

SAG - *Suspension adjustment gap*

Shock - Amortecedor traseiro da bicicleta

Sprints - Aumento da aceleração em corridas

TPI - *Threads per inch*

UCI - União Ciclística Internacional

VDV - *Vibration Dose Value*

XC - *Cross Country (*modalidade do ciclismo de montanha)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO..... 12

2 OBJETIVOS DA PESQUISA..... 13

2.1 OBJETIVO GERAL..... 13

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... 13

2.3 JUSTIFICATIVA..... 13

2.4 PROBLEMA DE PESQUISA..... 14

2.5 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA..... 15

3 REVISÃO DE LITERATURA..... 16

3.1 HISTÓRIA DA BICICLETA..... 16

3.1.1 A bicicleta moderna..... 20

3.2 MODALIDADES DO CICLISMO..... 22

3.2.1 Ciclismo de estrada..... 23

3.2.2 Ciclismo BMX..... 24

3.2.3 Ciclismo Mountain Bike..... 25

3.3 BICICLETA *MTB FULL SUSPENSION*..... 26

3.4 SISTEMAS DE SUSPENSÃO (DIANTEIRO E TRASEIRO) 28

3.4.1 Funcionamento e partes da suspensão dianteira..... 29

3.4.2 Cursos da suspensão dianteira..... 31

3.4.3 Ajustes da suspensão dianteira..... 32

3.4.4 Suspensões dianteiras de alta performance..... 33

3.4.5 Funcionamento e partes da suspensão traseira..... 33

3.4.6 Amortecedor traseiro..... 35

3.4.7 Ajustes do amortecedor traseiro..... 36

3.5 VIBRAÇÕES MECÂNICAS..... 38

3.5.1 Classificação das vibrações mecânicas..... 40

3.5.2 Mola..... 40

3.5.3 Amortecedor..... 43

3.5.4 Frequência e Ressonância..... 44

3.5.5 Fator de amortecimento..... 45

3.6 PNEUS DE BICICLETA..... 46

3.6.1 Tipos de pneus..... 47

3.6.2 Construção dos pneus..... 48

3.7 CLASSIFICAÇÃO DOS DEFEITOS EM ELEMENTOS MECÂNICOS 50

3.7.1 Modos de falhas independentes do tempo..... 50

3.7.2 Modos de falhas dependentes do tempo..... 51

4 MATERIAIS E MÉTODOS..... 54

4.1 LOCAIS DO ESTUDO..... 54

4.1.1 Oficina mecânica em Porto Alegre..... 54

4.1.2 Oficina mecânica em Gravataí..... 54

4.1.3 Oficina mecânica em Canoas..... 54

4.2 SERVIÇOS EFETUADOS..... 55

4.2.1 Suspensão Rockshox Recon TK Gold..... 55

4.2.2 Suspensão dianteira Fox 32 Float CTD..... 56

4.2.3 Amortecedor traseiro Fox Triad..... 58

4.2.4 Amortecedor traseiro Fox X2 Trunnion..... 60

4.2.5 Corpos hidráulicos de amortecedores..... 61

4.2.6 Amortecedor Rockshox Deluxe RLC3..... 62

4.2.7 Amortecedor Fox Racing DHX 5.0..... 64

4.2.8 Amortecedor RockShox Monarch RT3..... 65

4.2.9 Amortecedor RockShox Monarch RT..... 66

4.2.10 Suspensão dianteira RockShox Judy Gold..... 66

4.2.11 Suspensão dianteira RockShox Recon XC..... 67

4.2.12 Suspensão dianteira RockShox Recon Silver..... 68

4.2.13 Suspensão dianteira GTA RX Gold Air..... 69

4.3 MATERIAIS UTILIZADOS..... 71

4.4 AVALIAÇÃO DOS PONTOS CRÍTICOS NAS SUSPENSÕES..... 71

4.4.1 Hastes da suspensão dianteira..... 71

4.4.2 Hastes do amortecedor traseiro..... 73

4.4.3 Corpo hidráulico do amortecedor traseiro..... 74

4.5 MANUTENÇÃO PREVENTIVA EM SUSPENSÕES..... 75

4.6 ANÁLISE VIBRATÓRIA DO SISTEMA DE SUSPENSÃO..... 78

4.6.1 Descrição do ensaio de vibração..... 79

4.7 DETERMINAÇÃO DAS GRANDEZAS DE ANÁLISE VIBRATÓRIA 82

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS..... 85

6 CONCLUSÃO..... 88

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... 89

REFERÊNCIAS..... 90

ANEXO A – LISTA DE FERRAMENTAS..... 93

ANEXO B – FORMULÁRIO DE VIBRAÇÕES MECÂNICAS..... 95

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, existe um aumento na demanda por bicicletas no mercado consumidor, sendo estas para uso na prática do esporte ou como meio de transporte. A Abraciclo (2022) divide as modalidades em MTB (*mountain bike)*, urbana/lazer, elétrica, estrada e infanto-juvenil. Segundo dados da Abraciclo (2022) é notável que entre as categorias existentes, a *mountain bike* é a mais produzida e representou 63% da produção de bicicletas no Polo Industrial de Manaus em janeiro de 2022. Além disso, pode-se notar que houve um aumento significativo na produção de bicicletas em todas as categorias quando comparado janeiro de 2021 com janeiro de 2022. Isso mostra que existe um potencial de mercado que pode ser explorado com novas tecnologias e produtos que atendam melhor a necessidade dos usuários.

A MTB pode ser dividida em três subcategorias: *cross country* (XC), enduro/*all mountain* e *downhill*. Ainda dentro da categoria MTB, as bicicletas podem ser divididas em dois grupos com características distintas: *hardtail*, as quais possuem um quadro rígido e geralmente suspensão dianteira; *full-suspension*, estas, porém, contam com suspensão dianteira e traseira. Estes dois grupos de bicicletas são definidos pelo tipo de percurso que se pretende realizar, variando desde percursos não pavimentados, como estradões de terra, regulares com aclives e declives até percursos mais técnicos, irregulares com declives e obstáculos naturais tais como troncos, pedras, raízes, buracos, etc. Aplicando um sistema de suspensão traseira na *bike*, consegue-se obter a vantagem de transpor terrenos mais acidentados com maior estabilidade e controle, em comparação às *hardtail*.

Observando o avanço das tecnologias nos esportes ao longo dos anos e lançando um olhar para a modalidade do *mountain bike* no ciclismo, o presente trabalho busca ampliar a visão sobre os sistemas de suspensão nas *bikes* de alta performance, averiguando quais os pontos críticos nestes componentes que podem ocasionar desgastes e falhas, prejudicando assim, o desempenho e a segurança de usuários e atletas.

Utilizando-se de uma metodologia de pesquisa exploratória e investigação empírica, o estudo em questão visa traçar paralelos entre as áreas da Mecânica dos Sólidos, Ciência dos Materiais, Engenharia de Manutenção e Vibrações Mecânicas, observando na prática o comportamento dos materiais nos elementos suspensivos das bicicletas ao longo do tempo de uso das mesmas.

2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos do presente trabalho foram divididos em objetivo geral e objetivos específicos, os quais são apresentados a seguir.

2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar as estruturas e as partes críticas no sistema de suspensão de bicicletas de alta performance, buscando averiguar quais os principais pontos de desgaste que surgem nos componentes ao longo do tempo.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

a) estudar os elementos mecânicos, pneumáticos e hidráulicos que compõem os sistemas de suspensão traseiro e dianteiro das *bikes*;

b) analisar os principais pontos de fadiga e desgaste que incidem nas partes dos elementos suspensivos e amortecedores;

c) realizar uma pesquisa de campo em empresas do setor de manutenção especializada na região metropolitana de Porto Alegre, para auferir informações sobre os elementos da suspensão e as manutenções preventivas e corretivas que são feitas;

d) analisar as soluções aplicadas nos principais componentes de desgaste, afim de verificar a melhora da vida útil (durabilidade) dos equipamentos nos sistemas de suspensão;

e) realizar um ensaio de análise vibratória em uma bicicleta *mountain-bike,* afim de analisar as frequências de excitação e amplitude vibracional que incide sobre o sistema de suspensão.

2.3 JUSTIFICATIVA

Um dos meios de locomoção mais utilizados no mundo são as bicicletas. Anualmente são fabricadas algumas dezenas de milhões desse veículo em vários continentes e o Brasil é um dos grandes fabricantes além de amplo consumidor.

Dentre os diversos segmentos do mundo das bicicletas, o ciclismo de montanha, popularmente conhecido como *mountain bike*, tem se tornado ao longo dos

últimos anos, um dos esportes amplamente praticado por atletas e pessoas adeptas que pretendem realizar uma atividade saudável e entrar em contato com a natureza.

Atualmente as bicicletas de montanha estão divididas em quatro grandes categorias que englobam todas as modalidades praticadas (*CrossCountry, Trail, Downhill e DirtJump).* Um dos componentes de grande destaque para atender às exigências desse esporte são os sistemas de suspensão traseiro e dianteiro.

De acordo com Foale (2002), os principais objetivos da suspensão de bicicleta são: reduzir a vibração atuante no ciclista; manter o contato da roda com o solo; reduzir a perda de impulso ao transpor um obstáculo; reduzir as forças de impacto oriundas de saltos ou baques; manter o equilíbrio. Um sistema de suspensão adequado garante uma boa performance e conforto ao ciclista.

Os elementos que compõem as suspensões, além das exigências de projeto como resistência mecânica, baixo peso e desempenho em amortecimento, tem extrema importância durante o uso de uma bicicleta, pois caso falhem pode causar acidentes com consequências graves ao ciclista.

Neste contexto, destaca-se a relevância do presente trabalho, no qual se propõe a analisar as partes críticas nos sistemas de suspensão, buscando entender quais as principais falhas e desgastes que podem vir a acometer tais elementos. Este estudo também visa propor soluções aos problemas apresentados, trazendo desta forma contribuições para a área do ciclismo no que tange o desempenho das *bikes* e segurança dos atletas.

2.4 PROBLEMA DE PESQUISA

A suspensão é um dos componentes mais importantes de uma bicicleta tipo mountain bike, a mesma é responsável pela tração, controle e estabilidade de todo equipamento, além de manter o conforto do ciclista, absorvendo as irregularidades do terreno. O estudo das partes do sistema de suspensão das bicicletas do tipo mountain bike é de grande importância, através deste é possível contribuir para o bom funcionamento e otimização do desempenho das mesmas.

Diante disto, observa-se a importância da realização de uma análise dos elementos da suspensão traseira e dianteira nas bicicletas mountain bike. Em virtude

do número variado de itens que compõem os sistemas de suspensão, o presente trabalho tem como questão de pesquisa identificar: Quais são as partes críticas que sofrem desgaste, ocasionando mal funcionamento do equipamento e quais tipos de soluções podem ser encontradas para atenuar a ocorrência desses defeitos?

2.5 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

Este projeto de pesquisa delimita-se em buscar informações sobre os pontos críticos nas suspensões traseira e dianteira em bicicletas de alto desempenho, verificando assim, quais os tipos de desgastes e defeitos que podem acarretar em perda de performance da bicicleta e redução na segurança dos usuários. A pesquisa também visa apresentar possíveis soluções para os problemas que serão analisados.

Para obtenção desses dados será realizada uma pesquisa de campo em oficinas mecânicas, especializadas em manutenção de bicicletas de alta performance. A pesquisa será feita em oficinas na região metropolitana de Porto Alegre no ano de 2022.

O presente projeto também visa realizar um ensaio de análise vibratória em uma *mountain bike,* afim de verificar a segurança e durabilidade do equipamento, buscando avaliar a frequência natural do sistema e quais os valores de frequência de excitação podem vir a acarretar fenômenos de ressonância.

3 REVISÃO DE LITERATURA

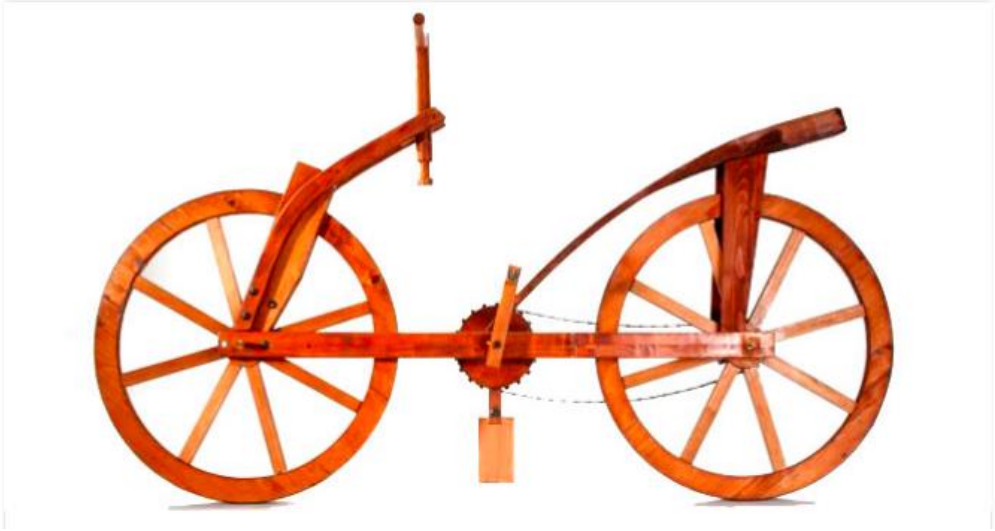
3.1 HISTÓRIA DA BICICLETA

Para entender como os sistemas de suspensão tem exercido influência ao longo do tempo no tocante ao desenvolvimento da bicicleta, se faz necessário remontar à história do veículo. Apesar de existirem muitas concordâncias nas referências aos seus inventores e construtores, o mesmo não acontece em relação às datas.

De acordo com MTB Brasília (2017), esboços de uma bicicleta foram encontrados no *Codex Atlânticus,* coleção de documentos do inventor renascentista Leonardo da Vinci (1452-1519) que abrangem uma grande variedade de assuntos os quais incluem a anatomia, mecânica, estudos sobre o voo e projetos arquitetônicos.

O esboço da bicicleta de Da Vinci antecipa uma série de tecnologias que seriam utilizadas quase 400 anos depois nas primeiras bicicletas, como sistemas de pedais, rodas com raios de madeira e transmissão por corrente e roda dentada. A empresa italiana de design *Multi Tranciati* recriou a bicicleta esboçada por Da Vinci conforme mostrado na Figura 1.

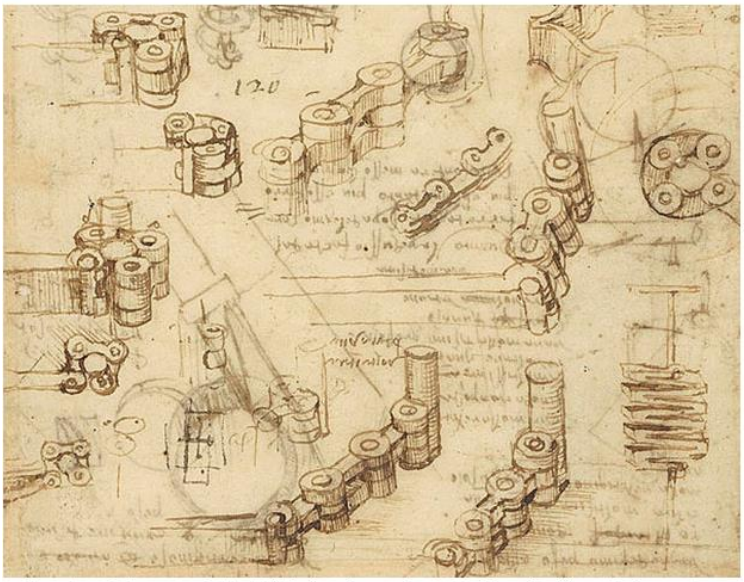
Figura 1: Bicicleta projetada por Da Vinci



Fonte: MTB Brasília (2017)

Nos esboços de Da Vinci também foram encontrados modelos de sistemas de transmissão por correntes conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2: Sistemas de transmissão esboçados por Da Vinci



Fonte: MTB Brasília (2017)

Em 1780, Monsieur de Sivrac, um aristocrático parisiense, realiza um rudimentar protótipo daquilo que seria a bicicleta. Trata-se do celerífero, como visto na Figura 3, era feito de duas rodas de madeira com raios unidos por uma viga, que se empurrava fazendo uma alavanca com os pés no chão (CALLISXTO, 1967).

Figura 3: Celerífero

Fonte: Magazine (2011)

Anos mais tarde, em 1817, o barão alemão residente na cidade de Karlsruhe, de nome Karl Friedrich Drais von Sauerbrenn realiza implementos no celerífero, com um sistema de direção que permitia fazer curvas e com isto manter o equilíbrio da bicicleta quando em movimento, além de incorporar um rudimentar sistema de

frenagem. Esse dispositivo, conforme mostrado na Figura 4, ficou conhecido como bicicleta “Draisiana”. (WILSON, PAPADOPOULOS, 2004).

Figura 4: Draisiana

Fonte: Magazine (2011)

As *Draisiennes* e outros veículos semelhantes que foram sido criados ao longo do tempo não convenceram a comunidade científica que não os reconheceram como um meio de transporte revolucionário e eficiente.

Conforme Sidwells (2003), um importante passo para o reconhecimento da bicicleta como um veículo de tração humana a ser desenvolvido, foi o aparecimento de uma solução mecânica mais eficiente na transformação da força gerada em movimento. Esta revolução surgiu por volta do ano 1855 com a introdução do pedal e manivelas que permitiam tornar o veículo mais rápido e sobretudo tudo mais confortável.

Pierre Michaux, um carroceiro da cidade de Brunel, França, recebeu em sua oficina uma draisiana para reparos. Depois de pronta colocou seu filho para usá-la e este a achou muito cansativa. Michaux então passou a pensar em algum sistema de propulsão que fosse ligado diretamente a roda dianteira e que fizesse o deslocar da máquina mais fácil. Acabou redesenhando todo o projeto original da draisiana, criando um quadro de ferro e um sistema de propulsão por alavancas e pedais na roda dianteira. Pai e filho gostaram tanto do resultado que acabaram por optar pela sua fabricação. Estava criado o que viria a ser chamado de *Velocípede*, de acordo com a Figura 5. Michaux teve a brilhante ideia de dar um de seus velocípedes para o filho de Napoleão III e isto abriu as portas comerciais de seu produto (HISTORY, 2020).

Figura 5: Velocípede de Pierre Michaux

Fonte: History (2020)

Durante a revolução industrial houve uma expressiva revolução de ideias, conceitos e transformações sociais resultando em uma série de invenções, projetos e inovações para os veículos a propulsão humana. Em 1868 os biciclos, bicicletas e triciclos ganharam notoriedade e muita importância para o mercado francês, acabando por aparecerem com destaque nas grandes exposições da época, como na *Expo Paris* (1868), ficando nítida a importância que bicicletas e variantes tomariam no mercado francês e logo por toda a Europa (BELLOTO, 2009).

Conforme Alcorta (2013), na década de 1880, o inventor ingles John Kemp Starley, responsável pelo desenvolvimento das máquinas de costura Coventry, decidiu repensar a bicicleta e acabou criando um modelo completamente diferente. Conforme pode ser observado na Figura 6, o modelo consiste de uma construção em aço, com roda raiada, pneus em borracha maciça e um sistema de freios inovador. Sua grande roda dianteira, 50 polegadas ou aproximadamente 125 cm, fazia dela a máquina de propulsão humana mais rápida até então fabricada.

Como os pedais são fixos no eixo da roda, quanto maior o diâmetro da roda, maior a distância percorrida em cada giro, portanto, maior a velocidade em cada pedalada. As rodas, a partir de então, seriam fabricadas com medidas que atendiam ao comprimento da perna do ciclista.

Figura 6: Bicicleta de James Starley

Fonte: History (2020)

3.1.1 A bicicleta moderna

Por volta de 1888 Starley idealizou um outro modelo, este muito similar à bicicleta moderna porque também utilizava uma corrente para transmitir o movimento à roda traseira. Com a morte de Starley, seu neto aperfeiçoou o modelo chamado *Rover*, redimensionando as rodas ao tamanho usado atualmente, com o quadro feito de tubos de aço em forma de trapézio, o guidão ligado direto na roda dianteira, tração traseira por corrente e freio a tambor na roda dianteira. Mas as bicicletas ainda apresentavam um problema de difícil solução – suas rodas eram de madeira ou ferro. No mesmo ano o veterinário irlandês John Boyd Dunlop patenteou a primeira versão do pneu, que se resumia a uma trama de borracha cheia de ar, para construir um triciclo para seu filho. Antes disso, em 1845, o engenheiro civil escocês Robert Thomson já havia patenteado um pneu de borracha vulcanizada, porem sua invenção destinava-se apenas para carroças, daí o pouco sucesso junto as bicicletas. Somente em 1891 que os franceses Édouard e André Michelin inventaram o clássico tubo de borracha fina munido com uma válvula para controlar o ar interno envolto em um outro tubo de borracha mais resistente. (ALCORTA, 2003).

