

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS
ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

ARTHUR YVES PEREIRA

**COMPARAÇÃO DE ENSAIOS MECÂNICOS E SIMULAÇÕES
NUMÉRICAS EM QUADROS DE BICICLETA DE ALUMÍNIO**

MANAUS

2018

ARTHUR YVES PEREIRA

**COMPARAÇÃO DE ENSAIOS MECÂNICOS E SIMULAÇÕES
NUMÉRICAS EM QUADROS DE BICICLETA DE ALUMÍNIO**

Trabalho de Curso apresentado como
requisito parcial à obtenção do título de
bacharel em Engenharia Mecânica da
Universidade do Estado do Amazonas
(UEA)

Orientador: Prof. Arlindo Pires Lopes Ph.D

MANAUS

2018

PEREIRA, Arthur Yves.

Comparação de ensaios mecânicos e simulações numéricas em quadros de bicicleta de alumínio – Universidade do Estado do Amazonas – UEA, da Escola Superior de Tecnologia – EST/ Arthur Yves Pereira. ---2018

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade do Estado do Amazonas, 2018

ARTHUR YVES PEREIRA

**COMPARAÇÃO DE ENSAIOS MECÂNICOS E SIMULAÇÕES
NUMÉRICAS EM QUADROS DE BICICLETA DE ALUMÍNIO**

Este Trabalho de Curso foi considerado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade do Estado do Amazonas (UEA) e aprovado em sua forma final pela comissão examinadora.

Manaus, 11 de dezembro de 2018

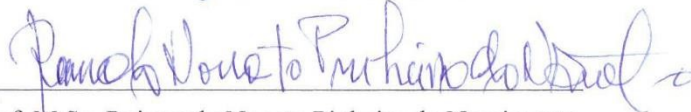
Banca examinadora:



Orientador: Prof. Arlindo Pires Lopes Ph.D.



Prof. Dr. Gilberto Garcia Del Pino.



Prof. M.Sc. Raimundo Nonato Pinheiro do Nascimento

*Dedico esta obra a todos aqueles que estiveram ao meu lado
durante minha jornada de graduação que se encerra com a
conclusão deste trabalho.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus e minha família por todo o amor, carinho e suporte que tornaram o caminho mais alegre e fácil. Agradeço também a meu orientador por acreditar nesse projeto

“Se for fazer algo, que o faça bem feito, pois coisa mal feita se faz duas vezes”

(Antonio Claudio)

RESUMO

Este trabalho compara os resultados de simulações computadorizadas feitas no programa SolidWorks Simulation com ensaios mecânicos reais em quadros de bicicleta da liga Al 6061. Para tanto, é apresentada uma retrospectiva histórica da bicicleta e seu atual processo de fabricação. Introduce-se o método dos elementos finitos, os critérios de avaliação de falhas em simulações e os principais ensaios mecânicos normativos aos quais se submetem quadros de bicicletas. Mostra-se também o processo de ensaios físicos e simulações. Quanto aos resultados, observou-se um excelente nível de precisão na identificação de pontos de concentração de esforços e de falha. No entanto, encontraram-se também significativas divergências de resultados dos testes de fadiga com a provável causa na definição dos parâmetros das curvas S-N e divergências das propriedades mecânicas do material.

PALAVRAS- CHAVE: SolidWorks. Método dos Elementos Finitos. Alumínio. Fadiga. Bicicleta.

ABSTRACT

This work compares the results of computer simulations made in the SolidWorks Simulation program with real mechanical tests on Al 6061 bicycle frames. For this purpose, a historical retrospective of the bicycle and its current manufacturing process is presented. We introduce the finite element method, the failure evaluation criteria in simulations and the main normative mechanical tests to which bicycle frames are submitted. It also shows the process of physical tests and simulations. Regarding the results, an excellent level of precision was observed in the identification of points of effort concentration and failure. However, significant divergences in fatigue test results were found with the probable cause in the definition of the parameters of the S-N curves and divergences of the mechanical properties of the material.

KEY WORDS: SolidWorks. Finite Element Method. Aluminum. Fatigue. Bicycle.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –	Karl von Drais (Litografia colorida da década de 1830)	17
Figura 2 –	Bicicleta de roda lta	18
Figura 3 –	Bicicleta de Estrada	19
Figura 4 –	Bicicleta de Downhill	20
Figura 5 –	Impact Pro modelo Final	23
Figura 6 –	Geometria Impact Pro	23
Figura 7 –	Anatomia de um quadro de carbono	24
Figura 8 –	Fluxograma de processo	25
Figura 9 –	Esquema de propagação de Falha	29
Figura 10 –	Curva S-N de alumínio 6061- T6	30
Figura 11 –	Tabela de valores S-n de alumínio 6061-T6	30
Figura 12 –	Esquema de aplicação de carga para ensaio estático	31
Figura 13 –	Detalhe do posicionamento do Sensor	32
Figura 14 –	Esquema de aplicação de carga para ensaio estático	33
Figura 15 –	Modelo montagem Final	37
Figura 16 –	Detalhe da malha gerada	39
Figura 17 –	Detalhe da geometria de fixação	40
Figura 18 –	Detalhe do ponto de aplicação de carga	40
Figura 19 –	Detalhe do ponto de máximo valor de tensão na compressão estática.	42
Figura 20 –	Plotagem da distribuição de deformações na compressão estática	43
Figura 21 –	Plotagem de deslocamentos em mm na compressão estática	43
Figura 22 –	Detalhe do ponto de máximo valor de tensão na compressão fadiga ..	44
Figura 23 –	Plotagem do deslocamento na compressão de fadiga	45
Figura 24 –	Detalhe em corte do ponto de máximo valor de tensão na tração de fadiga	45
Figura 25 –	Plotagem do deslocamento na tração de fadiga	46
Figura 26 –	Detalhe dos pontos de maior concentração de danos na simulação de fadiga	47
Figura 27 –	Representação do posicionamento dos sensores	47
Figura 28 –	Foto da montagem do sistema para teste	48
Figura 29 –	Gráfico de deformação do quadro 1	49
Figura 30 –	Gráfico de deformação do quadro 2	50
Figura 31 –	Gráfico de deformação do quadro 3	50

Figura 32 –	Gráfico de deformação do quadro 4	50
Figura 33 –	Gráfico de deformação do quadro 5	51
Figura 34 –	Gráfico de deformação do quadro 6	51
Figura 35 –	Gráfico comparativo dos quadros	51
Figura 36 –	Foto de falha do quadro 3	52
Figura 37 –	Foto de falha do quadro 4	52
Figura 38 –	Foto de falha do quadro 1	52
Figura 39 –	Foto de falha do quadro 5	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	–	Composição metalográfica Al 6061.....	21
Tabela 2	–	Comparativo de propriedades mecânicas.....	22
Tabela 3	–	Propriedades da malha gerada.....	38
Tabela 4	–	Tabela de forças resultantes nos pontos de fixação.....	40
Tabela 5	–	Tabela de detalhes de aplicação de carga da simulação numérica estático.....	41
Tabela 6	–	Tabela de detalhes de aplicação de carga da simulação numérica de fadiga	41
Tabela 7	–	Tabela de propriedades mecânicas aplicadas ao corpo	42
Tabela 8	–	Tabela de resultados da simulação numérica de carga estática	42
Tabela 9	–	Tabela de resultados da simulação numérica de compressão para fadiga	44
Tabela 10	–	Tabela de resultados da simulação numérica de tração para fadiga.....	45
Tabela 11	–	Tabela de propriedades da simulação numérica de fadiga.....	46
Tabela 12	–	Tabela de resultados da simulação numérica de fadiga	46
Tabela 13	–	Tabela de resultados dos testes experimentais de compressão estática	49
Tabela 14	–	Tabela comparativa de resultados encontrados nas simulações numéricas e testes experimentais.....	53

Sumário

1	Introdução	14
1.1	Problematização e hipótese	15
1.2	Delimitação do estudo	15
1.3	Objetivos.....	16
1.3.1	Objetivo geral	16
1.3.2	Objetivos específicos.....	16
1.4	Justificativa.....	16
2	Referenciais Teóricos	17
2.1	Historia da bicicleta.....	17
2.2	Tipos de Bicicletas	18
2.2.1	Bicicletas de Estrada (Road)	18
2.2.2	Bicicletas de montanha (Mountain Bikes).....	19
2.2.3	Bicicletas urbanas (cidade).....	20
2.3	Materiais	20
2.3.1	Propriedades Mecânicas do alumínio 6061	21
2.4	Quadros.....	22
2.4.1	Processo de fabricação dos quadros	24
2.5	Pontos de concentração de esforços	26
2.6	Método dos elementos finitos.....	26
2.7	Critério de von Misses.....	27
2.8	SolidWorks e SolidWorks Simulation.....	28
2.9	Fatiga	28
2.9.1	Curvas S-N	29
2.10	Métodos de teste experimentais dos quadros	30
2.10.1	Teste de compressão estático	31
2.10.2	Testes de fadiga	32
2.11	Sensores LVDT	34
3	Metodologia.....	35
4	Modelagem computadorizada.....	37
4.1	Criação dos modelos.....	37
4.2	Geração de malha	37
4.3	Geometrias fixas e aplicação de cargas	39
4.4	Simulação numérica de compressão estático.....	41
4.5	Simulação numérica de fadiga.....	43

4.6	Testes Experimentais	47
4.7	Resultados dos testes experimentais de compressão estático	48
4.8	Resultados dos testes experimentais de fadiga	49
5	Comparação e análise dos resultados.....	53
6	Conclusão.....	55
7	Sugestões para trabalhos futuros.....	56
8	Referências.....	57

1 Introdução

De acordo com a ABRACICLO (Associação Brasileira dos Fabricantes de Motocicletas, Ciclomotores, Motonetas, Bicicletas e Similares) ^[1], a frota brasileira de bicicleta é de mais de 7 milhões e tem uma produção anual de 2,5 milhões de unidades, e apresenta tendências de crescimento para os próximos ano, isso graças ao novo cenário mundial onde diversos países começam a seguir as tendências de nações desenvolvidos como Alemanha, Dinamarca e Holanda, já que o ciclismo pode ser considerado o modelo de transporte urbano mais sustentável para médias e longas distâncias^[2], e apresenta fortes tendências de crescimento em todas as suas modalidades. Com isso, a utilização de materiais confiáveis junto com o desenvolvimento de produtos de melhor qualidade e preço acessível se torna de extrema relevância.

Na busca pelo desenvolvimento de estruturas mais leves e mais resistentes, que implicam na utilização de menos materiais e, portanto, custos relativamente menores, o Método dos Elementos Finitos (MEF) se destaca pelo seu rápido avanço devido à crescente capacidade de processamento dos computadores aplicados a análise de mecânica estrutural e contínua ^[3]. Esse método parte de uma premissa natural onde problemas complexos são subdivididos em unidades menores e mais simples, cujos comportamentos são totalmente conhecidos. Com esta divisão o estudo de cada componentese torna possível e mais simples onde, conhecido o comportamento de cada um desses elementos, se reúne cada um destes resultados para se conhecer a solução do todo.

Tal método, para problemas de complexidades crescentes, gera também o aumento da quantidade de elementos a serem analisados ou demandam a simplificação através da substituição por analogia de porções reais do problema por elementos simplificados. Tais substituições, como citado em ZIENKIEWICZ^[3] e demonstrado por MC HENRY^[4], HRENIKOFF^[5] e NEWMARK^[6] na década de 1940, podem fornecer soluções satisfatórias para problemas complexos. Além da possibilidade de simplificação, com o advento da computação, a realização de cálculos em grandes quantidades de elementos que interagem entre si seguindo regras e propriedades bem definida, e a solução nada mais é do que a interação entre cada um dos elementos criados.

Nesse contexto, a aplicação de tal método na indústria de quadros bicicletas, se estende a praticamente qualquer projeto que vise criar estruturas mais fortes e mais leves com desempenhos melhores uma vez que, em se tratando de bicicletas voltadas para o esporte como as mountainbikes(MTB) bicicletas de estrada e de triátlon, a resistência, desempenho e leveza dos conjuntos ganham uma importância fundamental para o consumidor final, sendo inclusive alvo de análise e item de decisão entre modelos diferentes.

Para os engenheiros, o MEF e a utilização de programas de computador para simulações computadorizadas, representa uma grande redução de tempo e investimentos necessários com protótipos ao se identificar pontos fracos no projeto (normalmente de difícil detecção) antes mesmo da construção do primeiro protótipo. Numa indústria de inovação rápida como a de bicicletas com finalidade desportiva, onde novos modelos e tecnologias são apresentados todos os anos, a possibilidade de utilização de tais

soluções represente um aumento expressivo na qualidade e velocidade do desenvolvimento de novos quadros.

Apesar da crescente utilização do método, para a comprovação dos resultados realiza-se sempre o teste físico em modelos reais, pois a geração dos modelos e as simulações feitas no computador, muitas vezes apresentam pequenas variações oriundas de aproximações e distorções entre o modelo computadorizado e o protótipo real.

Nesse contexto, o presente trabalho busca a análise e comparação dos resultados obtidos com a utilização de programas de modelagem 3D e o método dos elementos finitos para simulações estáticas e de fadiga, com os resultados de testes em modelos reais.

