

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ALEX TADEU MOREIRA SANTOS
LEONARDO SILVA VALENGA

**ANÁLISE ESTRUTURAL DE QUADROS DE BICICLETA UTILIZANDO
O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2016

ALEX TADEU MOREIRA SANTOS

LEONARDO SILVA VALENGA

ANÁLISE ESTRUTURAL DE QUADROS DE BICICLETA UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, do Curso Superior de Engenharia Mecânica do Departamento de Mecânica – DAMEC – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, como requisito para obtenção do título de Bacharelado.

Orientador: Prof. Ivan Moura Belo

CURITIBA

2016

TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a Proposta de Projeto de Pesquisa “ANÁLISE ESTRUTURAL DE QUADROS DE BICICLETA UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS”, realizada pelos alunos Alex Tadeu Moreira Santos e Leonardo Silva Valenga, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Ivan Moura Belo
Departamento Acadêmico de Mecânica, UTFPR
Orientador

Prof. Marco Antônio Luersen
Departamento Acadêmico de Mecânica, UTFPR
Avaliador

Prof. Marcio Henrique de Avelar Gomes
Departamento Acadêmico de Mecânica, UTFPR
Avaliador

Curitiba, 07 de Dezembro de 2016.

RESUMO

O principal componente de uma bicicleta, o quadro, pode ser produzido utilizando uma ampla gama de materiais. Dentre os materiais, os fabricantes comumente utilizam ligas metálicas, sendo as mais aplicadas as ligas de aço, de alumínio e, em menor escala, as ligas de titânio.

Para avaliar a diferença no comportamento mecânico das bicicletas gerado por essas ligas, é proposta a realização de simulações numéricas em um software comercial, representando ensaios de resistência mecânica em modelos padronizados de quadros. São simulados diversos modelos, variando os materiais e os diâmetros e espessuras dos tubos que compõem o quadro.

Nas simulações os quadros são sujeitos a carregamentos estáticos, obtendo-se resultados quanto a deflexão, tensão equivalente de von Mises e flambagem. Em seguida é feito um comparativo utilizando cálculos baseados na teoria do método dos elementos finitos.

Palavras-chave: quadros de bicicleta, elementos finitos, simulação computacional, mecânica

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Draisienne, precursora da bicicleta	11
Figura 2 – Bicicleta Overman Victor “Flyer”, de 1893.....	12
Figura 3 - Bicicleta de estrada Strong Frames "Mike M"	13
Figura 4 - Componentes de uma bicicleta de estrada	14
Figura 5 – Componentes de um quadro.....	15
Figura 6 – Componentes de um quadro.....	15
Figura 7 - Quadro de aço (a) e cachimbo (b)	19
Figura 8 – Exemplo de uma discretização pelo MEF	25
Figura 9 – Discretização em uma geometria genérica	25
Figura 10 – Deflexão de uma viga de Euler-Bernoulli	27
Figura 11 – Estrutura de um pórtico	28
Figura 12 – Elemento de um pórtico	29
Figura 13 - Modelo usado como referência, vista traseira.....	31
Figura 14 - Bicicleta de estrada de referência, vista lateral.....	31
Figura 15 – Ensaio de fadiga com forças horizontais.....	36
Figura 16 – Esboço tridimensional do quadro	37
Figura 17 – Modelo tridimensional do quadro	38
Figura 18 – Elemento de malha solid186	39
Figura 19 – Elemento de malha solid187	39
Figura 20 – Elemento de malha surf154	40
Figura 21 – Elemento de malha conta174.....	40
Figura 22 - Malha gerada em um dos quadros.....	41
Figura 23 - Área de carregamento do peso do ciclista	42
Figura 24 - Área de carregamento das forças horizontais.....	42

Figura 25 - Carga aplicada referente a força exercida nos pedais	43
Figura 26 - Apoio traseiro	44
Figura 27 - Locais de deformação máxima e mínima.....	46
Figura 28 - Gráfico da máxima deformação nos quadros liga de alumínio	47
Figura 29 - Gráfico da máxima deformação nos quadros liga de titânio	47
Figura 30 - Gráfico da máxima deformação nos quadros liga de aço 1040	48
Figura 31 - Gráfico da máxima deformação nos quadros liga de aço 1040	48
Figura 32 - Comparativo de deslocamentos de um mesmo quadro variando os materiais.....	49
Figura 33 – Pontos de máxima e mínima tensão normal	50
Figura 34 - - Regiões de máxima e mínima tensão nos quadros de espessuras superiores a 1,00mm.....	51
Figura 35 - Regiões de máxima e mínima tensão nos quadros de menores espessuras inferiores a 1,00mm	51
Figura 36 - Tensões máximas de Von Mises nos quadros nos pontos de deslocamento máximo.....	52
Figura 37 - Comparativo entre as tensões de escoamento dos materiais.....	53
Figura 38 – peso dos quadros em liga de aço.....	54
Figura 39 - Segundo modo de flambagem	55
Figura 40 - primeiro modo de flambagem do quadro	56
Figura 41 – Representação do quadro em uma estrutura de pórtico	57
Figura 42 – Aplicação das condições de contorno	58
Figura 43 – quadro deformado utilizando a matriz de rigidez.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades dos aços.....	16
Tabela 2 – Propriedades do alumínio.....	17
Tabela 3 – Propriedades mecânicas da liga de titânio	18
Tabela 4 – Diâmetros dos tubos.....	33
Tabela 5 – Combinações de tubos utilizados.....	34
Tabela 6 – quantidade média de nós e elementos nos quadros	45

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

AISI – American Iron and Steel Institute

Chromoly – Chromium and Molybdenum

FEM – Finite Elements Method

MEF – Método dos Elementos Finitos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	Contexto do Tema	9
1.2	Caracterização do Problema	10
1.3	Objetivos	10
2	Fundamentação Teórica	11
2.1	Histórico da bicicleta	11
2.2	Componentes da bicicleta	13
2.3	Materiais	15
2.3.1	Aço	16
2.3.2	Alumínio	16
2.3.3	Titânio	17
2.4	Métodos de Fabricação	18
2.4.1	Aço	18
2.4.2	Alumínio	19
2.4.3	Titânio	19
2.5	Critérios de dimensionamento do quadro	20
2.5.1	Tensões a serem analisadas	21
2.6	Análise de Elementos Finitos	23
2.6.1	Introdução	23
2.6.2	Simulações Numéricas	24
2.6.3	Método dos Elementos Finitos	24
2.6.4	Aplicação do MEF ao projeto proposto	26
2.6.5	Pórticos	27
3	Metodologia	30
3.1	Considerações preliminares	30
3.2	Geometria do quadro	30
3.3	Levantamento das cargas aplicadas	32
3.4	Definição da seção dos tubos	33
3.5	Configurações dos quadros	33
3.6	Simulação Numérica	34
3.6.1	Pré-Análise	35
3.6.2	Geometria	36
3.6.3	Malha	38
3.6.4	Configuração do modelo	41
3.6.5	Solução Numérica	44
4	Resultados e Discussões	45
4.1	Resultados numéricos	45
4.1.1	Avaliação das malhas	45
4.1.2	Deslocamento Total	45
4.1.3	Tensões normais	49
4.1.4	Tensões Equivalentes	50
4.1.5	Peso dos quadros	53
4.1.6	Flambagem	55
4.1.7	Verificação e validação	56

5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	61
5.1	Trabalhos futuros	61

61
61

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto do Tema

A bicicleta é um meio de transporte popular em todo o mundo, podendo ser utilizada em variadas atividades, como deslocamentos diários, turismo, lazer, esporte, entre outros. Por ser um transporte ecologicamente limpo, livre de poluições durante a utilização, há um grande apelo por parte da sociedade no âmbito de incentivar as pessoas a aderirem às bicicletas para seu transporte diário em detrimento do automóvel. Há ainda os benefícios de saúde, pelo fato do ato de pedalar ser também uma atividade física que exige esforços por parte do ciclista.

No ciclismo esportivo em nível profissional, a busca por melhores resultados é constante. Isso obriga empresas e especialistas do setor a buscarem melhorias e investirem em tecnologias para aumentar a eficiência do uso das bicicletas. Embora todos os componentes de uma bicicleta possam ser objetos de estudo de desenvolvimento, o enfoque deste trabalho será apenas no quadro. O quadro é o principal componente de uma bicicleta, sendo o responsável por suportar os maiores esforços.

Uma bicicleta de alto desempenho deve possuir características tais como: baixo peso, rigidez, resistência e conforto, além de um custo compatível com valores de mercado (RIBEIRO, 2013). Para projetistas e engenheiros, equilibrar esses requisitos no desenvolvimento de um quadro torna-se um grande desafio, já que algumas dessas características são antagônicas, como por exemplo a rigidez e o conforto – este atrelado a absorção de impactos do quadro. Desse modo, se faz necessário um criterioso método de seleção de parâmetros, materiais e especificações no projeto de tal estrutura.

Tendo em vista os principais requisitos do projeto de um quadro, foram definidos critérios para avaliar o comportamento estrutural do mesmo perante esforços estáticos, que serão abordados adiante.

A escolha do tema está relacionada ao interesse pessoal dos autores pelo ciclismo e por projetos estruturais da engenharia, somado à vontade em aprofundar conhecimentos na área de simulação numérica e aproveitando o conhecimento adquirido no curso de engenharia mecânica.

1.2 Caracterização do Problema

O estudo do comportamento estrutural do quadro é de grande importância, através deste é possível contribuir fortemente para a otimização no projeto de bicicletas. Como foi mencionado, o quadro é o principal componente de uma bicicleta e um bom projeto influencia diretamente no uso de todo o equipamento.

A partir dos requisitos do projeto, definiu-se a necessidade de avaliar as deformações geradas pelos esforços ao quais os quadros estão sujeitos, para em seguida definir quais os limites suportados pela estrutura.

1.3 Objetivos

O presente trabalho tem como principal objetivo a avaliação de quadros de bicicleta, utilizando tubos cilíndricos em ligas metálicas aplicadas na indústria do ciclismo. A partir de um modelo genérico de bicicleta de estrada, analisa-se como o mesmo se comporta alterando parâmetros de sua geometria e propriedades físicas, através da simulação numérica baseada no método dos elementos finitos. A análise é feita comparando quadros com as mesmas dimensões, variando apenas os diâmetros dos tubos que o compõem, além dos materiais.

Entre os objetivos secundários, está a identificação de pontos críticos e a determinação do peso desses quadros.

Ao final do estudo, concluiu-se quais as vantagens e desvantagens de cada material nos modelos de quadro analisados, e prever quais apresentam um melhor desempenho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Histórico da bicicleta

Apesar de existirem divergências quanto a verdadeira origem da bicicleta, a história mais aceita é a de que a bicicleta como conhecemos hoje teve sua origem em um veículo inventado no início do século XIX, pelo alemão Karl Friedrich Drais von Sauerbronn (WHITT e WILSON, 2004), ao implementar um celerífero: um meio de transporte rudimentar, composto por duas rodas interligadas por uma viga com apoio para as mãos. O veículo veio à público em 1817 e ficou conhecido como Draisienne, mostrada na figura 1. Construído de forma simples, o usuário deveria utilizar suas próprias pernas para pôr o veículo em movimento, assim como acontecia com o celerífero. Entre as implementações realizadas por Drais, a mais impactante foi a inclusão de um sistema de direção, possibilitando ao equipamento fazer curvas.



Figura 1 - Draisienne, precursora da bicicleta
Fonte: Museus Kurpfälzischen, 2008

Mesmo sendo tão primitiva, a Draisienne já possuía algumas características encontradas nas bicicletas atuais, como por exemplo um quadro rígido, a disposição do guidão e suas duas rodas e a exigência de equilíbrio do condutor.

Com a revolução industrial, diversas novas implementações foram desenvolvidas. A bicicleta começou a ser aceita como um veículo eficiente de locomoção com a criação de um mecanismo eficiente de conversão de energia, através dos pedais, que recebem a força aplicada pelas pernas do condutor e transmite a uma das duas rodas.

Em décadas de evolução, a primeira bicicleta moderna – semelhante aos modelos da atualidade - surgiu no final do século XIX. Nessa época os novos modelos já possuíam pedais na base do quadro, corrente de transmissão de tração ligados para o eixo da roda traseira através de coroa e catraca, pneus de borracha com câmara de ar, rodas de mesmo aro, entre outros itens. Na figura 2 é mostrado um modelo de 1893, que já possui essas inovações.



Figura 2 – Bicicleta Overman Victor “Flyer”, de 1893

Fonte: Brightwells Auctioneers & Values, 2014

No século XX as bicicletas continuaram a evoluir para atender as necessidades dos ciclistas. 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. Dentre essas, foi concebida a bicicleta de estrada.

As bicicletas de estrada, também conhecidas como “*road bikes*” ou “*speed*” são bicicletas para uso esportivo, focando na velocidade e viagens de longa duração. Elas

são indicadas para uso no asfalto, possuem pneus estreitos e o guidão curvo. Para atender a essas necessidades, bicicletas desse tipo são mais leves do que as outras, possuem formato aerodinâmico, rodas estreitas e grande aproveitamento da energia aplicada aos pedais. Na figura 3 é mostrada uma bicicleta desse tipo.

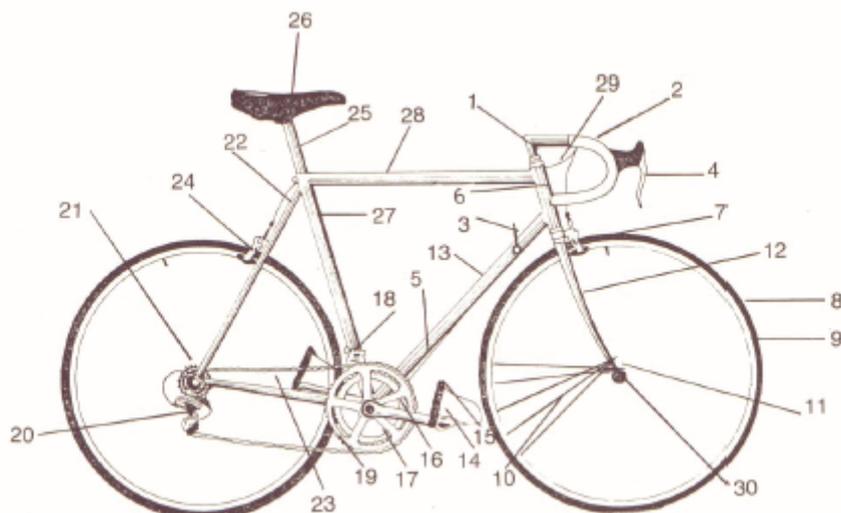


Figura 3 - Bicicleta de estrada Strong Frames "Mike M"
Fonte: Strong Frames, 2016

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.

2.2 Componentes da bicicleta

Como citado anteriormente, as bicicletas atuais possuem formato semelhante, com pouca variação em sua estrutura básica mesmo possuindo estilos e aplicações diferentes. Na figura 4, é mostrado os componentes que fazem parte de uma bicicleta em geral.



- | | |
|-----------------------|----------------------|
| 1. Mesa | 16. Biela |
| 2. Guidão | 17. Coroas |
| 3. Alavanca do câmbio | 18. Câmbio dianteiro |
| 4. Manete do freio | 19. Corrente |
| 5. Cabo do freio | 20. Câmbio traseiro |
| 6. Tubo da direção | 21. Roda livre |
| 7. Freio dianteiro | 22. Garfo posterior |
| 8. Pneu | 23. Vara posterior |
| 9. Aro | 24. Freio posterior |
| 10. Raios | 25. Canote do selim |
| 11. Cubo | 26. Selim |
| 12. Garfo | 27. Tubo vertical |
| 13. Tubo oblíquo | 28. Tubo horizontal |
| 14. Pedal | 29. Cabo do freio |
| 15. Firma-pé | 30. Alavanca |

Figura 4 - Componentes de uma bicicleta de estrada

Fonte: Pequini (2000, P 4.1)

O quadro, objeto de estudo deste trabalho, é a parte mais importante da bicicleta. Nele devem ser fixadas todos os outros componentes, portanto, este elemento deve ter boas qualidades mecânicas. Estas qualidades dependem, em grande parte, do material do qual o quadro é constituído e do processo de fabricação. Do quadro serão definidos o tamanho da bicicleta, a forma, conforto e quanto sua deformação durante os esforços influenciará no rendimento do conjunto (PEQUINI, 2000).

O quadro compõe-se, geralmente, de quatro tubos principais unidos por soldas ou cachimbos soldados e um par de tubos de diâmetros menores que compõem o garfo posterior, conforme ilustra a figura 5.