Com esses adventos a questão da insegurança foi sendo resolvida, entrando na era do que é chamada de *bicicleta de segurança*, que no fundo é a bicicleta que se conhece hoje. Sua configuração com duas rodas do mesmo tamanho e ciclista pedalando entre elas resolve também definitivamente o grave problema de equilíbrio

existente nos biciclos de roda grande. Ter um comportamento previsível e relativamente seguro para o condutor populariza o produto. O outro ponto importante para seu sucesso é a simplificação dos processos de produção, portanto diminuição de preço final. As rodas de uma bicicleta de segurança são ambas do mesmo tamanho. Fabricar e montar uma roda é sempre um processo trabalhoso e demorado e a padronização de tamanho facilita muito, não somente na produção da roda em si, mas em todo o processo de construção porque uniformiza também o tamanho dos tubos usados para garfo e quadro (FARIAS, 2009).

O domínio na tecnologia na transmissão por corrente também fez grande diferença porque esta cria um efeito elástico que diminui trancos nos pés e joelhos do ciclista. A bicicleta passaria a ser mais suave de conduzir. Todos estes melhoramentos tecnológicos derrubaram em parte a visão de dificuldade de condução, insegurança e incomodo que foi formada nos tempos do biciclo e das primeiras bicicletas, o que fez com as novas bicicletas se popularizassem. Tudo isto transforma a bicicleta em um modo de transporte simples, eficiente, mais seguro, confortável e com custo baixo. A partir de então inúmeras fábricas de bicicleta surgem ao longo de toda a Europa e Estados Unidos. Conforme ilustrado na Figura 7, observa-se um exemplar da empresa *Overman,* bicicleta fabricada em larga escala em todo território estadunidense (MUSEUM, 2015).

Figura 7: Bicicleta *Overman Victor Flyer*, de 1893

Fonte: Museum (2015)

A indústria de bicicletas foi a primeira grande indústria do mundo a gerar uma receita tão grande do público. Ele antecedeu e abriu o caminho para a indústria automobilística, que aprendeu e aplicou seus métodos. Provavelmente uma boa comparação hoje, em termos de volume de publicidade, seria a indústria fotográfica ou a indústria automobilística. E, em termos de uma indústria que é relativamente nova hoje, podemos comparar a indústria de computadores. (BICYCLE MUSEUM, 2015).

Em mais de 100 anos de evolução desde o final do século XIX, o formato da bicicleta não sofreu grandes alterações. Acredita-se que esse formato seja o mais eficiente, no qual apenas 1% da energia transmitida das pernas à roda traseira se perde, o que torna possível ao ciclista manter facilmente a marcha entre 16 e 19 quilômetros por hora, isto é, quase quatro vezes a velocidade do caminhar (DUARTE, 1990). Devido a isso, as maiores implementações desenvolvidas no século XX e disponibilizadas no mercado foram em outras áreas da bicicleta como o material do quadro, o tipo de freio, câmbio, aerodinâmica, entre outros.

Nos dias de hoje a bicicleta se tornou um importante meio de transporte, não poluente e seguro, sendo usada inclusive na prática de esportes olímpicos. Muitas pesquisas são desenvolvidas pela indústria, no intuito de aprimorar e melhorar cada vez mais um dos meios de transporte e lazer mais utilizados no mundo. De acordo com Farias (2009) a bicicleta é usada tanto como meio de transporte, sendo um transporte barato, ecológico e saudável, como objeto de lazer e para competições desportivas de ciclismo.

3.2 MODALIDADES DO CICLISMO

No século XX as bicicletas continuaram a evoluir para atender as necessidades dos ciclistas e muitos passos foram dados permitindo à bicicleta tornar-se num veículo de transporte mais seguro. Com o aumento da popularidade e a diversificação do uso, começaram a ser desenvolvidas bicicletas específicas para o tipo de terreno e aplicação que a mesma terá, encorajando os inventores a melhorar a velocidade, o rendimento e a segurança do utilizador (NABINGER, 2006).

A bicicleta é utilizada na prática de esportes desde o final do século XIX, a partir de então é notória a busca por projetar bicicletas cada vez mais velozes e com melhor desempenho. Dessa forma o setor passou a desenvolver novos materiais que proporcionem vantagens aos competidores, ganhando alguns segundos em relação

aos concorrentes que podem definir o vencedor. O desenvolvimento de novos materiais tem importante função, ganhando destaque à busca por materiais cada vez mais leves, resistentes, e capaz de proporcionar grandes velocidades. Serão descritos a seguir alguns esportes que, demandam bicicletas mais sofisticadas. Para Nabinger (2006) o desempenho dos ciclistas depende da técnica de pedalar, do preparo físico e do tipo de equipamento utilizado.

3.2.1 Ciclismo de estrada

O ciclismo de estrada foi a primeira modalidade a ser disputada quando iniciaram as competições utilizando bicicletas, na segunda metade do século 19. A primeira competição ocorreu em 31 de maio de 1868, no *Parc de Saint-Cloud*, em Paris. Existem duas principais modalidades do esporte: o *ciclismo contra o relógio* e a *corrida de estrada.* No *ciclismo contra o relógio* os competidores percorrem o percurso individualmente ou por equipe, vencendo aquele que finalizar o trajeto no menor tempo. A *corrida de estrada* consiste em uma prova em que todos os participantes largam juntos vencendo aquele que chegar à linha de chegada primeiro.

As bicicletas utilizadas neste esporte são conhecidas como *road bikes* ou *speed*. Estas bicicletas são concebidas para uma maior performance em relação a velocidade e em percursos de longa duração. Para atender a essas necessidades, bicicletas desse tipo são fabricadas com um formato aerodinâmico, com o guidão propositalmente baixo, utilizando componentes em fibra de carbono ou em titânio, o que lhe garante rigidez e leveza. As rodas são leves, com pneus finos e com elevada pressão. Tem pouca aderência ao solo, o que requer técnica e prática. Aceleram rápido e são capazes de manter alta velocidade.

Em consonância com a Figura 8, a bicicleta *speed* tem uso restrito ao asfalto e seu desempenho é satisfatório em estradas com boas condições, o que dificulta sua utilização em algumas localidades. Estas características combinadas com seu alto custo, com preços que chegam à casa dos *cem mil reais,* tornam a mesma não indicada para usos cotidianos e passeios (MTB BRASÍLIA, 2020).

Figura 8: Bicicleta Pinarello Dogma F12 Disk Time Ineos

Fonte: MTB Brasília (2020)

3.2.2 Ciclismo BMX

O BMX, também conhecido como bicicross, é o caçula do ciclismo. A origem da modalidade data das décadas de 1960 e 1970, época em que as vertentes mais tradicionais do esporte — estrada e pista — já faziam parte dos Jogos Olímpicos. O BMX surgiu graças à admiração de jovens norte-americanos pelo *MotoCross*. A vontade de imitar as manobras dos ídolos aliada à falta de equipamento fez com que bicicletas fossem utilizadas em pistas de terra. Nasceu, então, o *Bicycle Moto Cross*, ou simplesmente BMX (ESPORTELÂNDIA, 2019).

Bem mais barato e fácil de ser praticado que sua modalidade inspiradora, o BMX cresceu rapidamente, especialmente entre os jovens. Na década de 1970, o esporte viu a criação da primeira federação, nos Estados Unidos. Em 1981, surgiu a Federação Internacional de BMX. Um ano depois ocorreu o primeiro Campeonato Mundial da categoria, disputado em Dayton, nos Estados Unidos. Todos os campeões foram pilotos norte-americanos. Em 1993, a União Ciclística Internacional (UCI) passou a regular o esporte. O BMX fez sua primeira aparição olímpica nos Jogos Olímpicos de Pequim-2008, com disputas tanto no masculino quanto no feminino.

Reconhecido como uma das modalidades de ciclismo que mais exige habilidade por parte dos atletas, o BMX proporciona manobras espetaculares. As bicicletas utilizadas pelos competidores possuem rodas com aro 20”, além de uma

marcha e um freio, conforme ilustrado na Figura 9. O esporte é dividido em dois estilos, *BMX Racing* e *BMX Freestyle* (REDE DO ESPORTE, 2020).

Figura 9: Bmx Drb NewWay 2021

Fonte: Drb (2021)

3.2.3 Ciclismo Mountain Bike

Assim como o BMX, o mountain bike surgiu da curiosidade e da ânsia por aventura dos norte-americanos da década de 1970. Foi no estado da Califórnia que ciclistas que buscavam uma experiência diferente do asfalto das estradas resolveram enfrentar trilhas e terrenos acidentados com suas bicicletas. Um grupo de San Francisco ajudou bastante na divulgação da modalidade ao realizar um dos primeiros campeonatos de mountain bike. A prova, disputada entre os anos de 1976 e 1979, ocorreu nas proximidades da famosa ponte Golden Gate e acabou atraindo bastante interesse para a nova vertente do ciclismo (REVISTA BICYCLE, 2019).

Em 1983, os norte-americanos realizaram o primeiro campeonato nacional do esporte. Com o crescimento nos Estados Unidos e em outros países da Europa e na Austrália, o mountain bike teve seu primeiro Mundial realizado em 1990, já sob a sanção da União Ciclística Internacional (UCI). A partir de então, não demorou tanto para que a modalidade chegasse aos Jogos Olímpicos. A estreia veio justamente no berço do esporte, os Estados Unidos, em Atlanta (1996).

A bicicleta do mountain bike tem pneus mais largos do que a de estrada, além de amortecedores traseiros e dianteiros, para diminuir o impacto para os atletas nos terrenos acidentados do percurso. O material utilizado, também por conta do impacto, é mais resistente. Entretanto, não deixa a bicicleta tão pesada, ficando com cerca de oito quilos a nove quilos. Os modelos de competição têm um alto valor agregado, a Figura 10 exemplifica uma mountain bike de alto desempenho que custa em torno de cem mil reais (SPECIALIZED, 2022).

Figura 10: *Specialized S-Works Stumpjumper EVO*

Fonte: Specialized (2022)

3.3 BICICLETA *MTB FULL SUSPENSION*

No presente trabalho será dado ênfase às bicicletas de suspensão total, conhecidas popularmente como *bikes full suspension,* pois são bicicletas que contém amortecedores na dianteira e traseira. Tais bicicletas são indicadas para as modalidades desportivas como *Cross Country*, Enduro, *Trail, All Mountain* e outras modalidades que exigem suspensão dupla. As *MTB's full suspension* guardam vantagens e desvantagens em cada modelo.

As vantagens de uma *full suspension* são pontos altos em circuitos que exigem uma maior performance cujos terrenos são acidentados e com maior quantidade de obstáculos. A *MTB full suspension* traz mais estabilidade em alta velocidade, principalmente em terrenos acidentados, já que a roda traseira tem mais tração, garantindo que o pneu se mantenha em contato com o solo na maioria do tempo.

Em um percurso longo, principalmente em competições, a suspensão dupla garante mais conforto e menos dores pelo corpo, com o decorrer do pedal pela rota, minimizando os pequenos e grandes impactos causados pelo terreno. A *full suspension* permite uma agressividade maior no estilo de pilotar, ajudando em manobras mais arriscadas, como saltos em rampas, quedas e obstáculos altos. Existem várias medidas de curso de suspensão, como 100mm, 120mm, 150mm, entre outros. Isso vale para a suspensão dianteira e o amortecedor traseiro. Quanto maior o curso, mais adequada a bike estará para pedais mais agressivos, como o *All Mountain e o Donwhill* (JONES, 2019).

Enquanto em uma bike *hardtail* as descidas muito técnicas devem ser feitas com bastante cuidado, com as *full suspension* pode-se ter mais velocidade. Esse tipo de bicicleta faz correções na rota da bike, a mantendo estável e absorvendo melhor os impactos. Na figura 11 pode ser observado um modelo de bicicleta *full suspension* com suas respectivas partes.

Figura 11: Componentes da bicicleta *full suspension*

Fonte: Núcleo Bike (2022)

A *bike full suspension* também apresenta algumas desvantagens que podem ser descritas. Pelo menos na maior parte dos modelos de entrada e intermediários, é

mais pesada do que uma *hardtail*. Seu quadro mais robusto e a suspensão traseira colocam no mínimo quinhentas gramas a mais em um modelo.

O desempenho de uma *full suspension* em locais retos e com boa superfície não é o melhor comparado às *hardtail.* Por causa do quadro separado em duas partes e o movimento da suspensão traseira, mesmo que pequeno, a potência de pedal é prejudicada, o que atrapalha no ganho de velocidade. Com uma bike mais pesada, as subidas ficam um pouco mais difíceis de serem vencidas. Ainda que haja vários modelos com trava em ambas as suspensões, o peso continua o mesmo.

Mesmo que a *full suspension* seja para um iniciante, ela tem o custo mais alto do que um modelo intermediário ou mesmo avançado de *hardtail.* Por causa de seu sistema de quadro separado em duas partes, chamado link, com rolamentos e uma suspensão traseira, a revisão nesse tipo de bike demanda mais tempo e mecânicos especializados. Com isso, aumenta-se o custo de manutenção, principalmente se for preciso reparar alguma peça que faça parte desse sistema (WU, 2012).

3.4 SISTEMAS DE SUSPENSÃO (DIANTEIRO E TRASEIRO)

Os benefícios de uma suspensão para aumentar o controle, eficiência, conforto e segurança são comprovados. Basta dizer que o último campeão Olímpico de XC venceu a prova a bordo de um modelo *full suspension.* Na Figura 12 pode-se observar os elementos que fazem parte da suspensão dianteira e traseira em uma bicicleta.

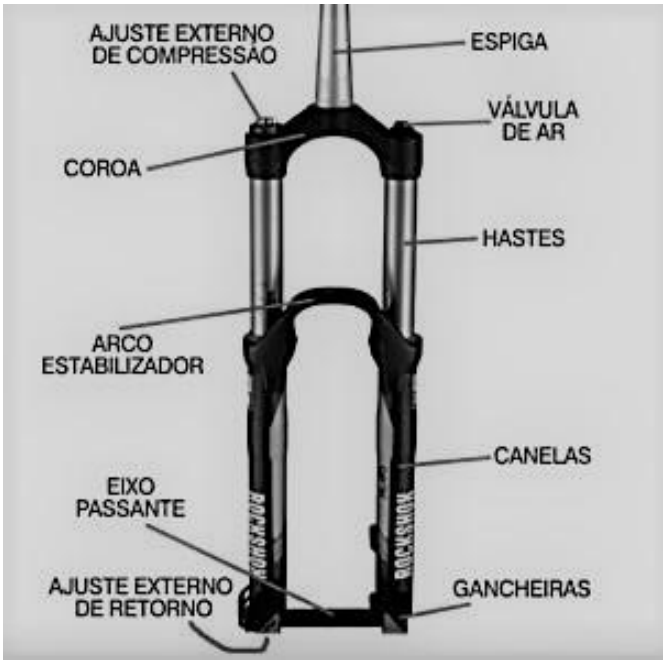
Figura 12: Elementos da suspensão dianteira e traseira.

Fonte: Pedal.com (2022)

3.4.1 Funcionamento e partes da suspensão dianteira

Conforme Wilson (2004), o objetivo de um sistema de suspensão é isolar o ciclista das irregularidades do terreno através de dispositivos (recursos mecânicos, hidráulicos ou pneumáticos) que absorvem a energia dos impactos. A gravidade exige recursos especiais para manter a eficiência de pedalada e o peso dos componentes dentro de um limite aceitável para o fim desejado, garantindo um amortecimento de qualidade. Na Figura 13 observa-se as partes externas de uma suspensão dianteira.

Figura 13: Partes externas da suspensão dianteira



Fonte: Revista Bicicleta (2021)

- **Espiga:** A espiga é o tubo que liga a mesa da bicicleta com a coroa da suspensão. Ela passa por dentro da caixa de direção e serve para prender o garfo e transmitir os comandos do ciclista no guidão.
- **Coroa:** A coroa une a espiga com as hastes da suspensão. Algumas bicicletas de *downhill* possuem duas coroas, uma acima e outra abaixo da caixa de direção. Isso serve para que a suspensão torça menos em situações super extremas.
- **Hastes:** As hastes ficam ligadas as coroas e, durante o movimento da suspensão, entram para dentro das canelas em um movimento telescópico.
- **Canelas:** Sustentam o eixo do cubo e permitem que a suspensão se movimente para cima e para baixo servindo de receptáculo das hastes.

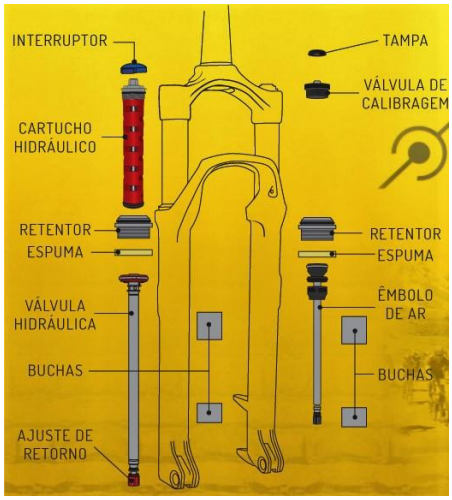
- **Arco Estabilizador:** Une as duas canelas, obrigando assim que os dois lados da suspensão trabalhem de forma sincronizada, evitando torções e movimentos indesejados.
- **Ajustes externos:** Localizados nas extremidades da coroa e das canelas, esses mecanismos realizam o ajuste de compressão e retorno da suspensão.
- ***Offset* de suspensões dianteiras**: O *Offset* da suspensão, normalmente medido em mm, é a distância que a suspensão posiciona o eixo dianteiro a frente do eixo de rotação do garfo. O offset, assim como o ângulo da caixa de direção, tem influência direta no *trail* do conjunto. O *trail* é a distância entre o ponto de contato do pneu e a linha imaginária que sai da caixa de direção rumo ao solo, no mesmo ângulo da caixa de direção.

De acordo com Inman (2018) um elemento elástico estabelece a força de restituição de um sistema, e seu comportamento descreve a relação entre forças e deslocamentos. Usualmente chamado de mola no contexto mecânico, esse elemento é considerado desprovido de massa e não dissipa energia. Na suspensão dianteira é encontrado um elemento elástico flexível, quando comprimido, ele armazena energia que é liberada quando ela retorna para sua forma original. Este elemento pode ser feito de metal, borracha, ar ou qualquer outro material que possua elasticidade.

A suspensão dianteira da bicicleta, em consonância com a Figura 14, tem partes internas compostas de um elemento elástico que faz o papel de mola e um elemento amortecedor, que trabalham de forma telescópica, permitindo que a roda se movimente para cima e para baixo em relação ao quadro da bike. A mola serve para sustentar o peso apoiado sobre a suspensão, absorver os impactos e voltar para a posição original. Hoje em dia, as suspensões mais avançadas possuem molas a ar, que permitem que a pressão seja regulada por uma ou mais válvulas que controlam câmaras de ar que são comprimidas como uma seringa tampada quando a suspensão trabalha. Com isso, ciclistas de pesos diferentes podem ajustar a suspensão de forma eficiente fazendo um ajuste básico do SAG, que é o tanto que a suspensão se desloca apenas com o peso do ciclista sobre a bike. Nas suspensões de alta performance esse elemento-mola é formado por um êmbolo pneumático que armazena ar comprimido, contendo um dispositivo de ajuste manual de compressão externo e estágios de travamento. A função do amortecedor é controlar a velocidade que a suspensão trabalha, para que seus movimentos mantenham o pneu dianteiro em contato com o

solo sem desestabilizar a bicicleta. Esse elemento-amortecedor é composto por um cartucho e uma válvula hidráulica, contendo um mecanismo de ajuste manual de retorno da suspensão (MULDOON, 2021).