É importante também ressaltar que todos os testes realizados estarão, por questões de padronização, embasados nas normas técnicas de requisitos mínimos referentes a construção de quadros de alumínio. Utilizaremos tanto normas Brasileiras quanto padrões internacionais.

1.1 Problematização e hipótese

Devida a extensa utilização e a importância do método dos elementos finitos nos mais diversos setores, uma extensa literatura pode ser encontrada no tema e a mesma se encontra ainda em expansão. No ramo da indústria de bicicletas, a busca por soluções que promovam a melhoria da qualidade do produto final juntamente com a diminuição dos custos, principalmente em se tratando de quadros de alumínio, é de suma importância para permanecer competitivo.

Dito isso a utilização dos programas de elementos finitos permitem a diminuição da quantidade de material utilizada no quadro, melhoria da qualidade e durabilidade dos mesmos e a diminuição de custos. Nisso é importante comprovar a eficácia de tais programas comparando-os a testes reais. O presente estudo parte do pressuposto de que as aproximações feitas por tais programas são suficientemente confiáveis para a conferência preliminar de projetos e visa a comparação do método com ensaios reais bem com o levantamento a interpretação dos resultados.

1.2 Delimitação do estudo

O presente estudo se limitará a elaboração, análise e comparação dos modelos computacionais com os ensaios mecânicos reais.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Como objetivo geral, o presente trabalho visa a comparação entre simulações feitas em computador com testes reais de esforços em quadros de bicicleta.

1.3.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- Modelagem em computador dos quadros de bicicletas selecionados;
- Simulação de testes de compressão estáticos nos modelos computadorizados;
- Simulação de testes de fadiga nos modelos computadorizados;
- Definição dos parâmetros de limite de resistência nos modelos computadorizados;
- Realização de testes físicos em protótipos;
- Comparação dos resultados;

1.4 Justificativa

O presente trabalho se mostra relevante por se tratar de um estudo que mostra diretamente a importância e precisão da utilização de métodos de análises computadorizadas em projetos ao comparar os resultados virtuais com resultados reais feitos em produtos de linha. Este estudo se estende a toda indústria que utiliza softwares de modelagem numérica mostrando qual o nível de precisão que se pode ser obtido com um destes programas. A simulação prévia de cargas e esforços em componentes permite a diminuição de falhas e problemas na manufatura de protótipos e peças iniciais, podendo-se identificar estes pontos antes mesmo da construção de um modelo físico, o que acarreta reduções de custo e redução de perdas de tempo com protótipos falhos e defeituosos.

Além disso, o presente trabalho também serviu como demonstrativo inicial e apresentação da metodologia na empresa Sense Industria de Bicicletas da Amazônia Presente no pólo industrial de Manaus que está diretamente ligada a projetos e manufatura de quadros de bicicletas de alumínio, sendo este um importante passo para a melhoria no desenvolvimento interno dos projetos feitos nesta empresa. Todo o maquinário e material de análise foram disponibilizados sem custos pela empresa. O estudo em si foi liberado para divulgação sem quaisquer restrições de apresentação de dados obtidos.

2 Referenciais Teóricos

2.1 Historia da bicicleta

De acordo com Wilson 2004[7] a primeira invenção de um veículo de propulsão humana que pode ser diretamente ligado as bicicletas modernas, é atribuído ao barão Karl Friedrich Drais von Sauerbronn. Tal maquina foi a público pela primeira vez nos jornais alemães de 1817, Reino Unido em 1818 e Estados Unidos em 1819. Tal maquina, não possuía um sistema de propulsão propriamente dito, sendo esta movida diretamente pelas pernas do usuário em contato com o chão como pode ser observado na pintura abaixo.



Imagem 1: Karl von Drais (Litografia colorida da década de 1830)

Fonte: Kolorierte Lithographie von Hartenstein , por volta de 1820^[8]

Após Drais, o segundo grande avanço no desenvolvimento das bicicletas, por volta de 1860, foi a introdução de pedais que proporcionaram uma nova e mais eficiente maneira de propulsionar a aparato. Apesar disso ainda ser objeto de disputas e contradições entre historiadores, por diversas vezes é atribuído a Pierre Michauxo[9] credito da implantação em grande escala desta melhoria. Há também patentes registradas em nome de Pierre Lallement[10]. Por não se tratar do foco de estudo deste trabalho, não entraremos aqui em maiores detalhes. Tais mecanismos foram inseridos diretamente na roda dianteira de maneira a realizar a transferência direta de forças do ciclista para a roda. Com isso, para maiores velocidades eram necessárias rodas maiores. Após a evolução do conceito, e da inserção dos raios para tencionar as rodas e permitir que deformassem em terrenos acidentados ou que colapsassem com o próprio peso surgiram às icônicas bicicletas de rodas altas.



Imagem 2: Bicicleta de roda alta, 1896

Fonte: WILSON, David G. Bicycle science. 2004.^[7]

O próximo grande passo do mundo do ciclismo foi a introdução das câmaras de ar para os pneus numa busca por alternativas de bicicletas mais seguras feita primeiramente por John Boyd Dunlop^[7]. Porém a invenção do veterinário apresentava o inconveniente de ter uma manutenção exigente e constante. Em resposta a isso Edouard e Michelin lançaram, em 1891, o primeiro pneu desmontável. A partir daí até a década de 1970, diversas foram as invenções que melhoraram o desempenho e a segurança das bicicletas, aumentando a velocidade e contribuindo com a segurança da utilização da mesma. Um grande exemplo é a roda livre que permitia ao ciclista parar de pedalar em descidas e trajetos com vento e inclinação favoráveis.

2.2 Tipos de Bicicletas

Atualmente temos a especialização da bicicleta. Diferentes modelos e geometrias que priorizam diferentes aspectos da locomoção, transporte ou conforto, ramificaram os tipos de bicicletas, e estas podem ser classificadas de diversas maneiras. Por questões de praticidade iremos diferenciar aqui somente alguns tipos de bicicletas quanto ao tipo de terreno e as atividades para as quais estas são recomendadas e não abordaremos bicicletas elétricas. Como guia para esta classificação utilizamos as denominações comerciais presentes em sites de grandes marcas de bicicletas^{[11][12][13]}.

2.2.1 Bicicletas de Estrada (Road)

Bicicletas de estrada são bicicletas, como o nome sugere, predominantemente para terrenos pavimentados e mais regulares, com algumas exceções. Em geral não possuem amortecedores e são projetadas normalmente para maiores velocidades sem grandes impactos. São também os tipos de bicicletas utilizadas em competições famosas como Le tour de France, Giro de Itália, etc. Alguns exemplos de subclassificação são:

- Triátlon;
- Endurance;
- Cyclocross;
- Touring;
- Gravel;
- Racing;



Imagem 3: Bicicleta de Estrada,

Fonte: A field guide to bicycles.^[12]

2.2.2 Bicicletas de montanha (Mountain Bikes)

Bicicletas voltadas para o uso em trilhas e terrenos acidentados. Proporcionam experiência em terrenos basicamente inacessíveis a outros tipos de bicicletas, lidando com grandes impactos através de sistemas de amortecedores. Geralmente de pneus largos permitem um maior conforto. Em contraste com as bicicletas tipo estrada estas não desenvolvem velocidades tão altas em terrenos lisos devido a relações de marchas mais leves e a geometria e postura menos aerodinâmicas. Estas também podem ser subdivididas em, por exemplo:

- Hardtail;
- Full Suspension;
- Trail;
- Enduro;
- Downhill;
- Fat;



Imagem 4: Bicicleta de Downhill,

Fonte: A field guide to bicycles.^[12]

2.2.3 Bicicletas urbanas (cidade)

São bicicletas que prezam pelo conforto e mobilidade, utilizadas especialmente dentro de perímetros urbanos como forma de locomoção, lazer e transporte. Podem apresentar ainda características de outros tipos de bicicletas, e acessórios de segurança como retrovisores, aparatos sonoros como bobinas e faróis. É, junto com as demais bicicletas, considerado o modelo de transporte mais sustentável, e em diversos países como China e Holanda tem importância fundamental na funcionalidade e cultura desses países. Algumas variações desse tipo de bicicletas:

- Comutação
- Híbrida
- Fixa
- Conforto
- Carga
- Vintage

2.3 Materiais

Atualmente, diversos tipos de materiais são utilizados na manufatura de quadros de bicicletas. Estes variam desde o aço até a fibra de carbono. Num contexto histórico, a busca por novos materiais esteve geralmente atrelada à busca por leveza, resistência e custo produtivo para a construção de bicicletas mais confiáveis, baratas e leves.

Dentre todas as possibilidades, uma das mais exploradas é o alumínio. De acordo com Shakhashiri (2007) ^[14], este é o metal não ferroso mais consumido no mundo. Constituindo aproximadamente 8% da massa da crosta terrestre, sendo a sua principal aplicação quase sempre em ligas metálicas. Isso ocorre devido à melhoria nas propriedades mecânicas alcançadas ao se utilizar elementos de liga.

Aprofundaremos-nos aqui nas propriedades do alumínio, em específico da liga 6061, por se tratar do material alvo deste estudo.

2.3.1 Propriedades Mecânicas do alumínio 6061

As propriedades únicas do alumínio de força, alta resistência a corrosão e baixa relação entre peso e resistência mecânica, tornam este material um de importância fundamental nos mais diversos campos de atuação como a aeronáutica, construção civil, transmissão de eletricidade, etc.^[15]

Para cada aplicação distinta, o alumínio é utilizado em ligas diferentes, pois o alumínio puro em si não possui propriedades mecânicas tão satisfatórias quanto suas versões não puras. A Aluminium Association utiliza um sistema de separação das diferentes ligas de alumínio em famílias, identificando cada liga com 4 dígitos, onde o primeiro dígito é relacionado ao elemento de liga principal utilizado naquela família da seguinte maneira^[16]:

- 1xxx: alumínio com 99,99% de pureza. Família de controle;
- 2xxx: ligas em que o cobre é o principal elemento de liga;
- 3xxx: ligas em que o manganês é o principal elemento de liga;
- 4xxx: ligas em que o silício é o principal elemento de liga;
- 5xxx: ligas em que o magnésio é o principal elemento de liga;
- 6xxx: ligas em que o magnésio e o silício são os principais elementos de liga;
- 7xxx: ligas em que o zinco é o principal elemento de liga;
- 8xxx: ligas que caracterizam composições diversas;
- 9xxx: reservado para uso futuro;

Tendo esta terminologia esclarecida, a liga alvo deste estudo se trata de uma liga de alumínio magnésio e silício (6061) com a seguinte composição tabelada na The Aluminum Association :

Tabela 1 – Composição metalografica Al 6061

Ano	1954	Liga	6061												
%Si	%Fe	%Cu	%Mn	%Mg	%Cr	%Ni	%Zn	%Ti	%Ag	%B	%Bi	%Ga	%Li	%Pb	%Zn
0.4-0.8	0.7	0.15-0.4	0.15	0.8-1.2	0.04-0.35	-	0.25	0.15	-	-	-	-	-	0.05	0.15

Fonte: Própria, valores de Aluminum Association^[18]

Sendo que esta possui as seguintes propriedades mecânicas:

Tabela 2 – Comparativo de propriedades mecânicas

Comparativo de propriedades mecânicas		
Propriedade	6061- O (cru)	6061 - T6 (tratado)
Dureza Brinell	33	93
Modulo de elasticidade GPa	69	69
Alongamento no ponto de quebra %	20	10
Resistencia a fadiga Mpa	61	96
Coefficiente de Poisson	0.33	0.33
Modulo de cisalhamento GPa	26	26
Tensão de Cisalhamento Gpa	84	210

Fonte: Própria, valores de MONDOLFO^[17]

Os quadros objetos deste estudo serão todos tratados termicamente como veremos no processo de fabricação dos quadros.

2.4 Quadros

Os quadros selecionados para este estudo são quadros de alumínio de liga 6061 produzidos no pólo Industrial de Manaus, sendo estes quadros destinados a mountain bikes. Os modelos do tipo Mountain Bikes apresentam as maiores solicitações reais em campo e também os maiores requisitos mínimos de resistência de acordo com as normas brasileiras e ISO.

O modelo em questão é o Impact Pro 2019 tamanho M. Este foi escolhido pela possibilidade da utilização de 6 quadros fornecidos pela empresa Sense Industria de Bicicletas da Amazônia. Tais quadros foram retirados diretamente da linha de produção não havendo quaisquer divergências entre os produtos de mercado e os quadros utilizados para este estudo.



