



ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL EM QUADRO DE BICICLETA

Marco Ricardo Da Silva Filho

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Juan-Pablo Marquez Costa

Macaé
Maio de 2023

ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL EM QUADRO DE BICICLETA

Marco Ricardo Da Silva Filho

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO MECÂNICO.

MACAÉ, RIO DE JANEIRO – BRASIL
MAIO DE 2023

CIP - Catalogação na Publicação

S729

Silva Filho, Marco Ricardo da

Análise e Otimização Estrutural em Quadro de Bicicleta / Marco Ricardo da
Silva Filho - Macaé, 2023.

50 f.

Orientador(a): Juan-Pablo Marquez Costa.

Trabalho de conclusão de curso (graduação) - Universidade Federal do Rio de
Janeiro, Instituto Politécnico, Bacharel em Engenharia Mecânica, 2023.

1. Análise estrutural (Engenharia). 2. Otimização estrutural.
3. Métodos de elementos finitos. 4. Análise modal. 5. Análise dinâmica.
I. Costa, Juan-Pablo Marquez, orient. II. Título

CDD 624

MARCO RICARDO DA SILVA FILHO

**ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL EM QUADRO DE
BICICLETA**

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Aprovado em:

BANCA EXAMINADORA

<http://lattes.cnpq.br/8446018727550474>

Prof. Necesio Gomes Costa

Instituto Politécnico - Centro Multidisciplinar UFRJ-Macaé

<http://lattes.cnpq.br/9030097744432901>

Prof. Elisa Pinto da Rocha

Instituto Politécnico - Centro Multidisciplinar UFRJ-Macaé

<http://lattes.cnpq.br/3808161204518595>

Prof. Rudineli Demarque

Instituto Politécnico - Centro Multidisciplinar UFRJ-Macaé

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL EM QUADRO DE BICICLETA

Marco Ricardo Da Silva Filho

Maio/2023

Orientador: Juan-Pablo Marquez Costa

Curso: Engenharia Mecânica

O estudo em questão tem como objetivo realizar uma análise e otimização estrutural em um conjunto quadro-garfo para bicicleta urbana, utilizando o ensaio de queda descrito pela norma ISO 4210-6. Para isso, serão aplicadas técnicas de análise modal e dinâmica por meio do método de elementos finitos. O estudo tem como principais objetivos comparar dois modelos de modelização, um em formato de viga e outro em formato de casca, além de utilizar dois materiais diferentes na construção dos componentes. No que tange a otimização, o objetivo é definir as dimensões ideais para a seção transversal da estrutura dos componentes analisados.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

STRUCTURAL ANALYSIS AND OTIMISATION FOR BIKE FRAME

Marco Ricardo Da Silva Filho

May/2023

Advisor: Juan-Pablo Marquez Costa

Course: Mechanical Engineering

The objective of this study is to perform structural analysis and optimization on a frame-fork assembly for an urban bicycle, following the falling test described in ISO 4210-6 standard. The study employs modal and dynamic analysis using the finite element method, comparing two modeling approaches: beam and shell. Regarding optimization, the objective is to determine the optimal dimensions for the cross-section of the analyzed components' structures.

Sumário

Lista de Figuras	viii
Lista de Tabelas	x
1 Introdução	1
2 A norma	3
2.1 A organização ISO	3
2.2 A família ISO 4210	4
2.2.1 A Norma 4210-6	4
2.3 O ensaio	4
2.3.1 Procedimento	4
2.3.2 Critério de validação	7
3 Revisão teórica	8
3.1 Análise modal	8
3.2 Análise dinâmica	9
3.2.1 Critério de plasticidade	11
4 Análise estrutural por métodos computacionais	12
4.1 Métodos computacionais existentes	12
4.2 Análise estrutural pelo Método de Elementos Finitos	13
4.2.1 Definição	13
4.2.2 Vantagens	14
4.2.3 Desvantagens	15
4.2.4 Procedimento	16
5 Metodologia experimental	18
5.1 Etapas do cálculo	18
5.1.1 Geometria	18
5.1.2 Material	19
5.1.3 Condições limites	21

5.1.4	Geração de malha	23
6	Resultados e Discussões	26
6.1	Deslocamento vertical do ponto P e tempo de análise	26
6.2	Convergência de malha	28
6.3	Resultados da análise modal	30
6.4	Resultados da análise dinâmica	32
7	Conclusões	35
8	Sugestões de trabalho futuro	37
A	Dados da simulação	38
	Referências Bibliográficas	40