Figura 14: Partes internas da suspensão dianteira



Fonte: Pedaleria (2018)

3.4.2 Cursos da suspensão dianteira

O curso da suspensão é a quantidade de movimento que ela pode oferecer. Ou seja, uma suspensão de 100mm pode mover-se até 10cm quando ela atinge um obstáculo. O curso da suspensão, de acordo com a Figura 15, varia de acordo com a aplicação da bicicleta. Modelos exclusivamente para descidas como as bikes de *downhill* podem ter até 200mm de suspensão. Já as de *cross-country*, que são bikes mais leves, vão de 80mm a 120mm de suspensão (ASCENT, 2020).

Figura 15: Cursos de suspensão por modalidade

Fonte: Revista Bicicleta (2021)

3.4.3 Ajustes da suspensão dianteira

Para permitir a adaptação com diferentes ciclistas e terrenos, as suspensões de bicicleta costumam tem uma grande gama de regulagens.

- **Retorno:** O retorno (*rebound* em inglês), é a regulagem que permite controlar a velocidade com que a suspensão retorna da posição comprimida para a estendida. A regulagem costuma ser feita por um botão tipo *dial* com cliques. Girando o botão, é possível fazer com que ela retorne mais rápido ou devagar. A grande maioria das suspensões de nível intermediário para frente já possuem essa regulagem, já que ela é fundamental para o bom controle da bicicleta (PEDAL.COM, 2020).

- **Compressão:** Na grande maioria das bikes para XC e Trail o ajuste de compressão disponível é o de baixa velocidade. Não do conjunto bike-ciclista, mas do êmbolo ou hastes telescópicas. Este ajuste visa somente controlar o primeiro terço do curso, preservando assim a estabilidade em entradas de curva, freadas bruscas e retomadas. Em alguns modelos ele é projetado para anular o movimento da suspensão diante de uma carga preestabelecida como por exemplo todo peso que está acima das rodas. O botão do ajuste pode ser contínuo ou ter cliques. Ele funciona como no retorno, girando o botão no sentido horário fecha-se a passagem de óleo pelo circuito aumentando a resistência ao movimento até travar. Mas diferente do retorno, ele não é diretamente proporcional a outros ajustes, e sim algo regido por preferência pessoal, tipo de pedalada ou terreno a ser encarado (PEDALERIA, 2015).

- **SAG:** É o quanto uma suspensão comprime-se apenas com o peso do piloto e do equipamento sobre a bike. Ajustar este ponto permite configurar as molas da bicicleta para o seu peso corporal e para sua condição de trilha. Para ajustar o SAG é necessário subir na bicicleta sem fazer movimentos bruscos. Usando uma abraçadeira ou o próprio sistema de medição da suspensão é preciso verificar quantos milímetros ela se movimentou. O SAG correto costuma ser indicado pelo fabricante do componente, seja ele um garfo ou um amortecedor traseiro. (BIKE MAGAZINE, 2017).

- **Válvula de ar:** Válvula em que se faz a calibragem de pressão no interior da suspensão com o auxílio de uma bomba de pressão específica para ar comprimido. O ajuste de pressão varia de acordo com o modelo da suspensão, o curso de funcionamento da mesma e o peso do ciclista (PARK TOOL, 2020).

3.4.4 Suspensões dianteiras de alta performance

As marcas líderes no mercado de suspensão de alto desempenho são as americanas *RockShox* e *FOX.* Com uma avançada tecnologia, os preços dos modelos da linha de competição ficam entre R$ 10.000,00 e R$ 15.000,00. Na Figura 16 observa-se o modelo top de linha da marca *Rockshox*, indicada para a modalidade de ciclismo *Cross Country*, contendo uma visualização da parte externa e interna da suspensão (MTB BRASÍLIA, 2022).

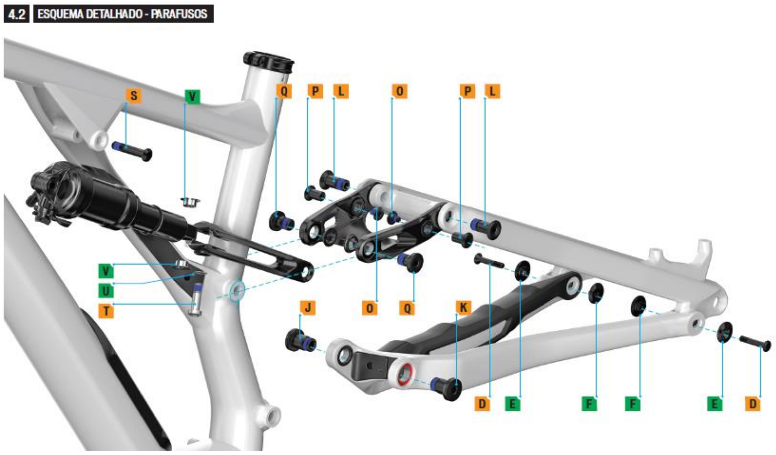
Figura 16: Suspensão RockShox SID SL Ultimate Race Day Boost

Fonte: Sram.com (2022)

3.4.5 Funcionamento e partes da suspensão traseira

A suspensão traseira da bicicleta é um sistema que permite que a roda traseira também tenha a capacidade de absorver impactos e seguir o terreno. A mesma costuma ser controlada por um amortecedor que une em uma única peça a mola e o sistema hidráulico. Este amortecedor, comumente chamado de *shock*, é acionado por um esquema de links, parafusos e espaçadores na estrutura do quadro, conforme visualizado nas Figura 17 e 18, os quais permitem o movimento da roda traseira da bike. Alterando o *shock* e a configuração de links e pivôs, os fabricantes são capazes de criar suspensões com características de funcionamento distintas, indicadas para as mais diferentes modalidades do ciclismo MTB (SPECIALIZED, 2020).

Figura 17: Bicicleta *Specialized Stumpjumper EVO Alloy 2020*



Fonte: Specialized (2020)

Figura 18: Especificação das partes da suspensão traseira

4.8. ESPECIFICAÇÕES DO ESPAÇADOR/EIXO/PARAFUSO

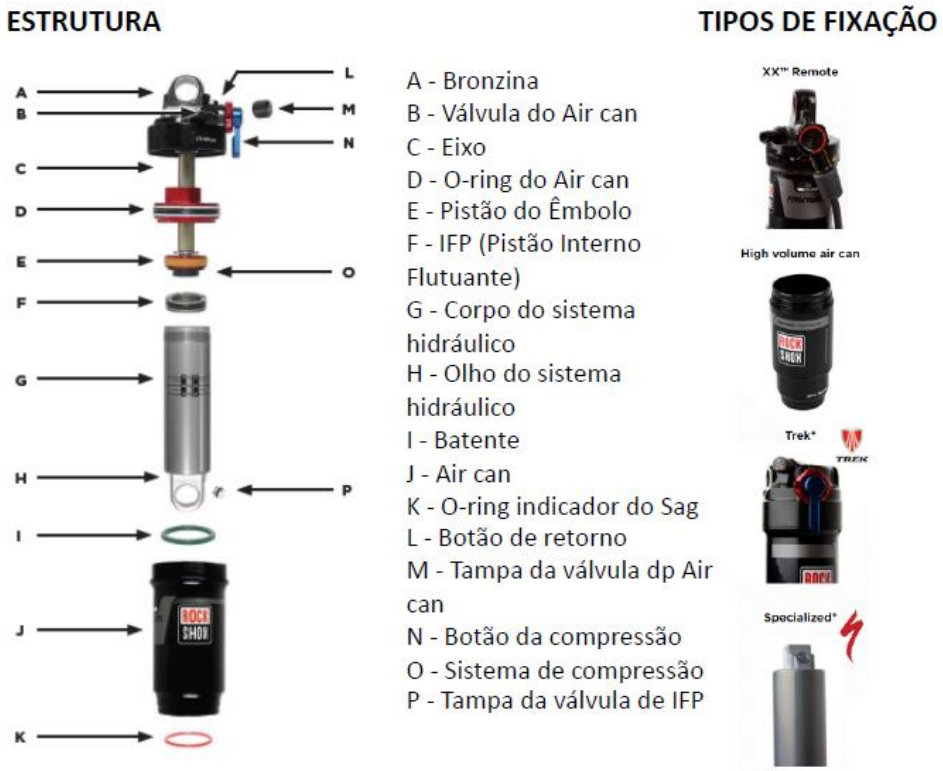
	QTD	LOCALIZAÇÃO / ITEM	DIMENSÕES	FERRAMENTA	TORQUE pol-lbf	TORQUE Nm
D	2	PARAFUSO DE ARTICULAÇÃO PIVÔ HORST	SCR,CUST,M6X1.0 X 32.5,STL,BLK	Chave hexagonal de 5 mm	90	10
E	2	ESPAÇADOR AJUSTÁVEL DO PIVÔ HORST, EXTERNO	DO PIVOT SPACER,GEO ADJ,6.0 ID, FLAT			
F	2	ESPAÇADOR AJUSTÁVEL DO PIVÔ HORST, INTERNO	DO PIVOT SPACER,GEO ADJ,M6 x 1			
G	4	ESPAÇADOR EXTERNO DO PIVÔ HORST	HORST PIVOT OUTER SPACER ASSY 12X21X2.5			
H	2	ESPAÇADOR CENTRAL DO PIVÔ HORST	SPCR,STEP,6MM ID X 16MM OD X 16MM W,7075-T6			
I	2	ESPAÇADOR DA ARTICULAÇÃO CENTRAL	SPCR,15.1 ID X 21.5 OD X 2.5 W,FSR,AL7075			
J	1	PARAFUSO DA ARTICULAÇÃO CENTRAL DS	SCR ASSY,CUST,OD15 X ,M14x1,7075,LH,BLK	Chave hexagonal de 6 mm	210	24
K	1	PARAFUSO DA ARTICULAÇÃO CENTRAL NDS	SCR ASSY,CUST,OD15 X ,M14x1,7075,BLK	Chave hexagonal de 6 mm	210	24
L	2	LINK DE UNIÃO NO PARAFUSO DA RABEIRA SUPERIOR	SCR,CUST,M6X1.0 X 8,SST 302	Chave hexagonal de 4 mm	60	7
M	2	LINK DE UNIÃO NO EIXO DA RABEIRA SUPERIOR	BOLT,CUST,M6 X 1FEM X 22.34,7075,BLK	Chave hexagonal de 6 mm	60	7
N	4	LINK DE UNIÃO NO ESPAÇADOR DA RABEIRA SUPERIOR	SPCR,CUST, 10 ID X 18.5 OD X 2.5 W,FSR,AL7075-T73			
O	4	LINK DE UNIÃO NO ESPAÇADOR DE EXTENSÃO	SPCR,CUST, 10 ID X 18.5 OD X 2.5 W,FSR,AL7075-T73			
P	2	LINK DE UNIÃO NO PARAFUSO DE EXTENSÃO	SCR,CUST,M6X1.0 X 8,SST 302	Chave hexagonal de 4 mm	60	7
Q	2	LINK DE UNIÃO NO EIXO DE EXTENSÃO	AXLE,SS PIVOT,MTB,TRAIL FSR L1	Chave hexagonal de 5 mm	60	7
R	2	LINK DE UNIÃO NO PARAFUSO DO TUBO DO SELIM	SCR ASSY,M12 X 1.0 X 17,21MM HEAD,FSR	Chave hexagonal de 6 mm	180	20
S	2	LINK DE UNIÃO NO ESPAÇADOR DO TUBO DO SELIM	SPCR,12.1 ID X 19.5 OD X 3 W,FSR,AL7075-T6			
T	1	PARAFUSO DO OLHAL DIANTEIRO DO AMORTECEDOR	SCR,CUST,M8X1.0 X 42,CHROMOLY	Chave hexagonal de 6 mm	90	10
U	1	PARAFUSO DO OLHAL TRASEIRO DO AMORTECEDOR	SCR,CUST,M8X1.25 X 27,CHOMOLY	Chave hexagonal de 6 mm LR	180	20
V	1	ARRUELA DO OLHAL TRASEIRO DO AMORTECEDOR	WSHR,FLAT,M8,8.2 ID X 13 OD X 0.5 THK,304 SST			
W	2	ESPAÇADOR PERFIL CARTOLA DO OLHAL TRASEIRO DO AMORTECEDOR	SPACER,SHOCK,19X8.1X0.6, SST 304			

Fonte: Specialized (2020)

3.4.6 Amortecedor traseiro

A suspensão traseira é todo o sistema de tubos, links, rolamentos e alavancas que tornam possível o movimento da roda traseira para absorver os impactos. Já o amortecedor, popularmente chamado de *shock*, é o elemento que absorve a força desses impactos. Na Figura 19 observa-se os principais componentes que compõem este item (REVISTA BICICLETA, 2020).

Figura 19: Componentes do amortecedor traseiro



Fonte: Sram (2020)

Existem dois movimentos principais para funcionamento: compressão e retorno. O primeiro é quando o amortecedor é comprimido pelo impacto com o obstáculo. Já o retorno é quando ele volta para a posição original. Em contrapartida, diferente da suspensão dianteira, o *shock* executa movimentos circulares em uma das pontas durante o amortecimento devido à complexidade de alguns projetos de suspensão e até pelo desenho do quadro elástico (parte móvel do quadro onde a roda traseira é fixada), por este motivo, ele deve ser muito bem construído, pois será exigido ao máximo durante sua vida útil. Nos amortecedores existem elementos de compressão e retorno, a seguir é listado alguns desses itens.

- **Elastômeros:** São pedaços de borracha bem rígidos usados para amortecer os impactos. Não possuem uma grande eficiência e quase não são usados em amortecedores traseiros.
- **Molas:** São comprimidas para absorver os impactos e depois voltam ao tamanho original. Hoje em dia, devido ao peso, as molas são usadas apenas em amortecedores de *downhill.* Em modelos mais caros são usadas molas de titânio para diminuir o peso e também por possuírem maior vida útil.
- **Ar:** Possui o mesmo princípio da mola, tendo a vantagem de não ter peso. Hoje em dia é a tecnologia mais usada para amortecedores traseiros.
- **Óleo:** Costuma ser mais usado para o retorno e em válvulas especiais. A vantagem é que mantêm o funcionamento mais constante, porém, pesa mais que os outros elementos.
- **Retorno:** Normalmente o elemento de retorno é o ar ou óleo, que ficam em câmaras separadas. Esses elementos na função de retorno, ao invés de ajudarem a amortecer o movimento, servem para controlar a velocidade que a suspensão volta para a posição original (BIKE EXCHANGE, 2018).

3.4.7 Ajustes do amortecedor traseiro

Diferente das suspensões dianteiras, o amortecedor traseiro deve ter regulagens internas e tamanhos diferentes para cada tipo de quadro. Isso acontece porque os quadros podem ter um sistema de suspensão e tamanhos diferentes e isso faz com que a força a ser absorvida seja menor, maior ou tenha uma curva de progressividade diferente. Atualmente, a regulagem desses amortecedores está cada vez mais precisa para cada quadro, sendo necessárias mudanças internas para que se tire maior aproveitamento do sistema. A seguir é listado as principais regulagens e ajustes que podem ser realizadas no amortecedor traseiro (BIKE EXCHANGE, 2018).

- **Controle de velocidade de retorno:** É um dos ajustes mais importantes do amortecedor. Sem o controle de retorno, a suspensão arremessaria o piloto por cima do guidão em impactos fortes (isso ainda costuma acontecer com regulagens erradas). Poder ter um ajuste sensível é essencial para que a suspensão funcione

bem de acordo com o terreno. Lembrando que um dos objetivos da suspensão é manter a roda da bicicleta o tempo todo no chão, para manter a tração do pneu, principalmente ao frear (BIKE MAGAZINE, 2017).

- **Trava:** A importância de travar o funcionamento é para evitar perda de energia ao pedalar em trechos onde a absorção de impactos não é a prioridade, como em asfalto, subidas lentas ou em *sprints*. Atualmente, são usados muito mais as plataformas de pedal, do que a trava total nos amortecedores traseiros (BIKE PEDAL POWER, 2018).

- **Plataforma de pedal:** Essa tecnologia reduz propositalmente a compressão com o mesmo objetivo que a trava, porém, o funcionamento não é bloqueado totalmente. Alguns modelos possuem controles externos para aumentar ou diminuir a sensibilidade do funcionamento. Popularmente é chamada de *ProPedal* no Brasil, pois foi o nome dado por uma das principais marcas do mercado (BIKE EXCHANGE, 2018).

- **Controle de compressão:** Controla a facilidade em absorver os impactos. Uma compressão muito macia faz com que a suspensão chegue ao final do curso com facilidade. Já uma compressão muito rígida faz com que não seja usado todo o potencial do amortecimento. As suspensões com compressão de ar normalmente não têm esse ajuste, pois basta colocar ou retirar mais ar (REVISTA BICICLETA, 2018).

- **Compressão de alta velocidade:** Nos modelos mais especializados, esse ajuste controla o funcionamento em situações de impactos mais rápidos, isto é, quando o impacto é em objetos maiores e menos arredondados, onde a suspensão é muito exigida. Normalmente ajuda a evitar situações de final de curso em suspensões de uso mais extremo (BIKE EXCHANGE, 2018).

- **Compressão de baixa velocidade:** Também presente em suspensões de custo elevado, serve para regular o funcionamento ao atingir obstáculos menores, ou seja, para evitar que a suspensão funcione sem tanta necessidade (BIKE VIZION BIKES, 2016).

- **Final de Curso – *Bottom Out:*** Alguns amortecedores mais especializados possuem uma regulagem extra para melhorar o desempenho da compressão do final do curso. Diferente da compressão de alta velocidade, essa regulagem funciona apenas quando o curso é acionado quase até o final (BIKE MAGAZINE, 2017).

- **Válvulas de inércia:** Esse sistema, chamado em algumas marcas de válvula inteligente, permite o funcionamento automático da suspensão apenas quando existem obstáculos. Ou seja, quando o terreno não é muito acidentado a suspensão permanece travada, porém quando se converte para um terreno técnico, aciona-se o funcionamento. Alguns modelos também permitem a regulagem da sensibilidade desse funcionamento. Estão mais presentes em suspensões dianteiras, mas já aparece em suspensões traseiras, como no sistema *Brain* da marca Specialized (REVISTA BICICLETA, 2018).

3.5 VIBRAÇÕES MECÂNICAS

De acordo com Kelly (2018) vibrações são oscilações de um sistema mecânico ou estrutural em torno de uma posição de equilíbrio. As vibrações são iniciadas quando um elemento de inércia é deslocado da posição de equilíbrio em decorrência de energia inserida no sistema por meio de uma fonte externa, o que se denomina trabalho. Um sistema mecânico vibratório é composto por três elementos:

- **Massa ou inércia:** responsável por armazenar energia cinética;

- **Molas, rigidez ou elasticidade:** responsável por armazenar energia potencial;

- **Amortecedor:** responsável por dissipar energia.

As vibrações de natureza mecânica são fenômenos importantes do mundo físico, e suas manifestações ocorrem com frequência no universo que nos circunda, liberando muitas vezes grandes quantidades de energia, como ocorre nos tremores de terra na crosta terrestre. Fenômenos vibratórios na natureza são, portanto, anteriores à existência do homem. Entretanto, é no cotidiano do mundo moderno que

deparamos mais frequentemente com inúmeros fenômenos físicos associados a vibrações mecânicas e suas manifestações. Assim, em aparelhos de uso doméstico como: aparelho elétrico de barbear, aspirador de pó, secador de cabelo, máquina de lavar roupa, entre outros, podemos vivenciar a sensação induzida pelo movimento mecânico de alta frequência e de pequena amplitude de deslocamento, desagradável em geral, associado a ruído sonoro e que conduz à fadiga física após certo tempo de exposição. No automóvel ou outros veículos de transporte urbano sentimos, de modo semelhante, o efeito dos movimentos e acelerações induzidos em nosso corpo, causado pelas irregularidades (ondulações, cavidades ou protuberâncias) nas vias de tráfego (SOTELO JUNIOR, 2006).

Na fase de projeto, procura-se antecipar problemas que possam causar desconforto ou falha prematura de equipamentos e máquinas, através de análise de vibração, eliminando possíveis fontes de vibração. Alguns componentes são utilizados como isoladores de vibração, principalmente materiais elastoméricos, com propriedades de amortecimento e rigidez adequados para determinadas aplicações. Mais recentemente, técnicas avançadas de isoladores ativos com o uso de sistemas de controles munidos de sensores e atuadores vêm crescendo em importância, com o objetivo de diminuir vibrações em sistemas em que isoladores convencionais são pouco efetivos (SAVI, 2017).