Imagem 5: Impact Pro modelo final ,

Fonte: IMPACT PRO [27]

A geometria do produto em questão se encontra de acordo com os projetos que foram utilizados na etapa da modelagem tridimensional dos quadros e pode ser observada resumidamente a seguir:

	TAMANHOS			
	S 380 mm	M 420 mm	L 470 mm	XL 520 mm
STACK	600	600	620	620
REACH	373	414.27	431.76	448.5
A TOP TUBE LENGHT	550.73	592	615	638
B HEAD TUBE LENGHT	100	100	120	120
C SEAT TUBE ANGLE	73.5	73.5	73.5	73
D HEAD TUBE ANGLE	69.3	69.3	69.3	69.3
E BB DROP	58	58	58	58
F CHAIN STAY LENGHT	440	440	440	440
G WHEEL BASE	1088.49	1104.04	1134.28	1151
H FRONT CENTER	634.99	670.4	700.52	717.39
I FORK LENGHT	498.7	498.7	498.7	498.7
J FORK OFFSET	51	51	51	51
K SETBACK	177.73	177.73	183.24	189.44

Imagem 6: Geometria IMPACT PRO,

Fonte: IMPACT PRO [27]

Vale ressaltar aqui que este modelo é considerado semi profissional já utilizado para competições pelo usuário. Apesar disso o processo de fabricação não apresenta nenhuma variação relevante em relação a modelos inferiores. O grande diferencial está no projeto dos perfis dos tubos utilizados aliados a geometria mais agressiva dos quadros posicionando o ciclista em um perfil mais baixo. Tais fatores e perfis de usuário fazem com que esta bicicleta esteja entre os quadros da empresa que mais sofrem solicitações mecânicas durante seu uso.

2.4.1 Processo de fabricação dos quadros

O fluxo de processo de fabricação dos quadros em questão é similar a maioria dos quadros de alumínio ao redor do mundo. Os quadros em si são formados por 8 partes principais, sendo elas:

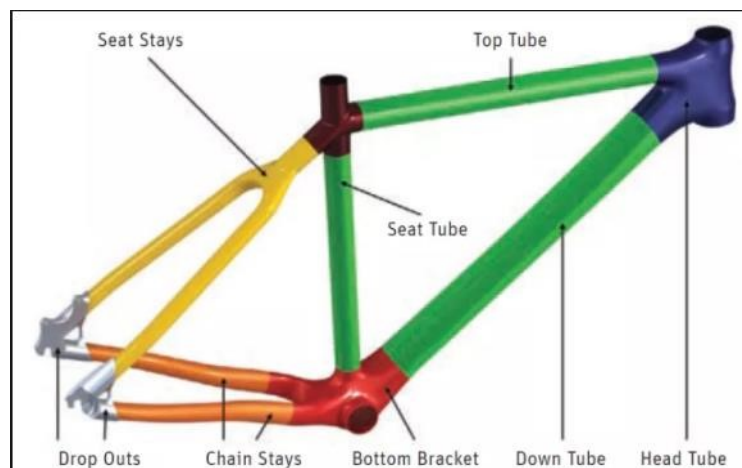


Imagem 7: Anatomia de um quadro de carbono,

Fonte: A field guide to bicycles.^[12]

- Head tube (HT) ou cabeçote;
- Top Tube (TT) tubo superior;
- Down Tube (DT) tubo inferior;
- Bottom Bracket central (BB) caixa de movimento central;
- Chain Stays (CS) rabeira inferior;
- Seat Stays (SS) rabeira superior;
- Drop outs ou gancheiras;

Todas estas partes chegam como materiais já hidroformados.

Apesar do formato externo final já vir pronto, todos os tubos necessitam de algum tipo de processamento para que se realizem os devidos encaixes para a solda, uma vez que os mesmos tubos servem para tamanhos diferentes de bicicletas e podem ser trabalhados em diferentes combinações. Portanto, são realizados os cortes em moldes de cortes, serras, e furadeiras. Alguns tubos necessitam ainda de processos de usinagem em fresas para que estejam prontos para a solda.

Após o preparo dos tubos, estão terão guias de cabos brazados e serão lavados em preparo para a solda. Cada pedaço é então posicionado em uma mesa de ponteamento e as peças são unidas em uma geometria pré-definida. Após o ponteamento, os quadros tem sua geometria checada e são então definitivamente soldados.

Feita a solda, os quadros precisam passar por um tratamento térmico para se reduzir os efeitos de perda de propriedades mecânicas que ocorrem durante o aquecimento na soldagem. O processo em questão é denominado T6.

T6 refere-se ao tratamento térmico dado as ligas de alumínio termicamente tratáveis que passam pelo processo de solubilização e depois são envelhecidas artificialmente. Esta designação é aplicável a produtos que não são trabalhados a frio após a solubilização e nos quais as propriedades mecânicas e/ou de estabilidade dimensional foram melhoradas após a precipitação e que, de acordo com Möller (2008)^[19], é o tratamento que produz as maiores resistências (durezas) em ligas de alumínio tratadas.

Foi observado que o tratamento térmico não está inteiramente de acordo com a norma ABNT NBR 12315 referente a Ligas de alumínio tratáveis, tendo seu resultado final checado através da utilização de um durômetro tipo webster quadro a quadro. Os valores de dureza encontrados são levemente abaixo do especificado na tabela de propriedades da liga de alumínio em questão, mas este fator não será foco deste estudo pela impossibilidade presente de análises metalográficas e de ensaios de tração e compressão.

Terminado o processo de tratamento térmico, os quadros recebem acabamentos finos, como as roscas do BB, Pintura e adesivagem, e seguem para montagem. Tal processo pode ser simplificado do fluxograma abaixo:

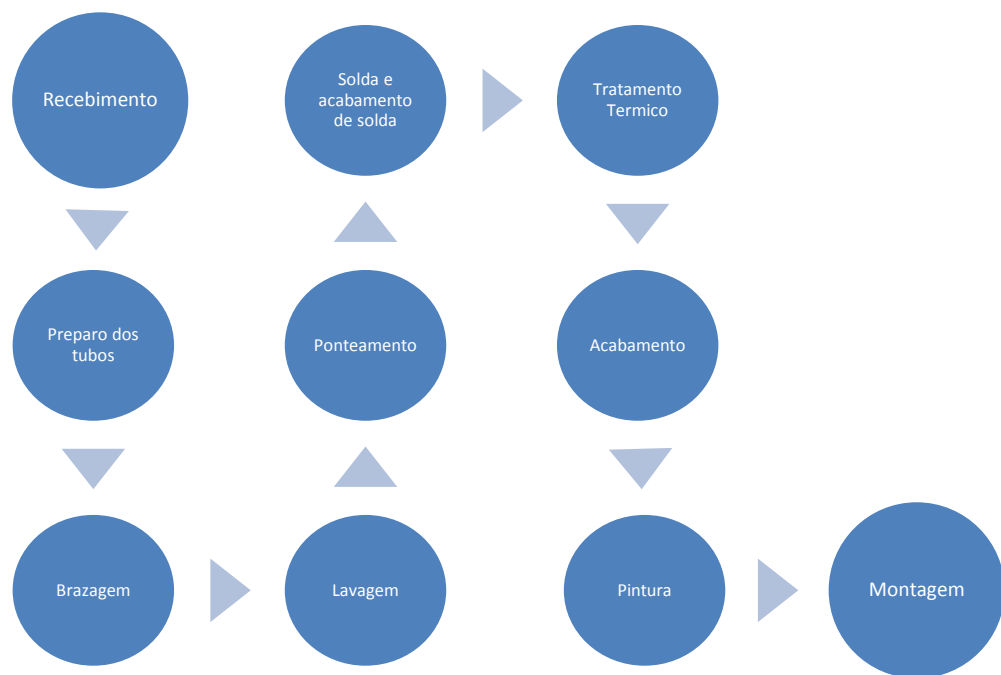


Imagem 8:FLUXOGRAMA DE PROCESSO

Fonte: Própria

2.5 Pontos de concentração de esforços

De acordo com a análise feita por Dwyer ^[20], os principais pontos de atenção na análise de concentração de esforços nos quadros, devem ser os pontos de junção do cabeçote, do BB e do tubo do selim com os tubos da rabeira. Tal análise foi baseada nos principais recalls realizados por grandes fabricantes de bicicletas.

Um dos prováveis motivos para a concentração de problemas nesses locais, é o fato de que muitas vezes além das concentrações de esforços, os mesmos tendem a ser pontos onde o material é termicamente afetado durante o processo de soldagem do quadro.

Estas observações se confirmam ao se observar a lista de chamados do SAC (serviço de atendimento ao cliente) da empresa em questão, onde se pode observar que todas as falhas mecânicas em quadros se deram próximos aos pontos comentados por Dwyer.

Portanto, espera-se observar durante as análises e ensaios mecânicos, falha dos componentes em regiões próximas aos pontos de união de componentes, em especial no DT, pelo tipo de carregamento ao qual se submeterão os quadros.

2.6 Método dos elementos finitos

Como já mencionado anteriormente, o MEF juntamente com as ferramentas CAD (computer aided drawing, ou desenho assistido por computador) e CAE (computer aided engineering, ou engenharia assistida por computador), são ferramentas indispensáveis a engenheiros e empresas que buscam inovação e agilidade no projeto de novos produtos.

Tal método parte de um princípio muito conhecido na engenharia que é a separação de problemas complexos em pequenos problemas cujos comportamentos e interações são totalmente conhecidos. Dito isso, o método dos elementos finitos parte do princípio da resolução de problemas discretos, ou seja, um problema onde o número de elementos é finito e tais elementos são bem definidos.

Com a crescente capacidade de processamento dos computadores, a resolução de problemas contínuos com grandes quantidades de elementos se tornou rápida e eficiente permitindo a grande expansão da aplicação do método^[3], havendo diferentes abordagens quanto a definição de quais os elementos a serem levados em conta na resolução destes problemas. Tal definição pode ser chamada de discretização e sempre envolve aproximações que buscam se aproximar ao Máximo da realidade.

Apesar do estado de sofisticação dos softwares, programas e solvers envolvidos na aplicação deste método, os princípios de resolução permanecem os mesmos e podem ser divididos em algumas etapas básicas:

- Discretização – Como mencionado anteriormente, a discretização tem por finalidade tornar problemas contínuos em problemas com um número

finito e bem definido de elementos. No caso do presente trabalho essa etapa se encontra na geração dos modelos tridimensionais e na sua consecutiva divisão em elementos pontuais na etapa de geração de malha dos corpos sólidos. Nesta etapa se divide corpos contínuos em nós, tendo suas posições demarcadas. Nos programas que realizam esse tipo de procedimento essa etapa é muito evidente durante a geração das malhas que representaram os corpos estudados;

- Aplicação de carregamentos e restrições – Aplica-se aqui as cargas pontuais e distribuídas bem como efeitos térmicos e outras relações que os corpos possam ter entre si como superfícies deslizantes ou rolamentos, transferências térmicas e etc. Nessa etapa também se define os pontos e geometrias fixas a serem considerados no estudo.
- Resolução – Como sugere, nessa etapa é calculado as forças de reação e deslocamentos bem como as tensões e cargas sofridas por cada um dos elementos. Tais cálculos são feitos através do estabelecimento das matrizes de rigidez e resolução das mesmas.

Não cabe no presente trabalho a explanação dos cálculos envolvidos no MEF por não se tratar do objeto de estudo em questão. Não está sendo questionado aqui os métodos e os cálculos em si, mas sim a comparação entre os dados previstos nas simulações e o comportamento real dos corpos mediante testes similares

2.7 Critério de von Mises

A análise dos resultados obtidos através das simulações computadorizadas parte da adoção de um critério a partir do qual se define o ponto de falha do material estudado. No caso do presente trabalho se adotou o Critério de Von Mises ou máxima energia de distorção

De acordo com KACHANOV ^[28], a teoria da máxima energia de distorção, tem como característica principal que as energias de distorção ou esforços mecânicos presentes nos corpos estudados são utilizadas para predizer se está ocorrendo o escoamento (ou deformação plástica) do material ou não.

Este critério presume, de maneira resumida, que o escoamento ocorre quanto a densidade de energia de deformação multiaxial em algum ponto do corpo é igual a energia de deformação no ponto de escoamento do material sob uma tensão uniaxial.

Utilizando tais conceitos o software utilizado neste estudo calcula exatamente a energia de deformação multiaxial presente em cada ponto do corpo estudado e apresenta os resultados de maneira a expor os pontos de maiores concentrações deste tipo de tensões sendo estes pontos os mais prováveis a sofrerem falhas mecânicas.

Dito isso o software utilizado neste estudo calcula a energia de deformação em cada ponto do corpo e apresenta os resultados gráfica e numericamente de forma a mostrar quais os pontos que apresentam maiores concentrações destas energias sendo estes pontos os mais prováveis de sofrerem falhas mecânicas.

2.8 SolidWorks e SolidWorks Simulation

SolidWorks é um programa de CAD, CAE elaborado pela empresa Dassault Systèmes lançado inicialmente em 1995. Esta plataforma CAD está entre os mais populares no mundo atualmente devido a sua facilidade de uso e interface intuitiva para desenhos tridimensionais.

Em contrapartida a parte de análise de projetos e simulações, o SolidWorks Simulation, fica atrás de outros grandes nomes como NX Nastran e Ansys em popularidade muito devido ao suposto não aprofundamento do software em problemas não lineares ou em complexas análises de vibração e interações térmicas. Esse, no entanto, não é o caso deste estudo onde buscou-se a verificação da capacidade de análise do software em questão.

Em termos de funcionalidade o Solidworks se baseia em recursos parametrizados (comprimento, profundidades, larguras, etc) para a modelagem de Sólidos, sendo esta abordagem desenvolvida inicialmente pela PTC (Creo/Pro-Engineer).

O SolidWorks Simulation utiliza-se das figuras parametrizadas gerados pelo SolidWorks juntamente como o MEF para realizar as análises e estudos nos corpos representados como já explanado anteriormente.