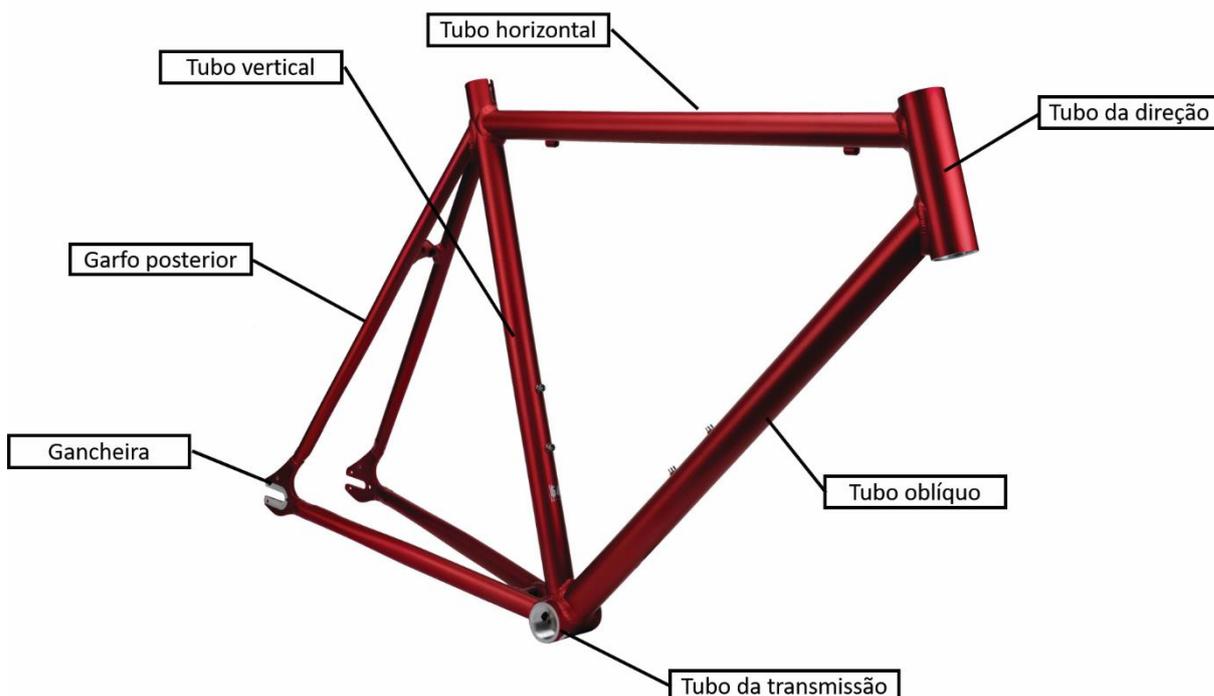


Figura 5 – Componentes de um quadro
Fonte: Performance Bicycles (2015), adaptado

2.3 Materiais

Com o rápido avanço da tecnologia que acontece nos tempos atuais, cada vez mais são empregados novos métodos e materiais para os mais diversos projetos e produtos. Isto não é diferente com as bicicletas. Tendo a tecnologia como aliada, é possível desenvolver os melhores tipos de quadro para cada aplicação. Seja para bicicletas usadas apenas por lazer, ou para os profissionais mais exigentes.

Há uma infinidade de pesquisas relacionadas aos materiais e suas propriedades mecânicas, área de interesse das indústrias do setor. Dessa forma, é possível determinar as melhores aplicações e os melhores materiais para a fabricação dos quadros de bicicletas.

No escopo desse trabalho, foram selecionados apenas os materiais metálicos. Tal escolha se deve pelo fato de serem os materiais mais utilizados pela indústria, e as suas características físicas, como o isomorfismo, que permite resultados na simulação mais fiéis aos quadros reais, sem que se exija grande quantidade de recursos computacionais.

Entre as ligas metálicas, foram selecionados para o estudo as liga de aço, de alumínio e de titânio.

2.3.1 Aço

O aço-carbono é um material comum e de custo baixo em comparação a outras ligas metálicas. É composto de ferro misturado com 0,008% a 2,11% de carbono. Suas propriedades podem ser variadas de acordo com elementos adicionados à sua composição, e passam a ser chamados aços-liga. Este material, por sua boa ductilidade, pode ser facilmente usinado, forjado, laminado e extrudado. Os principais elementos de liga utilizados são o níquel, cromo e molibdênio. Por suas boas propriedades, facilidade de processamento e baixo preço, o aço é o material mais utilizado na indústria em geral.

Na fabricação de bicicletas, são comumente utilizados os aços AISI 1040 e AISI 4130, também chamado de *Chromoly*, o único da família de aços 4000 utilizado na fabricação de quadros de bicicletas. Um quadro em Chromoly, dependendo de suas dimensões, pode ser ligeiramente mais pesado que um em alumínio, porém mais resistente e durável. A tabela 1 apresenta as propriedades dos aços utilizados neste trabalho.

Tabela 1 – Propriedades dos aços	
Propriedades mecânicas do Aço AISI 1040	
Modulo de Elasticidade(E)	210 GPa
Coefficiente de Poisson (ν)	0,30
Densidade (ρ)	7860 kg/m ³
Tensão Limite de Escoamento	350 Mpa
Propriedades mecânicas do Aço AISI 4130	
Modulo de Elasticidade(E)	210 GPa
Coefficiente de Poisson (ν)	0,28
Densidade (ρ)	7700 kg/m ³
Tensão Limite de Escoamento	360 Mpa

Fonte: (MATWEB, 2016)

2.3.2 Alumínio

Ligas de alumínio são caracterizadas por sua baixa densidade, alta condutividade térmica e elétrica, boa ductilidade e capacidade de fundição, soldabilidade e sua resistência à corrosão quando exposto à atmosfera. Porém, quando se faz necessária a resistência, o alumínio apresenta esta cerca de três vezes

mais baixa que o aço, limitando sua aplicação. O cenário muda quando estão em questão as ligas de alumínio. Estas podem apresentar resistências até 1,5 vezes maiores comparadas a alguns aços moles, que são alcançadas devido aos diversos processos de endurecimento que podem ser empregados ao alumínio. As ligas desse material são muito utilizadas em estruturas de aeronaves e peças automotivas, como blocos de motores, pistões e distribuidores.

Em quadros de bicicletas, é possível desenvolver estruturas consideravelmente mais leves que as de aço. Entretanto, torna os quadros mais rígidos em decorrência dos grandes diâmetros e espessuras utilizadas para a fabricação, o que oferece mais agilidade na movimentação do ciclista ao custo do conforto, devido à maior absorção de impactos, que um quadro de aço oferece.

Entre as ligas de alumínio mais comumente utilizadas na indústria está a liga 6061, utilizada neste trabalho, que tem suas propriedades mecânicas descritas na tabela 2. Esta liga possui em sua composição silício (0,4%), ferro (0,7%), cobre (0,4%), manganês (0,15%), magnésio (1,2%), cromo (0,35%), zinco (0,25%) e titânio (0,15%).

Tabela 2 – Propriedades do alumínio

Propriedades mecânicas do Alumínio	
Modulo de Elasticidade(E)	70 GPa
Coefficiente de Poisson (v)	0,33
Densidade (ρ)	2580 kg/m ³
Tensão Limite de Escoamento	210 Mpa

Fonte: (MATWEB, 2016)

2.3.3 Titânio

As ligas de titânio possuem propriedades mecânicas superiores as ligas de aço mais comuns. O metal possui baixa densidade, elevado ponto de fusão e módulo de elasticidade altíssimo. Além das ótimas propriedades, suas ligas podem ser facilmente usinadas e forjadas por ser um material muito dúctil. Este material ainda apresenta outra característica importantíssima, a resistência à corrosão. Este elemento é naturalmente resistente ao ar e à ambientes marinhos, o que lhe concede uma ampla gama de aplicações de alta performance. Titânio e suas ligas são muito utilizados em aeronaves, veículos espaciais, implantes ortopédicos, indústria química e, como no caso deste estudo, vem sendo empregado na fabricação de quadros de bicicletas.

Apesar de todos os pontos positivos, o titânio é altamente reativo em temperaturas elevadas, o que exige técnicas alternativas de refino, fusão e fundição. O que, naturalmente, eleva bastante o preço de suas ligas.

A liga de titânio mais utilizada na fabricação de bicicletas é a Ti-3Al-2,5V, que possui em sua composição alumínio (3%) e vanádio (2,5%) (MATWEB, 2016). Suas propriedades mecânicas estão mostradas na tabela 3 a seguir.

Tabela 3 – Propriedades mecânicas da liga de titânio

Propriedades mecânicas da liga Ti-3Al-2.5V	
Modulo de Elasticidade(E)	100 GPa
Coefficiente de Poisson (v)	0,30
Densidade (ρ)	4480 kg/m ³
Tensão Limite de Escoamento	500 Mpa

Fonte: (MATWEB, 2016)

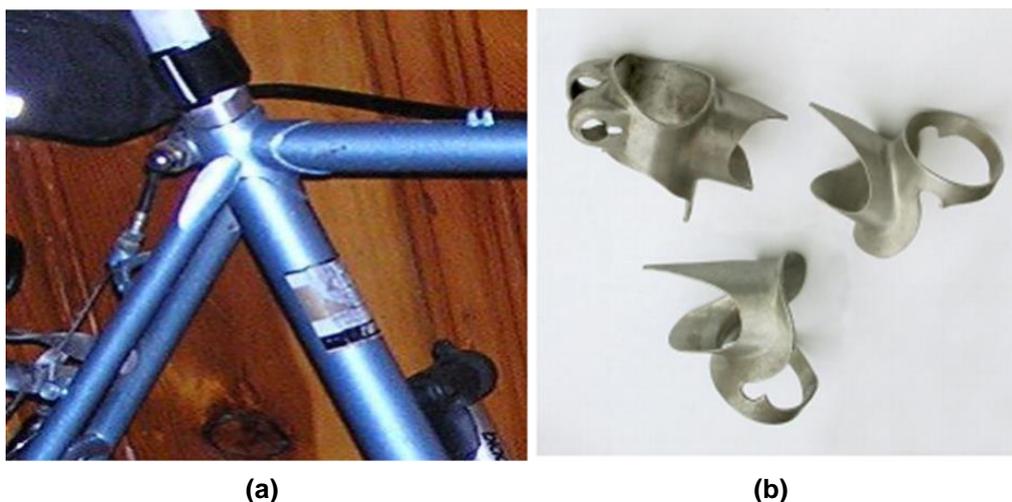
2.4 Métodos de Fabricação

2.4.1 Aço

Um método comum de fabricação de quadros de aço consiste em utilizar tubos com armações, ou cachimbos, em suas extremidades. Os tubos são conectados através de peças de aço, muitas vezes inoxidável. Após inserir os tubos nas armações, estes são revestidos latão ou prata.

Os cachimbos aumentam significativamente a resistência do quadro nas junções, pois distribuem os esforços sobre uma maior área superficial. Além disso, são fabricados de modo a minimizar o efeito de concentração de tensões.

Quadros montados com armações são extremamente fáceis de reparar em comparação com quadros soldados, pois, no caso de ruptura de um tubo, este pode ser substituído aplicando calor para o separar do cachimbo.



(a) (b)
Figura 7 - Quadro de aço (a) e cachimbo (b)
Fonte: (ADVAMEG INCORPORATION, 2006)

2.4.2 Alumínio

Quadros em alumínio podem ser, basicamente, fabricados de duas formas. A mais comum, por soldagem, que requer alguns cuidados se tratando desse material. E por hidroformagem, que apesar de ser um processo simples, necessita de maior investimento prévio para a compra de equipamentos.

O alumínio é um metal muito reativo, e acaba oxidando rapidamente a altas temperaturas. Por isso, deve-se raspar a superfície oxidada para que esta não interfira na qualidade da solda, gerando um cordão descontínuo. Os tubos de alumínio podem ser fixados à dissipadores de calor feitos em latão, por serem altamente condutores de calor e possuírem ponto de fusão mais alto que o do alumínio.

A hidroformagem consiste em se introduzir os tubos de alumínio em um molde, onde posteriormente é injetado um fluido sob alta pressão, expandindo o metal, que toma a forma do molde. Este processo passa a ser econômico para uma grande produção de peças, visto que se necessita apenas de molde, gerando economia de material.

2.4.3 Titânio

O processo de fabricação de quadros em titânio é de grande complexidade. Além do material ter um alto custo, trabalhar com ele também exige operações dispendiosas e cautelosas.

De início, o tubo de titânio é aquecido em um forno com atmosfera controlada, sem oxigênio. Por ser muito reativo, é necessário que o titânio seja imerso em uma solução de ácido clorídrico, após o aquecimento, para remover a superfície oxidada. Na sequência, uma máquina é responsável por deixar o tubo com o comprimento correto, e torná-lo oco.

Após uma inspeção de sua composição química, os tubos de titânio são recozidos à vácuo, processo necessário para reduzir a dureza de modo que ele possa ser trabalhado sem causar danos à máquina, ou ao próprio material.

Em seguida, os tubos são submetidos à alta pressão, reduzindo tanto seu diâmetro, como sua espessura. Com esse processo aumenta-se a densidade do tubo, deixando-o com a dureza e maleabilidade desejadas. Novamente, o titânio deve passar por um recozimento à vácuo, desta vez com o intuito de reduzir as tensões residuais presentes no tubo.

Em sua última etapa, os tubos de titânio são polidos e soldados de acordo com o formato do quadro.

2.5 Critérios de dimensionamento do quadro

Conforme especificado por Ribeiro (2013), há dois critérios principais a serem considerados no projeto de um quadro:

- 1) Devem possuir resistência mecânica suficiente para suportar esforços ocasionais de elevado valor e resistência à fadiga suficiente para ter uma durabilidade longa para uso normal;
- 2) Não se devem deformar mais do que determinados valores, para que o quadro absorva o mínimo possível de energia proveniente do pedalar do ciclista.

Com essas informações, entende-se que o quadro deve suportar os esforços exigidos sem que ocorram falhas visíveis na estrutura. Analisam-se as deformações máximas permanentes e as instantâneas, devendo estar entre os limites previstos.

Para determinação dos limites previstos, leva-se em consideração a tensão de escoamento do material. As tensões máximas nos quadros devem possuir valores abaixo do limite de escoamento, sendo que abaixo deste limite o quadro se deforma dentro do regime elástico.

Tal análise pode ser realizada efetuando-se testes normalizados para baixo e/ou elevado número de ciclos, assim obtendo-se os valores de tensões máximas no momento da ruptura. No presente trabalho, salienta-se que serão realizadas simulações computadorizadas e não testes. Desse modo, valores para as tensões máximas admissíveis deverão ser impostos.

A simulação não leva em consideração certas características de um quadro de bicicleta real. Algumas simplificações fizeram-se necessárias. A primeira deve-se à junção dos tubos: em um quadro real, conforme foi mencionado anteriormente, é comum o emprego de soldagem. Simular efeitos de soldagem pode se tornar uma tarefa extremamente complexa, pois seria necessário realizar um estudo sobre características do material de adição da solda, bem como variações de propriedades na região do material do quadro afetado pelas variações térmicas geradas por tal processo. A segunda simplificação diz respeito a fadiga, que está fora do escopo desse trabalho. O quadro deve ser projetado para trabalhar em vida infinita, ou seja, sem o surgimento do fenômeno da fadiga. Para isso, define-se que as tensões máximas não deveriam ultrapassar as tensões de limite elástico do material.

2.5.1 Tensões a serem analisadas

A partir dos requisitos de projeto de um quadro, conclui-se a necessidade de analisar os seguintes parâmetros para obter respostas quanto aos esforços solicitados: máxima tensão normal, tensão de cisalhamento, máxima tensão de Von Mises, flambagem, força axial, deflexão e o peso do quadro.

Tensão normal: Tensões normais são aquelas que atuam na direção normal à superfície de um componente, que no caso do trabalho, são os tubos que compõem o quadro (NORTON, 2004). É considerada positiva quando a força é trativa, ou seja, quando traciona o tubo; e negativa quando a força é compressiva, comprimindo o tubo.

Máxima tensão de von Mises: De acordo com a teoria de von Mises, um sólido dúctil vai escoar quando a densidade da energia de distorção alcançar um valor crítico para cada material (KIM e SANKAR, 2009). No estado de tensão uniaxial, o valor crítico de energia de distorção pode ser estimado através de um ensaio de tração

uniaxial. Considerando a fase de escoamento, obtém-se a densidade de energia de distorção através de:

$$U_d = \frac{1+\nu}{3E} \sigma_e^2 \quad \text{Eq. (1)}$$

Esta energia obtida é o valor crítico de densidade de energia de distorção do material. Desse modo, pelo critério de falha de von Mises, um material sob carregamento multiaxial irá escoar quando a energia de distorção for igual ou maior que o valor crítico de cada material (KIM e SANKAR, 2009):

$$U_d = \frac{1+\nu}{3E} \sigma_{VM}^2 \quad \text{Eq. (2)}$$

$$\sigma_{VM} \geq \sigma_e$$

A tensão de von Mises em termos gerais pode ser escrita como

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_{11}-\sigma_{22})^2+(\sigma_{22}-\sigma_{33})^2+(\sigma_{33}-\sigma_{11})^2+6(\sigma_{12}^2+\sigma_{23}^2+\sigma_{31}^2)}{2}} \quad \text{Eq. (3)}$$

Considerando um estado em que haja apenas cisalhamento, a tensão cisalhante máxima é determinada da seguinte forma:

$$\tau_{max} = \sigma_1 = \frac{\sigma_e}{\sqrt{3}} = 0,577\sigma_e \quad \text{Eq. (4)}$$

Ou seja, o material irá escoar quando a tensão de cisalhamento alcançar o valor de $0,577\sigma_e$.

Flambagem: A flambagem ocorre quando um componente sofre flexão transversalmente devido à compressão axial. Em peças esbeltas como os tubos do quadro torna-se necessário essa análise, pois uma flambagem excessiva pode causar instabilidades. Pela equação de Euler, é possível determinar se uma coluna biarticulada sofre flambagem:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad \text{Eq. (5)}$$

Na qual P_{cr} é a força crítica, E o módulo de Young, I o momento de inércia e L o comprimento do tubo.

Convém ressaltar que, apesar de estar fora do escopo deste trabalho, a fratura por fadiga é um problema muito comum em bicicletas. Ela ocorre quando o material é

submetido à uma carga cíclica abaixo da tensão de escoamento, mas que devido à alguns fatores como variações bruscas de seção, defeitos ou tensões residuais, agem como concentradores de tensões, amplificando-as acima do limite de escoamento. Desse modo, desenvolvem-se trincas microscópicas que aumentam a cada ciclo, reduzindo a seção resistente até a fratura do material (SILVA, FERREIRA, *et al.*, 2014).

2.6 Análise de Elementos Finitos

2.6.1 Introdução

Um dos grandes desafios que engenheiros enfrentam é modelar matematicamente fenômenos e eventos físicos, para melhor compreender como eles acontecem com isso haver previsibilidade, e então poder solucionar problemas relacionados. Segundo Reddy (2006) qualquer evento, seja ele físico, químico, biológico ou mecânico, pode ser analiticamente descrito com ajuda das leis da física em termos algébricos, diferenciais, e/ou equações integrais relacionando variadas quantidades de interesse.

Essa descrição analítica é denominada modelo matemático. Um modelo matemático, conforme Seborg *et al* (2010) “nada mais é do que uma abstração matemática de processo real”, sendo desenvolvido usando premissas acerca de como o processo funciona e utilizando axiomas ou leis que governem o mesmo, resultando em equações diferenciais ou integrais.