De acordo com Rao (2008), além dos problemas que afetam o conforto e a saúde, a vibração promove o desgaste prematuro de superfícies em contato, como é o caso de mancais, onde se apoiam eixos e outros elementos girantes. Em situações mais drásticas, a vibração pode levar a uma ruptura prematura de elementos de fixação e apoio de máquinas, causando graves danos materiais e humanos. Além de falhas simples por ruptura, causadas por cargas dinâmicas elevadas, podem ocorrer falhas em componentes mecânicos em consequência de fadiga de material associada a cargas dinâmicas moderadas, mas repetitivas, cíclicas e acumuladas, que tendem a reduzir a vida útil dos elementos de máquinas.

A ruptura por fadiga está, portanto, associada a fenômenos de vibração mecânica. Se não for possível eliminar totalmente a vibração nesses casos, deve-se ao menos tentar mantê-la sob controle e, com auxílio de planejamento e programação de manutenção apropriados, antecipar a substituição de componentes mecânicos antes que as avarias ocorram (RAO, 2008).

3.5.1 Classificação das vibrações mecânicas

Conforme Inman (2018), há diferentes formas de classificar as vibrações em sistemas mecânicos:

- **Quanto à excitação:** As vibrações podem ser livres (o sistema vibra nas suas frequências naturais e não há força de excitação externa) ou forçadas (o sistema vibra na frequência de excitação).
- **Quanto ao amortecimento:** As vibrações podem ser amortecidas ou não amortecidas.
- **Quanto ao deslocamento:** Pode ser retilíneo, torsional ou combinação de ambos.
- **Quanto às propriedades físicas:** O sistema pode ser discreto, neste caso tem um número finito de GDL (graus de liberdade), ou contínuo, neste caso tem um número infinito de GDL.
- **Quanto às equações envolvidas:** O sistema pode ser linear (potência 0 ou 1 e não existe produto entre estas e suas derivadas) ou não-linear (quando não é válido o princípio da superposição).

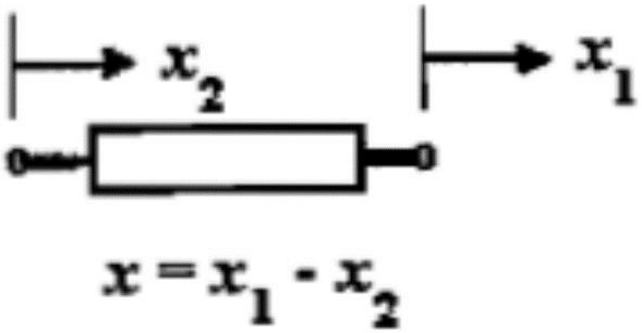
3.5.2 Mola

Uma mola é qualquer dispositivo elástico criado com a finalidade de converter em trabalho mecânico energia potencial e reconvertê-lo de volta em energia mecânica. Há uma grande variedade de dispositivos de mola, tais como compressão helicoidal, molas de torção, molas helicoidais submetidas a tensão de flexão na forma de folha, molas planas, molas na forma de barra de torção e molas em forma de disco.

As molas são feitas a partir de uma ampla variedade de materiais. Na sua forma mais simples, a maioria dessas molas desloca linearmente com a carga aplicada, mas há também molas submetidas a força constante e molas não lineares. As molas são muitas vezes utilizadas devido à sua robustez sob condições de carga dinâmica, mas as condições de carga também podem ser estáticas a temperaturas normais, estática a temperatura elevada, oscilantes, ou com carga de fadiga de stress com ciclos de amplitude variável. Esta variabilidade faz com que a mola seja adequada para armazenamento de energia (FREEMAN, 2008).

De acordo com Inman (2018), as molas podem ser classificadas como translacionais ou torcionais. A mola translacional opõe-se ao deslocamento translacional conforme mostrado na figura 20.

Figura 20: Deformação de uma mola translacional



Fonte: Silva (2012)

Esse deslocamento provoca na mola uma força de restauração que de acordo com a lei de Hooke é dada de acordo com a Equação 1:

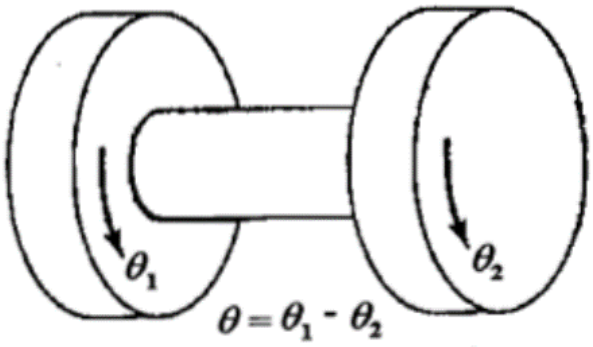
$$f = kx = k\ (x1 - x2) \quad (1)$$

Onde k é uma constante de proporcionalidade denominada rigidez (S.I.) [N/m]. A mola translacional armazena energia potencial elástica dada pela Equação 2:

$$EPE = (1\ /\ 2) * kx^2 \quad (2)$$

A mola torsional, também conhecida como barra de torção, opõe-se ao deslocamento angular relativo, como pode ser visto na Figura 21.

Figura 21: Deformação de uma mola torsional



Fonte: Silva (2012)

Tal deslocamento provoca na mola um torque (momento de torção) de restauração dado pela Equação 3:

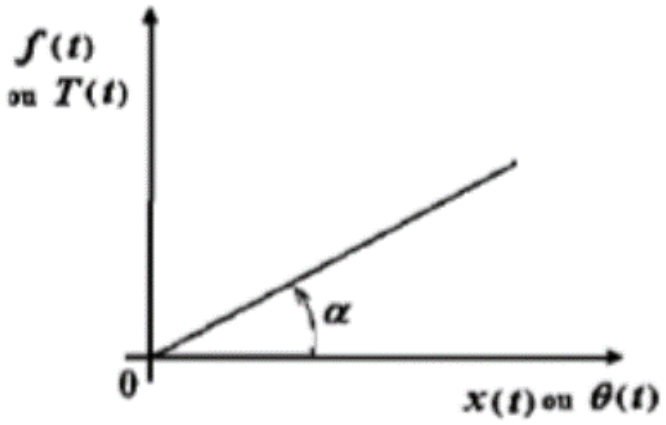
$$T = kt\ (\theta 1 - \theta 2) \quad (3)$$

Onde kt é a constante de proporcionalidade denominada rigidez à torção (S.I.) [N.m/rad] e θn é o deslocamento angular. A mola translacional armazena energia potencial elástica dada pela Equação 4:

$$EPE = (1\ /\ 2) * kt * \theta^2 \quad (4)$$

Uma mola é dita linear quando as deformações sofridas são diretamente proporcionais à força (ou carga) a que ela é submetida. Neste caso ela obedece a Lei de Hooke e o gráfico da força aplicada em função da deformação da mola (seja esta deformação extensiva ou compressiva) é linear, de acordo com a Figura 22, correspondendo a inclinação da reta a constante elástica da mola, comumente denominada de constante elástica. Esta constante corresponde à rigidez da mola, quanto maior seu valor, mais rígida será a mola, e vice-versa (YOUNG, 2003).

Figura 22: Rigidez de uma mola linear



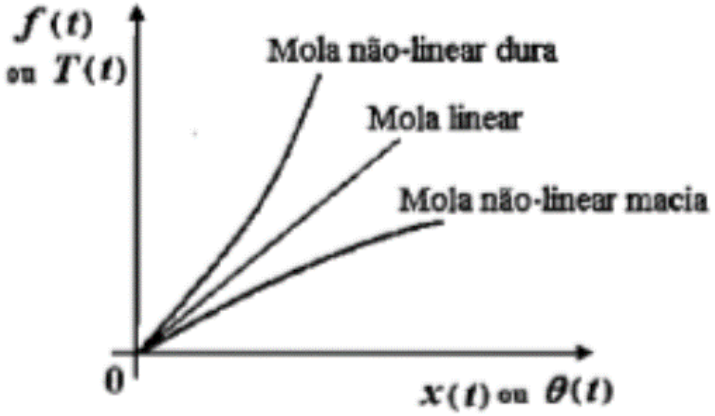
Fonte: Silva (2012)

As molas não lineares apresentam diferentes valores de k dependendo da força aplicada. O termo mola de um único elemento não linear corresponde a um dispositivo elástico que se comporta de forma não linear sem a necessidade da interação de um

elemento externo. Conforme a Figura 23, em uma mola não linear a rigidez não é constante, mas depende da sua compressão.

Este comportamento não linear ocorre quando o número de espiras diminui ou aumenta com a variação da compressão aplicada. O comportamento não linear de uma mola pode ser conseguido através da variação: do diâmetro da espira, do espaçamento entre as espiras e do diâmetro médio da mola na direção axial. Combinações dessas três opções também podem ser utilizadas (FREEMAN, 2008).

Figura 23: Rigidez de molas não lineares



Fonte: Silva (2012)

3.5.3 Amortecedor

É denominado amortecedor o fenômeno pelo qual a energia mecânica é dissipada, provocado pelo atrito, sob forma do calor ou som. Em sistemas com parâmetros concentrados admite-se que o amortecedor possui massa desprezível ou ela é concentrada na massa do sistema. Admite-se também que o amortecedor possui rigidez infinita (corpo rígido), ou ela é calculada e concentrada na mola do sistema.

Existem três tipos de amortecimentos que podem ocorrer separadamente ou em conjunto: amortecimento viscoso, não viscoso e histerético (SHACKELFORD, 2008).

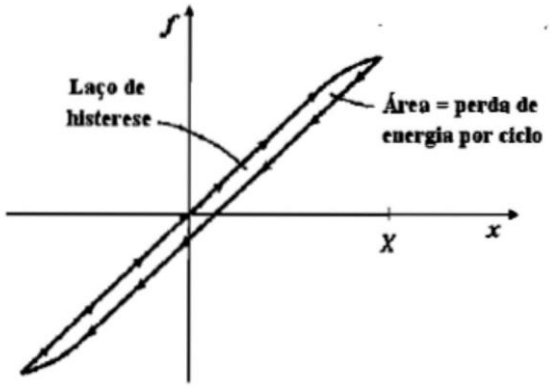
- **Amortecimento Viscoso:** É o mais comum, ele é caracterizado pelo atrito entre um sólido e um fluido (óleos lubrificantes com alta viscosidade). A força ou torque de atrito (fv) é proporcional à velocidade relativa entre o sólido e o fluido.

- **Amortecimento constante (seco) ou de Coulomb**: Resultante do atrito entre dois sólidos sem lubrificante (ou com pouca lubrificação). A dissipação de energia

neste tipo de amortecimento é provocada pela força de atrito (fc) cujo valor é encontrado através do produto entre a força normal (N) e o coeficiente de atrito dinâmico μ (adimensional).

- **Amortecimento estrutural ou histerético:** Decorre de atrito intermolecular durante o trabalho de deformação de um sólido. A medida do amortecedor histerético é dada pela amplitude X durante o processo de deformação, ilustrado na Figura 24.

Figura 24: Amortecimento histerético



Fonte: Silva (2012)

3.5.4 Frequência e Ressonância

A frequência é definida como o número de repetições de uma função específica ou número de ciclos de vibração sobre uma determinada unidade de tempo (MOBLEY, 1999). Pode ser representada pela Equação 5:

$$\mathrm{f} = 1 / \mathrm{T} = \omega / 2\pi \qquad (5)$$

Onde ω é denominada frequência circular para distingui-la da frequência linear. O conhecimento das principais frequências de vibração da estrutura é muito importante, pois respostas significativas somente ocorrerão quando a frequência de excitação for próxima às frequências naturais da estrutura. Caso o sistema sofra uma perturbação inicial a certa frequência de oscilação e o sistema continua a vibrar sem ação de forças externas, o sistema se encontra em sua frequência natural (BALACHANDRAN, 2009).

Os graus de liberdade são descritos por Norton (2011), como o número de parâmetros independentes (medidas) para definir uma única posição no espaço em qualquer instante de tempo. Ou seja, é a quantidade de possíveis movimentos de um sistema, seja estes de rotação ou translação. Para um grau de liberdade, a frequência natural de cada componente em um sistema é determinada por sua massa e rigidez, e pode ser representado conforme a Equação 6:

$$\omega n = 2\pi fn = \sqrt{k/m} \tag{6}$$

Onde k é a rigidez da mola e fn é a frequência natural, porém com a unidade em Hz, diferente de ωn que é dado em rad/s (BALACHANDRAN, 2009).

Quando a frequência natural do sistema coincide com a frequência de excitação, ocorre um fenômeno chamado ressonância. Este fenômeno amplifica o deslocamento e na maioria dos sistemas estruturais e mecânicos isto provoca tensões e deformações que podem levar à falha do sistema (BALACHANDRAN, 2009).

3.5.5 Fator de amortecimento

Amortecimento é a dissipação de energia por atrito durante um movimento oriundo das condições iniciais dadas a um sistema. Essa dissipação faz com que o sistema tenda a voltar à posição inicial (RAO, 2005).

O amortecimento crítico (Cc) é defino pela constante de amortecimento, a massa do sistema e a frequência natural, como mostra o desenvolvimento expressado na Equação 7:

$$Cc = 2\sqrt{km} = 2m\omega n \tag{7}$$

Fator de amortecimento é a relação entre o coeficiente de amortecimento viscoso real e o coeficiente de amortecimento crítico, conforme a Equação 8:

$$\zeta = \frac{C}{Cc} = \frac{C}{2m\omega n} = \frac{C}{2\sqrt{km}} \tag{8}$$

Em um sistema vibracional, de acordo com o valor de ζ, podemos classificar o fator de amortecimento em quatro casos:

- **Sistema subamortecido:** $0 < \zeta < 1 \Longrightarrow$ duas raízes complexas e conjugadas. É o caso de maior interesse da engenharia; um bom exemplo é a lubrificação de peças móveis quando existe um atrito entre sólido e líquido, como nos sistemas de suspensão veicular.

- **Sistema com amortecimento crítico:** $\zeta = 1 \Longrightarrow$ duas raízes reais e iguais, sendo ambas negativas.

- **Sistema superamortecido:** $\zeta > 1 \Longrightarrow$ duas raízes reais diferentes, sendo ambas negativas. Um exemplo de aplicação é o sistema de fechamento das portas, onde a porta representa a massa e o sistema é completado com uma mola e um amortecedor. Sendo o fator de amortecimento maior que 1.

- **Sistema sem amortecimento**: $\zeta = 0 \Longrightarrow$ duas raízes complexas puras conjugadas. É um caso particular de sistema com amortecimento viscoso em que o coeficiente de amortecimento é nulo, fazendo que o ζ seja nulo na equação.

3.6 PNEUS DE BICICLETA

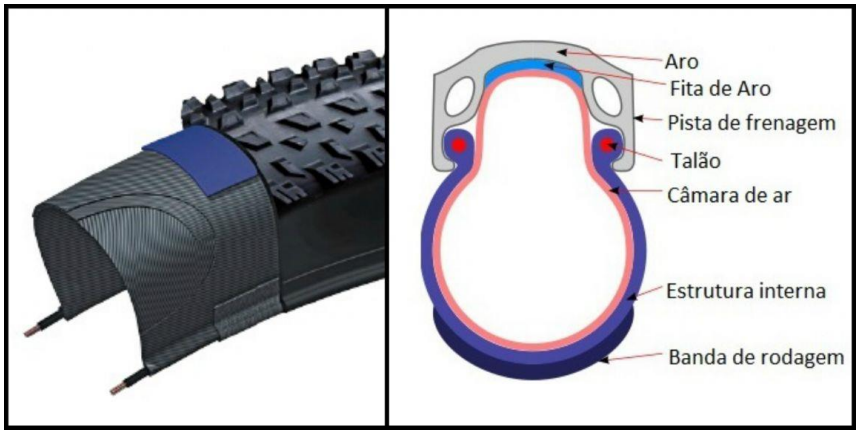
Os pneus de bicicleta são fundamentais para o rendimento de qualquer ciclista, eles são o ponto de contato de qualquer bicicleta com o solo e um importante item de segurança e desempenho. Desde os primitivos pneus maciços até a invenção do pneumático pelo veterinário escocês John Boyd Dunlop, no final do século XIX, esse importante componente, que tem como objetivo garantir um rodar macio e seguro, nunca parou de evoluir e a cada ano novas tecnologias chegam às prateleiras.

O mercado oferece centenas de opções para as mais variadas aplicações e necessidades que atendem todos os tipos de bicicletas, desde as infantis até os profissionais que buscam desempenho em competições de nível olímpico. Os preços variam bastante também. Há pneus econômicos e populares na faixa dos trinta reais, assim como existem também sofisticados pneus tubulares de competição feitos a mão que chegam a custar seiscentos reais a unidade (BIKE MAGAZINE, 2018).

3.6.1 Tipos de pneus

- **Clincher:** O clincher é certamente o tipo mais comum da atualidade. Conforme ilustrado na Figura 25, este tipo de pneu conta com um desenho especial e talões de aço ou kevlar para encaixarem-se por dentro de um aro que também conta com uma ranhura para esta função. Embora a maioria utilize câmaras internas de ar, alguns clinchers apostam em um desenho similar ao encontrado em carros para funcionar sem a câmara. Conhecidos como *tubeless*, este tipo de pneu é menos propenso a furos e pode ser utilizado com menos pressão, muitas vezes, possuem menor resistência a rolagem (FIGUEIREDO, 2017).

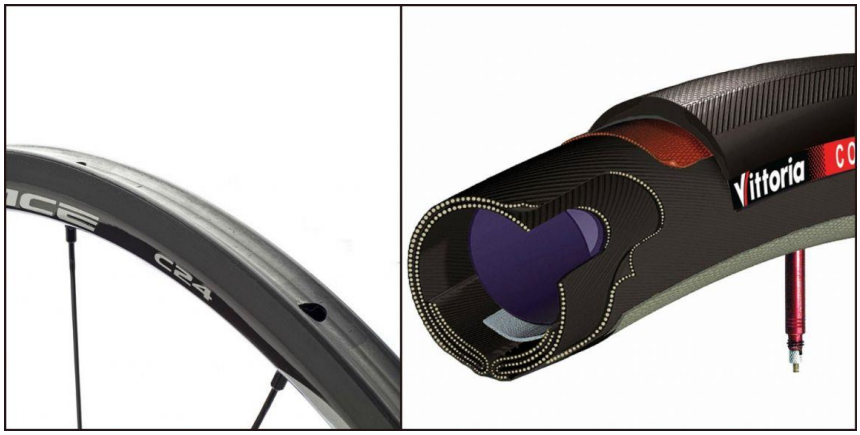
Figura 25: Pneu clincher



Fonte: Figueiredo (2017)

- **Tubular:** O pneu tubular muitas vezes é encontrado em bicicletas de estrada de competição. Nele, de acordo com a Figura 26, o pneu e a câmara estão conjugados, tipo um tubo e, diferente dos clinchers, o conjunto não se encaixa no aro, dependendo de uma cola especial para ficar no lugar. A grande vantagem deste tipo de pneu é a construção simples do aro, que permite reduzir bastante seu peso, e o conforto proporcionado pelo desenho em tubo. Além disso, graças ao encaixe perfeitamente redondo no aro, o tubular é mais flexível, podendo ser utilizados com pressões maiores mantendo o conforto e a aderência (TSW BIKE, 2020).

Figura 26: Pneu tubular



Fonte: Figueiredo (2017)

3.6.2 Construção dos pneus

Um pneu de bicicleta é composto dor diversos componentes permanentemente unidos durante o processo de fabricação. Conforme a Figura 27, são eles:

- **Carcaça**: A carcaça é o que gera formato ao pneu. Normalmente seu tecido é feito de nylon, mas alguns modelos utilizam algodão ou até seda. A carcaça ainda é responsável por manter a pressão do ar interno, ao mesmo tempo que mantém a flexibilidade para seguir os contornos da superfície (FIGUEIREDO, 2017).

Figura 27: Construção dos pneus

Fonte: Figueiredo (2017)

- **TPI**: A sigla TPI significa *threads per inch* e diz respeito a quantos fios o tecido da carcaça tem a cada polegada. Normalmente, este número varia de 15, nos pneus mais básicos, a 120 nos mais avançados. Via de regra, quanto mais fios por

polegada, mais flexível é a carcaça, indicando um pneu com rodagem mais eficiente e macia. Pneus com tecido mais fino (TPI maior), tendem a sofrer mais com cortes e rasgos (TSW BIKE, 2020).

- **Composto:** O material mais utilizado é o butil com alguns aditivos como o carbono e o silício para criar as características de tração e durabilidade desejadas pelo fabricante. Em alguns casos, os pneus tem mais de um composto, com borrachas mais duras ou mais macias em diferentes regiões para aliar durabilidade e tração (TSW BIKE, 2020).