2.9 Fatiga

De acordo com CHAWLA ^[29], fadiga é o processo de degradação das propriedades mecânicas do material que resultam ultimamente na falha de um corpo submetido a carga cíclicas sendo comumente observado em corpos, componentes ou partes que se movem.

As cargas definidas por CHAWLA não se restringem somente a cargas mecânicas, mas podem estar associados também a ciclos de estresse térmico dos componentes. Ele estima ainda que cerca de 90% de todas as falhas mecânicas de corpos ou componentes metálicos que sofrem movimento podem ser atribuídos a fadiga.

Falhas por fadiga são em geral facilmente identificáveis sob análise microscópica podendo se identificar a zona de início, a propagação da falha e a ruptura do material quando este atinge comprimentos críticos como pode ser observado na ilustração abaixo.

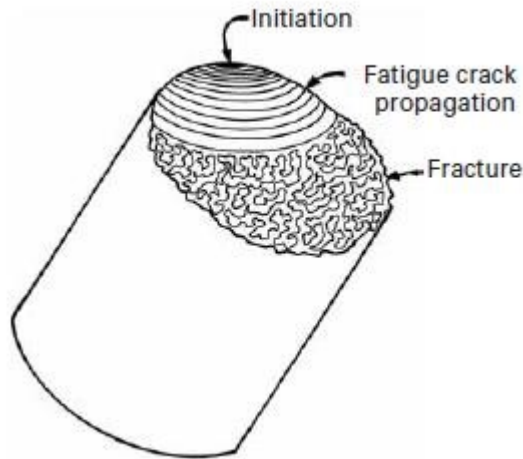


Imagem 9:ESQUEMA DE PROPAGAÇÃO DE FALHA

Fonte: CHAWLA 1999^[29]

Este tipo de falha ocorre normalmente sob níveis de estresse bem menores do que o observado em falhas de caráter de carregamento monotônico.

2.9.1 Curvas S-N

Uma das maneiras de abordar o estudo deste tipo de falha é através do método de análise de tensão e vida dos componentes. Neste método se relaciona a amplitude de tensão cíclica com o número de ciclos necessários até a falha, gerando-se uma curva conhecida como curva S-N onde S representa a tensão e N o número de ciclos.

Tais curvas são distintas de material para material e sofrem grandes variações a depender dos processos aos quais os corpos são submetidos. Diversos tratamentos térmicos como o observado em quadro de bicicletas de alumínio, visam o incremento das propriedades mecânicas melhorando assim, dentre outros fatores, a resistência a fadiga do alumínio.

Resistência a fadiga refere-se a capacidade do material de resistir a cargas cíclicas, porém não convém explicar aqui as descrições matemáticas de tais processos. Tais informações podem ser facilmente encontradas na obra de CHAWLA.

Para o presente estudo é de extrema relevância quais os valores adotados que descrevem a curva S-N do material do qual os quadros são feitos, ou seja, alumínio Al 6061 tratado termicamente pelo processo T6. Como referência, utilizaremos as curvas propostas por YAHR ^[31] e já utilizadas por BAI ^[30] podendo ser observadas abaixo:

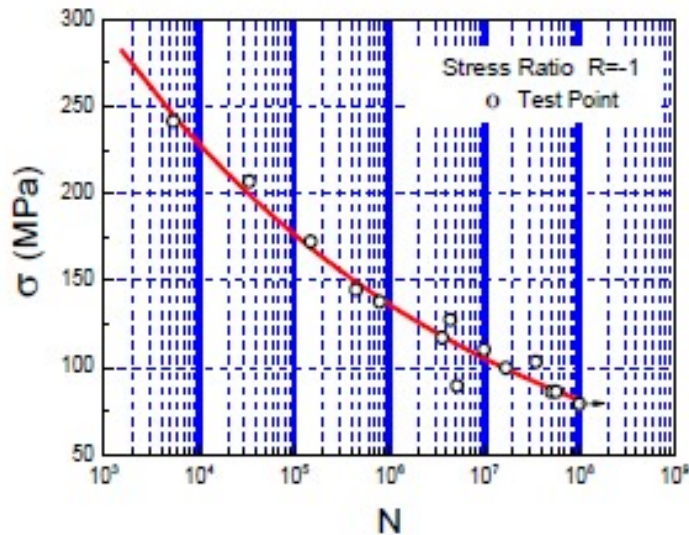


Imagem 10: Curva SN de alumínio 6061-T6

Fonte: BAI 2014^[30]

Specimen No.	Stress amplitude	Cycles of loading	Cycles of system	Error	Fatigue life	Remark
1	200 mPa	63,000	60,500	4%	33,700	Fracture
2	180 mPa	210,000	202,000	3.8%	79,100	Fracture
3	150 mPa	400,000	389,600	2.6%	432,000	Fracture
4	130 mPa	918,000	888,300	3.2%	1,550,000	Fracture
5	120 mPa	4,200,000	4,051,100	3.5%	3,100,000	Not broken

Imagem 11: Tabela de valores S-N de alumínio 6061-T6

Fonte: BAI 2014^[30]

Tais informações tiveram de ser buscadas na literatura, pois a biblioteca de materiais do programa de simulações não apresenta valores predefinidos para a liga de alumínio tratada neste estudo sendo estes valores inseridos no programa para a realização do estudo de fadiga.

2.10 Métodos de teste experimentais dos quadros

Ensaio mecânicos têm por finalidade avaliar as propriedades de um produto bem como sua segurança e durabilidade. Esta avaliação é feita a partir da análise dos dados coletados nos teste feitos no produto, podendo estes dados variar de simples

análises de resistência a uma determinada carga ou impacto até análises mais complexas como curvas de deformação e análises de microestruturas.

A normatização destes ensaios e critérios de aprovação permite que diferentes pessoas e laboratórios avaliem produtos similares de acordo com os mesmos parâmetros e critérios de avaliação. Dito isso, diferentes órgãos elaboram normas técnicas e requisitos mínimos de segurança para produtos levando em consideração fatores regionais e/ou exigências governamentais.

Isto não é diferente para quadros de bicicletas, visto que falhas mecânicas podem levar a acidentes graves. Diferentes normas estabelecem parâmetros mínimos de segurança como a própria ABNT (Associação Brasileira de Normas e Técnicas), a ISO (International Organization for Standardization ou Organização Internacional de Normalização) e a ASTM (American Society for Testing and Materials ou Sociedade Americana para Testes e Materiais).

No caso de quadros de bicicletas os 3 órgãos acima citados se assemelham em termos de requisitos mínimos sendo a mais exigente delas a norma ISO 4210 de 2015. Na empresa onde este estudo foi realizado, se utiliza esta norma como base para estabelecimento dos critérios mínimos internos de aceitação de resistência dos quadros, isso por que a normas brasileiras, em específico a NBR 14714 de 2013, não prevê ensaios de resistência a fadiga, sendo este um dos principais motivos de falhas mecânicas em bicicletas.

Internamente na empresa em questão se fazem 2 tipos de ensaios:

- Teste de compressão estático;
- Teste de fadiga;

Sendo o primeiro feito apenas para verificação da rigidez do quadro não estando este baseado em normas técnicas

2.10.1 Teste de compressão estático

O teste de compressão estático consiste na aplicação de uma carga de compressão de 1824N no quadro de acordo com o esquema abaixo:



Imagem 12:Esquema de aplicação de carga para ensaio estático

Fonte: BAI 2014^[30]

Durante este ensaio é medido o deslocamento do eixo deslizante onde é aplicada a força através de um sensor eletropneumático, tendo os resultados de deslocamento gravados para posterior análise.

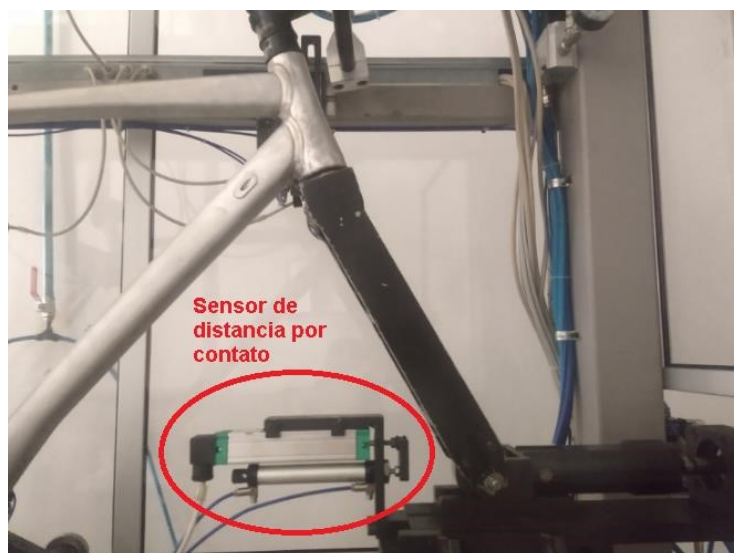


Imagem 13: Detalhe do posicionamento do sensor

Fonte: Própria

A aquisição de dados ocorre através do contato do sensor com o eixo que mede a posição inicial do eixo deslizante anterior a aplicação de carga e a compara com a posição final, gerando assim um valor em milímetros de deslocamento.

A carga utilizada em questão é a carga limite de operação do atuador pneumático utilizado uma vez que a máquina é projetada para testes de fadiga e possui apenas o recurso de análise estático como um recurso extra, não permitindo a utilização de cargas maiores para não se danificar o atuador pneumático. Foi salientada durante o estudo, a necessidade de aquisição de uma máquina específica para ensaios de tração e compressão a fim de obter dados como os limites de resistência dos quadros a estes tipos de carregamentos. O projeto de aquisição desta máquina foi orçado e previsto para aquisição em 2019.

2.10.2 Testes de fadiga

Diferente do teste de compressão estático, o teste de fadiga segue as diretrizes estabelecidas na norma ISO 4210-6: 2013^[32]. Nesta norma, se encontra diversos métodos de testes de ensaios destrutivos de quadros de bicicletas bem como os critérios mínimos de aceitação. Dentre eles temos 2 tipos de testes:

- Testes de impacto: subdividido em teste de impacto de massa em queda, e teste de impacto de quadro em queda;

- Testes de fadiga: subdividido em teste de forças de pedalada, teste de forças horizontais e teste de forças verticais;

Focaremos aqui nos testes de fadiga, em específico nos testes de fadiga de forças horizontais, que são o objeto de análise de estudo. Esta norma define de acordo com o quadro e a imagem abaixo as condições de ancoragem, as aplicações de forças nos quadros e o número mínimo de ciclos aos quais o quadro deve ser submetido sem apresentar falhas.

Table 4 — Forces and cycles on front fork dropouts

Bicycle type	City and trekking bicycles	Young adult bicycles	Mountain bicycles	Racing bicycles
Forward force, F_2 N	450	450	1 200	600
Rearward force, F_3 N	450	450	600	600
Test cycles, C_1	100 000	100 000	50 000	100 000



Imagem 14: Esquema de aplicação de carga para ensaio estático

Fonte: ISSO 4210-6 2015 p.8

Onde 1 representa um rolete de rolagem livre guiada e 2 representa um pivô rígido fixado no eixo traseiro da bicicleta.

Conforme observado na tabela, quadros do tipo Mountain Bikes devem ser submetidos a uma força de compressão $F_1=1200N$ e uma força de tração $F_2=600N$ por um mínimo de $C_1=50000$ ciclos. Porém, tal norma representa apenas um padrão mínimo de segurança para este tipo de produto. Internamente, para atender com segurança ao perfil de usuário dos produtos da marca Sense, se adotou este teste com as seguintes alterações:

- Carga $F_2=1200N$. Esta alteração se deu principalmente ao tipo de carregamento disponível no equipamento de testes que torna em qualquer operação $F_1=F_2$
- $C_1=150000$ ciclos no mínimo. Com um perfil de usuário mais exigente e um tempo de garantia de 3 anos em seus quadros se fez necessário aumentar o número de ciclos dos testes para garantir a vida útil dos quadros.

É importante ressaltar ainda que o garfo utilizado para os testes é um garfo de testes que segue os padrões definidos nessa mesma norma apresentando rigidez suficiente para ser considerado um corpo rígido nesse teste. O ponto de coleta de dados desse teste é o mesmo ponto utilizado no teste de compressão estático

2.11 Sensores LVDT

Os sensores utilizados na máquina que realiza os ensaios experimentais são sensores do tipo LVDT (linear variable displacement transducer/ ou transdutores lineares de deslocamento variável), que serve para a medição de deslocamento linear.

O funcionamento destes sensores é baseado em três bobinas e um núcleo cilíndrico de material ferromagnético que gera um sinal proporcional ao deslocamento do núcleo que entra em contato com o que se quer medir.

Todos os sensores deste tipo da máquina são calibrados pela empresa anualmente a fim de verificar a validade dos resultados obtidos, monitorando os desvios padrões apresentados pelo sensor e havendo a troca dos mesmo caso este desvios encontrem-se maior do que o permitido pelas normas da empresa. O sensor utilizado em questão apresenta um desvio de + 0,1 mm no valor de saída.

3 Metodologia

MÉTODO: Conforme Lakatos e Marconi, (2007, p. 44) “Método é o caminho pelo qual se chega a determinado resultado ainda que esse caminho não tenha sido fixado de antemão de modo refletido e deliberado”.