Frequentemente, os resultados obtidos são equações diferenciais e/ou integrais extremamente complexas, fazendo com que a solução por métodos analíticos tradicionais seja altamente trabalhosa. Quando aplicados em geometria arbitrárias, a solução pelos métodos clássicos se torna impossível (FISH e BELYTSCHKO, 2009).

Para possibilitar o estudo desses processos, drásticas simplificações foram adotadas para se obter uma solução analítica. Entretanto, com o advento da computação, foi possível desenvolver meios de avaliar modelos matemáticos através de métodos numéricos e estimar resultados, caracterizando uma simulação numérica.

2.6.2 Simulações Numéricas

Como anteriormente citado, soluções analíticas de equações aplicadas a geometrias aleatórias são uma tarefa com alta complexidade. Uma simulação numérica possibilita obter tais soluções utilizando aproximações numéricas (métodos numéricos), permitindo transformar equações diferenciais governantes em uma série de equações algébricas de um modelo discretizado, e calculando os resultados com o uso de um computador.

Diversos métodos numéricos foram desenvolvidos, entre os quais vários tem como objetivo comum a solução de equações diferenciais. No método das diferenças finitas, os termos derivativos são substituídos por quocientes diferenciais que envolvem valores da solução em uma malha de pontos de um domínio. As equações algébricas resultantes são resolvidas para valores da solução nos pontos impondo condições de contorno (REDDY, 2006).

2.6.3 Método dos Elementos Finitos

O método dos elementos finitos, também conhecido de forma abreviada como MEF ou FEM (do inglês *Finite Elements Method*) é um método numérico poderoso e generalista, podendo ser aplicado em diversos problemas práticos envolvendo geometrias complexas.

Conforme abordado por Reddy (2006), nesse método um dado domínio é visto como uma coleção de subdomínios, e a equação governante é aproximada por algum método variacional. Os subdomínios são interligados entre si através de nós, conforme exemplifica a figura 9. Nesta figura, a solução é composta por um somatório de 6 subdomínios.

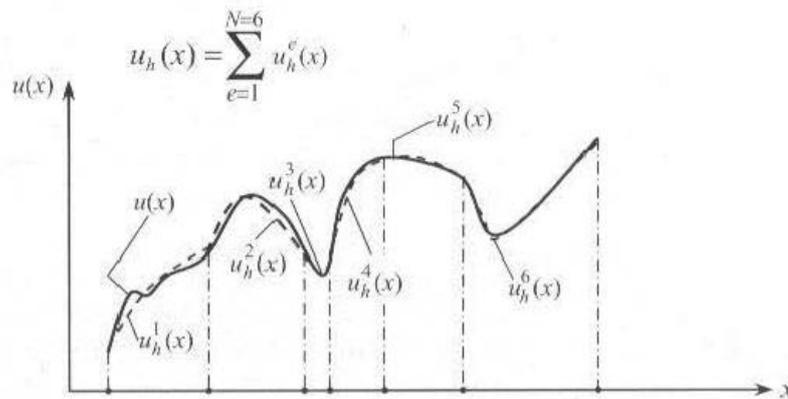


Figura 8 – Exemplo de uma discretização pelo MEF
Fonte: (REDDY, 2006)

Dividir a solução em uma “coleção” de polinômios é uma maneira fácil de simplificar a representação de uma solução complicada.

Quando essa ideia é aplicada a uma superfície, o domínio – geometria da superfície – é subdividido em geometrias mais simples, chamadas de elementos finitos (subdomínios). Cada elemento finito pode ser visto com um domínio próprio, no qual as soluções aproximadas são obtidas. A figura 10 ilustra uma aproximação para uma geometria genérica. Esta é chamada de malha de elementos finitos e o processo para a sua construção é conhecido como geração de malha (FISH e BELYTSCHKO, 2009)

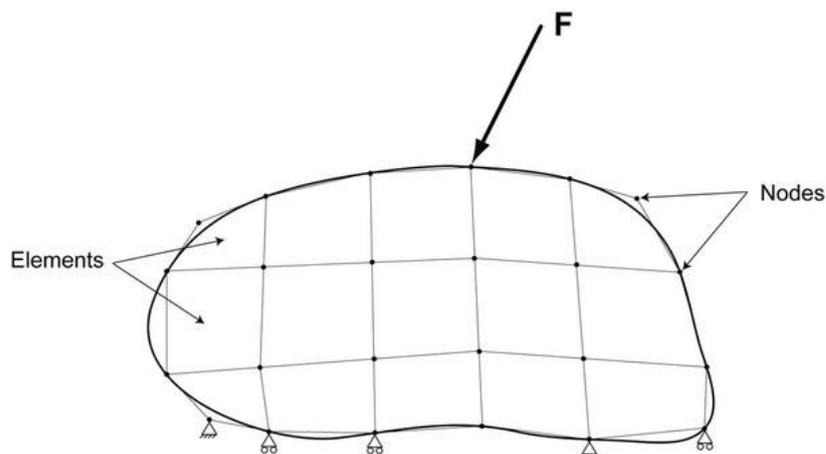


Figura 9 – Discretização em uma geometria genérica
Fonte: (REDDY, 2006)

Segundo Fish e Belytschko (2009) o MEF foi desenvolvido nos anos 1950 pela indústria aeroespacial. Os principais envolvidos foram a Boeing e a Bell Aeroespacial. Foi estabelecido os procedimentos de montagem da matriz de elementos e

formulações através de um artigo escrito por M.J. Turner, R.W. Clough, H.C. Martin e L.J. Topp. Nos anos 1960, E. Wilson desenvolveu um dos primeiros programas computacionais em elementos finitos, que foi amplamente usado. Em 1965, a NASA iniciou um projeto de elementos finitos, o que gerou um programa chamado NASTRAN, que inovou com a possibilidade de uma análise tridimensional em vigas e elementos de casca. Ainda nos anos 60, o engenheiro norte-americano John Swanson desenvolveu um programa em MEF para análise de reatores nucleares, e em 1970 fundou a ANSYS, sendo um dos pioneiros na comercialização de programas em elementos finitos.

2.6.4 Aplicação do MEF ao projeto proposto

A aplicação do MEF ao quadro de bicicletas tem como base a formulação de elementos finitos para vigas e cascas. Esses elementos são usados para modelar estruturas e componentes que são finos em relação às outras dimensões, tais como os tubos que compõem o quadro.

Existem duas teorias principais para descrever o comportamento das vigas: a de Euler-Bernoulli e a de Timoshenko. Neste trabalho optou-se por se basear na teoria da viga de Euler-Bernoulli, também conhecida como teoria da viga para engenharia (FISH e BELYTCHKO, 2009). Tal escolha deve-se pelo fato dessa teoria desprezar o efeito do cisalhamento, possibilitando a utilização da teoria de viga fina.

A formulação inicia-se inserindo um eixo no centroide da seção transversal de uma viga cilíndrica, conforme mostra a figura. O eixo é chamado linha central (ou eixo neutro), e a viga está sob uma carga distribuída $p(x)$. A maior simplificação na teoria da viga para engenharia vem da hipótese de como a viga se deforma. A teoria tem como hipótese-chave que seções normais à linha central de uma viga permanecem retilíneas e normais (FISH e BELYTCHKO, 2009), conforme ilustrado na figura 11, a qual mostra uma viga antes e depois da aplicação de uma carga.

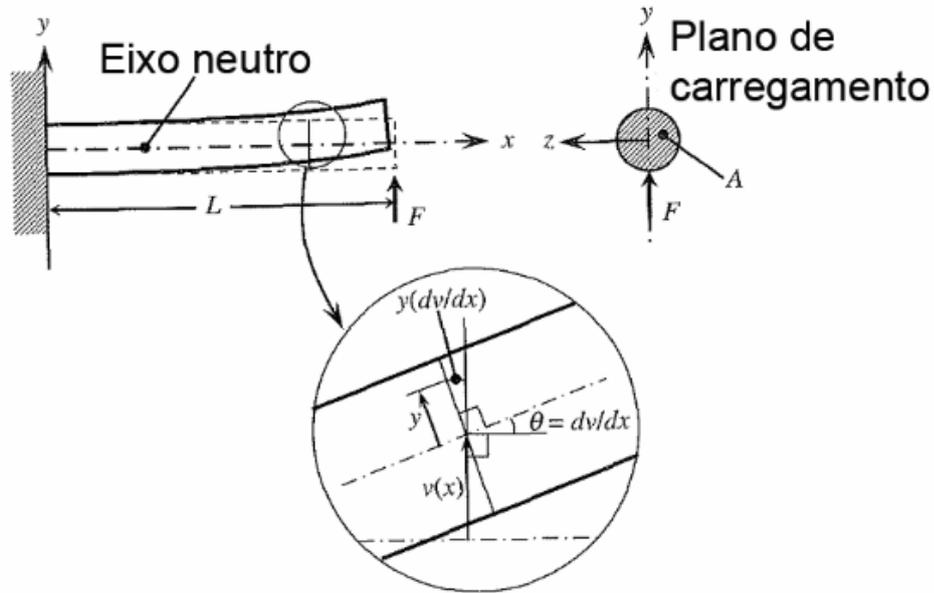


Figura 10 – Deflexão de uma viga de Euler-Bernoulli
Fonte: (KIM e SANKAR, 2009)

O campo de deslocamentos pode ser representado por:

$$u(x, y) = u_0(x) - y \frac{dv}{dx} \quad \text{Eq. (8)}$$

No qual o termo u_0 é o deslocamento da viga ao longo do eixo neutro e o ângulo θ indica a inclinação da viga.

2.6.5 Pórticos

Seguindo a formulação demonstrada por Kim e Sankar (2009), uma estrutura de pórtico é similar a uma treliça, com a diferença de que os componentes, com adição de uma força axial, podem possuir força cortante e momento fletor. Deste modo, essa estrutura combina características de uma viga e uma barra uniaxial. Os componentes são ligados entre si através de uma junta rígida, como uma soldagem, a qual transmite a força cortante e o momento fletor, além de sofrer a mesma rotação quando a estrutura deforma. Para uma estrutura plana bidimensional, há 3 graus de liberdade, u , v e θ , deslocamentos nas direções x e y , e rotação em torno do eixo z , por nó, conforme mostra a figura 12.

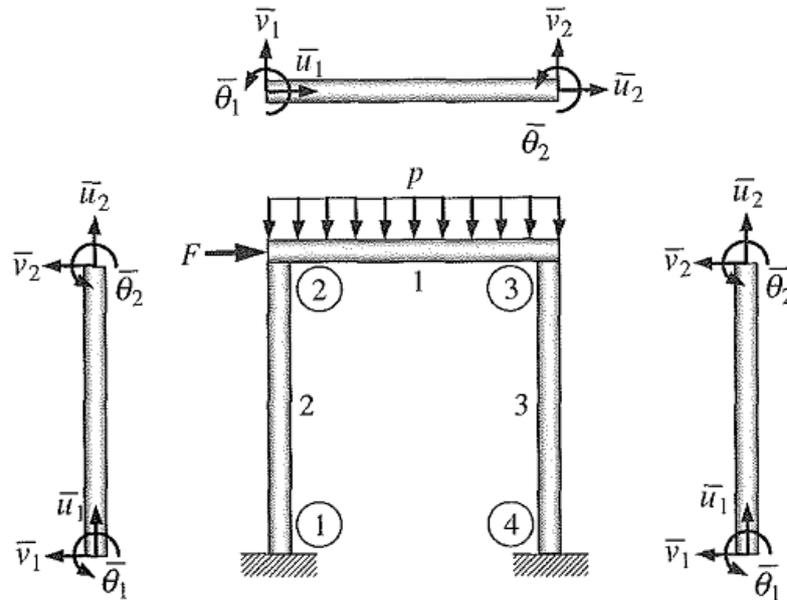


Figura 11 – Estrutura de um pórtico
Fonte: (KIM e SANKAR, 2009)

Considerando um diagrama de corpo livre de um elemento conforme mostrado na figura, que possui dois nós e 3 graus de liberdade em cada nó, e cada elemento possui um sistema de coordenadas local \bar{x} - \bar{y} no qual o eixo \bar{x} é paralelo ao elemento. O eixo é positivo na direção do primeiro para o segundo nó do elemento. No sistema de coordenadas local os deslocamentos nos eixos \bar{x} e \bar{y} são respectivamente, \bar{u} e \bar{v} , e a rotação no eixo \bar{z} é dada por $\bar{\theta}$. Cada nó possui 3 graus de liberdade. As forças atuando no elemento, em coordenadas locais, são $f_{\bar{x}1}$, $f_{\bar{y}1}$, e \bar{c}_1 no nó 1 e $f_{\bar{x}2}$, $f_{\bar{y}2}$, e \bar{c}_2 no nó 2. A meta é derivar uma relação entre os seis elementos de força e os seis graus de liberdade. É conveniente usar o sistema de coordenadas locais para derivar a relação força-deslocamento assim como os efeitos axiais e de flexão são independentes nas coordenadas locais. A figura 13 mostra um elemento de pórtico em coordenadas locais.

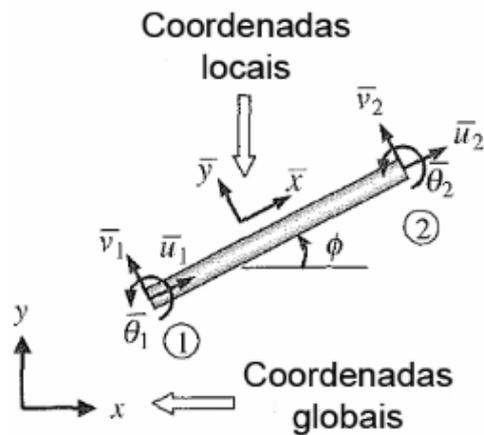


Figura 12 – Elemento de um pórtico
Fonte: (KIM e SANKAR, 2009)

As forças nos elementos e deslocamentos nodais são vetores, podendo ser representados por:

$$\{\bar{f}\} = [T]\{f\} \quad \text{Eq. (9)}$$

Onde a matriz de transformação $[T]$ é uma função de direção dos cossenos dos elementos. Uma relação semelhante é usada para conectar os graus de liberdade das coordenadas locais e globais:

$$\{\bar{q}\} = [T]\{q\} \quad \text{Eq. (10)}$$

Como um sistema de pórticos é uma combinação entre uma treliça bidimensional e elementos de vigas, é possível uma relação entre os graus de liberdade e forças no sistema de coordenadas locais, representado por:

$$[\bar{k}]\{\bar{q}\} = \{\bar{f}\} \quad \text{Eq. (11)}$$

Onde $[\bar{k}]$ é a matriz de rigidez no sistema de coordenadas locais.

3 METODOLOGIA

3.1 Considerações preliminares

Para que o estudo pudesse ser realizado, algumas considerações foram necessárias:

- 1) Os tubos referentes ao jogo de direção e ao jogo de transmissão central não fazem parte do escopo do estudo, portanto tiveram suas dimensões mantidas constantes, tendo como referências diâmetros utilizados comercialmente e uma espessura fixada em 2,0mm;
- 2) No garfo posterior, a gancheira foi simplificada para um cilindro de 32mm de diâmetro e furo central de 11mm, para fixação de apoios;
- 3) Ainda no garfo posterior, o tubo de ligação entre os dois tubos oblíquos foi fixado em 8mm de diâmetro e 2mm de espessura;
- 4) Os comprimentos dos tubos dos quadros de cada material serão mantidos constantes, bem como os ângulos de fixação entre eles;
- 5) A espessura inicial dos tubos é de 0,5mm variando até 2,00mm, sendo que em cada simulação a espessura será a mesma para todos os tubos avaliados;
- 6) A ligação entre os tubos será rígida, com soldas livres de defeitos;
- 7) Quando um ambiente dinâmico é simulado usando análise estática, as cargas estáticas são normalmente multiplicadas por um fator de carregamento dinâmico G . Neste estudo, foi adotado como fator $G = 2$.
- 8) É utilizado um coeficiente de segurança de 1,5.

3.2 Geometria do quadro

Para determinação da geometria do quadro, busca-se uma geometria que atenda as regulamentações da UCI, "*Union Cycliste Internationale*" – União do Ciclismo Internacional - para competições de estrada.

Há uma certa dificuldade em obter dados de dimensões geométricas dos quadros dos maiores fabricantes. Outro ponto a se considerar é que a grande maioria das bicicletas de competição atualmente são fabricadas em fibra de carbono, o que foge do escopo do trabalho. Por estes motivos, foi utilizado como referência para construção da geometria um quadro de liga de titânio de um fabricante artesanal, que

atende aos requisitos supracitados. Tal quadro pode ser visto na figura 14. Com detalhe do garfo posterior apresentado na figura 15.