- **Desenho:** Pode variar de cravos grandes até pneus lisos *(slicks).* Normalmente, os mais lisos são utilizados no asfalto. Nos pneus de MTB, o desenho e o formato dos cravos têm uma importante ligação com o uso que será feito do pneu. Em geral cravos mais juntos e baixos costumam ser mais rápidos na terra batida, enquanto os mais altos e separados costumam funcionar melhor na lama (FIGUEIREDO, 2017).

- **Talão:** Encontrado em pneus clincher, o talão deve ser feito de um material que estica pouco, garantindo que o pneu não escape da roda com a pressão do ar. Ele pode ser feito de arame, comumente encontrado em pneus mais baratos, ou de Kevlar (aramida) nos modelos mais avançados. Um pneu com talão de arame não pode ser dobrado, enquanto os de kevlar sim. Por isso, muitas vezes os pneus de kevlar são chamados de "dobráveis" (FIGUEIREDO, 2017).

- **Parede Lateral:** É a parte do pneu que não entra em contato com o asfalto. A lateral do pneu terá sua construção feita conforme o uso, podendo variar em peso, espessura e material. Nos de estrada, os mais leves costumam tem a lateral bem fina, leve e maleável, o que ajuda a reduzir o peso e aumentar o conforto da bike. No outro extremo do espectro temos os pneus de uso mais agressivo, que apostam em laterais mais resistentes ou reforçadas, mesmo que isso comprometa o peso, para não correr o risco de cortes nesta parte do pneu (TSW BIKE, 2020).

- **Camadas de proteção contra furos:** Muitos pneus apostam em camadas extra para aumentar a proteção contra furos. As opções são muitas e cada fabricante aposta em materiais como o kevlar ou outro tecido exclusivo (FIGUEIREDO, 2017).

3.7 CLASSIFICAÇÃO DOS DEFEITOS EM ELEMENTOS MECÂNICOS

As falhas em elementos mecânicos são processos que podem assumir as mais distintas formas, dependendo do tipo de aplicação, do material, das condições ambientais, entre outros. De um modo geral, a falha pode ser definida como a incapacidade de o componente corresponder à demanda que lhe é exigida, ou seja, é a situação em que o sistema deixa de cumprir seu requisito funcional, não desempenhando a função para a qual foi projetado. Esta situação engloba uma falha por colapso total do sistema, em que deixa de operar por completo, ou condições em que o sistema continua operando, mas fora de uma faixa tolerada, desviando-se assim do ponto desejado de operação e comprometendo sua funcionalidade (WULPI, 2014).

As formas com que o componente estrutural pode falhar dependem do tipo de carregamento, tipo do material, condições ambientais, tempo de vida e cuidados com manutenção. Uma distinção bem marcante pode ser feita, considerando os modos que não são influenciados pela idade do componente, ou tempo de aplicação do carregamento e os modos que dependem do tempo de vida ou de carregamento (WULPI, 2014).

3.7.1 Modos de falhas independentes do tempo

Os modos de falha tratados como independentes do tempo são os que possuem igual probabilidade de ocorrer, qualquer que seja a vida ou tempo de uso do produto considerado. Estes modos se manifestam quando a estrutura em questão sofre uma sobrecarga ou um pico de solicitação, levando a uma falha na forma de uma ruptura, ou um empenamento (ROSA, 2002).

- **Fratura**: Em geral o processo de desenvolvimento da fratura é dividido em duas etapas distintas, início da fratura e propagação desta. Uma fratura pode ser classificada em duas categorias gerais, fratura dúctil e fratura frágil. Uma fratura dúctil é caracterizada por uma apreciável deformação plástica na nucleação e na propagação da trinca. Uma deformação plástica em nível macroscópico é também

encontrada nas superfícies de falha. Uma fratura frágil nos metais é caracterizada por uma grande velocidade de propagação da trinca, com pequena deformação plástica, mesmo em um nível microscópico. Um metal pode ter uma ruptura dúctil ou frágil, dependendo da temperatura, estado de tensões e velocidade de carregamento (ALMEIDA, 2018).

- **Flambagem:** A falha por flambagem ocorre quando temos uma combinação crítica de rigidez da combinação estrutura-sistema de aplicação de carga, na qual os deslocamentos transversais passam a crescer de uma forma significativa, mesmo com carga constante. Neste caso a peça perde a sua forma original, alterando a geometria, o que compromete sua operação em serviço. Este modo de falha é característico de estruturas esbeltas nas quais ocorrem tensões de compressão. A instabilidade que leva à falha por flambagem pode ocorrer de um modo global, como no caso clássico de colunas, ou de uma forma local, quando a instabilidade fica restrita a uma deformação local nas paredes da peça, mas que pode levar após a um colapso a nível global da estrutura (ROSA, 2002).

- **Deformação elástica excessiva:** Em muitas situações práticas as tensões que se desenvolvem no material são relativamente baixas, não levando o material a nenhum modo de falha que comprometa a sua resistência mecânica. No entanto a peça ou estrutura pode vir a falhar por uma flexibilidade excessiva, onde os deslocamentos passam a ser muito grandes, acima de um máximo admissível. Este caso pode ocorrer facilmente quando se adota seções relativamente esbeltas para suportar a carga, que age em uma direção. Ocorre, no entanto, que cargas adicionais, como devido a uma excentricidade, podem surgir em direções diferentes, levando a deslocamentos inaceitáveis (ALMEIDA, 2018).

3.7.2 Modos de falhas dependentes do tempo

O tempo de uso do produto pode afetar a falha de componentes das mais variadas formas, dependendo do modo de falha, porém todos estes modos de falha são caracterizados por algum tipo de envelhecimento ou desgaste do material. Isto é traduzido como uma perda gradativa das propriedades que tornam o material adequado ao uso pretendido, fazendo com que a funcionalidade da peça fique pouco

a pouco comprometida. Temos vários modos de falha que podem ser considerados como dependentes do tempo, ou também chamados de modos de falha por envelhecimento ou ainda, desgaste (WULPI, 2014).

- **Fadiga:** A fadiga é um processo de redução da capacidade de carga de componentes estruturais pela ruptura lenta do material, através do avanço quase infinitesimal da trinca a cada ciclo de carregamento. A fadiga ocorre pela presença de tensões que variam com o tempo, que provocam deformações plásticas cíclicas localizadas nos pontos mais críticos. Estas deformações levam a uma deterioração do material que dá origem a uma trinca de fadiga que, com o prosseguimento do carregamento variável, vai crescendo, até atingir um tamanho suficiente para provocar a ruptura final. O processo de nucleação da trinca de fadiga depende das tensões cisalhantes cíclicas que atuam, enquanto que para a propagação são importantes as tensões de tração, que fazem com que as pequenas trincas que foram nucleadas venham a crescer e levem à ruptura final. Como os mecanismos que atuam na nucleação e na propagação são distintos, é necessário usar critérios diferentes para avaliar uma falha por fadiga na nucleação e na fase de propagação (BUDYNAS, 2016).

- **Corrosão:** A corrosão pode ser definida como a destruição de um corpo sólido por uma ação química ou eletroquímica não intencional, que invariavelmente inicia na superfície do corpo. No caso dos metais o ataque ocorre quase sempre por uma ação eletroquímica, devida à característica estrutural dos metais, que permite fenômenos como o movimento de elétrons dentro da rede cristalina. Como os materiais não metálicos não exibem esta propriedade, eles podem ser atacados apenas pelos meios corrosivos capazes de reagirem quimicamente com eles dentro de certas condições. Muitos fenômenos de corrosão são em essência eletroquímicos e envolvem a presença de um eletrólito em contato com o metal. Este eletrólito é usualmente uma solução aquosa de um sal, ácido ou álcali e consequentemente este tipo de corrosão é denominado úmido. Todos os outros fenômenos de corrosão envolvendo reações químicas entre o metal e um líquido, ou gás, que não é um eletrólito, são classificados como corrosão a seco (ROSA, 2002).

- **Corrosão sob tensão**: A superposição de um esforço mecânico com um meio ambiente agressivo ao material pode levar ao surgimento de um outro tipo de corrosão, a chamada corrosão sob tensão. Este tipo de corrosão difere da corrosão tradicional por dois aspectos básicos. Em primeiro lugar, a corrosão ocorre apenas em pontos muito localizados, como por exemplo nos contornos de grão. Neste caso a aparência externa do material não evidencia a degradação que o material sofre. Este ataque localizado vai penetrando, podendo comprometer a capacidade de carga da peça pelas trincas que se formam a partir dos pontos de ataque. Em segundo lugar, o meio ambiente que provoca a corrosão sob tensão no material é um meio com composição química particular, para aquele tipo de material, que vem assim a ativar o processo. Isto significa que, para um dado material, de todos os meios agressivos que levam a uma corrosão, apenas uns poucos provocam uma corrosão sob tensão. Deste modo, a corrosão sob tensão ocorre apenas em certas combinações de material e meio ambiente. Este estado de tensões pode ser proveniente dos esforços de operação, ou produzido por um estado residual de tensões, presente no material, mesmo na ausência de cargas externas (BUDYNAS, 2016).

- **Desgaste:** Aqui refere-se ao desgaste do material, por remoção deste, seja através do processo de aderência e remoção de partículas do material de um dos elementos do par de atrito para o outro, seja por arrancamento de metal por partículas mais duras, que colidem com este. O primeiro tipo de desgaste é denominado de desgaste adesivo e depende muito das condições de lubrificação e também da compatibilidade dos dois metais em contato. O segundo tipo de desgaste é o tipo abrasivo, onde a principal variável é a dureza do material. O desgaste abrasivo pode ocorrer pela presença de partículas duras entre as duas superfícies em atrito ou então pelo contato de uma superfície dura e áspera sobre outra mole (WULPI, 2014).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 LOCAIS DO ESTUDO DE CASO

Os resultados apresentados a seguir foram extraídos da pesquisa de campo realizada em três oficinas mecânicas especializadas na região metropolitana de Porto Alegre entre os meses de julho e agosto no ano de 2022. Por uma questão de sigilo não serão identificados os nomes das empresas. Foi executado o acompanhamento de dois dias de trabalho em cada oficina mecânica durante o seu horário comercial de funcionamento. Durante o estudo de caso foi visualizado as principais incidências de manutenção e os pontos críticos de maior desgaste nas suspensões e amortecedores.

4.1.1 Oficina mecânica em Porto Alegre

O primeiro local da pesquisa de campo foi em uma oficina mecânica localizada no bairro Nonoai na cidade de Porto Alegre. O proprietário é engenheiro mecânico, pioneiro no país no conceito de manutenção especializada em ciclismo extremo de alta performance desde 1994. No acompanhamento de dois dias trabalho na oficina identificou-se algumas suspensões e amortecedores que chegaram para realização de manutenção.

4.1.2 Oficina mecânica em Gravataí

O segundo local da pesquisa de campo foi em uma oficina mecânica localizada no centro da cidade de Gravataí. O proprietário é técnico mecânico e atua na manutenção especializada em suspensões, *shocks* e canotes retráteis desde 2015. No acompanhamento de dois dias trabalho na oficina conseguiu-se identificar algumas suspensões e amortecedores que chegaram para realização de manutenção.

4.1.3 Oficina mecânica em Canoas

O terceiro local da pesquisa de campo foi em uma *bike shop* localizada no bairro Estância Velha na cidade de Canoas. Os proprietários são um casal com formação técnica em química e mecânica. A loja foi aberta no ano de 2017 na cidade, porém um dos donos já atuava como técnico de manutenção de bicicletas a mais de 15 anos. O estabelecimento realiza venda de bicicletas, componentes, acessórios de ciclismo e vestuário.

4.2 SERVIÇOS EFETUADOS

Foram analisados diversos modelos e marcas de suspensões ao longo dos dias de acompanhamento nas oficinas mecânicas. Os principais serviços efetuados foram manutenções corretivas e preventivas nos componentes. Na sequência estão os componentes que realizaram manutenção nas oficinas de Porto Alegre, Gravataí e Canoas sucessivamente.

4.2.1 Suspensão *Rockshox Recon TK Gold*

O primeiro item que entrou na linha de trabalho do dia na oficina mecânica de Porto Alegre foi uma suspensão dianteira *Rockshox Recon TK GOLD* conforme ilustrada na Figura 28, com amortecimento ar/ óleo, de 110 mm de curso.

Figura 28: Suspensão *Rockshox Recon TK GOLD* em manutenção

Fonte: O Autor

Conforme visualizado na Figura 28, foram retiradas as hastes para inspeção e constatado um desgaste excessivo na haste direita, onde a anodização, o primer e a tinta de revestimento do alumínio foram eliminados, prejudicando o funcionamento da suspensão. Também se observou uma saturação no fluído de amortecimento, diminuindo assim a lubrificação nas canelas e aumentando seu desgaste.

No detalhe da figura 29, nota-se as novas hastes que foram colocadas a pedido do cliente. São hastes desenvolvidas pela empresa portuguesa *ND Tuned,*

especializada em suspensões e amortecedores. Com um design exclusivo, as hastes *ND Tuned* foram desenhadas para aplicar em suspensões *RockShox e Fox* de 32 mm de diâmetro. As hastes são fabricadas em alumínio 7050, liga tratável termicamente e que apresenta resistência mecânica elevada, superior à dos aços inoxidáveis e a dos aços baixo carbono. As hastes sofrem um tratamento de anodização dura com uma espessura de 40 microns, que lhes permite obter uma maior durabilidade com grande resistência ao desgaste, rigidez e uma boa capacidade de deslize.

Figura 29: Hastes *ND Tuned*

Fonte: O Autor

4.2.2 Suspensão dianteira *Fox 32 Float CTD*

O próximo item a entrar na linha de trabalho do dia foi uma suspensão dianteira *Fox 32 Float 29 Fit CTD,* com amortecimento mola/ óleo, de 100 mm de curso, conforme ilustrado na Figura 30. As hastes foram retiradas para inspeção e foi constatado desgaste excessivo nas duas peças. A oxidação do alumínio chegou em um nível extremo, onde as camadas de tratamento químico foram eliminadas e o metal sofreu uma ruptura na parte inferior da peça.

Figura 30: Suspensão *Fox 32 Float 29 Fit CTD* com hastes danificadas

Fonte: O Autor

No detalhe da Figura 31, pode-se observar os orifícios superiores da coroa onde são fixadas as hastes. É notória a saturação do óleo lubrificante que, em conjunto com partículas de sujeira, cria-se uma espécie de borra abrasiva no interior das canelas, fazendo com que o contato deslizante que incide sobre as hastes, corrobore com a perda do tratamento químico e consequentemente sua oxidação e ruptura do alumínio.

Figura 31: Óleo lubrificante contaminado na coroa e canela da suspensão

Fonte: O Autor

A oxidação é a reação das moléculas de óleo lubrificante com as moléculas de oxigênio do ar atmosférico, processo que pode levar a aumento da viscosidade e formação de borras, vernizes e sedimentos. A oxidação pode, ainda, provocar a depleção de aditivos, colapso do óleo básico, ferrugem e corrosão. Na Figura 32, observa-se os componentes internos das hastes com a borra originada pelo óleo saturado. Nota-se os detalhes do êmbolo hidráulico de retorno e a mola metálica helicoidal de amortecimento.

Figura 32: Componentes internos das hastes com a borra

Fonte: O Autor

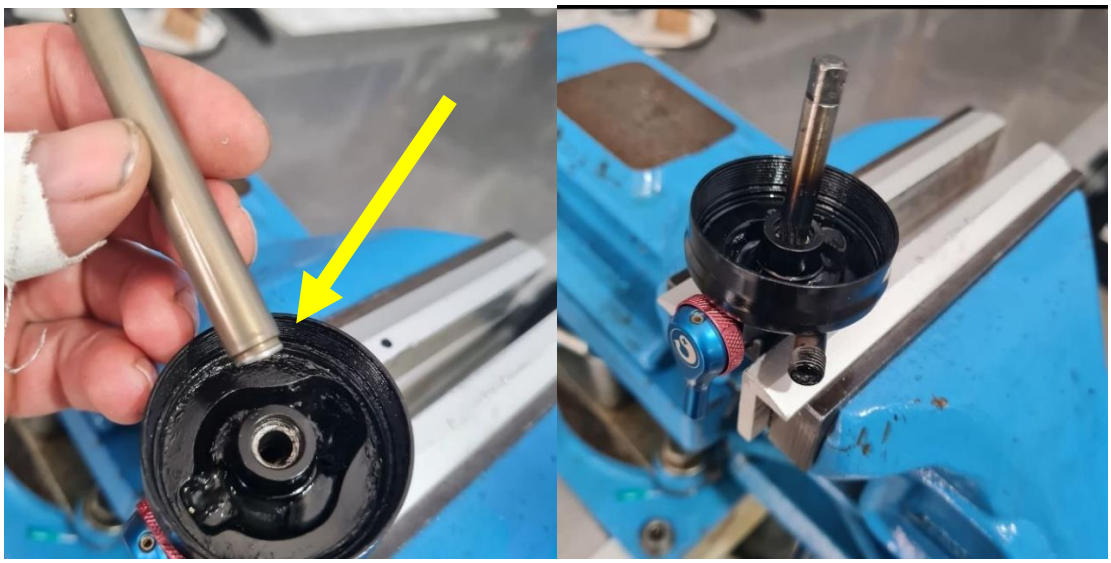
4.2.3 Amortecedor traseiro *Fox Triad*

O terceiro elemento do dia a entrar na linha de trabalho foi um amortecedor traseiro *Fox Specialized Triad*. O *shock* foi desmontado para revisão e constatou-se uma fratura da haste de alumínio no interior do cabeçote, logo após o término da rosca, conforme visualizado na Figura 33.

O processo de fratura neste caso pode ser causado devido ao encruamento, no qual é o fenômeno pelo qual um metal dúctil se torna mais duro e mais resistente quando submetido à deformação plástica. Durante esse processo, observa-se inicialmente uma grande movimentação de discordâncias ao longo de toda a estrutura cristalina. Então, após certa deformação, o excesso de discordâncias começa a criar uma resistência à propagação das mesmas, o que causa o endurecimento do material.

Devido ao aumento da energia interna no estado de trabalho a frio, a reatividade química também é aumentada, levando a uma diminuição geral na resistência à corrosão e, em certas ligas, introduz a possibilidade do aparecimento de trincas.

Figura 33: Haste do *amortecedor Fox Triad* fraturada



Fonte: O Autor

Após a extração da haste fraturada, foi refeita a rosca no interior do cabeçote e realizada a usinagem de uma nova haste em aço temperado consoante com a Figura 34. Também se realizou a limpeza dos demais componentes e efetuou-se a troca do kit de vedação que compõe o amortecedor.

Figura 34: Nova haste em aço temperado e componentes do amortecedor

Fonte: O Autor

Após isso, de acordo com o ilustrado na Figura 35, foi montada a haste nova em aço temperado no interior do cabeçote e finalizada a instalação dos demais componentes. O amortecedor passou por testes de compressão e tração e verificou-se a normalidade de seu funcionamento.

Figura 35: Instalação de haste nova e demais componentes

Fonte: O Autor

4.2.4 Amortecedor traseiro *Fox X2 Trunnion*

No segundo dia de acompanhamento na oficina, a primeira peça que entrou na linha de serviço foi um *shock Fox X2 TRUNNION 2019 Kashima.* Conforme a Figura 36, o amortecedor foi aberto para inspeção e constatou-se uma trinca no alumínio do corpo interno do sistema hidráulico (*damper*).