Adota-se no presente estudo o método indutivo, que para chegar ao conhecimento ou demonstração da verdade, a mesma parte de fatos particulares, comprovados, para chegar a uma conclusão genérica. Segundo o filósofo inglês Francis Bacon (1561-1626), responsável pela criação do método indutivo no século XVII, essa metodologia estaria dividida em quatro etapas: coleta de informações a partir da observação rigorosa da natureza; reunião, organização sistemática e racional dos dados recolhidos; formulação de hipóteses segundas a análise dos dados recolhidos e comprovação das hipóteses a partir de experimentações.

Coma finalidade de identificar e expor as diferenças entre as simulações e testes reais esse estudo ira estabelecer os critérios de comparação e os testes a serem realizados de forma lógica e coerente com a literatura, buscando comprovar os conhecimentos prévios.

TECNICAS: Conforme Andrade, (2006, p. 135) “as técnicas de pesquisa acham-se relacionadas com a coleta de dados, ou seja, a parte prática da pesquisa. ”

Conforme Andrade, (2006, p. 135) “Técnicas são conjuntos de normas usadas especificamente em cada área das ciências, podendo-se afirmar que a técnica é a instrumentação específica da coleta de dados. ”

Conforme Lakatos e Marconi (2006, p.185) “A pesquisa bibliográfica, ou de fonte secundária, abrange toda bibliografia já tornada pública em relação ao tema de estudo, desde publicação avulsa, boletins, jornais, revistas, livros, pesquisas, monografias, teses, material cartográfico, meios de comunicação orais.”

No presente trabalho, a técnica de coleta de dados utilizadaserão os ensaios mecânicos exigidos por norma para a construção de um quadro, por serem estes os testes reais aos quais os quadros são submetidos para aprovação. Em tais testes, esperam-se resultados aproximados quando confrontados os testes reais com as simulações computadorizadas

PROCEDIMENTOS: Conforme Lakatos e Marconi, (2007, p.223) “Procedimentos constituem etapas mais concretas da investigação, com finalidade mais restrita em termos de explicação geral dos fenômenos menos abstrato. Pressupõem uma atitude concreta em relação ao fenômeno e estão limitadas a um domínio particular. Nas ciências sociais os principais métodos de procedimentos são: históricos, comparativos, monográficos ou estudo de caso estatístico, tipológicos funcionalista, estruturalista.”.

Conforme Andrade, (2006, p. 135) “Consiste no estudo de indivíduos, profissões, condições, instituições grupos ou comunidade com finalidade de obter generalizações.”.

Assim sendo, o presente trabalho procede da seguinte forma:

- Levantamento bibliográfico
- Análise e síntese da literatura do estado da Arte
- Seleção dos modelos de quadros a serem estudados
- Verificação de possíveis fatores de divergência de resultados
- Estabelecimento dos testes comparativos
- Modelagem 3D dos quadros
- Simulações computadorizadas dos quadros
- Manufatura dos quadros
- Testes físicos
- Análise e comparação dos resultados.

4 Modelagem computadorizada

4.1 Criação dos modelos

A criação dos modelos CAD 3D partiram da utilização dos desenhos técnicos 2D de cada um dos tubos componentes dos quadros a sua geração em 3D. O processo de desenho não será aprofundado aqui, mas para linhas gerais, cada elemento foi gerado individualmente e em seguida montado seguindo a geometria pré-estabelecida do modelo.

A geração individual de cada um dos tubos permitiu um controle mais preciso de cada elemento bem como o controle das espessuras variáveis de cada tubo. Além disso, o processo de criação individual e posterior montagem de cada elemento em uma estrutura final, permitiu a aproximação dos processos construtivo físico dos quadros ao processo de montagem digital dos elementos.

É importante ainda ressaltar, que além dos componentes do quadros, foi criado ainda um corpo para simular o garfo utilizado nos testes reais para melhor aproximação dos resultados.

Segue abaixo a montagem final da estrutura:

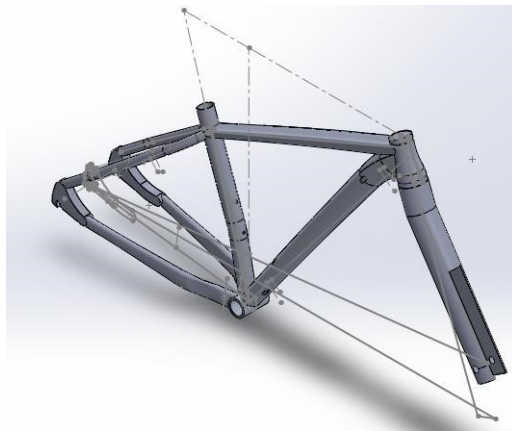


Imagem 15: Modelo montagem final

Fonte:Própria

4.2 Geração de malha

Após a geração dos modelos foi utilizado o SolidWorks simulation para todas as etapas seguintes. Quanto a geração de malha, está se deu através do controle dos parâmetros de tamanho de malha que define o espaçamento Máximo e a tolerância dimensional entre elementos constituintes da malha.

Este passo é importante, pois define a riqueza de detalhes que o estudo irá mostrar. Dito isso, quanto menor o espaçamento entre os nós da malha gerada, maior será o número de nós necessários para que a malha represente o modelo criado. Além disso, é importante o controle dos parâmetros para que as geometrias contínuas geradas durante a modelagem sejam representadas sem grandes aproximações e/ou deformações, do contrário o estudo pode apresentar divergências inaceitáveis de resultados.

Seria tentador então estabelecer o menor espaçamento possível entre os elementos constituintes da malha, porém temos de lembrar que cada elemento será sujeito a análise e processamento durante a etapa de cálculo de reações. Tal fato faria com que o processamento de tantos elementos se tornasse demasiadamente demorado, sendo que os ganhos em precisão se tornam irrelevantes considerando os tipos de solicitações, cargas e processos de fabricação ao qual o produto final será submetido. Portanto, cabe aqui uma ressalva de que a determinação do tamanho final dos elementos deve partir do bom senso e experiências prévias de quem está fazendo o estudo, sendo que este valor deve ser o suficiente para prover todos os detalhes necessários ao estudo mas não demasiado a ponto de promover uma saturação de informação gerada.

Dito isso, segue abaixo o detalhe da malha criada para este estudo. Os valores adotados para o tamanho do elemento e a tolerância são arbitrários e foram selecionados com base em análises feitas anteriormente e também com o tamanho máximo para que o programa pudesse gerar os resultados de maneira adequada.

Tabela 3 – Propriedades da malha gerada

Tipo de malha:	Malha mista
Gerador de malhas usado:	Malha padrão
Transição automática:	Desativada
Incluir loops de malha automáticos:	Desativada
Pontos Jacobianos	4 Pontos
Verificação Jacobiana para cascas	Ativada
Tamanho do elemento	5.5 mm
Tolerância	0.275 mm
Plotagem de qualidade de malha	Alta
Total de nós	158094
Total de elementos	80022
Tempo para conclusão da malha (hh:mm:ss):	00:02:28

Fonte: Própria, valores obtidos na geração de relatório do SolidWorks Simulation

Nome do modelo: IMPACT PRO M 16.08.18
Nome do estudo: compressão fadiga (Valor predeterminado-)
Tipo de malha: Malha mista

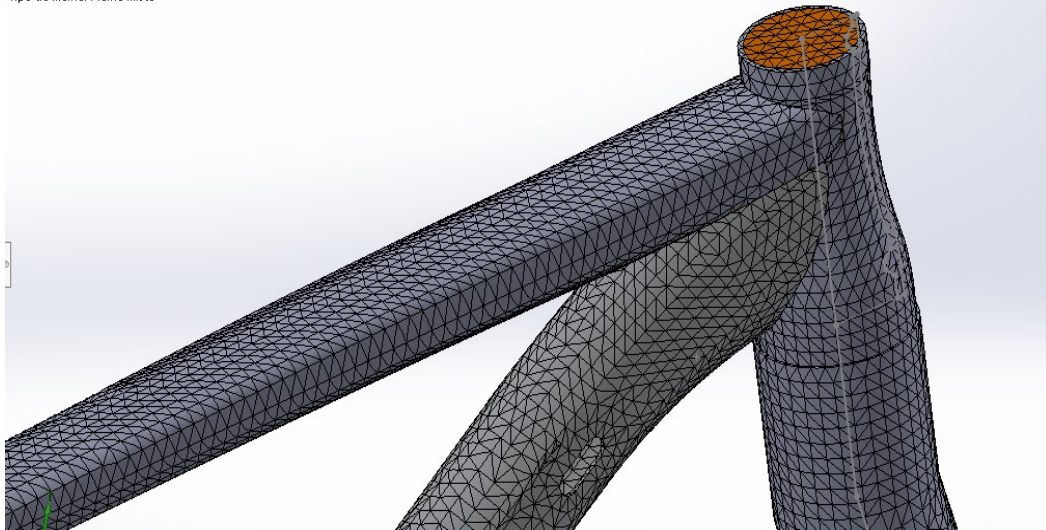


Imagem 16: Detalhe da malha gerada

Fonte: Própria

4.3 Geometrias fixas e aplicação de cargas

Após a definição da malha, selecionaram-se as geometrias a serem consideradas fixa, ou imóveis do estudo. Estas geometrias agem como pontos de resistência às cargas aplicadas.

Naturalmente selecionaram-se as faces de fixação do eixo traseiro nos drop outs por serem os pontos fixos nos testes reais. A seleção dessas faces envolve certos cuidados pois as mesmas não sofrerão deformações durante a simulação. Portanto deve sempre se adotar pontos onde não são relevantes os esforços resultantes das aplicações de carga.

Assim como na seleção dos pontos fixos, a seleção dos pontos de aplicação de carga deve representar as forças as quais o corpo de prova será submetido durante os testes. Aqui porem, não há a representação do pistão pneumático responsável pela aplicação da carga no quadro. Selecionou-se, portanto, o próximo ponto para onde a carga é transferida que seria no eixo do garfo de provas. A direção da carga é a mesma direção que se tem no ensaio real. As cargas selecionadas seguem os critérios já explanados nos itens referentes aos ensaios mecânicos, sendo estas cargas baseadas em normas, funcionamento da maquina e padrões internos da empresa aonde os experimentos foram realizados.

Com isso em mente, é gerada ao final da análise uma tabela abordando as forças aplicadas e a cargas resultantes nos pontos de fixação como mostrado nas imagens e tabelas abaixo:

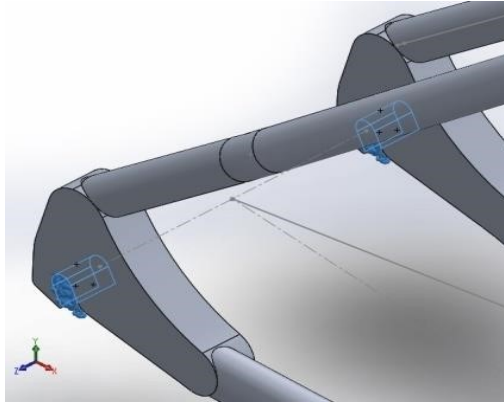


Imagem 17: Detalhes da geometria de fixação

Fonte: Própria

Tabela 4 – Tabela de forças resultantes nos pontos de fixação

Forças resultantes				
Componentes	X	Y	Z	Resultante
Força de reação(N)	1812.98	199.426	0	1823.92

Fonte: Própria, valores obtidos na geração de relatório do SolidWorks Simulation

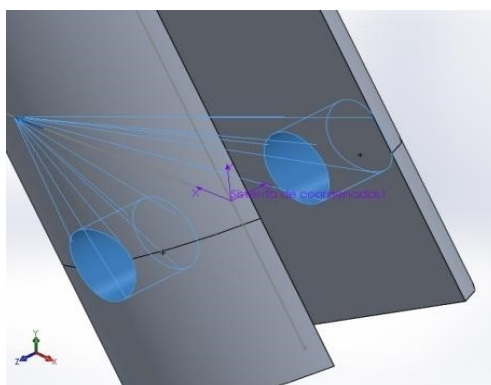


Imagem 18: Detalhes do ponto de aplicação de carga

Fonte: própria

Tabela 5 – Tabela de detalhes da aplicação de carga do teste estático

Entidades:	2 face(s)
Tipo:	Carga (transferência direta)
Sistema de coordenadas:	Sistema de coordenadas1
Força Valores:	1824, ---, --- N
Momento Valores:	---, ---, --- N.m
Coordenadas de referência:	50, 0, 0 mm
Componentes transferidos:	Força

Fonte: Própria, valores obtidos na geração de relatório do SolidWorks Simulation

Tabela 6 – Tabela de detalhes da aplicação de carga teste de fadiga

Entidades:	2 face(s)
Tipo:	Carga (transferência direta)
Sistema de coordenadas:	Sistema de coordenadas1
Força Valores:	1200, ---, --- N
Momento Valores:	---, ---, --- N.m
Coordenadas de referência:	50, 0, 0 mm
Componentes transferidos:	Força

Fonte: Própria, valores obtidos na geração de relatório do SolidWorks Simulation

4.4 Simulação numérica de compressão estático

Estabelecido as cargas, pontos de fixação e definições de malha, aplicou-se o material a todas as peças e definiu-se como corpo rígido a representação do garfo. Tal definição permite que o programa ignore deformações sofridas pelo garfo já que o mesmo apresenta uma rigidez extremamente elevada relação ao sistema. Já a aplicação de material define as propriedades mecânicas que o corpo gerado terá. Para tanto, utilizou-se a biblioteca de matérias presentes no próprio programa que dispõe os seguintes valores para as propriedades do alumínio 6061 – T6:

Tabela 7 – Tabela de propriedades mecânicas aplicados ao corpo

Nome:	6061-T6 (SS)
Tipo de modelo:	Isotrópico linear elástico
Critério de falha predeterminado:	Tensão de von Mises máxima
Limite de escoamento:	2.75e+08 N/m²
Resistência à tração:	3.1e+08 N/m²
Módulo elástico:	6.9e+10 N/m²
Coefficiente de Poisson:	0.33
Massa específica:	2700 kg/m³
Módulo de cisalhamento:	2.6e+10 N/m²

Fonte: Própria, valores obtidos da biblioteca de matérias do SolidWorks

Após essas definições finais, realizou-se o estudo obtendo-se os seguintes resultados:

Tabela 8 – Tabela de resultados da simulação numérica de carga estática

Tipo de resultado	Valor maximo encontrado	Elemento da malha
VON: tensão de von Mises	1.931e+08 N/m ²	Nó: 67167
URES: Deslocamento resultante	8.581e+00 mm	Nó: 145658
ESTRN : Deformação equivalente	1,50E+00	Elemento: 37535

Fonte: Própria, valores obtidos nas simulações realizadas

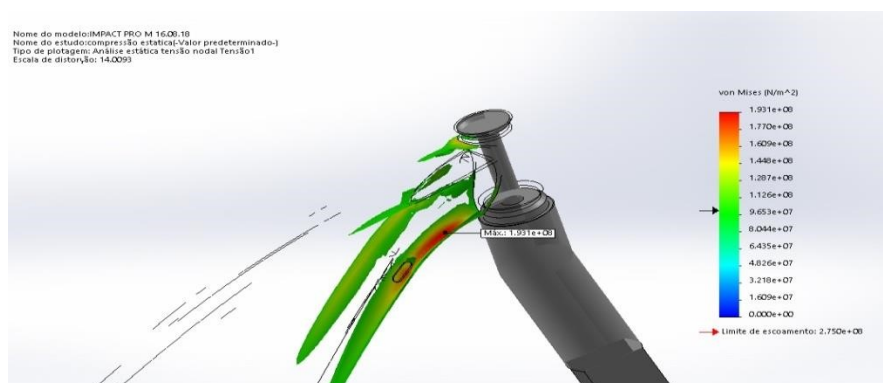


Imagem 19: Detalhes do ponto de Maximo valor de tensão na compressão estática

Fonte: própria

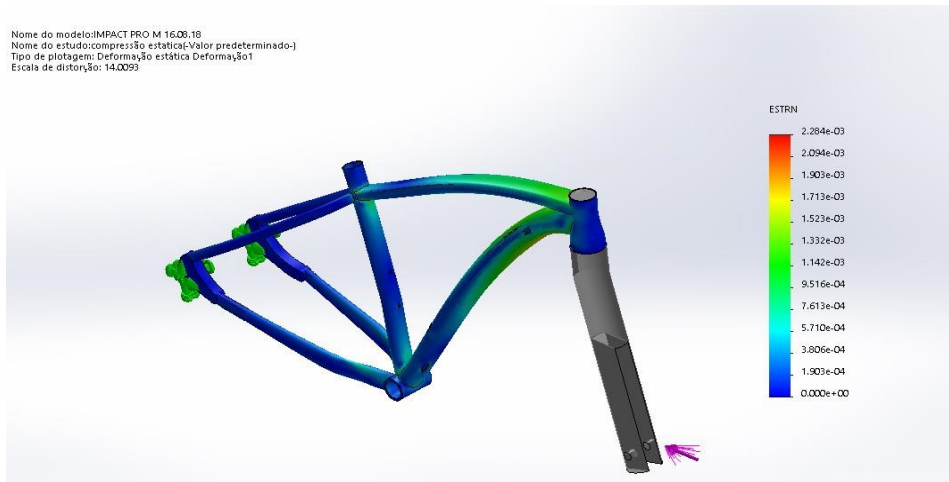


Imagem 20: Plotagem da distribuição de deformações compressão estática

Fonte: própria



Imagem 21: Plotagem de deslocamentos em mm compressão estática

Fonte: própria

É importante ressaltar que para o teste de compressão estático, o maior valor encontrado para o deslocamento corresponde justamente ao deslocamento na região do eixo rolante guiado onde temos a aquisição de dados do sensor na prática.

4.5 Simulação numérica de fadiga

Para a simulação de fadiga são tomados inicialmente os mesmos passos executados para a simulação da compressão estática, sendo os pontos de ancoragem e

aplicação de força exatamente os mesmos, atentando-se somente a mudança da carga aplicada para cumprimento dos padrões internos de testes.

Dito isso, é gerado primeiramente um resultado de uma aplicação estática que representa apenas a simulação da aplicação de F_1 (ou etapa de compressão do quadro). Realiza-se então um novo estudo que compreende a aplicação de F_2 (ou etapa de tração do quadro). A união destas duas etapas corresponde a um ciclo (C_1).

Feito os dois estudos estáticos, realiza-se um novo estudo exclusivo de fadiga estabelecendo-se o número de ciclos a serem executados e os tipos de carregamento considerado para cada aplicação de carga, onde o programa compila os dados das duas simulações e, através da interpolação das energias de deformação calculadas com as curvas S-N fornecidas ao software, calcula os danos gerados pela fadiga.

Este cálculo de danos é apresentado em porcentagem, calculando-se a razão entre o número de ciclos definidos no teste e o número de ciclos total esperado que cada ponto do quadro resista. Os detalhes deste estudo e seus resultados podem ser observados nos pontos abaixo.

- Resultados da simulação de compressão;

Tabela 9 – Tabela de resultados da simulação numérica de compressão para fadiga

Tipo de resultado	Valor maximo encontrado	Elemento da malha
VON: tensão de von Mises	1.270e+08 N/m ²	Nó: 67167
URES: Deslocamento resultante	5.646e+00 mm	Nó: 145658
ESTRN : Deformação equivalente	1,50E+00	Elemento: 37535

Fonte: Própria, valores obtidos nas simulações realizadas

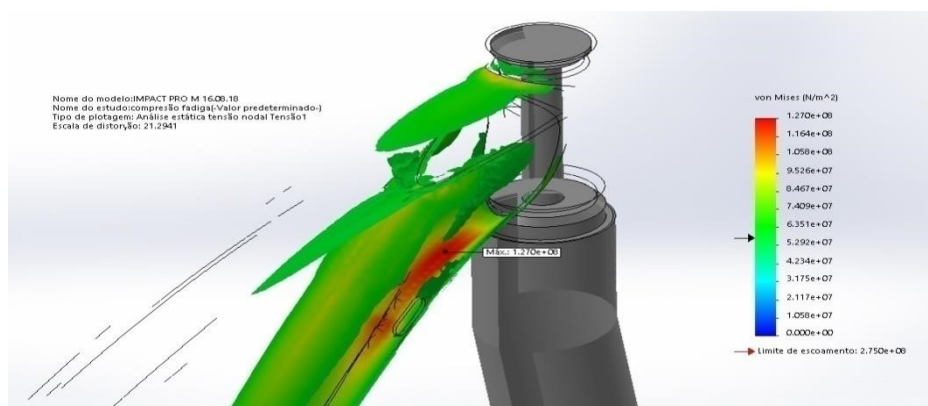


Imagem 22: Detalhes do ponto de Maximo valor de tensão compressão fadiga

Fonte: própria

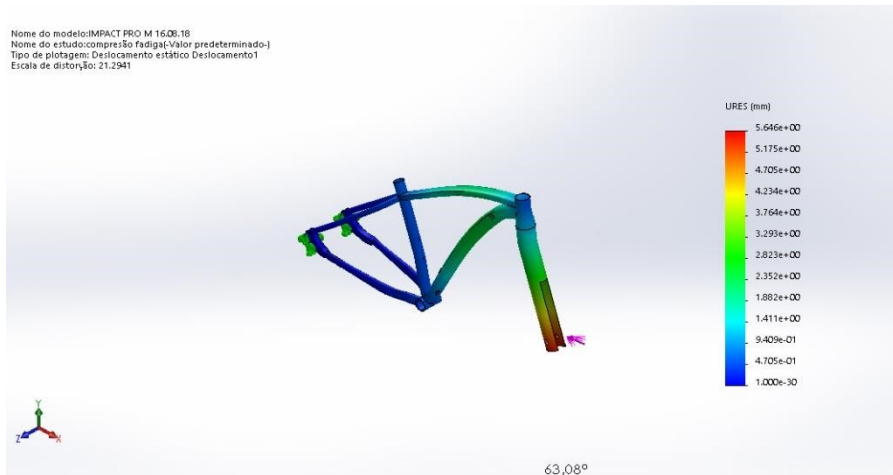


Imagem 23: Plotagem do deslocamento compressão fadiga

Fonte: própria

- Resultados da simulação de tração;

Tabela 10 – Tabela de resultados simulação numérica de tração para fadiga

Tipo de resultado	Valor máximo encontrado	Elemento da malha
VON: tensão de von Mises	1.270e+08 N/m ²	Nó: 67167
URES: Deslocamento resultante	5.646e+00 mm	Nó: 145658
ESTRN : Deformação equivalente	1,50E+00	Elemento: 37535

Fonte: Própria, valores obtidos nas simulações realizadas

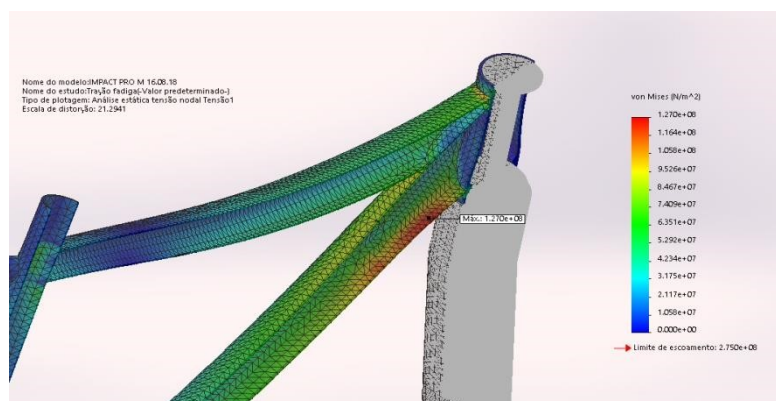


Imagem 24: Detalhe em corte do ponto de Máximo valor de tensão tração de fadiga

Fonte: própria

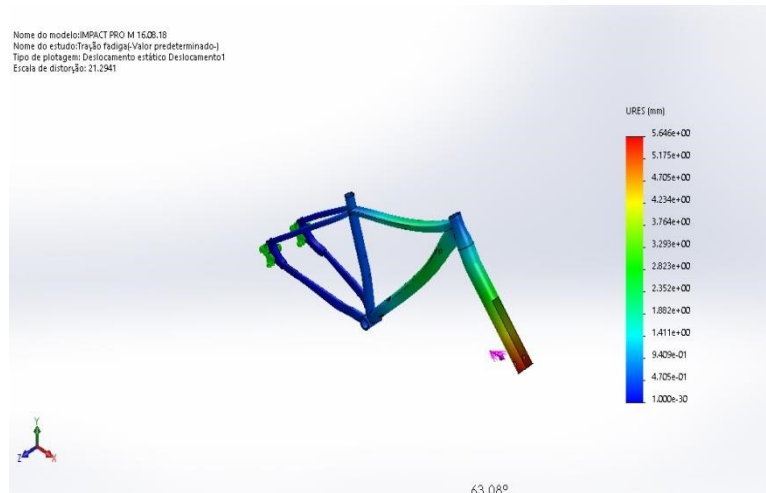


Imagem 25: Plotagem do deslocamento na Tração de fadiga

Fonte: própria

- Detalhes e resultados da simulação de fadiga:

Tabela 11 – Tabela de propriedades da simulação numérica de fadiga

Tipo de análise	Fadiga(Amplitude constante)
Interação de eventos	Aleatório
Calcular tensão alternada usando	Intensidade da tensão (P1-P3)
Face da casca	Face superior
Correção da tensão média	Nenhuma
Fator de redução de resistência à fadiga	1

Fonte: Própria, valores obtidos nas simulações realizadas

Tabela 12 – Tabela de resultados da simulação numérica de fadiga

Tipo de análise	Maximo	Elemeto da malha
Danos sofridos em porcentagem no ponto mais afetado	69.4 %	Nó: 67167
Vida maxima esperada C maximo no ponto mais fragil	576000 ciclos	Nó: 67167