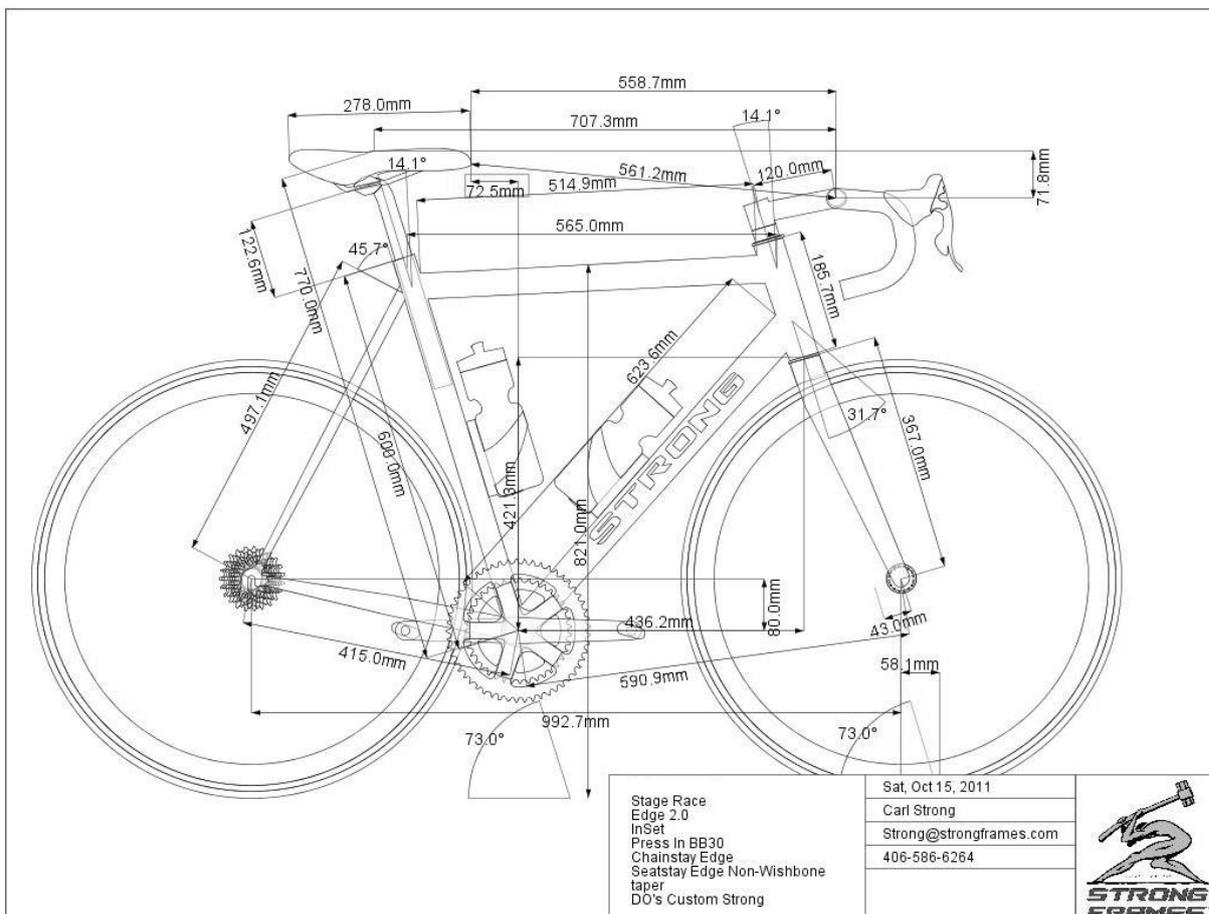


Figura 14 - Bicicleta de estrada de referência, vista lateral

Fonte: (Strong Frames, 2007)

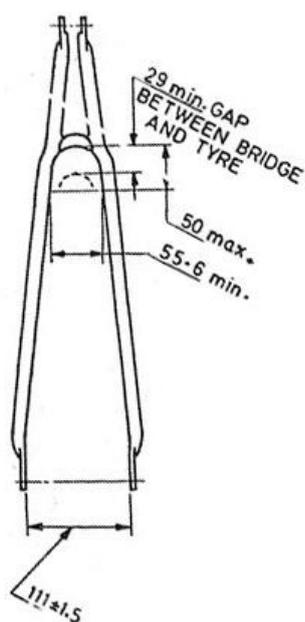


Figura 13 - Modelo usado como referência, vista traseira

Fonte: (Indian Standard, 2008)

3.3 Levantamento das cargas aplicadas

Para que seja possível obter resultados concretos, o levantamento dos carregamentos deve estar muito bem definido. É de grande dificuldade a obtenção de um padrão de carregamentos oriundo da indústria de bicicletas, visto que estariam expondo o modo como dimensionam seus produtos.

Na falta de um padrão a ser seguido, puderam ser adotadas algumas situações mencionadas por Peterson (1986) descritas a seguir:

- 1) Arranque: Um ciclista com massa em torno de 75kg aplica sua máxima força para acelerar uma bicicleta a partir do repouso. Nesse caso, o ciclista encontra-se em pé apoiado apenas nos pedais e no guidão. As forças de inércia são significativas, pois existe aceleração. As parcelas das forças aerodinâmicas, de rolagem e giroscópicas podem ser desprezadas. A bicicleta está em equilíbrio de forças verticais com as rodas alinhadas. Utilizando os dados das forças nos pedais e aceleração, é possível solucionar as equações de equilíbrio estático e dinâmico e obter as forças aplicadas na corrente, pedais e guidão.
- 2) Impacto horizontal: O manual "*Requirements for Bicycles*" do Bureau of National Affairs (BNA) dispõe de normas regulamentadas para testes de carregamento compressivo com cargas orientais. Um carregamento de 980N é aplicado horizontalmente nas gancheiras do garfo, com as gancheiras traseiras engastadas. Dessa forma, o teste simula uma colisão frontal em baixa velocidade contra uma parede ou meio fio. Para que o quadro seja bem-sucedido no teste, não deve haver fratura ou deformação que comprometa o ângulo de esterçamento da roda.
- 3) Impacto vertical: O carregamento devido a um impacto vertical pode ser considerado como o peso do ciclista e a força exercida nos pedais multiplicados pelo fator de carregamento dinâmico.
- 4) Força nos pedais a velocidade constante: Um ciclista de elite imprime uma potência média de cerca de 300W, a 80rpm (LINDSEY). Desprezando-se as forças dinâmicas da perna e forças aerodinâmicas, bem como as perdas de energia transferidas a roda. Tal força é multiplicada pelo fator de carregamento dinâmico.

3.4 Definição da seção dos tubos

Há uma grande variedade de diâmetros, formatos e espessuras das seções transversais dos tubos aplicados pela indústria na fabricação dos quadros. Para este estudo, foi realizado um levantamento sobre quais as dimensões mais utilizadas. Como critério de simplificação para facilitar a simulação, foram considerados apenas os tubos de seção transversal circular.

A partir disso, foram considerados os seguintes tubos, de acordo com a tabela 4.

Tabela 4 – Diâmetros dos tubos

Tubo	Diâmetros [mm]		
Tubo do selim	25,4	27,2	31,8
Tubo horizontal	25,4	27,2	31,8
Tubo oblíquo	25,4	27,2	31,8
Garfo posterior – Tubo horizontal	8,0	10,0	12,0
Garfo posterior – Tubo oblíquo	10,0	12,0	14,0

Fonte: autoria própria

3.5 Configurações dos quadros

Com a definição da geometria e dos tubos adotados, foram definidas as combinações de tubos possíveis para montagem do quadro. Para evitar ligações indevidas e interferências indesejáveis, foram estabelecidos os seguintes critérios:

- O tubo do selim deve possuir um diâmetro externo maior ou igual ao tubo horizontal;
- Os tubos horizontais e oblíquo não devem possuir diâmetros externos superiores ao do tubo do jogo da direção;
- O tubo do garfo posterior horizontal deve possuir um diâmetro igual ou menor que o tubo do garfo posterior oblíquo;
- O tubo do garfo posterior oblíquo deve possuir um diâmetro no máximo duas vezes menor que o tubo do selim.

Considerando esses critérios, obtém-se 36 configurações possíveis de quadros. Acrescentando as espessuras dos tubos, num intervalo de 0,5 a 2,0mm e variação de

0,5mm, obtêm-se 4 espessuras diferentes, elevando a quantidade de combinações possíveis para 144. Multiplicando-se os quatro diferentes materiais analisados, se obteve um total de 576 configurações.

Neste trabalho não será possível avaliar essa quantidade de combinações. Desse modo, optou-se por selecionar combinações chaves. No caso, foram selecionados os tubos com menores dimensões possíveis, os com maiores dimensões possíveis, e alguns intermediários. Assim, é possível estimar o comportamento dos quadros que não foram avaliados. No total, as combinações selecionadas estão apresentadas na tabela 5:

Tabela 5 – Combinações de tubos utilizados

CONFIG	ESPESSURA [mm]	JOGO DA DIREÇÃO [mm]	TUBO HORIZONTAL [mm]	TUBO VERTICAL [mm]	TUBO OBLÍQUO [mm]	GARFO POSTERIOR OBLÍQUO [mm]	GARFO POSTERIOR HORIZONTAL [mm]
1	0-2	38,1	25,4	25,4	25,4	8	14
2	0-2	38,1	25,4	25,4	25,4	10	14
3	0-2	38,1	25,4	25,4	25,4	12	14
19	0-2	38,1	25,4	25,4	31,8	8	14
20	0-2	38,1	25,4	25,4	31,8	10	14
21	0-2	38,1	25,4	25,4	31,8	12	14
22	0-2	38,1	25,4	27,2	31,8	8	14
23	0-2	38,1	25,4	27,2	31,8	10	14
24	0-2	38,1	25,4	27,2	31,8	12	14
34	0-2	38,1	31,8	31,8	31,8	8	14
35	0-2	38,1	31,8	31,8	31,8	10	14
36	0-2	38,1	31,8	31,8	31,8	12	14

Fonte: autoria própria

Somando as combinações selecionadas para a simulação, têm-se 12 quadros. Considerando a variação de espessura e material, foram realizadas 192 simulações.

3.6 Simulação Numérica

A simulação é realizada através do módulo Workbench do programa computacional ANSYS. De modo a sistematizar o procedimento da simulação, a mesma foi subdividida em 7 passos:

- 1) Pré-Análise;
- 2) Geometria;

- 3) Malha;
- 4) Configuração do modelo;
- 5) Solução Numérica;
- 6) Resultados Numéricos;
- 7) Verificação e Validação.

3.6.1 Pré-Análise

Nesta primeira etapa, é realizado o planejamento da simulação. É necessário um total entendimento do problema proposto, para garantir que a solução obtida corresponderá ao que havia sido solicitado. Duas informações são primordiais para a compreensão da simulação: as equações governantes definidas no domínio e as condições de contorno definidas nos vértices do domínio.

No *software* ANSYS, foram utilizados 2 módulos de simulação, interconectados para utilizarem as mesmas características geométricas e carregamentos. São os módulos *Static Structural*, para análise estrutural e *Eigenvalue Buckling*, para avaliação de flambagem.

Conforme visto na sessão de modelagem matemática, as equações governantes para deslocamento nodal são baseadas na teoria da análise de elementos finitos para vigas e pórticos. Para as tensões utiliza-se o critério de Von Mises.

Para determinar as condições de contorno, buscou-se referências de testes físicos normalizados para quadros. Foram encontrados diversos ensaios, que levam em consideração a análise à fadiga, rigidez torcional, rigidez lateral e análise vertical. Tais ensaios tem como objetivo avaliar principalmente a performance do quadro e o conforto do ciclista, fugindo do escopo do trabalho, que propõe uma análise mais simplificada.

A norma EN14781 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2005) estabelece critérios padronizados para avaliações de bicicletas de corrida. Dentre os tipos de ensaios dispostos, o que possui condições de contorno mais semelhantes ao deste estudo é o ensaio de fadiga com forças horizontais. Tal ensaio aplica uma força cíclica ao eixo do garfo dianteiro, sendo este fixado em um apoio deslizante, e o eixo traseiro fixado com apoio do tipo pino, conforme figura 15.

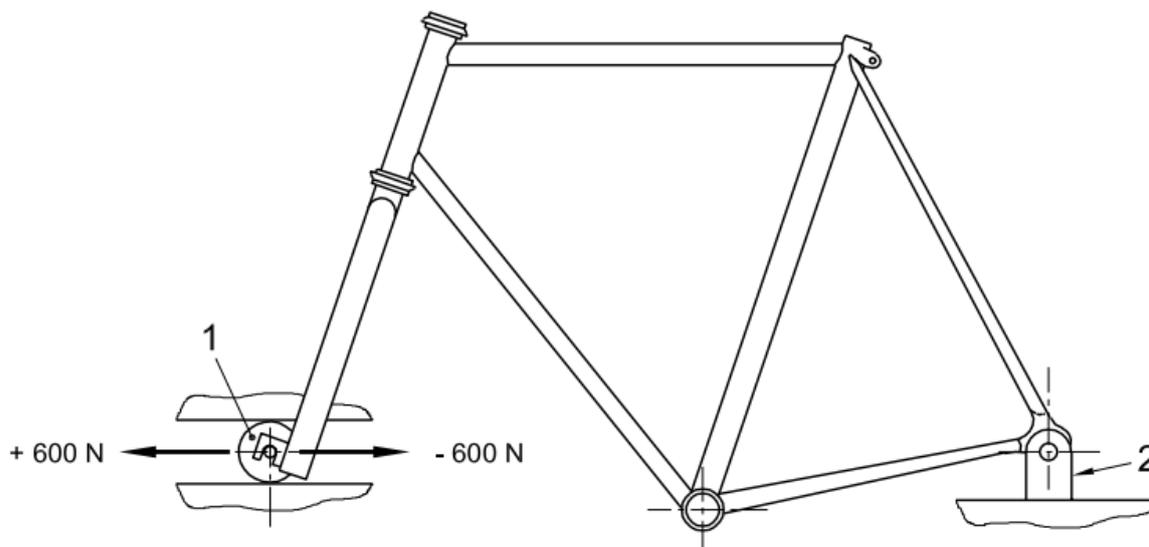


Figura 15 – Ensaio de fadiga com forças horizontais

Fonte: (CEN, 2005)

Houveram dificuldades em encontrar testes reais semelhantes ao deste estudo pelo fato deste ser uma grande simplificação do comportamento de quadros reais. Por exemplo, a carga do ciclista aplicada no assento neste trabalho é apenas vertical, distribuída sob o tubo do selim. Em um quadro real, a mesma carga é distribuída no selim e no guidão. Outro ponto é que em quadros reais, o peso do ciclista é aplicado no selim, e este possui uma certa distância do tubo do assento, gerando um momento no mesmo.

3.6.2 Geometria

A geometria do quadro é modelada no *software* Solidworks a partir das especificações determinadas nas seções 3.2, 3.3 e 3.5. Foi criado um esboço tridimensional do quadro, para servir de base para todos os modelos, conforme a figura 16.

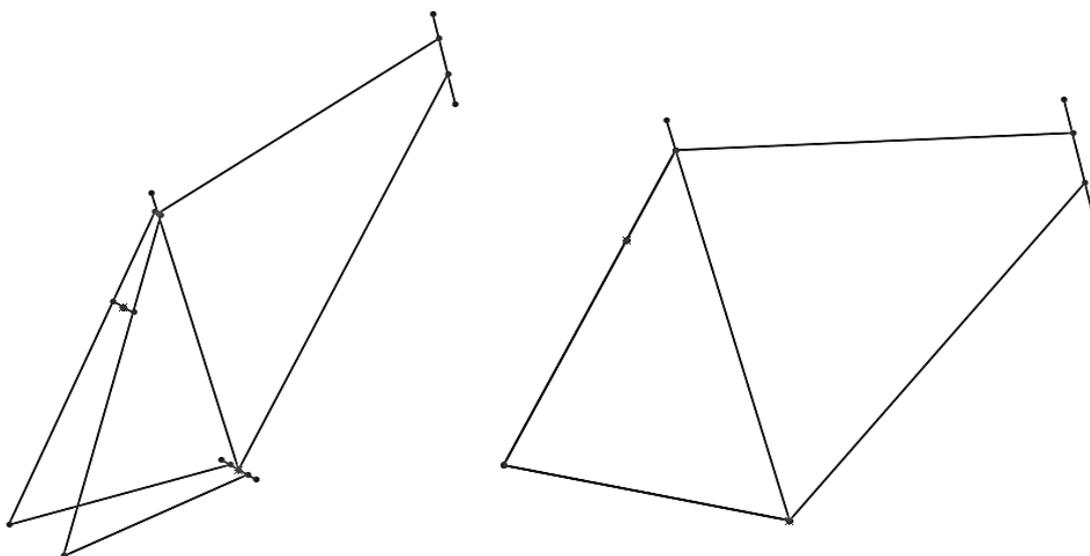


Figura 16 – Esboço tridimensional do quadro
Fonte: autoria própria

A partir deste modelo, foram criados 48 modelos parametrizados do quadro, utilizando recursos de varredura, no qual uma geometria de seção transversal é extrudada seguindo uma linha. Cada linha corresponde a um diferente tubo. Um desses modelos pode ser visto na figura 17.



Figura 17 – Modelo tridimensional do quadro
Fonte: autoria própria

Busca-se modelar uma geometria simplificada, sem uso de recursos de arredondamentos de canto ou indicação de solda, conforme os critérios iniciais. Tais recursos gerariam geometrias mais complexas, o que acarretaria em cálculos mais densos, exigindo um maior processamento computacional.

3.6.3 Malha

Nesta etapa, a geometria é importada para a interface Mechanical do ANSYS. O *software* faz a leitura da geometria e a subdivide em elementos e nós. Para geração de malha, foram utilizados 2 parâmetros de controle: *Automatic Method* e *Mesh Sizing*.

O primeiro, *Automatic Method*, foi selecionado com a opção *multizone*, no qual a malha é gerada utilizando mais de um tipo de elemento. Isso se deve a certa complexidade da geometria do quadro, que contém cortes nos tubos para as ligações,

o que dificulta a geração de malhas com um único elemento. Para possibilitar o estudo, buscou-se a menor quantidade de nós possíveis, para que se obtenha o mínimo de custo computacional com resultados plausíveis.

No processo, foram gerados 4 tipos de elementos de malha, ilustrados abaixo nas figuras 18, 19, 20 e 21.

O primeiro, solid186, consiste em uma estrutura hexaédrica homogênea com 20 nós. Cada nó possui 3 graus de liberdade: translação nodal nos eixos x, y e z.