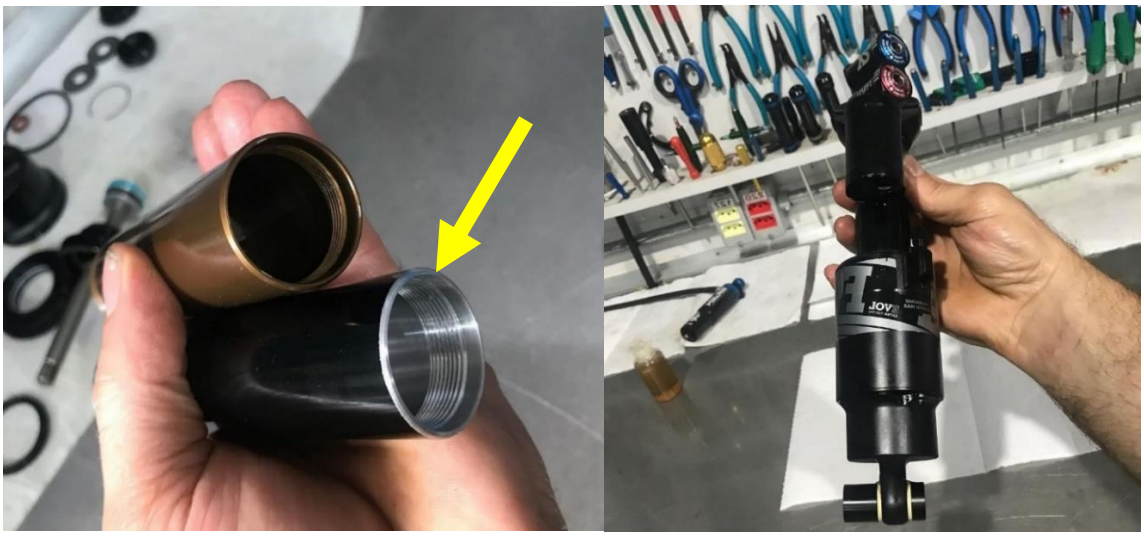
Figura 36: Amortecedor com trinca no corpo do *damper*

Fonte: O Autor

As trincas deste tipo são geralmente causadas pelo posicionamento assimétrico das buchas inferiores, ocasionando esforços laterais e inferindo em danos e vazamento no corpo do sistema hidráulico.

Por ser um amortecedor muito específico e com difícil acesso às peças de reposição, a solução para esse problema foi realizar o desenvolvimento de uma nova peça utilizando como matéria prima uma haste de suspensão *Marzocchi* com a mesma medida de diâmetro. Consoante com a Figura 37, a peça foi cortada e usinada com a rosca na medida da original. Também foi realizado o tratamento químico na peça, finalizado com revestimento na cor preta. Após isso, o amortecedor foi remontado com novos *kits* de vedação.

Figura 37: Novo corpo do *damper* usinado e tratado quimicamente



Fonte: O Autor

4.2.5 Corpos hidráulicos de amortecedores

O segundo serviço acompanhado do dia foi a revisão de corpos hidráulicos avariadas de amortecedores, os quais estavam com desgaste na anodização e revestimento químico.

Para Gahr (1987), o atrito e o desgaste não são propriedades intrínsecas dos materiais, mas sim características da interação desses materiais com variáveis operacionais do processo a que estão submetidos, sendo estes responsáveis, respectivamente, por dissipações de energia e matéria. O atrito é a resistência ao

deslocamento e é gerado a partir da interação de sólidos em determinadas áreas de contato; já o desgaste é a perda progressiva de material da superfície de um corpo sólido, decorrente do contato e do movimento relativo deste com outro corpo sólido, líquido ou gasoso.

As peças foram submetidas a um novo tratamento químico. A anodização de alumínio é um tratamento de superfície, através de um processo eletrolítico, que tem como objetivo formar uma camada uniforme de óxido de alumínio. Essa camada é capaz de proteger contra corrosão, quando exposta ao meio ambiente, além de proporcionar uma película decorativa e protetora de alta qualidade e durabilidade. A cor escura é resultante do processo eletrolítico que deposita no interior dos poros sais metálicos específicos. Conforme visualizado na Figura 38, a cor no alumínio é obtida em função do tempo no processo, quanto maior a permanência mais escura a cor

Figura 38: Corpos submetidos ao processo de anodização

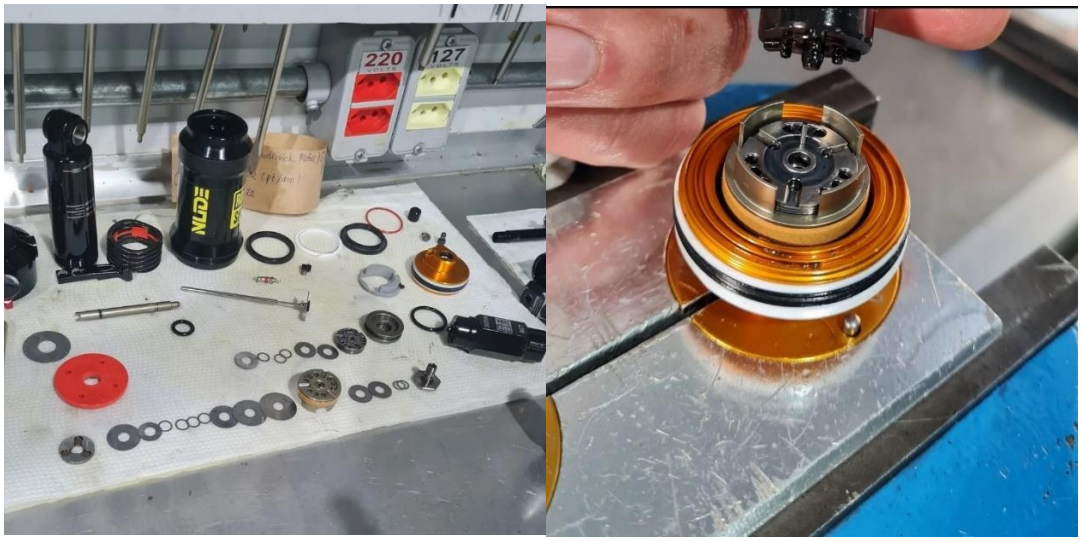
Fonte: O Autor

4.2.6 Amortecedor *Rockshox Deluxe RLC3*

A entrada da terceira ordem de serviço do dia foi uma revisão de um amortecedor *RockShox Deluxe Nude RLC3*, de acordo com a Figura 39, no qual foi realizado desmontagem, limpeza dos componentes, troca do fluído hidráulico e do kit de vedações. Utiliza-se máquina pneumática a vácuo para sangria dos cartuchos, otimizando o funcionamento do amortecedor e eliminando todas as bolhas contidas

no processo de sangria manual. Este processo é o mesmo realizado pelo fabricante quando o amortecedor é montado pela primeira vez.

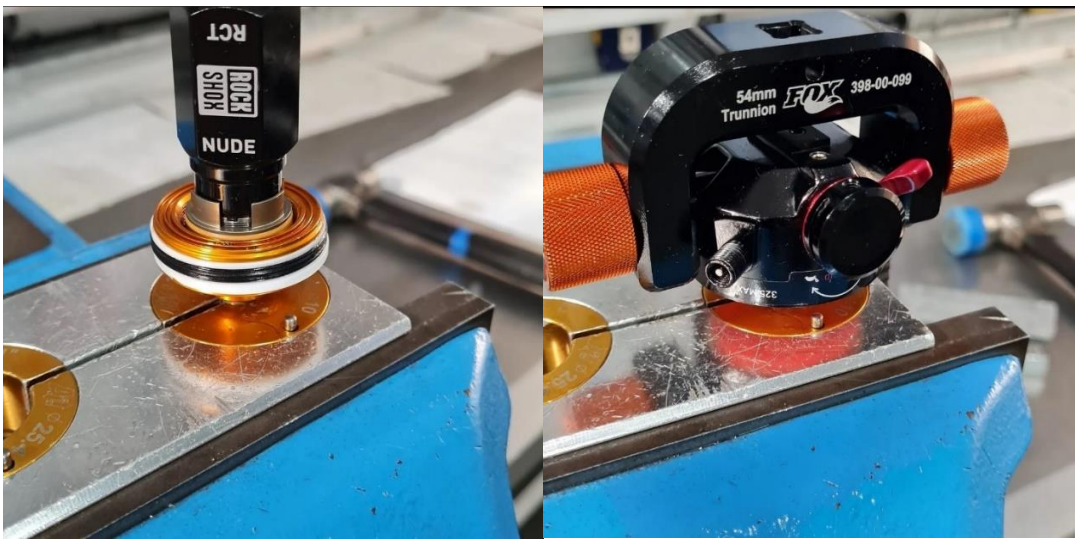
Figura 39: Amortecedor *RockShox Deluxe Nude RLC3*



Fonte: O Autor

Cada amortecedor demanda o uso de diferentes ferramentas para sua revisão. Neste caso foi usado ferramentas específicas importadas dos EUA. No detalhe da Figura 40 pode-se observar a *Lock Piston Tool RCT,* a qual serve para realizar o desmonte do pistão interno do êmbolo e a *Fox 54mm Trunnion Eyelet Torque Fixture Tool,* a qual tem a finalidade de realizar a extração do cabeçote da câmara de ar.

Figura 40: Detalhe das ferramentas para revisão do amortecedor



Fonte: O Autor

4.2.7 Amortecedor *Fox Racing DHX 5.0*

A quarta ordem de serviço do dia foi uma revisão de um amortecedor *Fox Racing Shox DHX 5.0 AIR*. O *shock* teve seus componentes desmontados e constatou-se grande acúmulo de terra nos retentores, ocasionando assim, um desgaste acentuado na haste devido à abrasão das partículas com o corpo da mesma no movimento alternativo do amortecedor. Conforme ilustrado na Figura 41, o fluído lubrificante também estava saturado com partículas de sujeira.

Figura 41: Amortecedor *Fox Racing Shox DHX 5.0 AIR*

Fonte: O Autor

Devido a avaria da haste, o cliente optou por realizar a troca da mesma. A nova haste que foi colocada, ilustrada na Figura 42, é importada dos EUA e seu tratamento químico de anodização é do padrão *Kashima Coat*, o qual é um processo de anodização dura patenteado pela *Miyaki Company og Japan*. Bissulfeto de molibdênio lubrificante é depositado por indução elétrica em bilhões de micro poros na superfície do alumínio anodizado duro para melhor lubrificação e menos abrasão e desgaste. O padrão *Kashima Coat* melhora a lubrificação e a resistência à corrosão em comparação com a anodização dura convencional e outros tipos comuns de revestimento, como teflon, grafite e dissulfeto de tungstênio.

Além da troca da haste, foi efetuada a substituição do óleo lubrificante, do kit de vedação e a completa limpeza dos componentes.

Figura 42: Detalhe da nova haste *Kashima Coat*

Fonte: O Autor

4.2.8 Amortecedor *RockShox Monarch RT3*

Na visita a oficina mecânica localizada em Gravataí, o primeiro item que entrou na linha de trabalho do primeiro dia foi um amortecedor *RockShox Monarch RT3 HV* conforme detalhe na Figura 43, o qual passou por uma revisão completa de 200 horas. O *shock* teve seus mais de 40 componentes desmontados, os quais foram limpos e lubrificados. Foi realizada uma análise e efetuada a troca do kit de vedação e do óleo lubrificante do amortecedor. Em seguida foi remontado e calibrada a câmara de ar com nitrogênio pressurizado com 120 psi.

Figura 43: Amortecedor *Monarch RT3 HV*

Fonte: O Autor

4.2.9 Amortecedor *RockShox Monarch RT*

O segundo componente no qual realizou-se serviço foi um amortecedor *RockShox Monarch RT*, conforme Figura 44, o qual passou por uma revisão intermediária de 125 horas. O *shock* teve seus itens desmontados, os quais foram limpos e lubrificados. Foi realizada uma análise e efetuada a troca do kit de vedação. Em seguida foi remontado e calibrada a câmara de ar com nitrogênio pressurizado no valor de 130 psi.

Também foi realizado a revisão completa na balança da suspensão traseira que compõe a bike *Specialized Camber*. Foi realizado a extração dos rolamentos, parafusos, vedações e arruelas que fazem parte do sistema. Os componentes foram limpos e lubrificados, após isso, realizou-se a remontagem do sistema traseiro de suspensão juntamente com o amortecedor.

Figura 44: Amortecedor e tubos da suspensão traseira

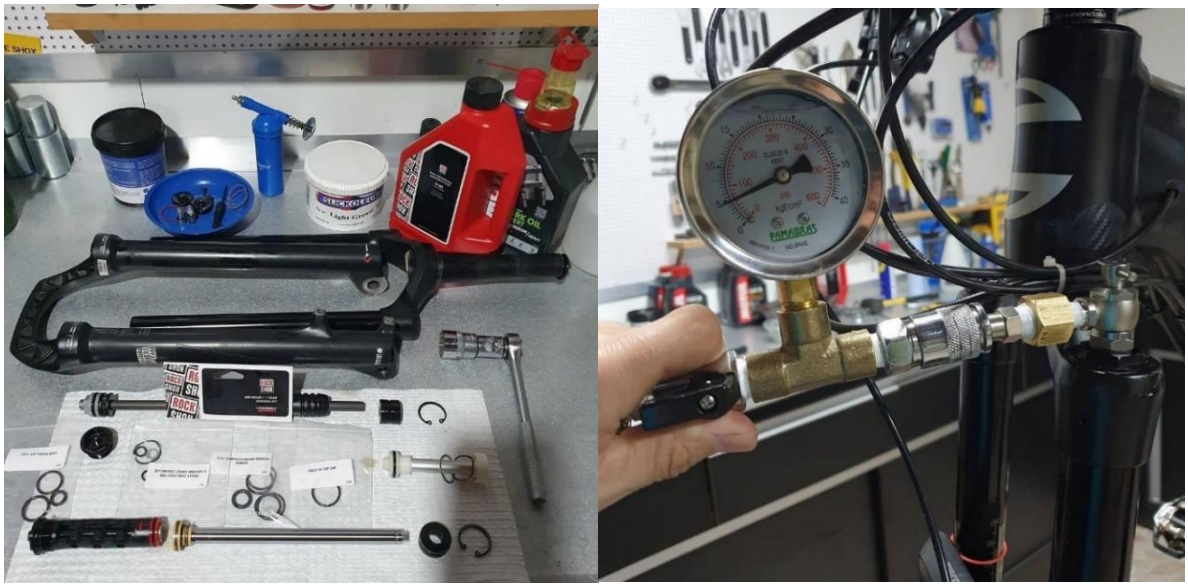
Fonte: O Autor

4.2.10 Suspensão dianteira *RockShox Judy Gold*

De acordo com detalhe na Figura 45, o terceiro serviço do dia efetuou-se em uma suspensão *RockShox Judy Gold*, a qual passou por uma revisão completa de 200 horas. A suspensão teve seus itens desmontados, os quais foram limpos e lubrificados. Foi efetuada a troca do kit de vedação e do fluído hidráulico. Em seguida

foi remontado e calibrada a câmara de ar com nitrogênio pressurizado no valor de 75 psi.

Figura 45: Suspensão *Rochshox Judy Gold* em revisão



Fonte: O Autor

4.2.11 Suspensão dianteira *RockShox Recon XC*

De acordo com a Figura 46, o quarto serviço do dia foi efetuado em uma suspensão *RockShox Recon XC*, a qual passou por uma revisão completa de 200 horas. A suspensão teve seus itens desmontados, os quais foram limpos e lubrificados. Foi efetuada a troca do kit de reparos e fluídos originais. Em seguida foi remontado e calibrada a câmara de ar com nitrogênio pressurizado no valor de 85 psi.

Foi detectado um desgaste na haste por falta de manutenção preventiva. Este desgaste pode inutilizar a suspensão, sendo facilmente evitado com as revisões periódicas de 50 horas (ou 6 meses) que visa limpeza e lubrificação. É um serviço mais rápido pois não há troca de reparos, sendo mais barato, porém muito importante para a preservação do equipamento.

Figura 46: Suspensão *RockShox Recon XC* em revisão

Fonte: O Autor

4.2.12 Suspensão dianteira *RockShox Recon Silver*

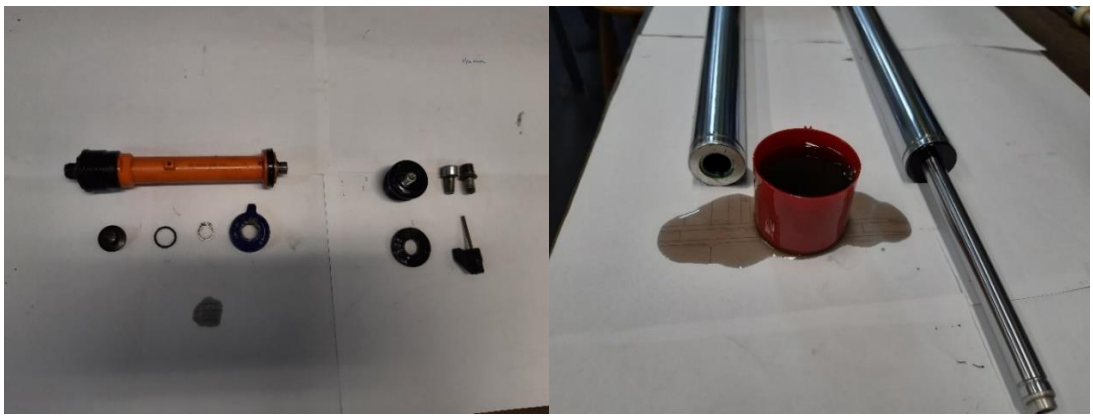
Na visita a *bike shop* localizada em Canoas, realizou-se a manutenção em duas suspensões dianteiras. Conforme detalhe na Figura 47, a primeira foi a *RockShox Recon Silver TK SL*, a qual estava com vazamento de ar, fazendo com que não houvesse retorno após a compressão da suspensão.

Figura 47: Suspensão *RockShox Recon Silver TK SL* em revisão

Fonte: O Autor

Foi constatado um vazamento na válvula de ar, na qual é realizada a calibragem de pressão. A válvula estava com acúmulo de sujeira, ocasionando uma perda na eficiência da vedação. Os componentes internos foram limpos e foi realizada a troca do óleo e dos reparos de vedação da suspensão. Após isso, realizou-se testes e foi constatado que o vazamento de ar havia cessado, fazendo com que a suspensão atuasse de maneira adequada. Na Figura 48 nota-se o óleo saturado que foi trocado e os componentes que foram limpos e lubrificados.

Figura 48: Óleo saturado e componentes internos da suspensão



Fonte: O Autor

4.2.13 Suspensão dianteira *GTA RX Gold Air*

A segunda suspensão foi a *GTA RX Gold Air 120*, a qual estava em uso a 2 anos e ainda não tinha sido submetida a nenhum tipo de revisão. O equipamento foi desmontado utilizando ferramental adequado. Foi verificado um desgaste acentuado nas hastes, principalmente do lado direito, ocasionando uma perda total do revestimento químico de anodização e pintura, apresentado na Figura 49.

Figura 49: Desgaste na haste da suspensão *GTA RX Gold*

Fonte: O Autor

Quando verificado o interior das canelas, pode-se observar uma decomposição do revestimento interno, das buchas e esponjas de vedação, provavelmente causada pelo acúmulo de umidade, sujeira e produtos químicos no interior da mesma. Na Figura 50 nota-se esses detritos que estavam no interior das canelas, os quais fizeram com que houvesse o desgaste nas hastes, devido ao atrito entre as duas partes no funcionamento da suspensão. Os componentes foram limpos com água e detergente neutro, após secos com uma toalha e lubrificados com graxa especial para suspensão. Foi realizado a troca dos retentores e buchas de vedação. A haste avariada será substituída em uma próxima oportunidade devido à falta de peça de reposição para a mesma.

Figura 50: Canela direita e cartucho hidráulico da suspensão *GTA RX Gold*

Fonte: O Autor

4.3 MATERIAIS UTILIZADOS

Para a realização das revisões nos garfos de suspensão dianteira e nos amortecedores traseiros foram utilizados variados tipos de ferramentas, equipamentos de proteção e insumos. Do mesmo modo, para a realização do ensaio de análise de vibração foram utilizados alguns recursos, tais como instrumentos de medição, EPI's e equipamentos de ciclismo. Todos os itens utilizados estão listados no Quadro 8 no ANEXO A.

4.4 AVALIAÇÃO DOS PONTOS CRÍTICOS NAS SUSPENSÕES

Através da análise dos serviços efetuados nas três oficinas mecânicas visitadas, realizou-se a avaliação das principais partes críticas que compõem os sistemas suspensivos.

4.4.1 Hastes da suspensão dianteira

Quadro 1: Hastes da suspensão dianteira

Suspensão dianteira	**Defeitos**	**Causas**	**Soluções/ análises**
RockShox Recon XC	Desgaste moderado na haste dianteira.	Ocorre devido a partículas de sujeira que são forçadas umas contra as outras, e movem-se ao longo da superfície da haste, provavelmente causado por falta de manutenção periódica.	Desgaste facilmente evitado com as revisões periódicas de 50 horas (ou 6 meses) que visa limpeza e lubrificação dos componentes.