Fonte: Própria, valores obtidos nas simulações realizadas

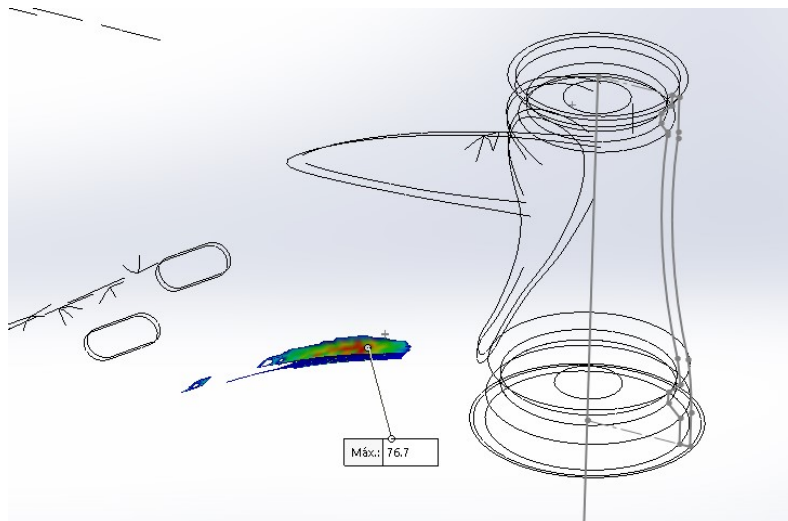


Imagem 26: Detalhe dos pontos de maior concentração de dano na simulação de fadiga

Fonte: própria

4.6 Testes Experimentais

Os ensaios foram feitos utilizando-se a maquina de fadiga da marca BikeMachinery modelo Halley H/B. Esta maquina apresenta o seguinte esquema de posicionamento de sensores para o monitoramento das deformações do quadro durante os testes:

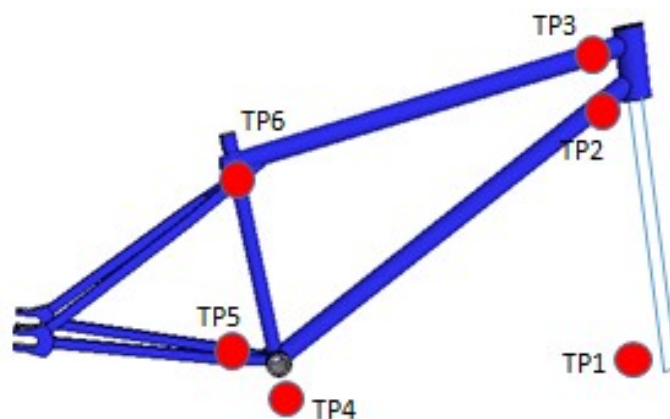


Imagem 26: representação do posicionamento dos sensores

Fonte: Relatório interno de fadiga

Por padrão interno da empresa, para os testes de fadiga, a maquina está setada para coletar dados das deformações a cada 2000 ciclos, obtendo-se um valor Maximo e

Mínimo de cada um dos sensores. Os valores máximos e mínimos correspondem respectivamente a etapa de tração e a etapa de compressão.

Apesar da presença de diversos sensores no quadro, o único sensor que apresenta medições relevantes nos dois tipos de ensaios realizados neste trabalho é o sensor TP1. Isso porque os demais sensores estão posicionados de maneira a coletar deformações laterais durante os ensaios de simulação de força de pedalada.

Abaixo a foto da montagem utilizada tanto para o teste estático quanto para o teste de fadiga:



Imagem 26: Foto da montagem do sistema para teste

Fonte: Própria

Fica esclarecido aqui que os atuadores fixados no guidão e nos pés de vela não estavam aplicando nenhuma carga ao quadro durante os testes, estando estes posicionados apenas pelo funcionamento dos sensores de quebra que identificam quando os atuadores se deslocam além dos pontos programados para a parada da máquina, indicando que houve um deslocamento anormal durante o teste, o que indica normalmente uma quebra ou a incorreta fixação de alguma parte.

4.7 Resultados dos testes experimentais de compressão estático

Abaixo a tabela com os dados coletados durante os teste de compressão estáticos. Cada quadro foi identificado para se poder correlacionar os testes estáticos e dinâmicos para uma possível verificação de relação entre a deformação no teste estático e a durabilidade do quando expostos a fadiga.

Tabela 13 – Tabela de resultados dos testes experimentais de compressão estático

Teste de compressão estatico	Leitura inicial (sem carga)	Leitura final (com 1824N)	Deslocamento
QUADRO 1	68,2	79,7	11,5
QUADRO 2	68,2	78,9	10,7
QUADRO 3	67,1	78,3	11,2
QUADRO 4	68	79,3	11,3
QUADRO 5	66,8	76,1	9,3
QUADRO 6	67,5	77,6	10,1
		Média	10,683

Fonte: Própria

4.8 Resultados dos testes experimentais de fadiga

Os resultados dos testes podem ser observados através dos gráficos abaixo que gerados nos relatórios internos da empresa. Neles, podemos observar que o espaçamento entre a linha de ponto Maximo e mínimo é a soma dos deslocamentos máximos referentes a compressão e a tração que são exercidos durante o ciclo de fadiga.

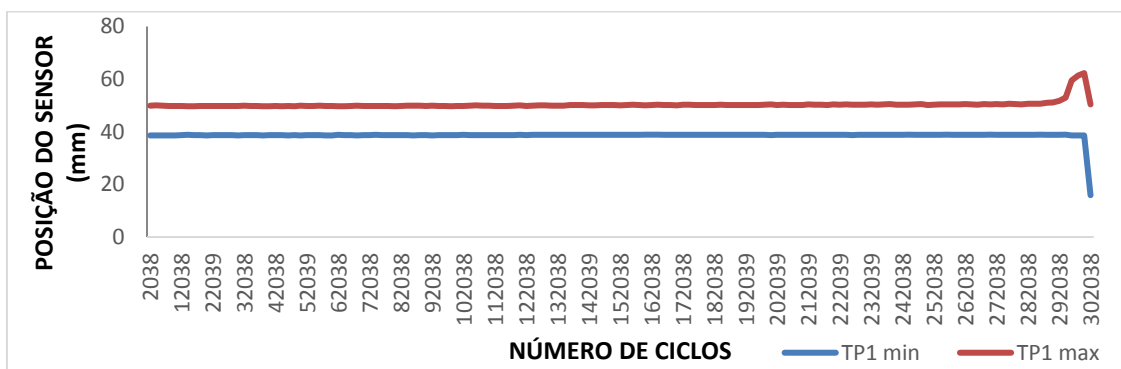


Imagem 27: Gráfico de deformação quadro 1

Fonte: Relatório de ensaio Sense

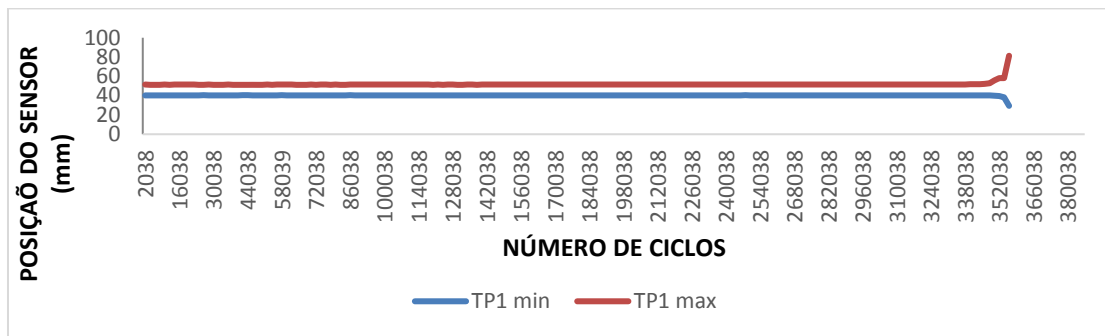


Imagem 28: Gráfico de deformação quadro 2

Fonte: Relatório de ensaio Sense

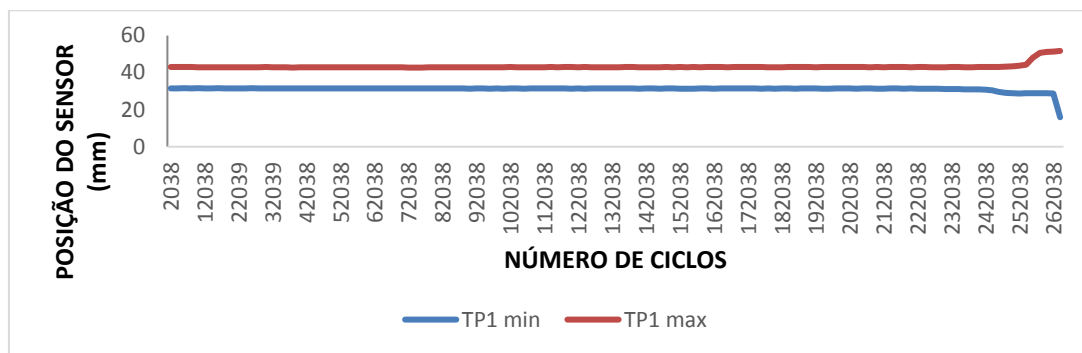


Imagem 29: Gráfico de deformação quadro 3

Fonte: Relatório de ensaio Sense

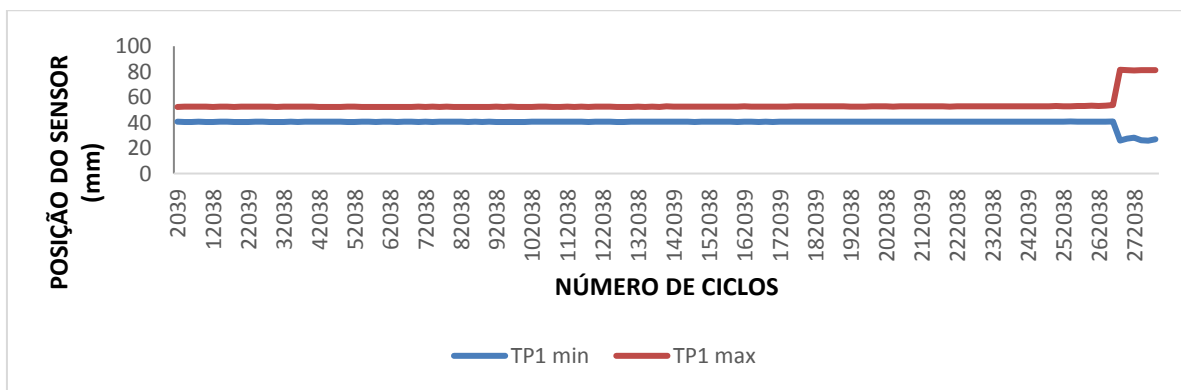


Imagem 30: Gráfico de deformação quadro 4

Fonte: Relatório de ensaio Sense

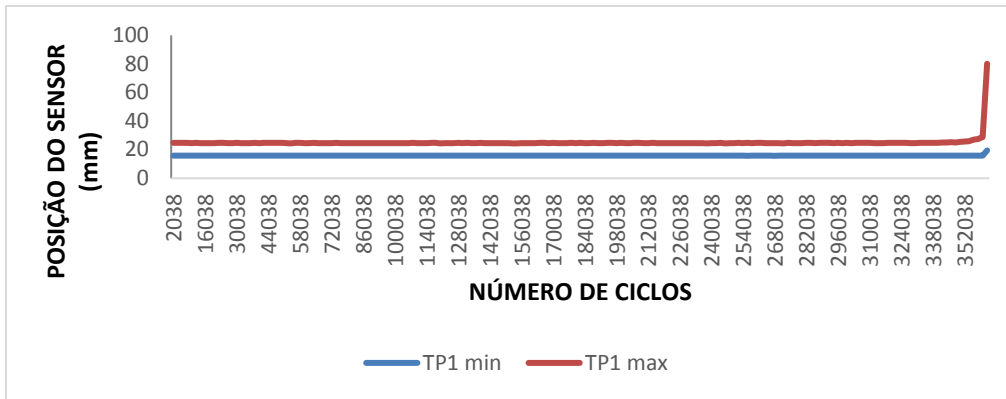


Imagem 31: Gráfico de deformação quadro 5

Fonte: Relatório de ensaio Sense

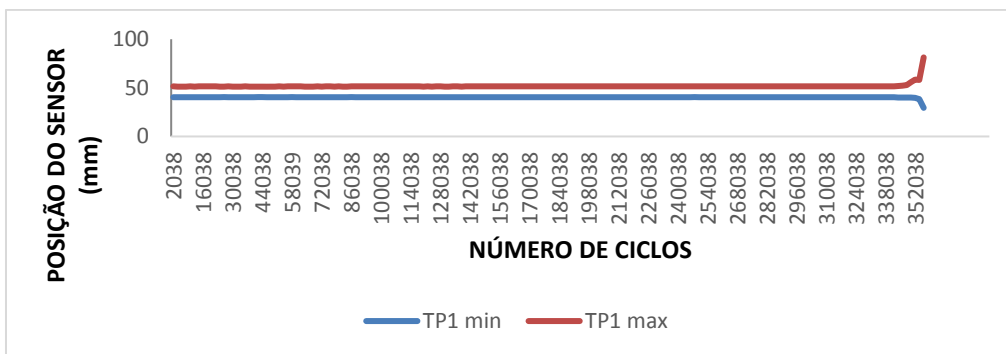


Imagem 32: Gráfico de deformação quadro 6

Fonte: Relatório de ensaio Sense

Para simplificação dos resultados obtidos nos gráficos acima, foi feito um gráfico compilando as amplitudes de deslocamento de cada um deles, podendo se observar mais claramente como cada quadro se compara ao outro em termos de durabilidade.