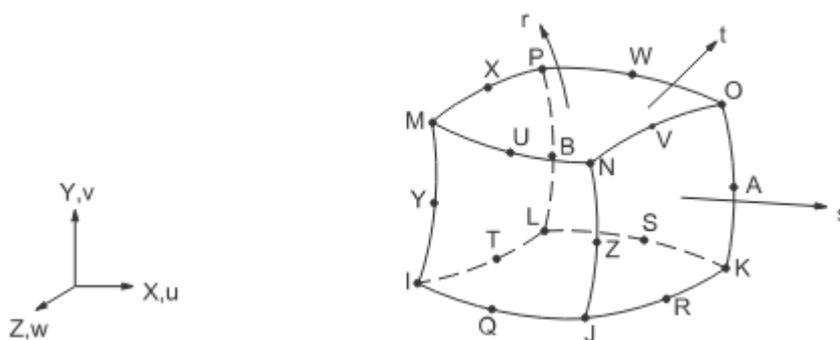


Figura 18 – Elemento de malha solid186

Fonte: (SAS IP, INC., 2015)

O elemento solid187 tem uma estrutura tetraédrica, com 10 nós. Tem comportamento semelhante ao solid186, com 3 graus de liberdade em cada nó. Foi o elemento mais utilizado na construção da malha, englobando os tubos oblíquo, horizontal e vertical, além do garfo posterior

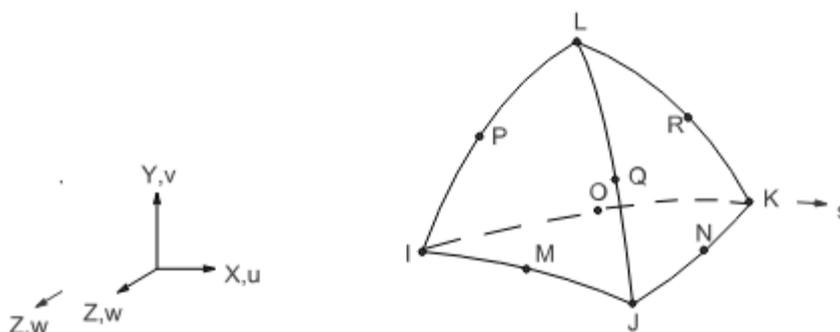


Figura 19 – Elemento de malha solid187

Fonte: (SAS IP, INC., 2015)

O elemento surf154 é uma superfície que pode ter 4 ou 8 nós. É utilizado para efeitos de carregamentos aplicados diretamente às superfícies, se sobrepondo as faces de outros elementos onde há contato, para obter melhores resultados. No quadro ele foi aplicado pelo software nos locais onde há aplicação de forças externas.

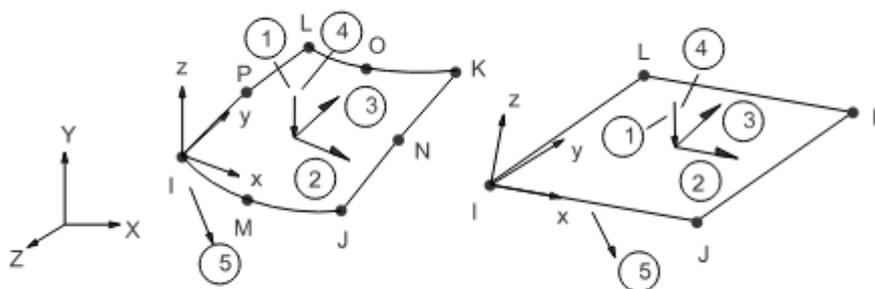


Figura 20 – Elemento de malha surf154

Fonte: (SAS IP, INC., 2015)

O elemento conta174 possui de 8 a 9 nós, e é utilizado em superfícies onde há contato e deslizamento entre faces do elemento geométrico. No quadro foi aplicado nas junções entre os tubos.

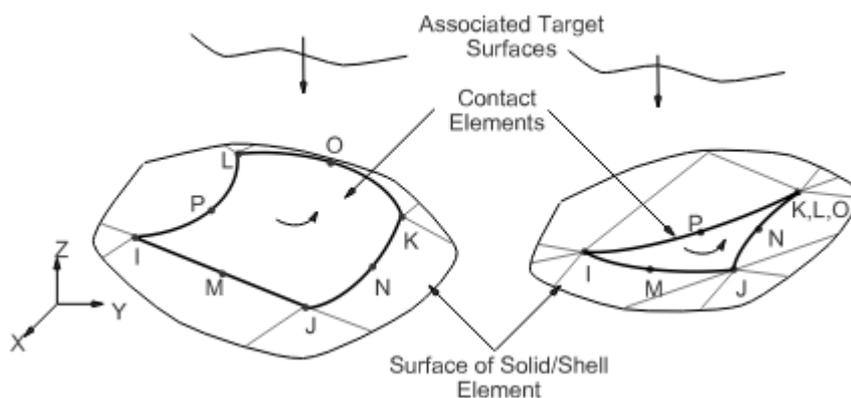


Figura 21 – Elemento de malha conta174

Fonte: (SAS IP, INC., 2015)

O outro método aplicado a geração de malha, *Mesh Sizing*, determina qual o tamanho médio dos elementos. No estudo, após análises e comparativos de qualidade da malha, esse tamanho médio foi determinado em 6mm.

Para uma malha de boa qualidade, há métodos de avaliação no *software*, como por exemplo o recurso “*Skewness*”, que foi utilizado neste estudo. O método consiste em avaliar a simetria do elemento, sendo que quanto mais os tamanhos de suas arestas forem iguais, mais uniforme e simétrico será o elemento e melhor será sua qualidade. A avaliação do recurso varia de 0 a 1, na qual o 0 significa um elemento perfeitamente uniforme e 1 um elemento totalmente assimétrico. O recurso calcula a simetria de todos os elementos e retorna os valores mínimo e máximo, e a média. Neste estudo, buscou-se um valor média de simetria inferior a 0,4.

Para atingir o valor de 0,4, foi necessário reduzir o tamanho dos elementos através do recurso *Mesh Sizing* citado anteriormente. Na figura 22 é mostrada a malha utilizada no quadro nº 1, o qual possui 83199 nós e 35534 elementos.



Figura 22 - Malha gerada em um dos quadros
Fonte: autoria própria

3.6.4 Configuração do modelo

Essa etapa consiste em aplicar todos os suportes e carregamentos na geometria do quadro, assim como o material. O primeiro carregamento vertical, referente ao peso do ciclista, foi aplicado utilizando um recurso de massa distribuída, na superfície superior do tubo vertical. A massa com magnitude de 100kg foi aplicada conforme

ilustrado na figura 26. O carregamento horizontal, de 1000N, foi aplicado à superfície interna do tubo de direção, conforme a figura 27.

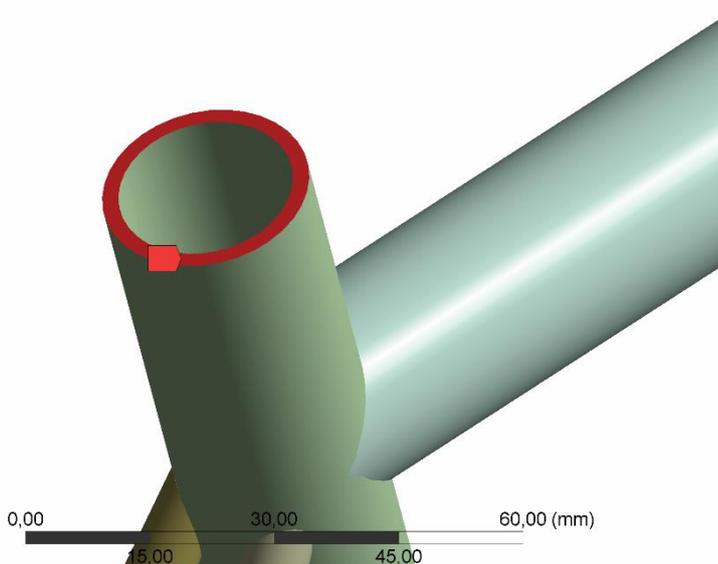


Figura 23 - Área de carregamento do peso do ciclista
Fonte: autoria própria

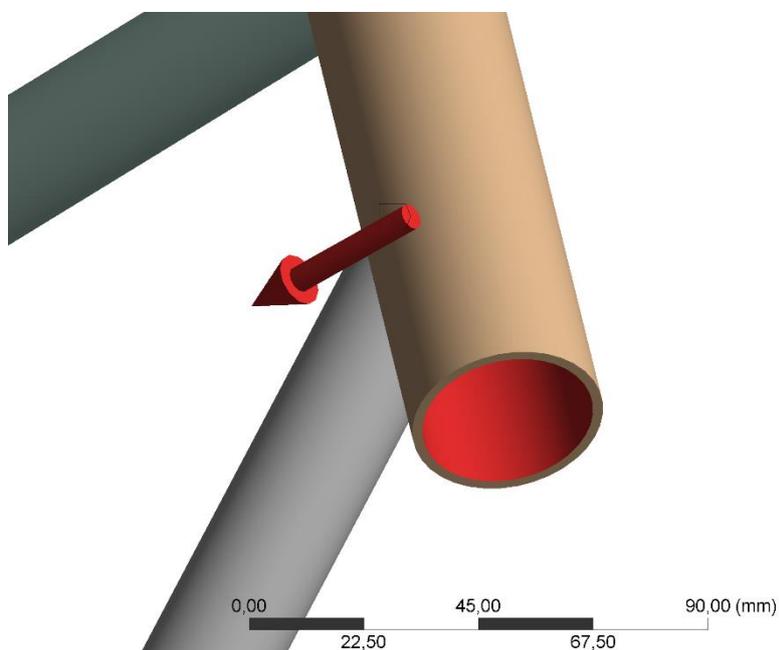


Figura 24 - Área de carregamento das forças horizontais
Fonte: autoria própria

Em seguida, nessa mesma superfície, foi aplicado um suporte do tipo “*Displacement*”, que permite à superfície selecionada deslizar nas direções selecionadas. Seguindo o teste proposto, foram restringidos os eixos X e Y, e

permitido o deslocamento no eixo Z, que corresponde ao deslocamento horizontal descrito na pré-análise.

O próximo carregamento, representando a força aplicada nos pedais, foi aplicado no tubo de transmissão central. A força de magnitude de 300N foi aplicada na superfície interna do tubo, com seu vetor apontado para baixo, conforme ilustra a figura 28.

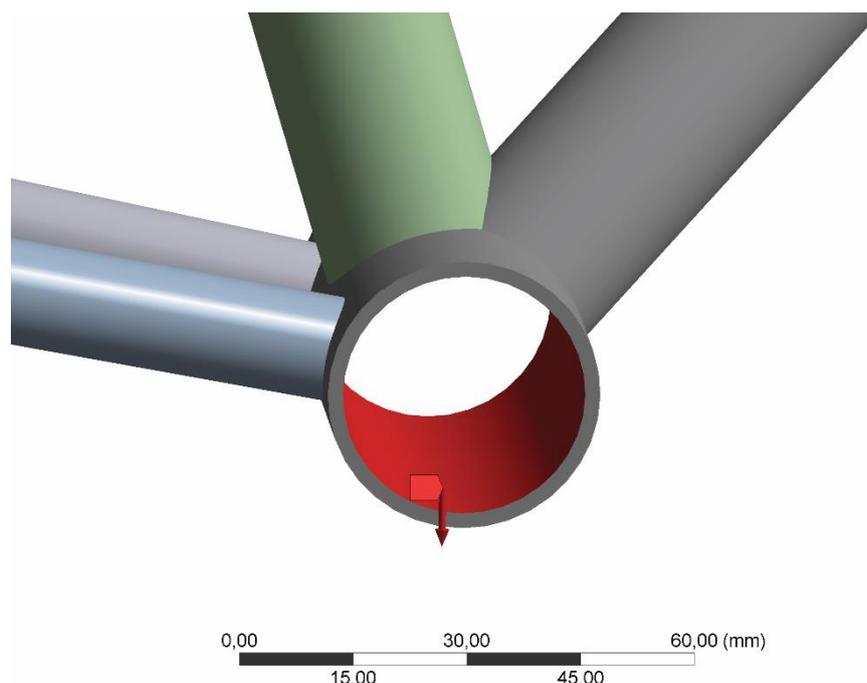
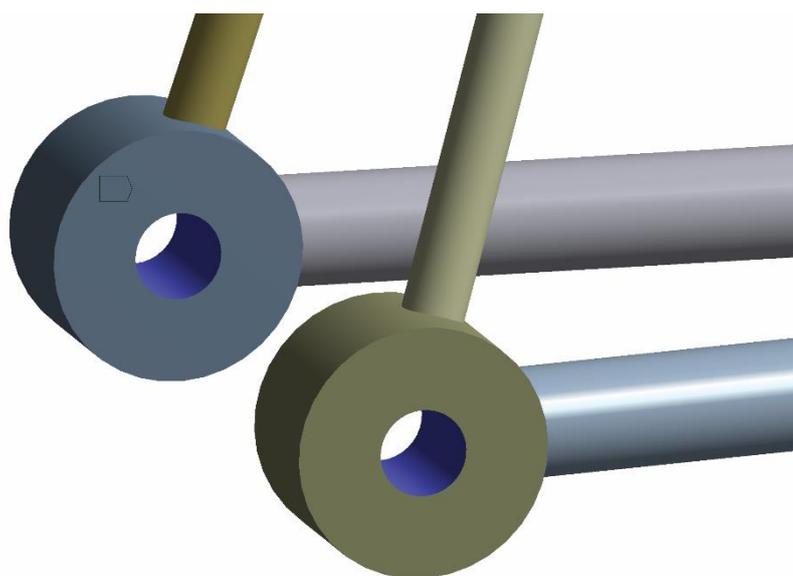


Figura 25 - Carga aplicada referente a força exercida nos pedais

Fonte: autoria própria

Finalizando a seção de suportes e carregamentos, foi aplicado um apoio do tipo cilíndrico no garfo posterior, conforme figura 29. Este tipo de apoio possui 3 restrições possíveis: axial, tangencial e radial. Para representar o movimento de um eixo, foram restringidos os apoios axial e radial, permitindo que o quadro “rotacione”.



0,00 15,00 30,00 45,00 60,00 (mm)

Figura 26 - Apoio traseiro

Fonte: autoria própria

3.6.5 Solução Numérica

Para a solução numérica, deve-se inserir na interface do ANSYS quais tensões deverão ser calculadas. Como o objetivo é a avaliar as tensões máximas no quadro e a deflexão, foram selecionadas as soluções “*Stress – Equivalent (von Mises)*” e “*Deformation – Total Deformation*” para o módulo *Static Structural* e “*Deformation – Total Deformation*” para o módulo “*Eigenvalue Buckling*”.

Determinado esses parâmetros, a simulação já pode ser executada.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As próximas etapas do processo de simulação já incluem os resultados obtidos.

4.1 Resultados numéricos

4.1.1 Avaliação das malhas

No primeiro momento, foi avaliada a malha gerada. Considerando os elementos com tamanho médio de 6mm, as malhas das geometrias analisadas tiveram números próximos entre 28.000 e 34.000 elementos e 70.000 e 84.000 nós, conforme a tabela 6.

Tabela 6 – quantidade média de nós e elementos nos quadros

Espessura	Nº médio de nós	Nº médio de elementos
0,5	84060	34342
1	81018	33580
1,5	75415	31019
2	69811	28457

Fonte: autoria própria

Nota-se que em um quadro de mesmas dimensões variando apenas a espessura, há uma quantidade maior de nós e elementos naquele com tubos de espessura 0,5 mm. Isso se deve ao fato de espessuras mais estreitas “estrangularem” os elementos tridimensionais, de modo que para uniformizá-los seria necessário reduzir ainda mais o seu tamanho médio. Assim, conclui-se que os quadros de espessuras de 0,5 mm não tiveram a mesma qualidade dos quadros de 2,0 mm, mas ainda assim trouxeram resultados coerentes.

4.1.2 Deslocamento Total

Em todas as simulações realizadas, a região com maior deformação foi a região frontal do quadro, devido à carga horizontal e as restrições impostas – o tubo de direção é livre no sentido horizontal. As regiões com menores deformações foram as correspondentes às gancheiras traseiras, devido aos suportes nessas regiões. Nota-se também uma deformação significativa nos tubos do garfo horizontal traseiro, conforme pode ser visto na figura 30



Figura 27 - Locais de deformação máxima e mínima
Fonte: autoria própria

Nota-se uma influência direta da espessura e material. Os quadros de espessura 0,5mm de alumínio foram aqueles que apresentaram maiores valores de deslocamento, no qual o quadro de configuração nº1 apresentou maior valor, de 0,529mm. As deformações dos quadros em alumínio podem ser vistas na figura 28.

Em seguida, os quadros de titânio apresentaram maiores deformações, explicadas pela característica dúctil do material. Assim como nos quadros de alumínio, os de liga de titânio com espessura de 0,5 apresentaram maiores deformações. O gráfico exibindo a deformação máxima dos quadros pode ser visto na figura 29.

Por fim, os quadros de aço tiveram menores deformações, característica da rigidez dessas ligas. Os dois materiais geraram gráficos com valores bem próximos, com as deformações da liga 1040 ligeiramente superiores. O quadro com menor valor de deformação simulado foi o nº 36 com 2mm de espessura, apresentando 0,042mm de deformação. Os valores obtidos nesses quadros podem ser visualizados nas figuras 30 e 31, respectivamente.