RockShox Recon TK Gold	Desgaste acentuado na haste do lado direito causando perda total da anodização.	Item sem manutenção a quase 2 anos, sendo utilizada em condições extremas de pedal (chuva e lama), causando acúmulo de umidade/ partículas e consequente desgaste por abrasão entre os corpos.	Colocação de novas hastes *ND Tuned*, que ocasionam maior durabilidade com grande resistência ao desgaste, rigidez e uma boa capacidade de deslize.
Fox 32 Float CTD	Desgaste excessivo nas duas hastes ocasionando ruptura do alumínio.	Saturação completa do óleo hidráulico e regulagem da pressão de ar no êmbolo pneumático abaixo do recomendado pelo fabricante.	Colocação de novas hastes *ND Tuned*, que ocasionam maior durabilidade com grande resistência ao desgaste, rigidez e uma boa capacidade de deslize.
GTA RX Gold Air	Desgaste acentuado nas hastes do lado direito.	No interior das canelas notou-se uma decomposição do revestimento interno, das buchas e esponjas de vedação, provavelmente causada pelo acúmulo de umidade, sujeira e produtos químicos no interior da mesma.	Desgaste facilmente evitado com as revisões periódicas de 50 horas (ou 6 meses) que visa limpeza e lubrificação dos componentes.

Fonte: O Autor

4.4.2 Hastes do amortecedor traseiro

Quadro 2: Hastes do amortecedor traseiro

Amortecedor traseiro	Defeitos	Causas	Soluções/ análise
Fox Triad	Fratura frágil da haste de alumínio no interior do cabeçote.	Regulagem da pressão de ar abaixo do recomendado pelo fabricante tende a causar uma alta compressão do *shock* durante o uso, podendo vir a sobrecarregar as estruturas internas do amortecedor, gerando fadiga e consequentemente rupturas no longo prazo.	Foi refeita a rosca no interior do cabeçote e realizada a troca de uma nova haste em aço temperado. Também se realizou a limpeza dos demais componentes e efetuou-se a troca do kit de vedação que compõe o amortecedor.
Fox Racing DHX 5.0	Desgaste acentuado na haste.	Grande acúmulo de terra nos retentores, ocasionando assim, desgaste na haste devido à abrasão das partículas com o corpo da mesma no movimento alternativo do amortecedor. O fluído lubrificante também estava saturado com partículas de sujeira.	Colocação de nova haste *Kashima Coat,* a qual melhora a lubrificação e a resistência à corrosão em comparação com a anodização dura convencional e outros tipos comuns de revestimento, como teflon, grafite e dissulfeto de tungstênio.

Fonte: O Autor

4.4.3 Corpo hidráulico do amortecedor traseiro

Quadro 3: Corpo hidráulico do amortecedor traseiro

Amortecedor traseiro	**Defeitos**	**Causas**	**Soluções/ análise**
Fox X2 Trunnion	Trinca no alumínio do corpo interno do sistema hidráulico (*damper*).	As rachaduras deste tipo são geralmente causadas pelo posicionamento assimétrico das buchas inferiores, ocasionando esforços laterais e inferindo em danos e vazamento no corpo do sistema hidráulico.	A solução para esse problema foi realizar o desenvolvimento de uma nova peça utilizando como matéria prima uma haste de suspensão *Marzocchi* com a mesma medida de diâmetro. A peça foi cortada e usinada com a rosca na medida da original. Também foi realizado o tratamento químico de anodização na peça, finalizado com revestimento na cor preta.
Corpos hidráulicos de amortecedores (variadas marcas)	Desgaste na anodização das superfícies das peças.	Desgaste gerado pelo atrito da interação de sólidos em determinadas áreas de contato ocasionando a perda progressiva de material da superfície. Isso se deve a falta de manutenção preventiva nos amortecedores.	As peças foram submetidas a um novo tratamento químico, contando com a anodização de alumínio, que é um tratamento de superfície, através de um processo eletrolítico, que tem como objetivo formar uma camada uniforme de óxido de alumínio. Essa camada é capaz de proteger contra corrosão, além de proporcionar uma película decorativa e protetora de alta qualidade e durabilidade.

Fonte: O Autor

4.5 IMPORTÂNCIA DA MANUTENÇÃO PREVENTIVA EM SUSPENSÕES

A maioria dos ciclistas sabem que periodicamente é necessário fazer uma revisão na bicicleta. O que uma boa parte dos ciclistas desconhece é que, quando levam suas *mountains bikes* para realizar a chamada revisão geral nas oficinas, o serviço geralmente não inclui a desmontagem e revisão da suspensão. Por isso, grande parte dos usuários de bicicleta acaba por levar este componente para manutenção apenas quando este apresenta algum tipo de falha. Revisar o sistema de suspensão apenas quando ele apresenta problema é um dos grandes erros que um ciclista pode cometer.

A manutenção de equipamentos hidráulicos e pneumáticos, como é o caso da grande maioria de suspensões de alta performance, deve ser feita com base nas horas de uso. Essa recomendação é válida para todas as marcas de suspensão, embora cada uma delas tenha uma sugestão específica de horas para cada revisão em seus manuais, que em geral, variam de 50 a 200 horas. Isso significa que é necessário somar as horas em que se passa pedalando para saber o momento de realizar as revisões. Atualmente, existem diversas ferramentas que auxiliam neste controle mecânico. Um deles é o *Bike Conecta,* aplicativo que regula a manutenção da bike em horas de uso e quilometragem. Em conexão com a conta no *app Strava* (aplicativo que realiza a cronometragem do tempo em cada pedalada), o *Bike Conecta* envia mensagens afim de avisar o tempo de cada revisão.

Diante das análises dos pontos críticos no sistema de suspensão, é notável que a falta de manutenção preventiva corrobora com a diminuição significativa do tempo de vida útil dos componentes, ocasionando falhas como desgastes e colapsos nas partes das suspensões e amortecedores. Tendo isso como base, os técnicos das oficinas nas quais foi realizado a pesquisa de campo, relataram a importância da manutenção preventiva e forneceram informações de como proceder adequadamente com as revisões do sistema de suspensão. Nos Quadros 4 e 5 são apresentados planos de manutenção preventiva com informações extraídas dos técnicos especializados em relação às inspeções e revisões que devem ser feitas, afim de aumentar a vida útil dos componentes do sistema de suspensão.

Quadro 4: Plano de manutenção preventiva do sistema de suspensão dianteiro

Frequência (horas)	**Manutenção**	**Observações**
5	• Limpeza das hastes e dos retentores. • Verificar a pressão do ar no êmbolo superior da suspensão.	• Prolonga a vida útil dos retentores, *o-rings* e anéis raspadores. • Minimiza a possibilidade de arranhões nas hastes. Minimiza a sujeira do sistema interno das canelas.
50	• Limpeza geral da suspensão, remoção e lubrificação das canelas. • Verificação das buchas internas e lubrificação de espumas/ anéis raspadores. • Verificação da superfície das hastes, afim de identificar possíveis riscos e trincas.	• Restaura a sensibilidade de leitura das pequenas irregularidades do solo. Reduz o atrito. • Estende a vida útil das buchas internas. Elevação da segurança e desempenho da suspensão. • Previne trocas de peças por desgaste prematuro e evita manutenções corretivas.
200	• Manutenção completa no sistema de suspensão. • Limpeza geral e lubrificação de todos os componentes internos e externos. • Substituições de todas as borrachas e vedações recomendadas pelo fabricante. • Substituição do óleo do sistema de retorno. Calibração da pressão do ar no êmbolo superior da suspensão de acordo com o fabricante.	• Prolonga a vida útil da suspensão. • Restaura o desempenho de amortecimento e agilidade na leitura do terreno. • Elevação da segurança e desempenho da suspensão. • Previne trocas de peças por desgaste prematuro e evita manutenções corretivas. Esta manutenção faz com que a suspensão funcione sempre no mais alto grau de excelência, apresentando o rendimento para a qual foi projetada.

Fonte: O Autor

Quadro 5: Plano de manutenção preventiva do sistema de suspensão traseiro

Frequência (horas)	**Manutenção**	**Observações**
5	• Limpeza e lubrificação do corpo hidráulico do *shock.* • Verificar a pressão do ar e realizar o SAG.	• Prolonga a vida útil dos retentores e do corpo hidráulico. • Previne mal funcionamento do amortecedor e possibilidade de fim-de-curso em obstáculos.
25	• Remoção, limpeza e lubrificação da câmara de ar. • Limpeza ou substituição do cabo remoto e alojamento do bloqueio.	• Restaura a sensibilidade de leitura das pequenas irregularidades do solo. Reduz o atrito. • Evita bloqueios inesperados do amortecedor devido a sujeira e falhas no cabo e trava remota.
50	• Inspeção do eixo, reservatório, corpo do amortecedor e câmara de ar. • Ajuste de torque nos parafusos do sistema.	• Elevação da segurança e desempenho da suspensão. • Previne trocas de peças por desgaste prematuro e evita manutenções corretivas.
100	• Manutenção, limpeza e lubrificação completa do sistema do amortecedor. • Substituição do kit de vedação e óleo hidráulico. • Desmontagem da balança traseira. • Limpeza e lubrificação de *links*, parafusos e juntas do sistema.	• Prolonga a vida útil do amortecedor. • Restaura o desempenho de amortecimento e agilidade na leitura do terreno. • Esta manutenção faz com que a suspensão funcione sempre no mais alto grau de excelência, apresentando o rendimento para a qual foi projetada.

Fonte: O Autor

4.6 ANÁLISE VIBRATÓRIA DO SISTEMA DE SUSPENSÃO EM BICICLETA MTB

Conforme visto nos capítulos anteriores, o demasiado tempo de uso de bicicletas MTB em terrenos irregulares com umidade e terra, aliado a falta de manutenção preventiva pode ocasionar a falha de componentes do sistema de suspensão. Os defeitos são caracterizados por algum tipo de envelhecimento ou desgaste do material. Isto é traduzido como uma perda gradativa das propriedades que tornam o material adequado ao uso pretendido, fazendo com que a funcionalidade da peça fique gradualmente comprometida.

Outra causa que pode gerar falhas nos componentes mecânicos é a vibração, a qual promove o desgaste prematuro de superfícies em contato. Em situações mais drásticas, a vibração pode levar a uma ruptura prematura de elementos mecânicos, causando graves danos materiais e humanos. Além de falhas simples por ruptura, causadas por cargas dinâmicas elevadas, podem ocorrer falhas em componentes mecânicos em consequência de fadiga de material associada a cargas dinâmicas moderadas, mas repetitivas, cíclicas e acumuladas, que tendem a reduzir a vida útil dos elementos mecânicos.

A ruptura por fadiga está, portanto, associada a fenômenos de vibração mecânica. Se não for possível eliminar totalmente a vibração nesses casos, deve-se ao menos tentar mantê-la sob controle e, com auxílio de planejamento e programação de manutenção apropriados, antecipar a substituição de componentes mecânicos antes que as avarias ocorram. Quando a frequência natural do sistema coincide com a frequência de excitação, ocorre um fenômeno chamado ressonância. Este fenômeno amplifica o deslocamento e na maioria dos sistemas estruturais e mecânicos isto provoca tensões e deformações que podem levar a falhas.

Em virtude disto, nota-se a importância do conhecimento da frequência natural nos sistemas de suspensão das bicicletas MTB, bem como as frequências de excitação, afim de identificar as situações em que as duas frequências podem coincidir, ocasionando o fenômeno de ressonância. Para tal conhecimento, realizou-se um ensaio dinâmico em área externa com uma bicicleta MTB monitorada por um sensor de vibração, afim de gerar gráficos de amplitude vibracional. Com os dados

extraídos no ensaio dinâmico, realizou-se cálculos de Mecânica Vibratória, afim de conhecer os valores de frequência natural, frequência de excitação e ressonância.

4.6.1 Descrição do ensaio de vibração

Para simular o terreno e obstáculos encontrados nas trilhas e circuitos de *Mountain Bike,* escolheu-se um quebra-molas, o qual é uma ondulação transversal usada em ruas e rodovias para a redução da velocidade dos veículos. A Figura 51 apresenta o local do ensaio situado na rua Voluntários da Pátria, 4455 – bairro Humaitá, na cidade de Porto Alegre.

Figura 51: Local do ensaio vibracional

Fonte: O Autor

Chegando ao local do ensaio de vibração, demarcou-se o quebra-molas com dois cones de sinalização. Após isso, foi realizado a fixação do sensor acelerômetro triaxial SV 38 no assento da bicicleta conforme ilustrado na Figura 52. O acelerômetro foi conectado ao analisador de vibração SV 106D e colocado no bolso do casaco do ciclista.

Figura 52: Acelerômetro fixado no assento da bicicleta

Fonte: O Autor

De acordo com a Figura 53, o analisador de vibração *SV 106D* cumpre integralmente com os requisitos do ISO 2631-1 e da diretiva de vibração europeia fornecendo o valor de exposição de vibração A (8) referindo-se ao valor de vibração total de saúde e geral para a avaliação de conforto. Duas entradas permitem a conexão de 2 sensores triaxiais de vibração de corpo inteiro em simultâneo. O valor de exposição de vibração A (8) é calculado em tempo real e os resultados de ambos os sensores são exibidos simultaneamente em unidades VDV e RMS. Além dos valores de exposição, o *SV106D* calcula o tempo restante até os limites sugerindo o tempo de trabalho seguro para o usuário (SVANTEK, 2020).

Figura 53: Analisador de vibração *SV 106D*

Fonte: O Autor

No detalhe da Figura 54 é apresentado o Acelerômetro *SV 38V*. O instrumento é um acelerômetro triaxial de corpo inteiro baseado em transdutores MEMS dedicados ao instrumento *SV 106D*, para medições de vibração do corpo humano de acordo com a ISO 2631-1 e atende aos requisitos tanto da almofada do assento ou do encosto. O *SV 38V* usa baixa tensão e consome muito menos energia do que os acelerômetros IEPE estendendo o tempo de vida da bateria do Medidor de Vibração *SV 106*D. A memória embutida TEDS armazena informações sobre a sensibilidade do acelerômetro que é automaticamente transferido para o Medidor *SV 106D*, ajudando a evitar erros de configuração (SVANTEK, 2020).

Figura 54: Acelerômetro *SV 38V*

Fonte: O Autor

Após a instalação dos componentes no ciclista e na bicicleta, foram realizadas seis passagens no quebra-molas com velocidades distintas. A primeira velocidade de passagem no quebra-molas foi de 21,1 km/h e a sexta foi de 30,8 km/h. As velocidades foram registradas através do aplicativo de ciclismo *Strava* instalado no celular do ciclista.

Após a conclusão de cada passagem, foi extraído do aplicativo as informações de velocidade no momento em que o pneu dianteiro da bicicleta toca o quebra-molas. Conforme detalhado na Figura 55, o *Max Speed* é o momento em que a bicicleta apresenta maior velocidade durante o trajeto do ensaio.

Figura 55: Primeira velocidade registrada no aplicativo *Strava*

Fonte: O Autor

Após isso, foram extraídas as medidas da altura e comprimento do quebra-molas com o auxílio de uma trena. Ao fim do ensaio realizou-se a extração dos dados do analisador de vibração, gerando um gráfico de amplitude vibracional.

4.7 DETERMINAÇÃO DAS GRANDEZAS DE ANÁLISE VIBRATÓRIA

Para determinação dos valores da constante elástica do sistema mola-amortecedor da bicicleta, frequência natural, período vibracional, frequências de excitação e ressonância, utilizou-se equações matemáticas contidas no formulário do ANEXO B.

O Quadro 6 apresenta os dados extraídos do ensaio de vibração. Estes dados foram utilizados na modelagem matemática com as equações contidas no ANEXO B, afim de conhecer as grandezas físicas de vibração mecânica, as quais são apresentadas no Quadro 7.

Quadro 6: Dados extraídos do ensaio de vibração

Dados	Sigla	Valor	Unidade
Massa da bicicleta	$m1$	15,4	kg
Massa do ciclista	$m2$	67,2	kg
Massa total do conjunto bike-ciclista	m	82,6	kg
Altura do solo em relação ao ponto central do eixo traseiro da bike (somente com a massa da bike)	$h1$	0,327	m
Altura do solo em relação ao ponto central do eixo traseiro da bike (com a massa total)	$h2$	0,322	m
Deformação da mola (conjunto pneu-amortecedor)	x	0,005	m
Aceleração da gravidade	g	9,81	m/s^2
Comprimento do quebra-molas	L	9	m
1ª velocidade de passagem no quebra-molas	$v1$	5,86	m/s
2ª velocidade de passagem no quebra-molas	$v2$	6,19	m/s
3ª velocidade de passagem no quebra-molas	$v3$	6,44	m/s
4ª velocidade de passagem no quebra-molas	$v4$	6,77	m/s
5ª velocidade de passagem no quebra-molas	$v5$	7,58	m/s
6ª velocidade de passagem no quebra-molas	$v6$	8,55	m/s

Fonte: O Autor

Quadro 7: Grandezas de vibração mecânica

Grandezas	Sigla	Valor	Unidade
Peso total	P	810,306	N

Constante elástica do sistema mola-amortecedor da bicicleta	k	162.061,2	N/m
Frequência natural	wn	44,294	rad/s
1º período vibracional	$t1$	3,07	s
2º período vibracional	$t2$	2,91	s
3º período vibracional	$t3$	2,79	s
4º período vibracional	$t4$	2,66	s
5º período vibracional	$t5$	2,37	s
6º período vibracional	$t6$	2,11	s
1ª frequência de excitação	$w1$	2,046	rad/s
2ª frequência de excitação	$w2$	2,159	rad/s
3ª frequência de excitação	$w3$	2,252	rad/s
4ª frequência de excitação	$w4$	2,362	rad/s
5ª frequência de excitação	$w5$	2,651	rad/s
6ª frequência de excitação	$w6$	2,977	rad/s
1ª frequência de ressonância	$r1$	0,0461	s.u
2ª frequência de ressonância	$r2$	0,0487	s.u
3ª frequência de ressonância	$r3$	0,0508	s.u
4ª frequência de ressonância	$r4$	0,0533	s.u
5ª frequência de ressonância	$r5$	0,0598	s.u
6ª frequência de ressonância	$r6$	0,0672	s.u

Fonte: O Autor

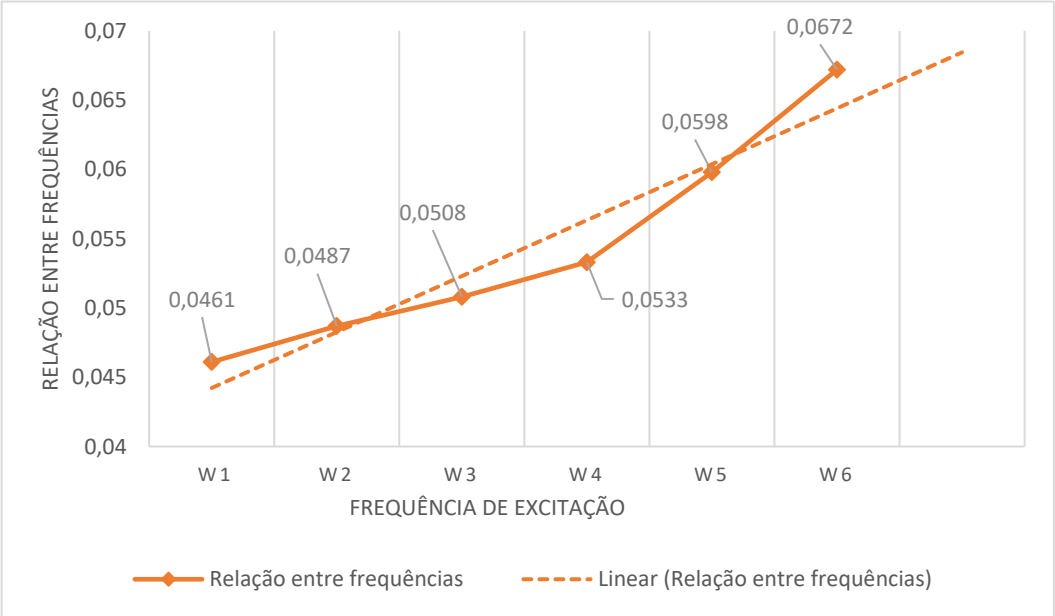
5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Um sistema mecânico ou estrutural sofre vibração forçada quando energia adicional externa é fornecida ao sistema durante a vibração, por uma força aplicada ou por uma excitação de deslocamento imposta, exercida pelas propriedades elásticas do material. As frequências naturais de oscilação fazem com que o sistema sofra ação de um fenômeno conhecido como ressonância mecânica, isso faz com que o sistema vibre com grandes amplitudes, gerando grandes deformações que levam a falha do material ou de componentes do sistema pela vibração não dimensionada.