Lista de Figuras

2.1	Representação do teste de impacto. Fonte: Norma ISO 4210-6.	5
4.1	Fluxograma do método de elementos finitos. Autoria própria.	16
5.1	Dimensões da seção transversal da estrutura. Fonte: ABAQUS®/Standard	19
5.2	Representação da geometria e dos componentes do modelo viga. Fonte: ABAQUS®/Standard	19
5.3	Comportamento do modelo elasto-plástico perfeito. Fonte: Autoria própria.	21
5.4	Representação da fixação do eixo traseiro para modelo casca. Fonte: ABAQUS®/Standard	22
5.5	Representação da posição das massas e fixação da superfície rígida no modelo viga. Fonte: ABAQUS®/Standard	23
5.6	Representação da posição das massas e fixação da superfície rígida no modelo casca. Fonte: ABAQUS®/Standard	23
5.7	Representação de malha do conjunto no modelo viga. Fonte: ABAQUS®/Standard	24
5.8	Representação de malha do conjunto no modelo casca. Fonte: ABAQUS®/Standard	25
5.9	Vista detalhada da malha na região do canote do assento. Fonte: ABAQUS®/Standard	25
5.10	Vista detalhada da malha na região do tubo de direção. Fonte: ABAQUS®/Standard	25
6.1	Representação do ponto P no modelo viga. Fonte: ABAQUS®/Standard	27
6.2	Deslocamento vertical do ponto P para modelo viga. Fonte: ABAQUS®/Standard	27
6.3	Deslocamento vertical do ponto P para modelo casca. Fonte: ABAQUS®/Standard	27

6.4	Análise de convergência de malha para modelo viga. Fonte: ABAQUS®/Standard	28
6.5	Análise de convergência de malha para modelo casca. Fonte: ABAQUS®/Standard	29
6.6	Valores dos dez primeiros modos de vibração para modelo viga. Fonte: ABAQUS®/Standard	30
6.7	Valores dos dez primeiros modos de vibração para modelo casca. Fonte: ABAQUS®/Standard	30
6.8	Início do primeiro modo de vibração. Fonte: ABAQUS®/Standard	31
6.9	Fim do primeiro modo de vibração. Fonte: ABAQUS®/Standard	31
6.10	Dados de deslocamento máximo para modelos analisados em análise modal. Fonte: ABAQUS®/Standard	32
6.11	Deformação máxima para modelo viga. Fonte: ABAQUS®/Standard	33
6.12	Deformação máxima para modelo casca. Fonte: ABAQUS®/Standard	33
6.13	Dados de deformação máxima para modelos analisados em análise dinâmica. Fonte: ABAQUS®/Standard	34
A.1	Tempo de calculo para modelo viga. Fonte: ABAQUS®/Standard	38
A.2	Tempo de calculo para modelo casca. Fonte: ABAQUS®/Standard	38
A.3	Representação do modelo em casca repartido nas seções de mudança de geometria. Fonte: ABAQUS®/Standard	39

Lista de Tabelas

2.1	Alturas de queda e distribuição de massas no canote do selim, no tubo de direção e no movimento central. Fonte: Norma ISO 4210-6	6
2.2	Valores de deformação permanente em milímetros. Fonte: Norma ISO 4210-2	7
5.1	Tabela de propriedades do aço CrMo. Fonte: AMS Internacional	20
5.2	Tabela de propriedades do alumínio. Fonte: AMS Internacional	20
5.3	Valor adotado para aceleração da gravidade.	22
5.4	Tabela dos elementos de malha para modelo viga. Fonte: ABAQUS®/Standard	24
5.5	Tabela dos elementos de malha para modelo casca. Fonte: ABAQUS®/Standard	25
6.1	Valores de deslocamento máximo para modelo com 3/4 de polegada de diâmetro externo. Fonte: ABAQUS®/Standard	32
6.2	Valores de tensão máxima segundo Von Mises. Fonte: ABAQUS®/Standard	33

Capítulo 1

Introdução

A análise estrutural é uma disciplina de grande relevância dentro da engenharia, devido à sua vasta aplicação e importância em diversos setores industriais. Trata-se de campo de estudo que envolve a compreensão e avaliação do comportamento estrutural de componentes e sistemas mecânicos, desempenhando um papel fundamental no projeto e na otimização de estruturas para garantir sua integridade e desempenho.

Aplicada em uma variedade de setores, dos quais destacam-se: aeronáutica, automotiva, naval, construção civil, energia e muitos outros. Em cada um desses setores, este modelo de análise desempenha um papel fundamental na garantia da segurança e confiabilidade dos produtos e estruturas.

O ensino deste conteúdo geralmente começa com modelos simples, como vigas simplesmente apoiadas, mas não há limites quanto ao grau de complexidade que pode ser abordado. À medida que aumentamos os requisitos de análise, com geometrias mais complexas e condições de contorno menos comuns, lidar com tais complexidades pode se tornar um desafio se nos limitarmos aos métodos analíticos convencionais.

Diversas técnicas e métodos foram desenvolvidos para colaborar com o processo de desenvolvimento de sistemas mecânicos, desde testes experimentais até simulações computacionais avançadas. Felizmente, à medida que os sistemas mecânicos se tornaram mais complexos, a sociedade foi capaz de responder a essa demanda, e essa resposta foi a abordagem numérica. Essa abordagem permite avaliar o comportamento estrutural, prever pontos de falha, otimizar o projeto e identificar soluções para melhorar a resistência e o desempenho das estruturas, de uma maneira virtual, diminuindo enormemente o custo e tempo de desenvolvimento.