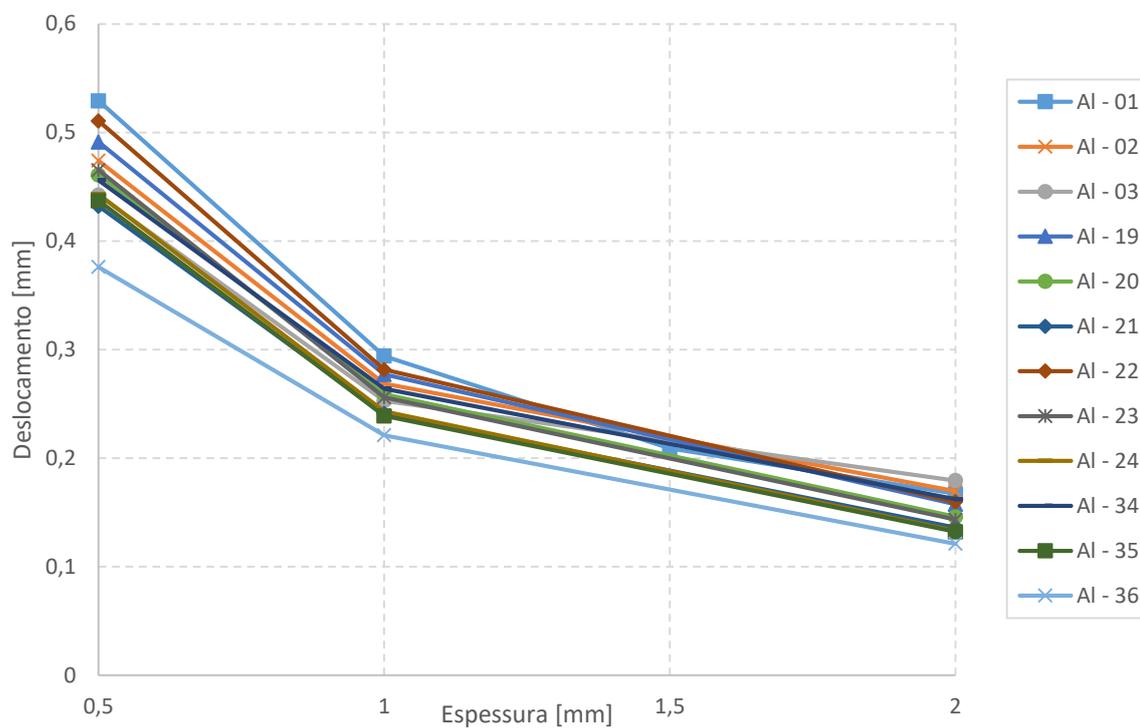


Figura 28 - Gráfico da máxima deformação nos quadros liga de alumínio
Fonte: autoria própria

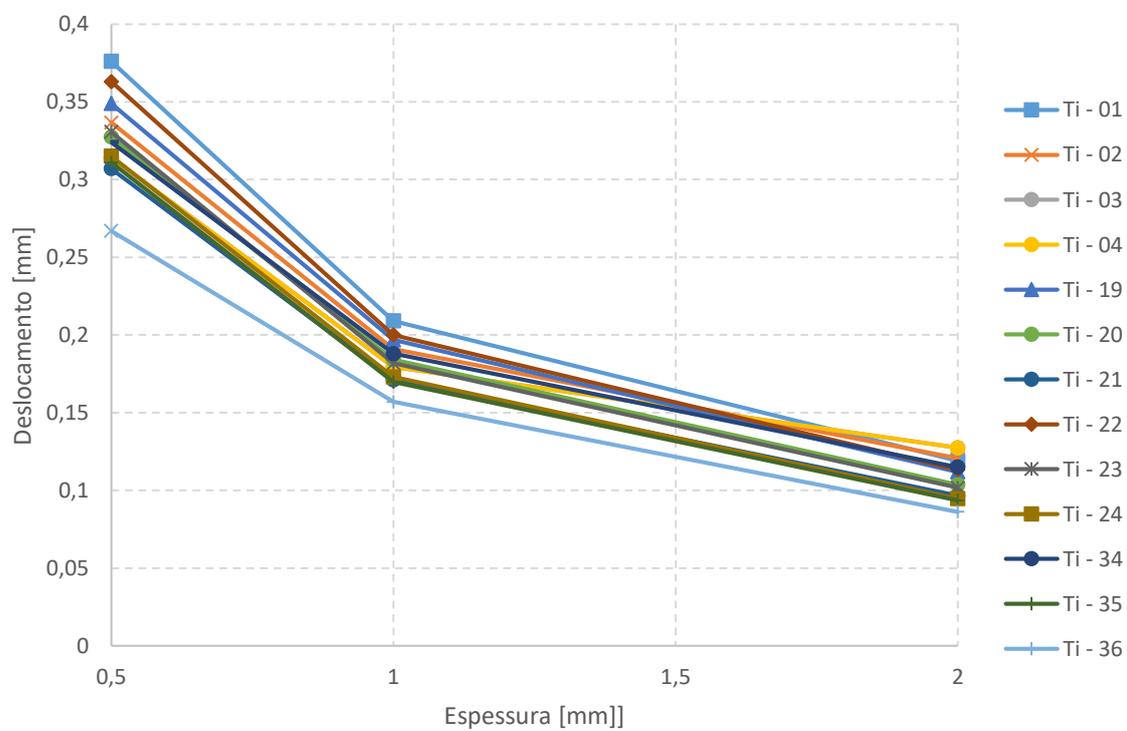


Figura 29 - Gráfico da máxima deformação nos quadros liga de titânio
Fonte: autoria própria

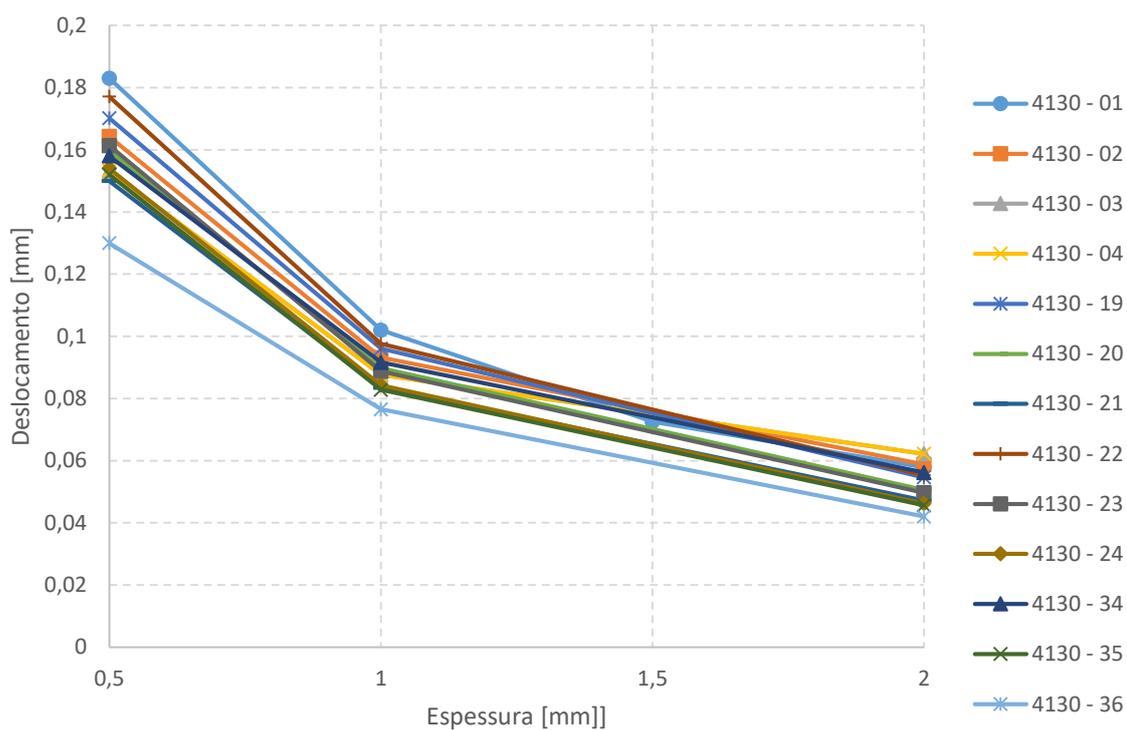


Figura 30 - Gráfico da máxima deformação nos quadros liga de aço 1040
Fonte: autoria própria

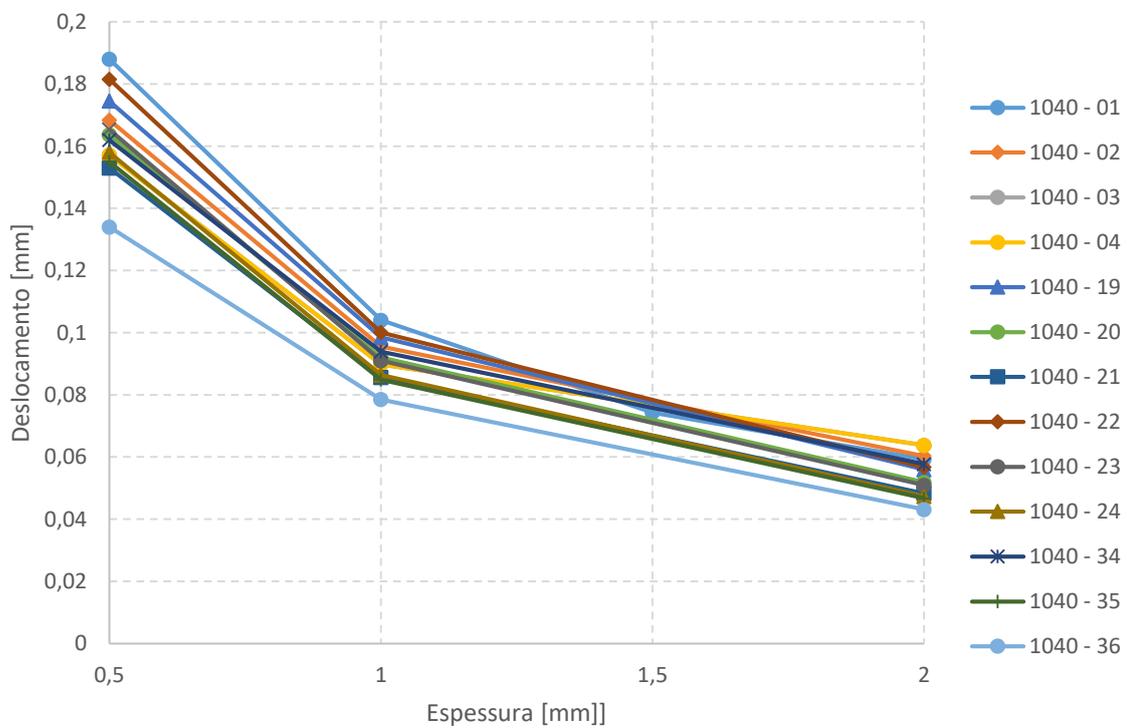


Figura 31 - Gráfico da máxima deformação nos quadros liga de aço 1040
Fonte: autoria própria

Observa-se um comportamento semelhante entre os materiais conforme a espessura é aumentada. De 0,5 a 1,00 mm a variação do deslocamento é mais acentuada, e a partir de 1,00mm a diferença diminui.

Na figura 32, faz-se um comparativo dos deslocamentos de um mesmo quadro com os 4 materiais. Os aços 1040 e 4130 por possuírem características de ductilidade semelhantes, geraram curvas idênticas. A liga de alumínio apresentou as maiores deformações, evidenciando sua alta ductilidade. O quadro de liga de titânio, menos dúctil que o alumínio, apresentou valores intermediários entre este e as ligas de aço.

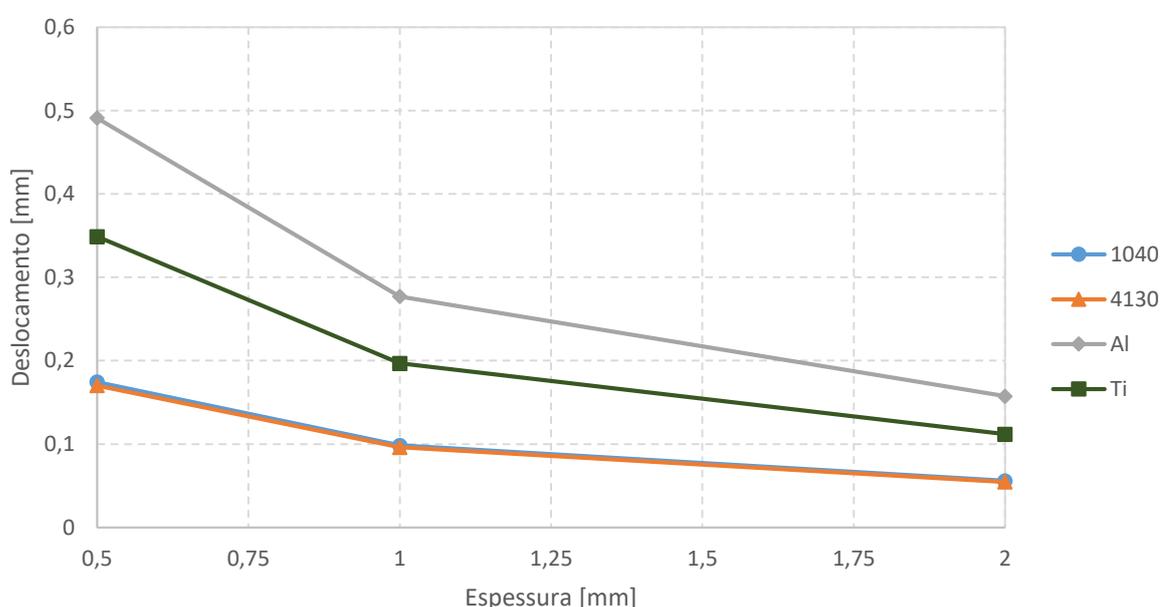


Figura 32 - Comparativo de deslocamentos de um mesmo quadro variando os materiais
Fonte: Autoria própria

4.1.3 Tensões normais

A análise de tensões normais mostrou em quais regiões do quadro ocorrem solicitações trativas e compressivas. O ponto de maior tensão compressiva, representado pelo ponto de tensão normal mínima, de valor negativo, foi a área superior do tubo vertical, na região de junção com o tubo horizontal e o garfo posterior. Analogamente, o ponto de maior tensão trativa foi na região de tensão normal máxima, compreendendo a região do tubo de transmissão central, na área de junção entre os tubos vertical e oblíquo e o garfo posterior. Na figura 33, esses pontos são mostrados.

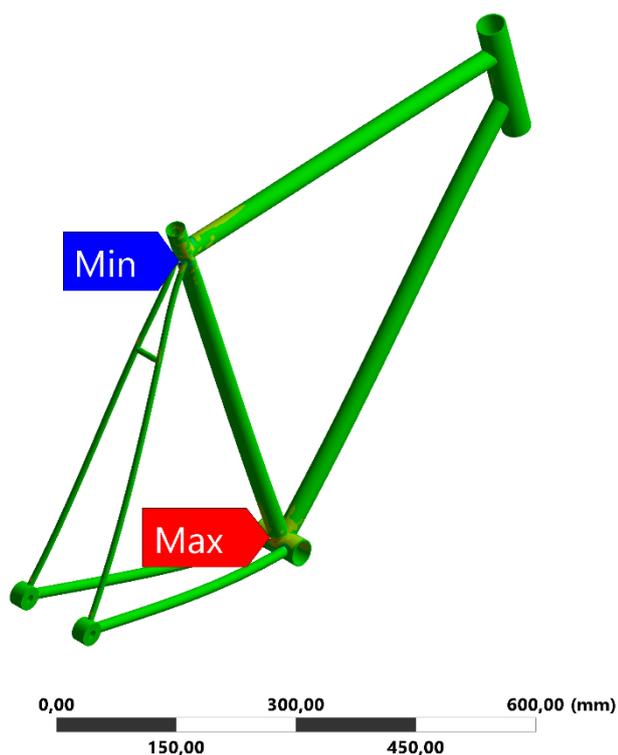


Figura 33 – Pontos de máxima e mínima tensão normal

4.1.4 Tensões Equivalentes

O ponto de máxima tensão equivalente variou entre duas regiões do quadro conforme a espessura dos tubos. Nos tubos de espessura até 1,0mm, o ponto de máxima tensão foi a parte superior do tubo horizontal, na região de encontro com o tubo horizontal e os tubos oblíquos do garfo posterior, conforme mostrado na figura 35. Nota-se ainda que nesses casos a região de menor tensão foi a do tubo de direção, o que pode ser explicado pela liberdade de deslocamento do tubo no eixo horizontal.

Nos quadros com espessura dos tubos superiores a 1,00mm, a região de maior tensão equivalente foi a parte inferior do tubo vertical, no encontro entre o tubo de transmissão central e os tubos horizontais do garfo posterior, conforme indica a figura 34.

C: Copy of Static Structural

Equivalent Stress

Type: Equivalent (von-Mises) Stress

Unit: MPa

Time: 1

21/11/2016 00:25

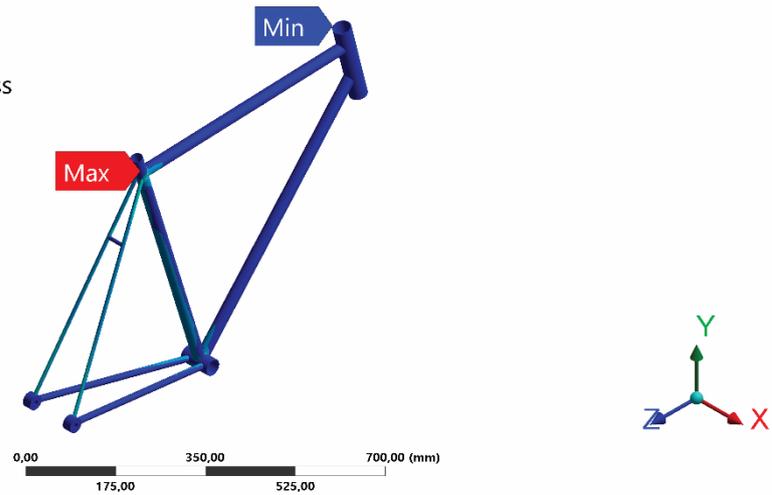
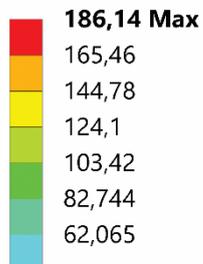


Figura 35 - Regiões de máxima e mínima tensão nos quadros de menores espessuras inferiores a 1,00mm

Fonte: autoria própria

A: Static Structural

Equivalent Stress

Type: Equivalent (von-Mises) Stress

Unit: MPa

Time: 1

20/11/2016 19:40

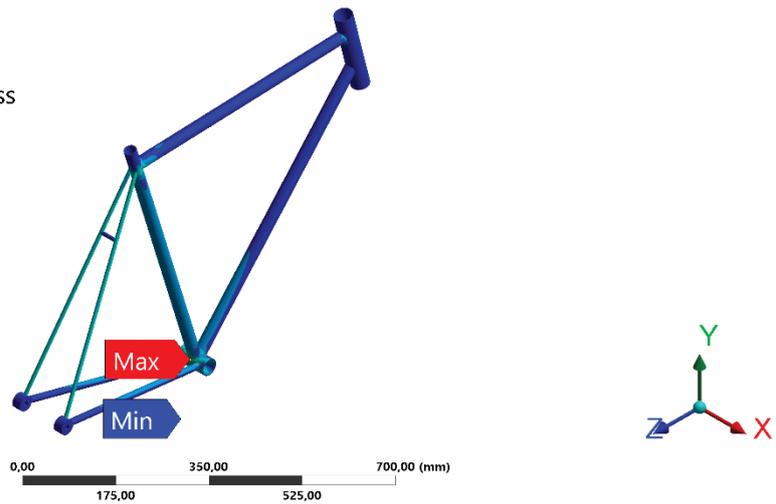
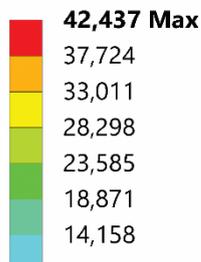


Figura 34 - - Regiões de máxima e mínima tensão nos quadros de espessuras superiores a 1,00mm

Fonte: autoria própria

No gráfico das tensões equivalentes, apresentado na figura 34, mais uma vez fica evidente a influência da espessura dos tubos no comportamento do quadro.