Todos os corpos possuem frequências naturais de vibração e, quando são submetidos a pulsos energéticos, cuja frequência coincide com uma dessas frequências naturais, ele passa a vibrar com frequências e amplitudes cada vez maiores. Sendo assim, quando a relação entre as frequências de excitação e natural tende ao valor 1, o fenômeno de ressonância é acentuado, podendo causar danos aos sistemas devido ao excesso de vibração.

De acordo com os cálculos da análise vibratória, gerou-se o Gráfico 1, onde pode ser visto que os valores das seis frequências de excitação ficaram distante do valor crítico de ressonância. Deste modo, os componentes do sistema de suspensão da bicicleta não sofreriam danos em condições normais de uso.

Gráfico 1: Relação entre frequências x Frequência de excitação



Fonte: O Autor

Conforme visualizado no Gráfico 1, os valores de frequência de excitação estão em uma crescente, ou seja, quanto maior a velocidade de passagem sobre um obstáculo, maior será a frequência de excitação, tendendo a se aproximar da frequência natural do sistema. A partir do gráfico obteve-se a Equação 9, a qual determina a função da relação entre frequências, ou seja, quando o valor de $w = wn$, o valor da relação entre as frequências é 1, atingindo o valor crítico de ressonância.

$$r = 0{,}0226w - 0{,}0002 \quad (9)$$

De acordo com o relatado neste presente trabalho, é importante lembrar que as principais funções da suspensão de bicicleta são: reduzir a vibração atuante no ciclista; manter o contato da roda com o solo; reduzir a perda de impulso ao transpor um obstáculo; reduzir as forças de impacto oriundas de saltos ou baques e manter o equilíbrio. Um sistema de suspensão adequado garante uma boa performance e conforto ao ciclista.

Porém o uso inadequado da bicicleta, não respeitando as condições de uso descritas pelo manual do fabricante, como a realização de trechos técnicos demasiadamente agressivos ou saltos de obstáculos com altura elevada em relação ao solo, podem ocasionar impactos que geram altas frequências de excitação. Estas frequências de excitação elevadas, se aproximando da frequência natural do sistema-mola da bicicleta, podem gerar fenômenos de ressonância, fazendo com que os itens das suspensões traseiras e dianteira sofram desgastes e até mesmo ruptura de elementos mais sensíveis.

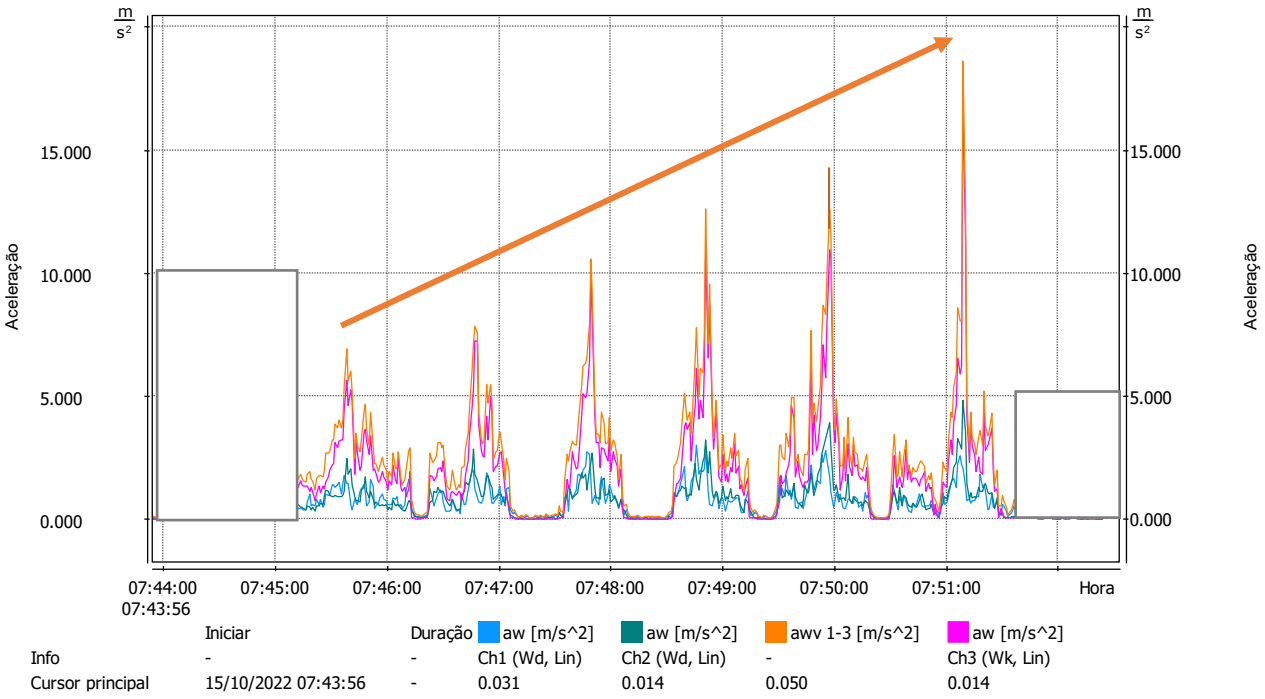
O Gráfico 2 (Aceleração x Tempo) gerado pelo sensor analisador de vibração *SV 106D*, apresenta os seis picos de amplitude vibracional obtidos pela passagem da bicicleta no quebra-molas. Nota-se que o pico de amplitude apresenta uma reta crescente nos seus valores, ou seja, quanto maior a velocidade em que se passa em um determinado obstáculo, maior será a frequência de excitação.

Para se obter o fenômeno de ressonância do sistema mola-amortecedor da bicicleta MTB ($r = 1$) é necessária uma velocidade elevada na passagem do obstáculo quebra-molas. Para fins de conhecimento desta velocidade, utilizou-se uma modelagem matemática com as fórmulas contidas no ANEXO B. Para obter o fenômeno de ressonância nesse sistema será necessário passar pelo obstáculo com

uma velocidade de 126,89 m/s ou 456,85 km/h. Tendo em vista que a velocidade média em competições profissionais de *mountain-bike* permeia a faixa dos 9 m/s, é notório que a configuração da bicicleta MTB é segura para o tipo de terreno que ela é utilizada normalmente, pois seria necessária uma velocidade anormal para alcançar o valor crítico de ressonância.

É evidente que a passagem por obstáculos no uso da *mountain-bike* tem a capacidade de ocasionar picos de frequência de excitação. Com isso, é importante observar o tempo de uso da bicicleta e o tipo de terreno em cada pedalada, pois esses itens influenciam diretamente na periodicidade das manutenções preventivas do sistema de suspensão.

Gráfico 2: Aceleração x Tempo



Fonte: Sensor analisador de vibração *SV106D* (2022)

6 CONCLUSÃO

Diante do exposto, é notável que a prática do ciclismo *mountain-bike* tem crescido ao longo dos últimos anos, tanto por entusiastas e amadores, como por profissionais do esporte. Neste cenário atual de progresso das tecnologias, o presente estudo buscou fomentar a discussão no tocante a engenharia envolvida nas suspensões das *mountain-bike,* apresentando sua evolução ao longo do tempo, destacando as tecnologias presentes nos sistemas e buscando analisar as partes críticas, as quais são mais suscetíveis a falhas e defeitos, comprometendo a segurança, conforto e performance dos usuários.

Em primeiro momento, realizou-se uma pesquisa bibliográfica descritiva afim de demonstrar as partes, tipos de configuração e o funcionamento dos elementos mecânicos, pneumáticos e hidráulicos que compõem os sistemas de suspensão traseiro e dianteiro das *mountain-bikes.*

Em relação a análise das principais partes críticas das suspensões, a pesquisa exploratória nas oficinas mecânicas se mostrou eficiente, pois obteve-se êxito na busca por respostas, visualizando na prática os serviços de manutenção efetuados e as soluções aplicadas aos problemas encontrados.

Através das entrevistas com os técnicos nas oficinas, criou-se um plano de manutenção preventiva para os sistemas de suspensão dianteiro e traseiro das bicicletas. Com a utilização deste plano, os usuários das bicicletas podem ter um planejamento dos serviços que devem ser efetuados, aumentando assim a durabilidade dos componentes e uma melhora na performance e segurança do conjunto.

Por fim, a realização do ensaio empírico de análise vibratória se mostrou de grande valia, pois através do mesmo, chegou-se à conclusão que as frequências de excitação geradas nas passagens por obstáculos durante um determinado percurso, permanecem distante da frequência natural do sistema-mola da bicicleta *mountain-bike.* Demonstrando, desta forma, o baixo risco de acontecer fenômenos de ressonância e evidenciando a segurança das bicicletas quando utilizadas conforme recomendação dos fabricantes.

As metodologias construídas para guiar o desenvolvimento do trabalho se mostraram adequadas e satisfatórias, gerando resultados que contribuem para uma melhor compreensão dos fenômenos nos sistemas de suspensão das *mountain-bikes.*

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir das observações realizadas no decorrer do desenvolvimento do presente trabalho, é possível realizar futuros projetos de aprimoramento e continuidade a este, bem como uma nova abordagem na área de manutenção e análise vibratória dos sistemas suspensivos das bicicletas *mountain-bike*. Entre estes, pode-se citar:

- Aprimoramento da análise vibratória do sistema de suspensão, utilizando outros conceitos e modelagens matemáticas de Mecânica Vibratória.

- Análise mais robusta dos materiais que compõem os sistemas de suspensão das bicicletas, buscando comparar o comportamento sob tensão de variados materiais, como por exemplo a fibra de carbono ou materiais não-convencionais.

- Ensaios estruturais nas partes do quadro e balança traseira da bicicleta, visando estabelecer análises quanto aos esforços que incidem sobre as partes de juntas soldadas.

- Análise do comportamento do sistema de suspensão com a alteração de parâmetros de geometria, ângulos e propriedades físicas do equipamento, através de simulação numérica baseada no método dos elementos finitos em softwares de Engenharia.

- Realização de comparativos com suspensões de outros tipos de veículos em relação a manutenção corretiva e preventiva, analisando custos, frequência e qualidade dos serviços realizados.

REFERÊNCIAS

ABRACICLO. Associação Brasileira de Fabricantes de Motocicletas, Ciclomotores, Motonetas e Similares. **História e Atuação**. Brasília. 2015. Disponível em: <www.abraciclo.com.br/abraciclo/historia>. Acessado em: abril de 2022.

ALCORTA, A. **A história da Bicicleta**. Artigo Escola da Bicicleta. Curitiba. 2003.

ALMEIDA, Júlio C. **Projeto Mecânico**: Enfoque Baseado na Fadiga e na Mecânica da Fratura.1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018.

ANTP. (Associação Nacional de Transportes Públicos). **Transporte Cicloviário:** Série Cadernos Técnicos**.** Vol. 7, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO SETOR DE BICICLETAS. **Comércio Varejista de Bicicletas**. Disponível em: <https://aliancabike.org.br/dados-do-setor/comercio-varejista/>. Acesso em: abril de 2022.

BALACHANDRAN, Balakumar; MAGRAB, Edward B. **Vibrations.** [S.l.]: CENGAGE Learning, 2009.

BELLOTO, J. C. A. **Bicicleta:** opção para uma mobilidade urbana mais saudável e sustentável. Monografia (Especialização Serviço Social) – UFPR Litoral, 2009.

BICYCLE HISTORY. **Story of Two-Wheelers for Transportation**. Disponível em: <http://www.bicyclehistory.net>. Acesso em: abril de 2022.

BICYCLE MUSEUM. **The Museum Collection**. Disponível em: <https://onlinebicyclemuseum.co.uk/tour/my-favourites/>. Acesso em: abril de 2022.

BIKE MAGAZINE. **A história da Bicicleta**. Disponível em: <https://www.bikemagazine.com.br/2011/03/historia-da-bicicleta/>. Acessado em: abril de 2022.

BIKE RADAR. **Suspension of the mountain bike**. Disponível em: <https://www.bikeradar.com/advice/buyers-guides/buyers-guide-to-mountain-bike-suspension-part-3/>. Acessado em: julho de 2022.

BUDYNAS, Richard G.; NISBETT, J. Keith. **Elementos de Máquinas de Shigley**. 10. ed. Porto Alegre: AMGH, 2016.

CALLISTER JUNIOR. **Ciência e Engenharia de Materiais:** Uma Introdução. (LTC Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, 2002), 5ª ed.

CALLISXTO, V. **As Rodas da Capital:** História dos Meios de Transporte. Editora Junta Distrital de Lisboa, 1967.

ESPORTELÂNDIA. **Ciclismo BMX**. Disponível em: <https://www.esportelandia.com.br/ciclismo/ciclismo-bmx/>. Acessado em: maio de 2022.

FARIAS L.G, PEREIRA L.L. **Pedalada para sustentabilidade:** desenvolvimento de uma bicicleta urbana compactável**.** São Paulo, SP. 2009.

Federação Internacional de Ciclismo (UCI). Disponível em: <www.uci.ch>. Acesso em: maio de 2022.

FOALE, Tony. **Motorcycle Handling and Chassis Design:** the art and science. Spain: Isbn, 2002.

FREEMAN JUNIOR, D.C. **Nonlinear Springs with Applications to Flow Regulation Valves and Mechanisms**. Doctorate of Philosophy in Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 2008.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Atlas, 2010.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de física:** gravitação, ondas e termodinâmica. Volume 2. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

INMAN, Daniel. **Vibrações Mecânicas**. Grupo GEN, 2018. 9788595154568. E-book. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595154568/>. Acesso em: julho de 2022.

JUNIOR, José S. **Introdução às vibrações mecânicas**. Editora Blucher, 2006. E-book. 9788521214953. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521214953/>. Acesso em: set. 2022.

KELLY, S G. **Vibrações Mecânicas:** Teorias e aplicações. Cengage Learning Brasil, 2018. E-book. 9788522127016. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788522127016/>. Acesso em: set. 2022.

MARQUES, E. C. S. **Implementação de Bicicleta como Meio de Transporte Alternativo**. Dissertação (Mestrado em Transportes) Universidade de Brasília – UnB, Departamento de Engenharia Civil, 2010.

MOBLEY, R. K. **Vibration Fundamentals**. Woburn: Butterworth-Heinemann, 1999.

MTB BRASÍLIA. **Bicicleta de Da Vinci**. Disponível em: <https://www.mtbbrasilia.com.br/2017/05/08/designers-recriam-a-bicicleta-do-genio-renascentista-leonardo-da-vinci/>. Acessado em: abril de 2022.

NABINGER, Eduardo, **Análise dinamométrica tridimensional da pedalada de ciclistas.** Porto Alegre RS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.

NORTON, R. L. **Cinemática e Dinâmica dos Mecanismos**. [S.l.]: AMGH, 2011.

RAO, S. S. **Vibrações Mecânicas**. 4. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

REDE DO ESPORTE. **Ciclismo de Estrada.** Disponível em: <http://rededoesporte.gov.br/pt-br/megaeventos/olimpiadas/modalidades/ciclismo-de-estrada>. Acesso em: abril de 2022.

ROSA, Edison. **Análise de Resistência Mecânica.** Departamento de Engenharia Mecânica - UFSC, 2002.

SAVI, M. A.; PAULA, Aline Souza D. **Vibrações Mecânicas**. Grupo GEN, 2017. 9788521634003. E-book. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521634003/>. Acesso em: julho de 2022.

SHACKELFORD, J. F. **Ciência dos Materiais** (PEARSON-Prentice Hall, São Paulo, 2008), 6ª ed.

SIDWELLS, C. **Manual Completo de Bicicletas e Ciclismo**. Editora Civilização, 2003.

SILVA, V. A. D. **Detecção de falhas em motores elétricos através das máquinas de vetores de suporte**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

SPECIALIZED BRASIL. **Catálogo Specialized**. Disponível em: <https://www.specialized.com/br/pt>. Acesso em: maio de 2022.

TAYLOR JONES (ed.). **Mountain Bike Comparison:** XC vs Enduro vs Trail Bikes Explained**.** 2019. Disponível em: <https://www.bikeexchange.com.au/blog/crosscountry-trail-enduro-mountain-bikes-explained-comparison-guide>. Acesso em: 26 ago. de 2022.

WILSON, David Gordon; PAPADOPOULOS, Jim. **Bicycle science**. Third ed. Cambridge, Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2004.

WHITT, Frank Rowland; WILSON, David Gordon: **Bicycling science**. Cambridge, Massachusetts London, England: Massachusetts Institute of Technology, 1995.

WU, Chia-Chin. **STATIC AND DYNAMIC ANALYSES OF MOUNTAIN BIKES AND THEIR RIDERS.** Tese (Doutorado) – Curse of Mechanical Engineering, University of Glasgow, Glasgow, 2012.

WULPI, Donald J. **Understanding How Components Fail.** Eurospan Gxc; 3rd ed., 2014.

ZUM, G.K.H. **Microstructure and wear of materials**, Tribology Series, Vol. 10, Elsevier, Amsterdam, 1987.

ANEXO A – LISTA DE FERRAMENTAS

Quadro 8: Ferramentas e materias utilizados

Ferramentas, EPI's e insumos utilizados nas revisões das suspensões	**Materiais utilizados no ensaio de vibração**
Óculos de segurança 3M Solus	Trena Professional IRWIN 5m/16f Tx3/4 Pol. C/6 IW13950
Luvas nitrílicas contra pó	Capacete de proteção de ciclismo RockRider ST100
Panos sem fiapos	Régua milimetrada aço inox 600 mm
Chave de torque para bicicleta ajustável (4/ 5/ 6 Nm)	Bicicleta MTB Specialized Camber Full Suspension 26'
Graxa branca Algoo PRO (PM 600)	03 cones de sinalização PVC 75 cm
Óleo para suspensão MOTOREX (5W, 10W e 15W)	Calibrador de pneus Stanley
Soquete Allen (4, 6 e 8 mm)	Acelerômetro triaxial SV 38V Svantek
Chave Allen ADX longa (2, 4, 6 e 8 mm)	Analisador de vibração SV 106D
Soquete hexagonal (12, 20 e 24 mm)	Balança digital de precisão G-Life
Chave de Boca de Ponta Fechada (12 e 22 mm)	Aplicativo de ciclismo Strava (para smartphone)
Chave catraca reversível	
Chave Pé-de-Corvo de 22 mm	

Bomba de ar com manômetro (300 psi) para garfo/ suspensão e amortecedor	
Chave inglesa ajustável (8 a 32 mm)	
Espátula para pneus Ice Tools	
Martelo de borracha	
Kit Park Tool SBK-1 extrator de rolamentos	
Óleo lubrificante WD-40	
Lock Piston Tool RCT	
Fox 54mm Trunnion Eyelet Torque Fixture Tool	
Ferramenta de posicionamento preciso IFP – S3	
Mini injetor de graxa Session	
Mordente para manutenção de amortecedores Session	
Suporte aéreo para bikes S-Tres	

Fonte: O Autor

ANEXO B – FORMULÁRIO DE VIBRAÇÕES MECÂNICAS

Quadro 9: Formulário de vibrações mecânicas

Fórmulas	Grandeza 1 (unidade)	Grandeza 2 (unidade)	Grandeza 3 (unidade)
$\boldsymbol{P = mg}$	$P =$ peso (N)	$m =$ massa total do conjunto (kg)	$g =$ aceleração da gravidade (m/s^2)
$\boldsymbol{k = \frac{P}{x}}$	$k =$ constante elástica da mola (N/m)	$P =$ peso (N)	$x =$ deformação da mola (m)
$\boldsymbol{wn = \sqrt{\frac{k}{m}}}$	$wn =$ frequência natural (rad/s)	$k =$ constante elástica da mola (N/m)	$m =$ massa total (kg)
$\boldsymbol{t = \frac{2L}{v}}$	$t =$ período vibracional (s)	$L =$ comprimento do quebra-molas (m)	$v =$ velocidade medida na entrada do quebra-molas (m/s)
$\boldsymbol{w = \frac{2\pi}{t}}$	$w =$ frequência de excitação (rad/s)	$\pi =$ constante matemática (3,14)	$t =$ período vibracional (s)
$\boldsymbol{r = \frac{w}{wn}}$	$r =$ relação entre frequências (ressonância)	$wn =$ frequência natural (rad/s)	$w =$ frequência de excitação (rad/s)

Fonte: Rao (2008)