Como mencionado, a análise estrutural inicia-se com modelos simples e compreensíveis entretanto, é aplicada para toda e qualquer estrutura mecânica em nosso entorno, principalmente àquelas que usamos com frequência e onde segurança deve ser prioridade. Um exemplo de estrutura que representa um modelo com certo grau de complexidade, deve apresentar confiabilidade e relevância em nosso dia a dia, são

as bicicletas.

As bicicletas podem ser consideradas o meio de transporte mais democrático já inventado, pois são fabricadas em diversos tamanhos, finalidades e são acessíveis a um grande número de pessoas. Elas oferecem uma forma de locomoção eficiente, saudável e sustentável para pessoas de todas as idades, habilidades e condições socioeconômicas.

No contexto da mobilidade urbana, as bicicletas desempenham um papel fundamental na promoção de cidades mais sustentáveis e inclusivas. Elas oferecem uma alternativa viável aos veículos motorizados, permitindo que as pessoas se movimentem de forma eficiente, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa e melhorando a qualidade do ar. Os fatores apresentados justificam e embasam o interesse da comunidade europeia, notadamente francesa, pela adoção de tal meio de transporte no dia a dia. Este interesse, passa também pelos governos que através de incentivos, seja através da construção de ciclo-vias, seja em incentivos para a população e indústria, fomentam este mercado.

Percebendo esse crescente, a competitividade na indústria aumenta e surge o desafio de entregar um produto que seja seguro, confortável e que apresente uma melhor performance perante seus concorrentes. Para isso, um curto tempo de desenvolvimento é indispensável, logo as análises e testes necessários podem ser antecipados, por meio de simulações durante as fases iniciais de concepção do produto.

Tais testes respeitam um conjunto de normas, sejam regionais ou internacionais, que garantem a confiabilidade e segurança de quem utiliza e fornece diretrizes para assegurar uma performance esperada.

Com base na justificativa exposta, o presente estudo tem como interesse avaliar o desempenho ao ensaio de queda e otimizar a estrutura de um conjunto quadro-garfo de bicicleta através do método de elementos finitos.

Capítulo 2

A norma

2.1 A organização ISO

A Organização Internacional para Padronização (*"International Organization for Standardization"*, em inglês), termo pelo qual é reconhecida a ISO, trata-se de uma organização não governamental e independente, sediada em Genebra desde sua fundação em 1947 e que desenvolve e publica normas internacionais de qualidade, segurança e eficiência para produtos, serviços e processos em todo o mundo.

As normas ISO são criadas por comitês técnicos para cobrir uma ampla variedade de assuntos, sistemas de gestão da qualidade, saúde e segurança no trabalho, meio ambiente, tecnologia da informação, segurança de alimentos, até normas específicas para produtos e serviços. Esses comitês são compostos por especialistas em um determinado assunto, incluindo representantes da indústria, governo e outras organizações relevantes e são responsáveis por desenvolver e atualizar as normas de acordo com as necessidades e avanços tecnológicos.

A conformidade com as normas ISO é uma escolha voluntária, no entanto, muitas organizações buscam essa certificação como forma de evidenciar seu compromisso com a qualidade e a eficiência. Essa certificação torna-se um diferencial importante no mercado, especialmente devido ao aumento constante da competitividade.

A ISO é uma das principais organizações internacionais que trabalham para promover a padronização global e a interoperabilidade, ou seja, a capacidade de diferentes sistemas, tecnologias e componentes interagirem e funcionarem juntos de uma forma eficaz entre produtos e serviços, objetivo pelo qual faz suas normas sejam amplamente reconhecidas e utilizadas em todo o mundo.

2.2 A família ISO 4210

As normas que compõem a família ISO 4210 estabelecem requisitos de segurança e desempenho para bicicletas, sendo essas bicicletas de estrada, de montanha, de passeio e de turismo para adultos e crianças.

Segundo a própria ISO define, o norma 4210 "foi desenvolvida em resposta à demanda em todo o mundo, e o objetivo é garantir que as bicicletas fabricadas em conformidade com esta Norma Internacional sejam o mais seguras possível na prática. Os testes foram projetados para garantir a resistência e durabilidade das partes individuais, bem como da bicicleta como um todo, exigindo alta qualidade em todo o processo e consideração dos aspectos de segurança desde a fase de projeto."

Em seu cunho técnico, a ISO 4210 define requisitos para a construção, montagem e inspeção destas bicicletas, incluindo os materiais utilizados, as dimensões, os testes de resistência e segurança. Dentre os requisitos, incluem-se testes de fadiga, testes de carga e testes de frenagem. No que tange a segurança do ciclista, a norma define tamanho mínimo da bicicleta, a distância mínima para o solo, dimensões do guidão e a presença de luzes e refletores.

2.2.1 A Norma 4210-6

A sexta parte da norma ISO 4210 que tem como título, no idioma original "*Cycles — Safety requirements for bicycles — Part 6: Frame and fork test methods*" descreve uma série de ensaios que devem ser realizados em quadros e garfos de bicicleta para garantir principalmente a segurança do ciclista.