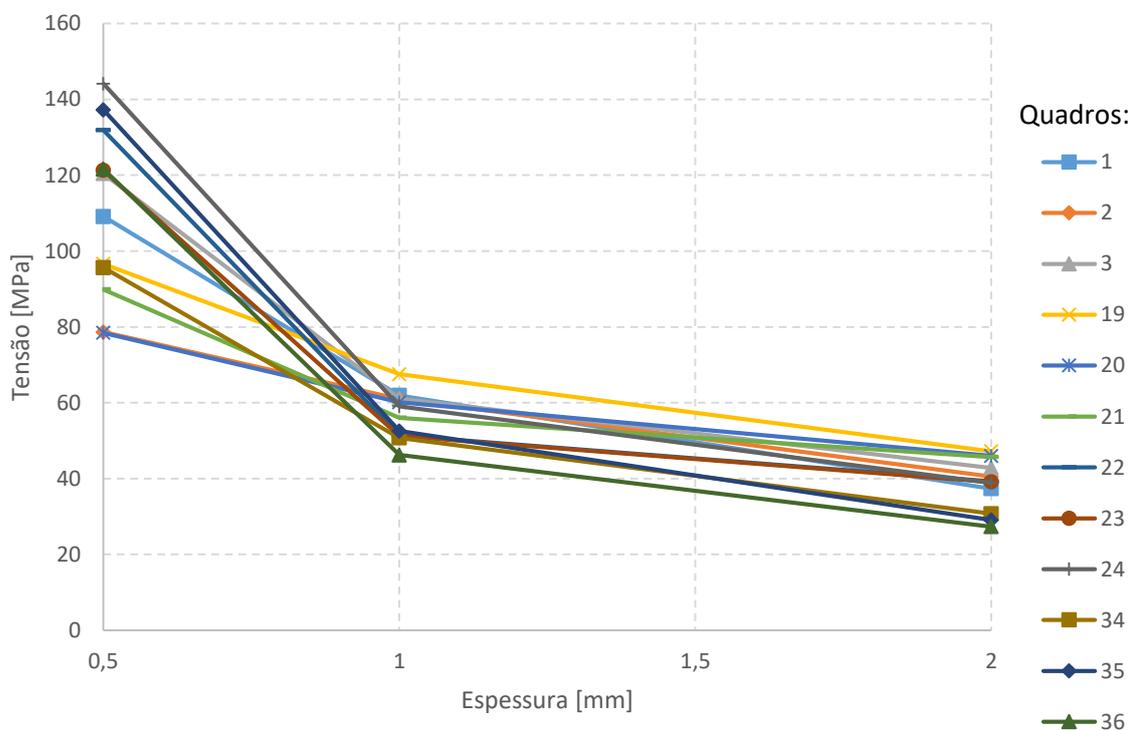


Figura 36 - Tensões máximas de Von Mises nos quadros nos pontos de deslocamento máximo

Fonte: autoria própria

Comparando com os valores de tensão de escoamento dos materiais, nota-se que todos os quadros apresentaram valores muito abaixo dessa tensão limite. Aplicando o coeficiente de segurança e considerando a carga dinâmica, conforme ilustrado no gráfico da figura 37, apenas a liga de titânio e a liga de aço 4130 pode ser aplicada em todas as situações. Entre os quadros de aço 1040, 3 não podem ser aplicados na espessura de 0,5 mm, e para a liga de alumínio apenas 2 quadros puderam ser aprovados para espessura de 0,5mm. Para tubos com espessura acima de 1,00mm, todos os materiais avaliados foram aprovados.

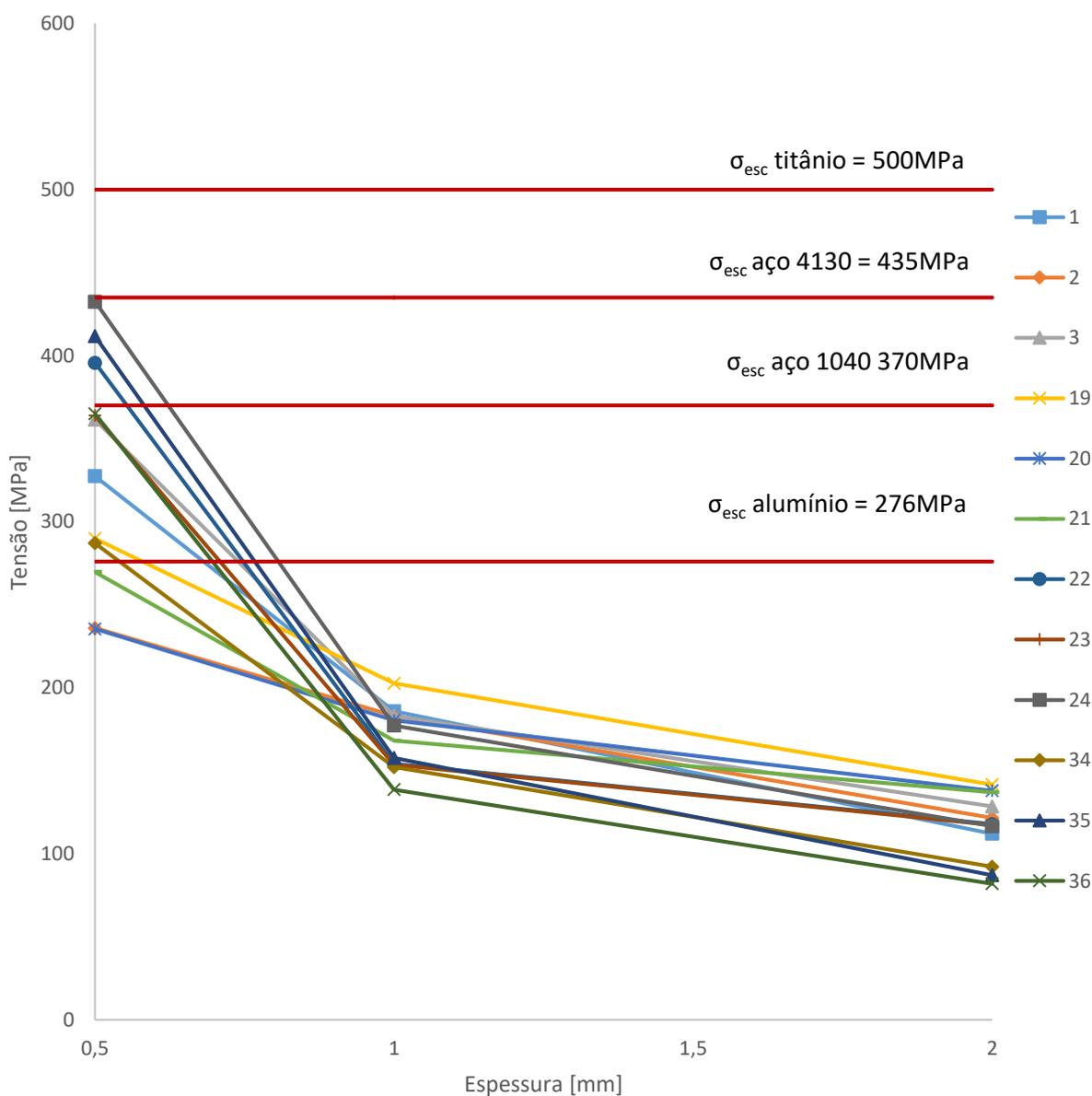


Figura 37 - Comparativo entre as tensões de escoamento dos materiais
Fonte: Autoria própria

4.1.5 Peso dos quadros

Numa simulação dos pesos das geometrias analisadas, nota-se que os quadros em liga de aço apresentaram maiores pesos. O que corresponde às expectativas, pelo fato do aço possui maior massa específica. O quadro em com maior peso tem cerca de 4kg, e o menor aproximadamente 1,25kg, conforme gráfico na figura 37. Em seguida os quadros em titânio apresentaram maiores pesos, variando entre aproximadamente 0,5kg e 2,5kg, conforme figura 38. Por fim, os quadros em alumínio apresentaram menores pesos, variando entre 0,5kg e pouco mais de 2,0kg, conforme figura 38.

Quadro	Espessura [mm]	Liga de alumínio	Liga de titânio	Ligas de aço
1	0,5	0,83	0,49	1,42
	1	1,21	0,73	2,14
	2	1,95	1,17	3,43
2	0,5	0,86	0,46	1,3
	1	1,24	0,75	2,19
	2	1,83	1,1	3,23
3	0,5	0,84	0,51	1,48
	1	1,27	0,77	2,24
	2	1,7	1,02	2,99
19	0,5	0,87	0,52	1,53
	1	1,33	0,8	2,34
	2	2,17	1,31	3,82
20	0,5	0,55	0,85	1,51
	1	0,78	1,3	2,29
	2	1,27	2,11	3,72
21	0,5	0,52	0,87	1,53
	1	0,8	1,33	2,34
	2	1,31	2,17	3,82
22	0,5	0,51	0,85	1,49
	1	0,77	1,28	2,27
	2	1,26	2,09	3,68
23	0,5	0,52	0,86	1,52
	1	0,79	1,31	2,3
	2	1,29	2,14	3,75
24	0,5	0,53	0,87	1,53
	1	0,81	1,34	2,35
	2	1,32	2,19	3,84
34	0,5	0,61	1,01	1,76
	1	0,83	1,37	2,4
	2	1,23	2,04	3,57
35	0,5	0,54	0,9	1,58
	1	0,84	1,4	2,45
	2	1,39	2,31	4,05
36	0,5	0,55	0,92	1,61
	1	0,86	1,42	2,5
	2	1,43	2,37	4,14

Figura 38 – peso dos quadros em liga de aço
Fonte: autoria própria

4.1.6 Flambagem

Utilizando o recurso *Eigenvalue buckling*, no modo de flambagem linear, foram obtidos valores bem próximos em todos quadros analisados. Numa primeira aproximação, foram calculados os 2 primeiros modos de flambagem. Como os valores dos multiplicadores de carga obtidos foram bem superiores ao fator de carregamento estático e coeficiente de segurança, conforme tabela 15, não foi necessário analisar mais modos.

Tabela 8 – Modos de flambagem

Modos	Multiplicador de carregamentos	Multiplicador de carregamentos (coef. de segurança X fator de carga estática)
1	11,526	3
2	13,995	

Fonte: autoria própria

As figuras 32 e 33 ilustram os modos de flambar do quadro, sendo ambos no tubo oblíquo do garfo posterior. No primeiro modo o tubo oscila na direção z da figura, e no segundo a oscilação é na direção x.

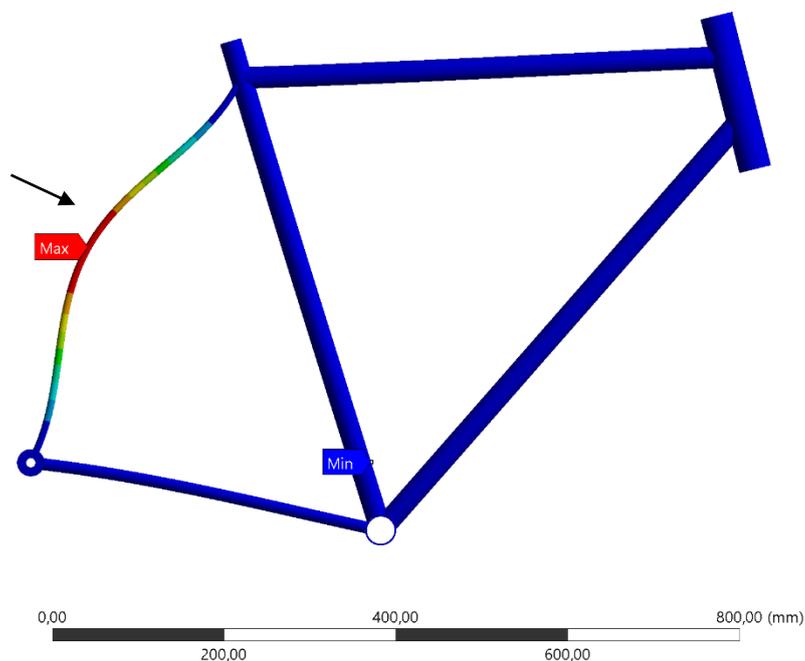


Figura 39 - Segundo modo de flambagem

Fonte: autoria própria

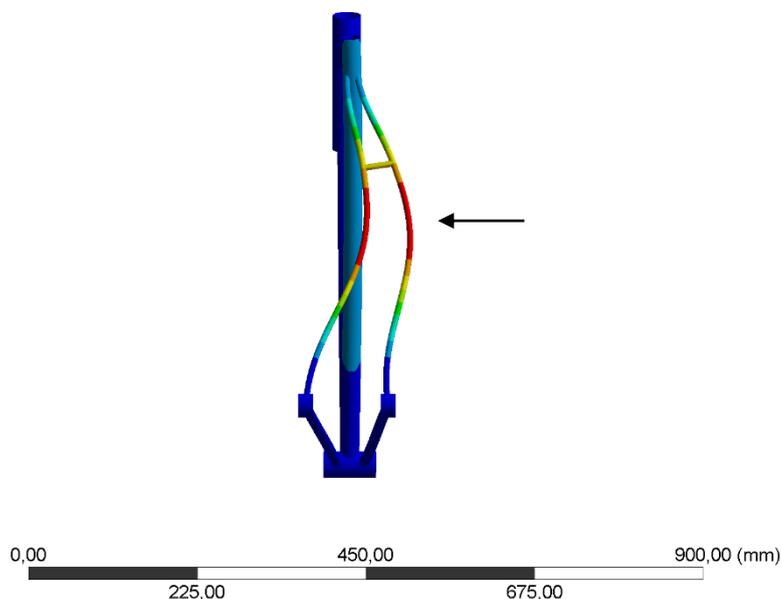


Figura 40 - primeiro modo de flambagem do quadro
Fonte: autoria própria

4.1.7 Verificação e validação

Esta seção tem como objetivos:

- Checar se os resultados obtidos estão de acordo com o modelo matemático desenvolvido;
- Checar se os erros numéricos são aceitáveis;
- Comparar com valores obtidos na teoria.

Na primeira verificação, foi analisado se as condições de contorno foram satisfeitas, e se os deslocamentos aconteceram conforme esperado. Isso pode ser facilmente verificado observando a deflexão dos nós onde os suportes foram aplicados. O tubo de direção se deslocou apenas horizontalmente, como previsto, e as gancheiras somente “rotacionaram”.

Realizou-se uma análise teórica do comportamento do quadro, para validação da simulação numérica no estágio seguinte. Para tal, utiliza-se a teoria da Análise de Elementos Finitos para vigas, treliças e pórticos previamente descrita.

Conforme proposto por Kim e Sankar (2009), o comportamento estrutural de um quadro de bicicleta se comporta de maneira semelhante a um pórtico, de tal forma que é possível utilizar essa aproximação considerando os fatores de correção descritos

anteriormente. Considerando cada tubo como um elemento de viga e cada conexão como um nó, é feita a seguinte aproximação

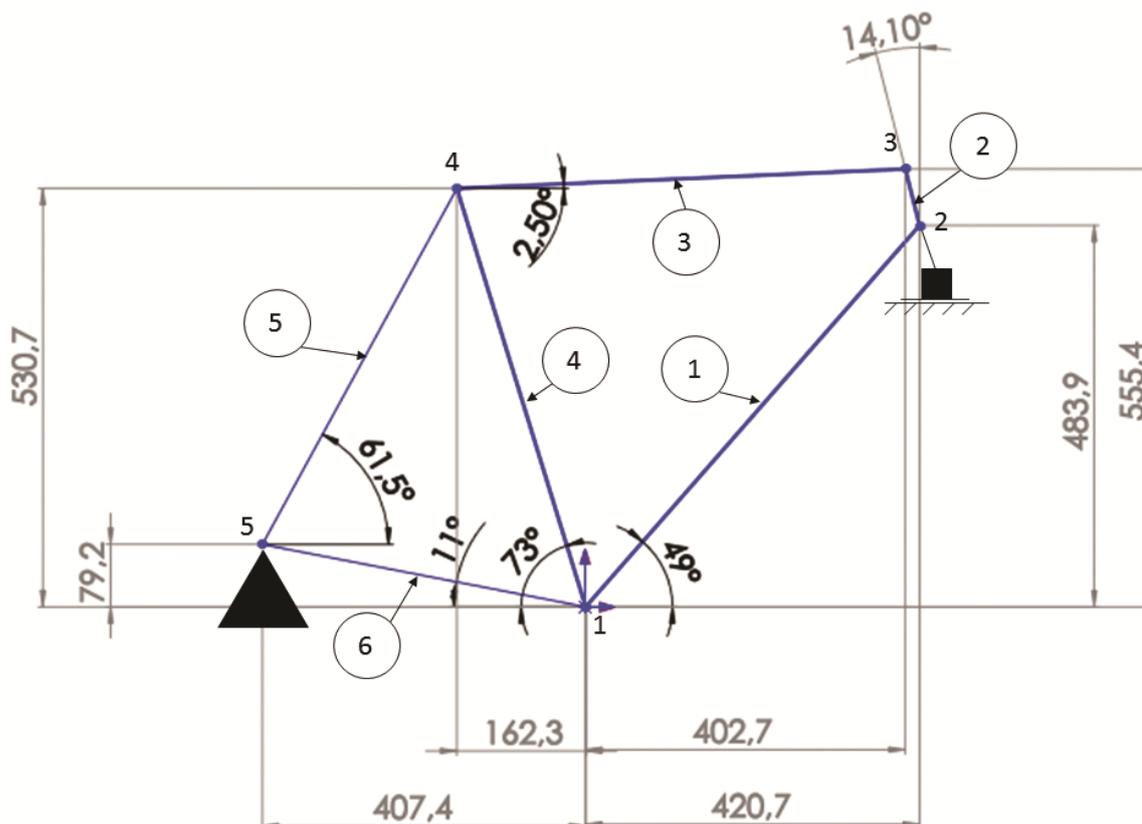


Figura 41 – Representação do quadro em uma estrutura de pórtico
Fonte: autoria própria

Nessa simplificação, o garfo traseiro foi adaptado em apenas dois elementos, transformando a estrutura em um modelo 2d. Tal aproximação é possível pelo fato da estrutura ser simétrica, e como os carregamentos considerados atuam apenas nas direções x e y, é possível avaliar as forças resultantes em direções bidimensionais.