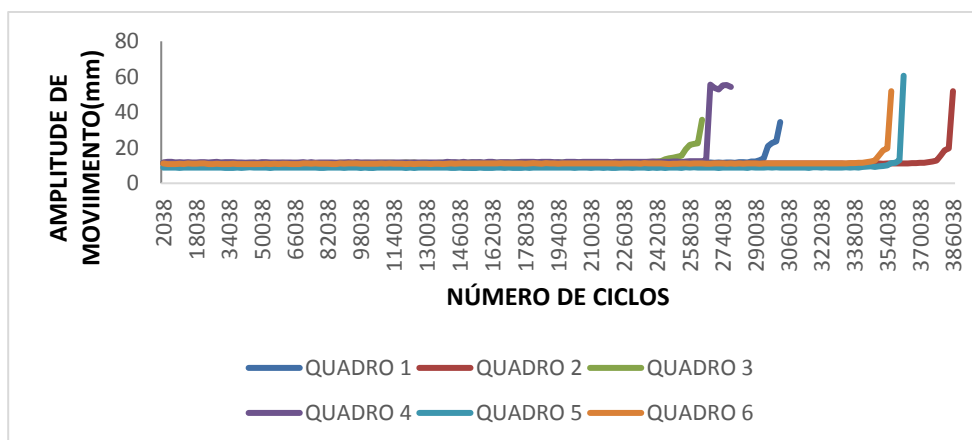


Imagem 33: Gráfico comparativo dos quadros

Fonte: Relatório de ensaio Sense

É importante salientar que os quadros 3 e 4 não apresentaram falhas típicas de fadiga e sim falhas relacionadas ao processo de soldagem como visto nas fotos abaixo:



Imagem 34: Foto de falha do quadro 3

Fonte: Própria



Imagem 35: Foto de falha do quadro 4

Fonte: Própria

Já os demais quadros sofreram os tipos de falhas esperados de acordo com as simulações feitas, tendo o início da falha sua origem na zona esperada como observado nas fotos abaixo:



Imagem 33: Foto de falha do quadro 1

Fonte: Própria



Imagem 34: Foto de falha do quadro 5

Fonte: Própria

5 Comparação e análise dos resultados

A tabela abaixo apresenta de maneira sucinta a comparação dos resultados esperados (simulações numéricas) com os resultados obtidos nos testes experimentais

Tabela 14 – Tabela comparativa de resultados encontrados nas simulações numéricas e testes experimentais

Teste	Parâmetro de comparação (unidade)	Resultado esperado (simulação numérica)	Resultado encontrado (teste experimental)	Diferença (%)
Teste de compressão estático	Deslocamento (mm)	8,581	10,683	24,50
Teste de compressão para fadiga + Teste de tração para fadiga	Amplitude do deslocamento (mm)	5,646 (tração)+ 5,646(compressão) = 11,292mm	11,85	-0,05
Teste de fadiga	Número de ciclos até falha	576000	386038	-32,98

Fonte : Própria

Dos valores mostrados nesta tabela de comparação podemos fazer as seguintes observações:

- O deslocamento encontrado no teste experimental de compressão estático é maior do que o esperado nas simulações numéricas. Isso sugere que os quadros se encontram com uma rigidez total menor do que o esperado;

- A amplitude do deslocamento encontrado no teste experimental de fadiga é comparável aos valores esperado nas simulações numéricas. Este resultado destoa do restante dos resultados encontrados neste estudo, sendo uma provável causa a aplicação mais baixa de cargas ao material atenuando a diferença de deslocamento;
- Os quadros apresentarem, mesmo no melhor dos casos, uma resistência 33% abaixo do esperado de acordo com os resultados das simulações. Essa divergência vai de acordo com o resultado encontrado no teste de compressão estático, sugerindo fortemente que as propriedades mecânicas dos corpos testados são inferiores as propriedades mecânicas definidas como parâmetros nas simulações numéricas. Esta divergência ocorrer pelo não seguimento das normas técnicas para o tratamento térmico do alumínio que gera propriedades mecânicas diferentes das utilizadas como parâmetros. Um dos possíveis motivos para a diminuição da rigidez total do quadro é para proporcionar certo conforto extra ao usuário.

Outra comparação importante que temos nesse estudo é a análise dos pontos de concentração de tensão (e provável quebra) dos corpos. Como podemos observar comprando as imagens 22,24, 25, 33 e 34, os pontos previstos nas simulações numéricas se aproximam de maneira bastante confiável aos pontos de quebra vistos nos testes experimentais.

Tais resultados não refutam a idéia de que haja divergência entre as propriedades mecânicas reais e as propriedades mecânicas adotadas como parâmetros para as simulações numéricas, podendo somente se afirmar que o programa apresentou um grau satisfatório de previsão de pontos fracos na estrutura.

6 Conclusão

Após a análise dos dados podemos concluir o seguinte:

- O programa SolidWorks e sua extensão SolidWorks Simulation permitiram a correta identificação dos pontos de concentração de tensão, sendo um aspecto fundamental na realização de estudos de validação de projetos.
- As divergências encontradas nas análises de aplicação de cargas estáticas sugere divergências nas propriedades mecânicas reais dos quadros em relação as propriedades adotadas para as simulações numéricas
- Grandes incongruências foram encontradas nas previsões das análises de fadiga, estando o desempenho dos quadros bem abaixo do previsto nas simulações.
- Apesar de não se atingir a resistência a fadiga esperado, os quadros da empresa Sense Industria de Bicicletas da Amazônia ainda apresentaram desempenho bem superior ao previsto em normas técnicas ou ainda aos requisitos mínimos internos da própria empresa.
- Os quadros apresentaram rigidez menor do que o esperado quando submetidos a carregamentos mais elevados como o do teste de compressão estático.

Como já mencionado, alguns fatores podem ter contribuído para as divergências dos resultados. Fatores como o não seguimento dos parâmetros descritos em normas técnicas no processo de tratamento térmico, tem profundos impactos nas propriedades mecânicas de elasticidade e resistência a fadiga em alumínios. Neste ponto sugeriu-se a empresa a adoção de testes e ensaios metalográficos e de propriedades mecânicas para analisar se o tratamento térmico está produzindo os efeitos desejados no metal.

Outro ponto de incerteza encontrado é na definição da curva S-N do material testado. Curvas desenvolvidas a partir de testes empíricos com os materiais utilizados se tornam mais precisas e confiáveis na previsão dos números de ciclos para falhas. Dito isso está sendo feito o levantamento de dados interno na empresa para se obter estas curvas referentes aos quadros que são feitos com os parâmetros atuais.

Verificou-se neste trabalho também a importância do processo de projeto, análise e validação de resultados inerentes a engenharia mecânica.

7 Sugestões para trabalhos futuros

Tendo em vista as dificuldades e problemas encontrados neste estudo seguem algumas sugestões para trabalhos futuros que serão de grande importância na verificação dos dados encontrados:

- Correlacionamento entre o resultado de diferentes parâmetros de tratamento térmico com a resistência a fadiga. Sendo aqui necessária a realização de metalografias para a verificação dos resultados do tratamento térmico;
- Levantamento das curvas S-N obtidas com diferentes parâmetros de tratamento térmico e comparação;
- Projeto de um modelo de quadro mais leve e com menores pontos de concentração de tensão;
- Verificação dos efeitos da solda na resistência a fadiga;
- Verificação dos módulos de vibração em quadros de bicicletas.
- Levantamento de um ciclo de esforços reais em quadros de bicicletas MTB em trilhas.

8 Referências

- [1] “PRODUÇÃO DE BICICLETAS DEVERÁ FECHAR O ANO COM ESTABILIDADE E CRESCER 9% EM 2018” disponível em:<<http://www.abraciclo.com.br/2017/1141-producao-de-bicicletas-devera-fechar-o-ano-com-estabilidade-e-crescer-9-em-2018>> acessado em 02/01/2018
- [2] PUCHER, John; BUEHLER, Ralph. Cycling towards a more sustainable transport future. 2017.
- [3] ZIENKIEWICZ, Olgierd Cecil et al. The finite element method. London: McGraw-hill, 1977.
- [4] MCHENRY, Douglas. A LATTICE ANALOGY FOR THE SOLUTION OF STRESS PROBLEMS. Journal of the Institution of Civil Engineers, v. 21, n. 2, p. 59-82, 1943
- [5] HRENNIKOFF, Alexander. Solution of problems of elasticity by the framework method. Journal of applied mechanics, v. 8, n. 4, p. 169-175, 1941.
- [6] NEWMARK, N. M. Numerical Methods of Analysis of Bars, Plates, and Elastic Bodies. In: Selected Papers By Nathan M. Newmark: Civil Engineering Classics. ASCE, 1949. p. 313-344.
- [7] WILSON, David G. Bicycle science. 2004.
- [8] Kolorierte Lithographie von Hartenstein, por volta de 1820. Wikipédia disponível em :<https://de.wikipedia.org/wiki/Karl_von_Drais#/media/File:Drais.jpeg> Acessado em 10/01/2018
- AMBRIZ, R. R.; JARAMILLO, D. Mechanical behavior of precipitation hardened aluminum alloys welds. In: Light Metal Alloys Applications. InTech, 2014.
- [9] A História da Bicicleta no Mundo Site Escola da Bicicleta Disponivel em :<<http://www.escoladebicicleta.com.br/historiadabicicleta.html>> Acessado em 13/01/2018
- [10] Bragging Rights to the Bicycle, All Thanks to a Frenchman
Disponivel em :< <http://www.nytimes.com/1998/08/02/nyregion/bragging-rights-to-the-bicycle-all-thanks-to-a-frenchman.html>> Acessado em 13/01/2018
- [11]Specialized Disponível em :<<https://www.specialized.com/br/pt>> Acessado em 13/01/2018
- [12] A field guide to bicycles Disponível em :< <https://www.bicycling.com/bikes-gear/newbikemo/a-field-guide-to-bicycles/slide/2>> Acessado em 13/01/2018
- [13] Sensebike Disponível em :<<http://sensebike.com.br/>> Acessado em 13/01/2018

- [14] SHAKHASHIRI, Bassam Z. Chemical of the Week: Aluminum. Science is Fun, 2007.
- [15] TOTTEN, George E.; MACKENZIE, D. Scott (Ed.). Handbook of Aluminum: Vol. 1: Physical Metallurgy and Processes. CRC Press, 2003.
- [16] DAVIS, Joseph R. et al. Aluminum and aluminum alloys. ASM international, 1993.
- [17] MONDOLFO, Lucio F. Aluminum alloys: structure and properties. Elsevier, 2013.
- [18] How to Design the Lightest Possible Bike – And Still Sleep at Night. Disponível em :<<https://www.engineering.com/DesignSoftware/DesignSoftwareArticles/ArticleID/14480/How-to-Design-the-Lightest-Possible-Bike-And-Still-Sleep-at-Night.aspx>> Acessado em 15/01/2018
- [19] MÖLLER, H.; GOVENDER, G.; STUMPF, W. E. The T6 heat treatment of semi-solid metal processed alloy A356. The Open Materials Science Journal, v. 2, n. 1, 2008.
- [20] DWYER, Forrest; SHAW, Adrian; TOMBARELLI, Richard. Material and design optimization for an aluminum bike frame. Bachelor of Science thesis, Worcester Polytechnic Institute. USA, 2012.
- [21] CERVO, Amado Luiz; BERVIAN, Pedro Alcino. Metodologia científica. 5. ed. São Paulo: Prentice Hall, 2002.
- [22] DALFOVO, Michael Samir; LANA, Régério Adilson; SILVEIRA, Amélia. Métodos quantitativos e qualitativos: um resgate teórico. Revista Interdisciplinar Científica Aplicada, Blumenau, 2008.
- [23] DAVIS, Joseph R. et al. Aluminum and aluminum alloys. ASM international, 1993.
- [23] GIL, Antônio C. Métodos e técnicas de pesquisa social. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2006.
- #filehistory> Acessado em 05/12/2015
- [24] TABOR, David. The hardness of metals. Oxford university press, 2000.
- [25] WAHLBERG, Axel. Brinell's method of determining hardness and other properties of iron and steel. Journal of the Iron and Steel Institute, v. 59, n. 1, p. 243, 1901.
- [26] ZANELLA, Liane Carly Hermes. Metodologia de estudo e de pesquisa em administração. 2009. Bacharel em Administração Pública, Departamento de Ciências da Administração, Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.
- [27] IMPACT PRO Disponível em :<<https://sensebike.com.br/mtb/hard-tail/impact-pro>> Acessado em 19/10/2018
- [28] KACHANOV, Lazar' Markovich. Foundations of the Theory of Plasticity. North-Holland, 1971.

[29] CHAWLA, Krishan Kumar; MEYERS, M. A. Mechanical behavior of materials. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1999.

[30] BAI, Shi et al. A wireless fatigue monitoring system utilizing a bio-inspired tree ring data tracking technique. Sensors, v. 14, n. 3, p. 4364-4383, 2014.

[31] YAHR, G. T. Fatigue design curves for 6061-T6 aluminum. Journal of pressure vessel technology, v. 119, n. 2, p. 211-215, 1997.

[32]ISO 4210-6 : 2015 Cycles – Safety requirements for bicycles – Part 6 : Frame and fork test methods.