A norma tem como função dispor sobre os métodos, procedimentos e critérios de validação do sistema em teste. Dentre os testes propostos, pode-se mencionar testes de frenagem, de fadiga, de impacto, de resistência mecânica, de estabilidade para todos os componentes de uma bicicleta padrão, quadro, garfo, guidão, pedais, rodas e assento.

Este presente trabalho tem como objetivo reproduzir computacionalmente um dos testes de impacto propostos, o ensaio de queda, descrito no idioma original da norma como "*falling frame*".

2.3 O ensaio

2.3.1 Procedimento

A norma determina uma série de requisitos específicos para a execução do ensaio de queda, incluindo a altura da queda, valor da massa a ser aplicada nos pontos definidos e finalmente, os critérios de aceitação para a bicicleta após o ensaio, conforme

a figura 2.1.

O ensaio é projetado para simular a queda da bicicleta em uma superfície dura e se interessa em avaliar a resistência estrutural do conjunto quadro-garfo após o impacto sobre o solo e pode ser descrito nos seguintes passos:

1. O ensaio inicia-se com a bicicleta em seus pontos de fixação do eixo traseiro para que ela seja livre para girar em seu entorno em um plano vertical.
2. Em seguida, é fixado na posição do assento, do guidão e dos pedais, três corpos de massas determinadas. É então medido a distância entre eixos com as três massas no lugar.
3. Após, o conjunto é suspenso pela roda dianteira de uma altura pré-determinada acima de um plano rígido e em seguida, é liberada para cair livremente sob a ação da gravidade, até seu impacto contra a superfície dura.

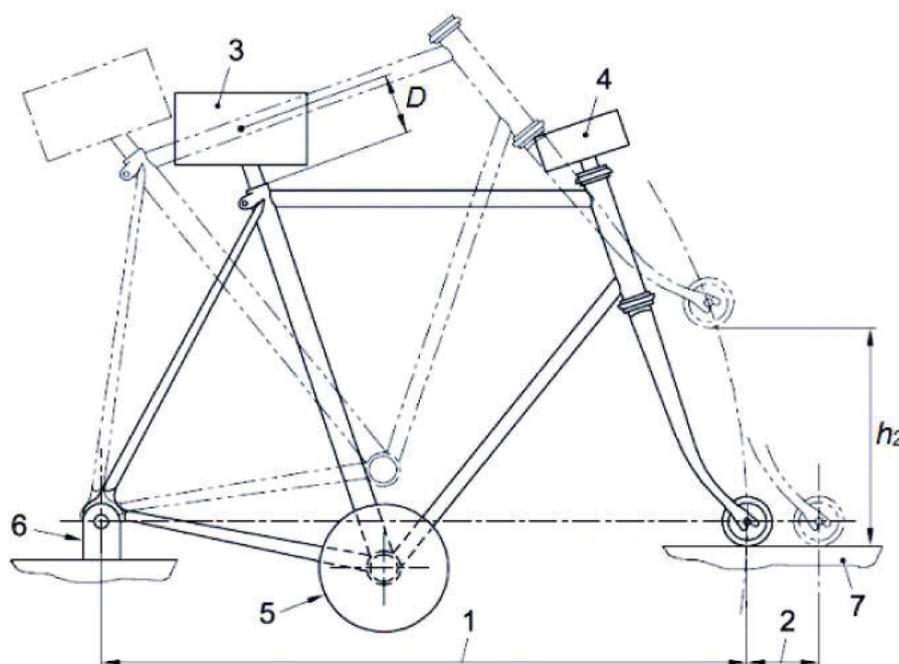


Figura 2.1: Representação do teste de impacto.
Fonte: Norma ISO 4210-6.

Onde:

- 1: distancia entre eixos inicial
- 2: deformação permanenete
- 3: massa 3 (M_3)

- 4: massa 4 (M4)
- 5: massa 5 (M5)
- 6: ponto de fixação para eixo traseiro
- 7: superfície rígida
- D: distancia para centro de gravidade
- h_2 : altura de queda

O objetivo do ensaio é avaliar a resistência e a integridade do conjunto quadro-garfo após uma queda. O ensaio de queda testa a resistência dos quadros e garfos e verifica se a bicicleta mantém a integridade estrutural necessária para garantir a segurança do ciclista durante sua utilização.

A forma abrange de forma ampla variados modelos de bicicletas de acordo com dois fatores: o tamanho do ciclista e a finalidade da bicicleta.

Tipo de bicicleta	Unidade	Urbana	Infantil	Montanha	Competição
Massa 3	kg	50	40	30	30
Massa 4	kg	10	10	10	10
Massa 5	kg	30	20	50	50
Altura de queda	mm	200	200	300	200

Tabela 2.1: Alturas de queda e distribuição de massas no canote do selim, no tubo de direção e no movimento central.