A origem das coordenadas globais foi inserida no nó 1, correspondente ao tubo da transmissão central.

Para determinar as condições de contorno do modelo, os seguintes procedimentos foram adotados:

- Nó 1: é aplicada a força exercida no pedal;

- Nó 2: foi considerado um apoio do tipo rolete (ou apoio móvel) no qual há força de reação apenas na direção y, não há deflexão nodal vertical e rotação.
- Nó 4: é aplicada a força exercida pelo peso do ciclista;
- Nó 5: é posto um apoio do tipo pino (ou articulação), o qual possui forças de reação nas direções x e y, e não há deflexão nodal vertical e horizontal, apenas rotação.

Definidas as condições de contorno, o modelo tem o seguinte formato, apresentado na figura 17.

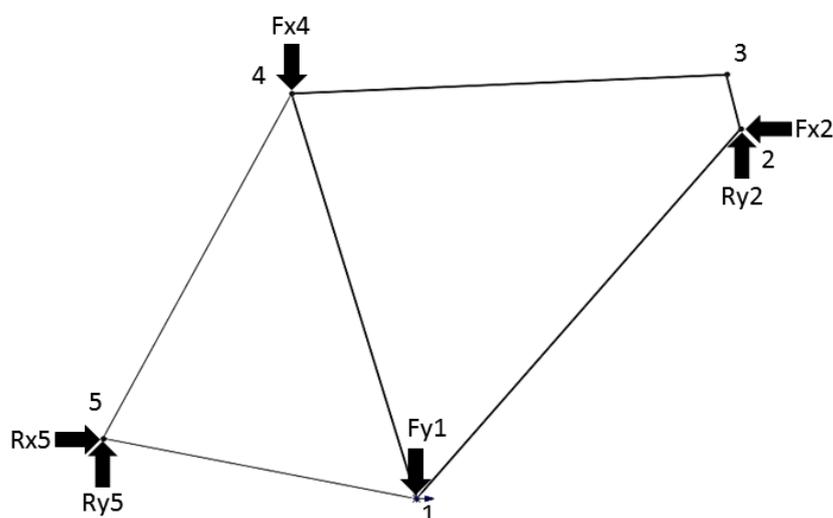


Figura 42 – Aplicação das condições de contorno
Fonte: autoria própria

Com o modelo definido, o vetor de forças tem a seguinte forma:

$$\{f\} = \begin{Bmatrix} f_{x1} \\ f_{y1} \\ m_1 \\ f_{x2} \\ f_{y2} \\ m_2 \\ f_{x3} \\ f_{y3} \\ m_3 \\ f_{x4} \\ f_{y4} \\ m_4 \\ f_{x5} \\ f_{y5} \\ m_5 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ -300 \text{ N} \\ 0 \\ -1000 \text{ N} \\ R_{y2} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1000 \text{ N} \\ 0 \\ R_{x5} \\ R_{y5} \\ 0 \end{Bmatrix}$$

E o vetor de deslocamentos, desprezando os termos nulos:

$$\{q\} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ \theta_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ \theta_2 \\ u_3 \\ v_3 \\ \theta_3 \\ u_4 \\ v_4 \\ \theta_4 \\ u_5 \\ v_5 \\ \theta_5 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ \theta_1 \\ u_2 \\ 0 \\ 0 \\ u_3 \\ v_3 \\ \theta_3 \\ u_4 \\ v_4 \\ \theta_4 \\ 0 \\ 0 \\ \theta_5 \end{Bmatrix}$$

Na sequência, foi realizada uma comparação com cálculo teórico, utilizando a teoria do método dos elementos finitos aplicado a estruturas. Foi selecionado o quadro nº 1, com 2mm de espessura nos tubos, e o material aço 1040. Tal método resultou em uma matriz de rigidez 15x15, disponível nos anexos. Resolvendo a equação matricial 9:

$$\{f\} = [k]\{q\}$$

Obtém-se, para as forças, a solução da equação:

$$\{f\} = \begin{Bmatrix} f_{x1} \\ f_{y1} \\ m_1 \\ f_{x2} \\ f_{y2} \\ m_2 \\ f_{x3} \\ f_{y3} \\ m_3 \\ f_{x4} \\ f_{y4} \\ m_4 \\ f_{x5} \\ f_{y5} \\ m_5 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ -300 \text{ N} \\ 0 \\ -1000 \text{ N} \\ 3599,21 \text{ N} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1000 \text{ N} \\ 0 \\ 1000 \text{ N} \\ 1426,03 \text{ N} \\ 0 \end{Bmatrix}$$

E para os deslocamentos:

$$\{q\} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ \theta_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ \theta_2 \\ u_3 \\ v_3 \\ \theta_3 \\ u_4 \\ v_4 \\ \theta_4 \\ u_5 \\ v_5 \\ \theta_5 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -0,0219 \text{ mm} \\ -0,0828 \text{ mm} \\ 0,0002 \text{ rad} \\ -0,12 \text{ mm} \\ 0 \\ 0 \\ -0,0948 \text{ mm} \\ 0 \\ 0 \\ -0,0731 \text{ mm} \\ -0,0897 \text{ mm} \\ 0,0001 \text{ rad} \\ 0 \\ 0 \\ -0,0004 \text{ rad} \end{Bmatrix}$$

Com auxílio do software *Microsoft Excel*, foi gerado um gráfico de deflexão nodal, exibido na figura 45.

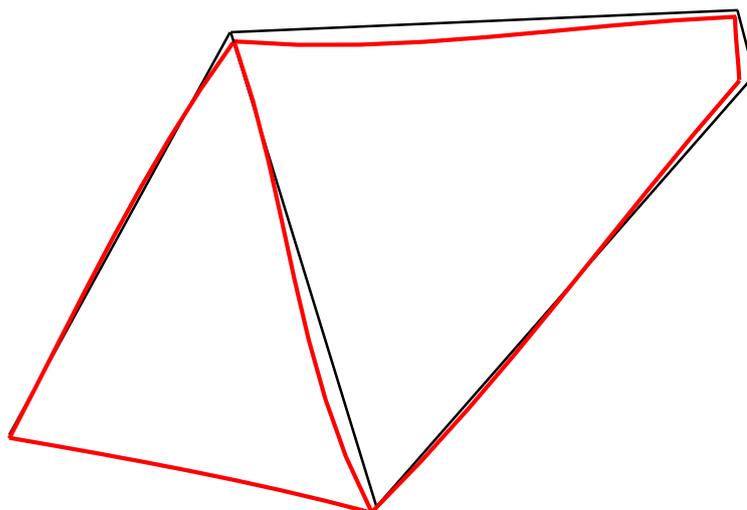


Figura 43 – quadro deformado utilizando a matriz de rigidez
Fonte: autoria própria

Analisando os resultados obtidos através de cálculos manuais, nota-se que o nó de maior deflexão foi o nó 2 na direção x, referente a variável u_2 . Este resultado vai de encontro com o obtido na simulação numérica, na qual a região de maior deformação nos quadros foi a correspondente a parte inferior do jogo da direção, devido as cargas horizontais. Houve diferença entre os valores obtidos devido ao nível de detalhamento dos métodos empregados, sendo que o método manual não leva em consideração as tensões geradas nas junções entre os tubos, o que elevou consideravelmente a magnitude das deflexões.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

O trabalho possibilitou conhecer e analisar alguns dos conceitos que tangem ao dimensionamento, concepção e construção de quadros de bicicleta.

O MEF é um método amplamente difundido e há uma extensa literatura deste aplicado à avaliação de estruturas, o que ao final do estudo ofereceu uma boa base de comparação no intuito de avaliar a compatibilidade dos resultados obtidos

Através das simulações numéricas efetuadas no *software ANSYS*, foi possível verificar a diferença de comportamento entre os materiais, no qual a liga de alumínio apresentou maior deformação devido a sua característica dúctil e as ligas de aço, mais rígidas, resultaram em quadros com menor grau de deformação.

Ficou evidenciado a importância da espessura dos tubos na estrutura dos quadros, sendo necessário buscar um equilíbrio de acordo com a solicitação em cada parte do quadro para garantir as melhores especificações. A liga de titânio, por possuir uma tensão de escoamento muito superior às outras ligas, permite projetar quadros com tubos de pequenas espessuras, o que gera um menor volume e conseqüente um menor peso, resultando num melhor desempenho para o ciclista.

Uma atenção especial deve ser dada a flambagem, para evitar que os valores de carregamento atinjam um valor crítico.

5.2 Trabalhos futuros

Este trabalho levou em consideração aproximações e simplificações significativas. Em pesquisas futuras, há a possibilidade de analisar o comportamento dos quadros com outras aplicações, tais como:

- Análise com carregamentos dinâmicos;
- Analisar o comportamento levando em consideração a fadiga;
- Analisar o comportamento com outros materiais, como por exemplo a fibra de carbono ou materiais não-convecionais;

REFERÊNCIAS

ADVAMEG INCORPORATION. How bicycle is made - material, manufacture, history, used, components, dimensions, machine, History. **How Products Are Made**, 2006. Disponível em: <<http://www.madehow.com/Volume-2/Bicycle.html>>. Acesso em: 10 Setembro 2016.

CIA DO PEDAL. Os segredos do alumínio. **Blog Cia do Pedal**, 2012. Disponível em: <<http://www.ciadopedal.com.br/blog/os-segredos-do-aluminio/>>. Acesso em: 15 outubro 2015.

DUARTE, L. G. Eficiência em duas rodas. **Super Interessante**, São Paulo, n. 4, Setembro 1990.

ESCOLA DA BICICLETA. Geometria e medidas das peças da bicicleta. **Escola de Bicicleta**. Disponível em: <<http://www.escoladebicicleta.com.br/geometria11.html#pedivela>>. Acesso em: 13 Outubro 2016.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Racing bicycles - Safety requirements and test methods**. Bruxelas: CEN, 2005.

FISH, J.; BELYTSCHKO, T. **Um Primeiro Curso em Elementos Finitos**. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

KIM, N.-H.; SANKAR, B. V. **Introduction to Finite Element Analysis and Design**. Hoboken: Wiley, 2009.

LINDSEY, J. Guide to Power Meter Metrics. Disponível em: <<http://www.bicycling.com/training/fitness/guide-power-meter-metrics>>. Acesso em: 13 Outubro 2016.

MATWEB. Aluminum 6061-T6; 6061-T651. **MatWeb - Material Property Data**, 2016. Disponível em: <www.matweb.com/search/GetReference.aspx?matid=9391>. Acesso em: 20 Julho 2016.

NORTON, R. L. **Projeto de Máquinas - Uma abordagem integrada**. 2ª. ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.

PEQUINI, S. **A evolução da bicicleta e suas implicações ergonômicas para a máquina humana**. [S.l.]. 2000.

PETERSON, L. A.; LONDRY, K. J. Finite-Element Structural Analysis: A New Tool for Bicycle Frame Design, The Strain Energy Method. **Bike Tech**, Ann Arbor, v. 5, n. 2, 1986.

REDDY, J. N. **An Introduction To The Finite Element**. 3^a. ed. New York: McGraw Hill, 2006.

RIBEIRO, P. M. T. **Análise dinâmica de um quadro de bicicleta**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, p. 86. 2013.

SAS IP, INC. Mechanical APDL, Element Reference. **ANSYS Documentation**., 2015.

SEBORG, D. E. *et al.* **Process Dynamics and Control**. 3^a. ed. Singapore: Wiley, 2010.

SILVA, A. D. M. M. et al. **Análise Estrutural do Quadro de uma Bicicleta**. Faculdade de Engenharia - Universidade do Porto. Porto, p. 55. 2014.

UNIÃO CICLISTA INTERNACIONAL. **Regras Técnicas da Bicicleta - Guia Prático de Aplicação**.

WHITT, F.; WILSON, D. **Bicycling Science 3rd Edition**. The MIT Press, 2004.

ANEXOS

Anexo A – Matriz de rigidez 15 x 15 utilizada para validação

$$K = \begin{bmatrix} 6,47E+04 & -2,51E+04 & 0,00E+00 & -4,53E+03 & 7,30E+03 & 1,48E+04 & -8,56E-02 & -3,78E-02 & -1,85E-03 & 0,00E+00 & -4,60E-02 & 0,00E+00 & -2,89E+04 & -3,50E+04 & 6,81E+03 \\ -2,51E+04 & 6,17E+04 & 0,00E+00 & -3,65E+04 & -2,89E+04 & 0,00E+00 & 4,60E-02 & 0,00E+00 & 0,00E+00 & -7,94E+00 & -7,90E+00 & 1,45E+05 & -1,17E+05 & 0,00E+00 & 0,00E+00 \\ 0,00E+00 & -3,65E+04 & 8,84E+04 & -5,19E+04 & 0,00E+00 & -2,27E+03 & 0,00E+00 & 1,66E-03 & 0,00E+00 & 7,95E+00 & 7,94E+00 & -1,43E+05 & 1,45E+05 & 0,00E+00 & 0,00E+00 \\ -4,53E+03 & 0,00E+00 & -5,19E+04 & 5,98E+04 & 1,48E+04 & -6,40E+03 & 3,78E-02 & 3,69E-02 & 7,53E-04 & -1,66E-03 & 0,00E+00 & -2,27E+03 & 0,00E+00 & -3,34E+03 & -6,15E+03 \\ 7,30E+03 & -2,89E+04 & 8,84E+04 & 1,48E+04 & 8,30E+04 & -4,85E+04 & 1,89E-02 & -1,15E-02 & -9,54E-03 & 0,00E+00 & 4,00E-02 & 0,00E+00 & -3,33E+04 & 6,81E+03 & -1,32E+03 \\ 1,48E+04 & -3,65E+04 & 8,84E+04 & -5,19E+04 & -4,85E+04 & 5,99E+04 & 1,15E-02 & 4,91E-02 & -4,09E-04 & 3,80E-02 & 0,00E+00 & -9,89E+01 & 0,00E+00 & -6,15E+03 & -1,13E+04 \\ -8,56E-02 & 4,60E-02 & 0,00E+00 & 3,78E-02 & 1,89E-02 & 4,33E+01 & 7,31E+00 & 1,34E+00 & 1,34E+00 & 0,00E+00 & 1,30E+01 & 0,00E+00 & -4,00E-02 & 1,85E-03 & 9,54E-03 \\ -3,78E-02 & 0,00E+00 & 1,66E-03 & 3,69E-02 & -1,15E-02 & 4,91E-02 & 7,31E+00 & 2,92E+01 & 1,47E-01 & 7,17E+00 & 0,00E+00 & -3,80E-02 & 0,00E+00 & -7,53E-04 & 4,09E-04 \\ -1,85E-03 & 0,00E+00 & 0,00E+00 & 7,53E-04 & -9,54E-03 & -4,09E-04 & 1,34E+00 & 1,47E-01 & 2,98E+00 & 0,00E+00 & 0,00E+00 & 0,00E+00 & 0,00E+00 & 1,10E-03 & 9,95E-03 \\ 0,00E+00 & -7,94E+00 & 7,95E+00 & -1,66E-03 & 0,00E+00 & 3,80E-02 & 0,00E+00 & 7,17E+00 & 0,00E+00 & 4,17E+02 & 2,01E+02 & 1,96E+00 & -2,00E+00 & 0,00E+00 & 0,00E+00 \\ -4,60E-02 & -7,90E+00 & 7,94E+00 & 0,00E+00 & 4,00E-02 & 0,00E+00 & 1,30E+01 & 0,00E+00 & 0,00E+00 & 2,01E+02 & 4,28E+02 & 2,00E+00 & -2,04E+00 & 0,00E+00 & 0,00E+00 \\ 0,00E+00 & 1,45E+05 & -1,43E+05 & -2,27E+03 & 0,00E+00 & -9,89E+01 & 0,00E+00 & -3,80E-02 & 0,00E+00 & 1,96E+00 & 2,00E+00 & 5,79E+05 & -5,79E+05 & 0,00E+00 & 0,00E+00 \\ -2,89E+04 & -1,17E+05 & 1,45E+05 & 0,00E+00 & -3,33E+04 & 0,00E+00 & -4,00E-02 & 0,00E+00 & 0,00E+00 & -2,00E+00 & -2,04E+00 & -5,79E+05 & 6,12E+05 & 0,00E+00 & 0,00E+00 \\ -3,50E+04 & 0,00E+00 & 0,00E+00 & -3,34E+03 & 6,81E+03 & -6,15E+03 & 1,85E-03 & -7,53E-04 & 1,10E-03 & 0,00E+00 & 0,00E+00 & 0,00E+00 & 0,00E+00 & 3,84E+04 & -6,54E+02 \\ 6,81E+03 & 0,00E+00 & 0,00E+00 & -6,15E+03 & -1,32E+03 & -1,13E+04 & 9,54E-03 & 4,09E-04 & 9,95E-03 & 0,00E+00 & 0,00E+00 & 0,00E+00 & -6,54E+02 & 1,27E+04 & 1,27E+04 \end{bmatrix}$$