Fonte: Norma ISO 4210-6

Como definição dos modelos de bicicleta, tem-se:

- Bicicleta urbana: geralmente são esperadas características como maior resistência, durabilidade e capacidade de suportar pesos mais elevados. Justamente por referir-se a um grande leque de pesos e tamanhos, mas principalmente devido ao fato de por vezes ser utilizada por duas pessoas, o ciclista condutor e um passageiro, entende-se que pode ser submetida a uma maior carga no nível do assento.
- Bicicleta para crianças e adolescentes: exigência no que tange resistência estrutural é menor.
- Bicicleta de montanha: comumente chamadas de *mountain bike* são projetadas para lidar com terrenos acidentados e trilhas *off-road*, logo requerem maior resistência, durabilidade e capacidade de enfrentar obstáculos como raízes, pedras e declives íngremes no nível do quadro e garfo, ambos reforçados e projetados para absorver impactos inevitáveis.

- Bicicletas para competição de velocidade: chamadas de *racing bikes*, são usadas em corridas de estrada ou pista e têm requisitos semelhantes às bicicletas de montanha, em excessão a altura de queda mais baixa.

O objeto de interesse do presente estudo interessa-se na análise de uma bicicleta urbana.

2.3.2 Critério de validação

Após a queda, é realizada uma nova medição entre os eixos e trata-se do principal critério de validação do ensaio. Uma vez que a deformação atinge o limite plástico, para bicicletas urbana, objeto de análise neste estudo, o valor não deve ultrapassar um limite de deformação de 60 milímetros. Caso contrário, a bicicleta está reprovada no estudo, como determina a seguinte tabela retirada da parte 2 da norma "*Requirements for city and trekking, young adult, mountain and racing bicycles*".

Tipo de bicicleta	Urbana	Infantil	Montanha	Competição
Deformação permanente	60	60	60	15

Tabela 2.2: Valores de deformação permanente em milímetros.
Fonte: Norma ISO 4210-2

A norma também menciona como critério de validação uma inspeção visual, com o objetivo de avaliar a condição, qualidade e integridade dos componentes e determina que não devem haver rachaduras ou fraturas visíveis no conjunto quadro-garfo, e após o segundo impacto, não deve haver separação de nenhuma parte de qualquer sistema de suspensão.

Capítulo 3

Revisão teórica

Com o objetivo de trazer soluções para as questões mencionadas anteriormente, modelos matemáticos foram desenvolvidos e se tornaram ferramentas essenciais para o cálculo e análise de sistemas complexos. Esses modelos oferecem uma abordagem mais precisa e confiável para entender e prever o comportamento de sistemas físicos, ajudando a solucionar problemas e aprimorar projetos.

Ao utilizar modelos matemáticos, é possível descrever o sistema em termos de equações e relações matemáticas que representam as interações entre as variáveis relevantes. Essas equações podem ser resolvidas numericamente ou analiticamente, dependendo da complexidade do sistema e dos métodos disponíveis.

3.1 Análise modal

A análise modal tem como objetivo principal determinar as frequências naturais de vibração e os modos de vibração de uma estrutura. As frequências naturais são as frequências características nas quais a estrutura vibra quando excitada sem a presença de forças externas, já os modos de vibração, por sua vez, descrevem as formas e direções específicas nas quais a estrutura se deforma durante a vibração.

As frequências naturais são calculadas durante a análise modal por meio da resolução das equações modais da estrutura. Essas equações são obtidas a partir da formulação matemática do problema, considerando as propriedades físicas da estrutura, como massa, rigidez e amortecimento.

O cálculo das frequências naturais envolve a determinação dos autovalores do sistema em questão. Esses autovalores representam o quadrado das frequências (ω^2) e são encontrados ao resolver o seguinte sistema de equações:

$$[K] * \phi = \omega^2 * [M] * \phi \quad (3.1)$$

Onde:

- $[K]$ é a matriz de rigidez da estrutura;
- $[M]$ é a matriz de massa da estrutura;
- ϕ é o vetor dos modos de vibração da estrutura;
- ω^2 é a frequência ao quadrado.

Essas equações modais são transformadas em um problema de autovalores generalizado, em que a frequência ao quadrado (ω^2) é o autovalor e os vetores de modos de vibração (ϕ) são os autovetores. Finalmente, as frequências são dadas pelas raízes quadradas dos autovalores e são expressas em Hz ou rad/s, dependendo da unidade adotada.

É importante ressaltar que as frequências naturais calculadas dependem das características geométricas, propriedades físicas, condições de contorno e do modelo estrutural utilizado na análise modal.

Nesta análise, estamos interessados em verificar os modos de corpo rígido da estrutura e conseqüentemente, o valor da frequência natural. Os modos de corpo rígido são associados a movimentos de translação e rotação de uma estrutura como um todo, sem ocorrerem deformações internas. Em outras palavras, eles representam as formas de vibração em que a estrutura se move como um corpo sólido, sem sofrer distorções.

Os modos de corpo rígido têm frequências naturais associadas, que representam a taxa na qual a estrutura vibra em cada modo. Essas frequências podem ser calculadas durante a análise modal, juntamente com os modos de vibração correspondentes.

Embora os modos de corpo rígido não forneçam informações detalhadas sobre o comportamento interno da estrutura, eles são importantes na análise modal, pois ajudam a compreender o comportamento global de sistemas complexos. Além disso, os modos de corpo rígido são úteis na validação dos resultados da análise modal e na identificação de possíveis problemas de vibração, como ressonâncias indesejadas ou interferências entre componentes estruturais.

3.2 Análise dinâmica

O cálculo dinâmico em análise estrutural é uma abordagem que considera a resposta de uma estrutura a carregamentos dinâmicos, como vibrações, impactos ou outros tipos de excitações. Ele é usado para prever e avaliar o comportamento dinâmico de uma estrutura, como edifícios, pontes, veículos, máquinas e outras estruturas sujeitas a movimentos ou carregamentos dinâmicos.

Existem várias técnicas e métodos para realizar o cálculo dinâmico em análise estrutural, e eles geralmente envolvem a resolução de equações diferenciais que descrevem o movimento da estrutura ao longo do tempo. Essas equações podem ser obtidas a partir das leis fundamentais da física, como a equação do movimento de Newton, ou podem ser derivadas de modelos matemáticos mais complexos, dependendo da natureza da estrutura e das condições de carregamento.

O cálculo dinâmico em análise estrutural é amplamente utilizado em várias áreas, como engenharia civil, aeroespacial, mecânica e sísmica. Ele desempenha um papel fundamental no projeto de estruturas sujeitas a cargas dinâmicas, permitindo avaliar a estabilidade, a segurança e o desempenho das estruturas sob diferentes condições de carregamento.

Na análise estrutural por elementos finitos, as equações dinâmicas são derivadas a partir das equações de equilíbrio dinâmico da estrutura. Essas equações descrevem a relação entre as forças atuantes na estrutura e as acelerações e deslocamentos resultantes.

Para uma estrutura linear elástica, as equações dinâmicas podem ser escritas como:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\} \quad (3.2)$$

Onde:

- $[M]$ é a matriz de massa, que representa a distribuição de massa da estrutura.
- $\{\ddot{u}\}$ é o vetor de aceleração, que representa as acelerações nodais desconhecidas na estrutura.
- $[C]$ é a matriz de amortecimento, que representa a dissipação de energia na estrutura.
- $\{\dot{u}\}$ é o vetor de velocidade, que representa as velocidades nodais desconhecidas na estrutura.
- $[K]$ é a matriz de rigidez, que representa a rigidez estrutural.
- $\{u\}$ é o vetor de deslocamento, que representa os deslocamentos nodais desconhecidos na estrutura.
- $\{F\}$ é o vetor de força aplicada na estrutura.

Essas equações podem ser obtidas a partir da formulação do elemento finito onde os deslocamentos e forças desconhecidas são aproximados usando funções de

forma, e as integrações numéricas são realizadas para obter as matrizes de massa, amortecimento e rigidez.

Uma vez que as equações dinâmicas são estabelecidas, elas podem ser resolvidas numericamente para obter os deslocamentos e acelerações da estrutura ao longo do tempo. A solução destas equações permite obter informações sobre as respostas dinâmicas da estrutura, como deslocamentos, acelerações e tensões em diferentes pontos da estrutura.

3.2.1 Critério de plasticidade

O interesse do ensaio é determinar se a estrutura está em conformidade ou não. Para responder a essa pergunta, a norma estabelece um limite máximo para a deformação plástica. A fim de avaliar se a estrutura atingiu essa deformação permanente mencionada, é necessário realizar um estudo de plasticidade. Para isso, existem diferentes métodos sugeridos, como o critério de Von Mises, de Tresca ou de Drucker-Prager. A escolha do critério a ser utilizado depende do responsável pelo projeto, que deve considerar a criticidade e a aplicação específica. Para este tipo de estudo, o mais comum e sugerido é adotar o método de Von Mises como critério de plasticidade.

Para tal, uma vez que as tensões principais dos componentes é conhecida, o cálculo da tensão de von Mises é realizado por meio da seguinte fórmula:

$$\sigma_{vonMises} = \sqrt{(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2 - \sigma_1 \cdot \sigma_3 - \sigma_2 \cdot \sigma_3)} \quad (3.3)$$

Onde, σ_1 , σ_2 e σ_3 são as tensões principais ou as tensões de cada componente. Por fim, a tensão de von Mises calculada é então comparada com o limite de escoamento do material. Se a tensão de von Mises for menor ou igual ao limite de escoamento, a estrutura é considerada segura.

Para termos de segurança, outro termo à ser levado em consideração é o coeficiente de segurança, que tem como objetivo garantir a confiabilidade da estrutura, considerando incertezas intrínsecas e possíveis variações durante a operação do sistema em questão. Este presente estudo não considera um coeficiente de segurança igual a 1, pois entende que a sua determinação é uma escolha por vezes pessoal do departamento de engenharia ou está condicionada à uma decisão técnica de um grupo de especialistas.

Capítulo 4

Análise estrutural por métodos computacionais

Desde a descoberta e evolução do mundo numérico, os computadores se tornaram o aliado preferido para solução de problemas de engenharia, e não é diferente na análise estrutural. As duas análises propostas, sem o auxílio de instrumentos numéricos, seriam uma tarefa árdua, delicada e possivelmente imprecisa.

Além de uma enorme redução no tempo de cálculo, o uso de ferramentas computacionais traz inúmeras vantagens como uma visualização e interpretação de resultados mais direta, maior flexibilidade e adaptabilidade, tudo graças à uma maior capacidade de cálculo e facilidade para lidar com grandes quantidades de dados.

4.1 Métodos computacionais existentes

Existem vários métodos computacionais para análise estrutural, cada um com suas próprias características e especificidades. A seguir estão os principais métodos utilizados na análise estrutural computacional:

- Método de Elementos Finitos (MEF): O MEF é um método numérico utilizado para analisar a resposta estrutural de sistemas complexos. Ele divide o domínio de análise em um conjunto de pequenos elementos finitos interligados por nós. Os elementos podem ter diferentes geometrias e propriedades, permitindo que o método seja aplicado a uma ampla gama de problemas de engenharia.
- Método de Elementos de Contorno (MEC): O MEC é um método numérico utilizado para resolver problemas de valor de contorno em que a solução é buscada em uma superfície de contorno. Ele divide a superfície em elementos de contorno, e as equações da mecânica dos sólidos são aplicadas nessas superfícies para obter as soluções. O MEC é adequado para problemas que

envolvem tensões e deformações na superfície de um sólido, mas tem menos flexibilidade em relação ao MEF.

- Método de Diferenças Finitas (MDF): O MDF é um método numérico que discretiza as equações diferenciais governantes da mecânica dos sólidos em pontos discretos do domínio da análise. O método é adequado para problemas em que o domínio de análise pode ser discretizado em uma grade uniforme. No entanto, ele não é tão flexível quanto o MEF em relação à geometria do problema.
- Método dos Elementos de Fronteira (MEFr): O MEFr é um método numérico que discretiza as equações diferenciais governantes da mecânica dos sólidos em uma superfície que rodeia o domínio de análise. Ele divide essa superfície em elementos de fronteira, e as equações são resolvidas nesses elementos. O MEFr é adequado para problemas que envolvem ondas ou vibrações, como a análise de dutos.
- Método dos Elementos de Volume (MEV): O MEV é um método numérico que é uma generalização do MEF. Ele discretiza o domínio de análise em pequenos volumes em vez de elementos finitos. O MEV é adequado para problemas em que a resposta estrutural pode ser encontrada em todo o volume do sólido.

A escolha do método é condicionada ao problema à ser analisado, das propriedades do material, da geometria e das condições de contorno do problema. Devido à sua flexibilidade, precisão e eficiência computacional, o MEF é atualmente o método mais amplamente utilizado na análise estrutural computacional e foi o método escolhido para este estudo.

4.2 Análise estrutural pelo Método de Elementos Finitos

4.2.1 Definição

A análise estrutural pelo MEF trata-se de uma técnica que tem como objetivo simular o comportamento mecânico de estruturas através da divisão da estrutura em uma quantidade finita de subelementos, nos quais as equações que governam o comportamento mecânico do material são aplicadas.

Essa análise estrutural envolve a definição da geometria da estrutura, a definição das propriedades mecânicas do material, a aplicação de condições de contorno, a aplicação de cargas caso existam, a resolução das equações que governam o comportamento mecânico e uma posterior interpretação dos resultados.

Em termos de resultados, os resultados comuns são a analisar a resposta da estrutura em termos de deformação, tensão, deslocamento, frequência, entre outros parâmetros, permitindo a otimização do projeto, a identificação de pontos críticos e a previsão do comportamento da estrutura em diferentes condições de carregamento.

4.2.2 Vantagens

O MEF tem diversas vantagens em relação a outros métodos de análise estrutural, como:

- **Flexibilidade:** é um método flexível que pode ser aplicado a uma ampla variedade de problemas de engenharia, incluindo problemas com geometrias complexas, cargas não-lineares e comportamentos não-lineares de materiais.
- **Precisão:** é capaz de fornecer resultados precisos para problemas de engenharia, desde que o modelo seja construído com cuidado e a malha seja suficientemente refinada.
- **Eficiência computacional:** geralmente mais eficiente do que outros métodos numéricos, como o método de diferenças finitas ou o método de elementos de contorno, especialmente para problemas tridimensionais.
- **Visualização:** permite uma visualização direta das respostas da estrutura, como deslocamentos e tensões, em diferentes etapas da análise.
- **Otimização:** pode ser combinado com algoritmos de otimização para encontrar soluções eficientes e otimizadas para problemas de engenharia.
- **Integração com modelos geométricos:** é facilmente integrado com softwares de desenho e concepção, os CAD (no inglês, *Computer Aided Design*), permitindo a criação rápida e precisa de modelos de elementos finitos.
- **Previsão de falhas:** pode ser usado para prever a ocorrência de falhas estruturais, como fraturas ou deformações excessivas, antes que elas ocorram na realidade, o que pode levar a economias significativas em tempo e dinheiro.

Devido a essas vantagens, o método de elementos finitos é amplamente utilizado na análise estrutural de projetos de engenharia em diversas áreas, não apenas na mecânica estrutural, mas também em aplicações nas indústrias aeroespacial, naval, civil, automotiva, entre outras.

4.2.3 Desvantagens

Entretanto, como qualquer processo, a análise de elementos finitos possui algumas desvantagens, tais como:

- Precisão do cálculo é diretamente relacionada com o nível de refino dos elementos, o que eleva consideravelmente o custo computacional do cálculo.
- Tempo de cálculo pode ser elevado quando comparado com outros modelos.
- Para análises de fluidos outros métodos se provam mais eficientes, como os métodos de volumes finitos, de diferenças finitas ou de partículas finitas.

4.2.4 Procedimento

O processo de simulação estrutural pelo MEF envolve as etapas descritas no fluxograma apresentado na figura 4.1 :

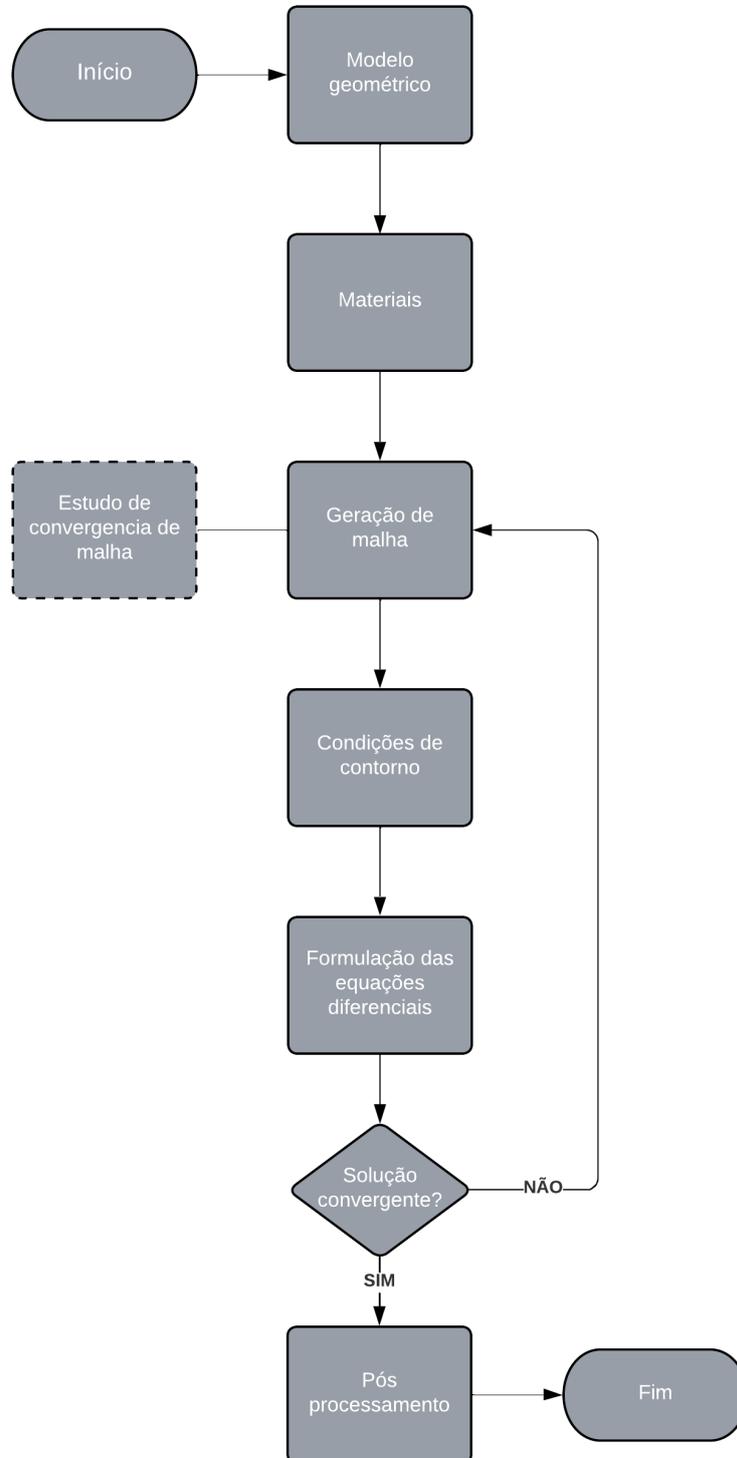


Figura 4.1: Fluxograma do método de elementos finitos.
Autoria própria.

- Definição do problema (Início): Nesta etapa, reflete-se sobre os objetivos da simulação que neste caso, como trata-se de uma análise estrutural, se interessa em avaliar o comportamento da estrutura sob cargas estáticas e dinâmicas, analisar a deformação e a tensão em diferentes pontos da estrutura, identificar pontos críticos ou determinar a vida útil do componente.
- Modelagem da geometria: A geometria do componente ou estrutura a ser analisado é modelada em um software de simulação por meio de elementos finitos. Para esta etapa pode-se utilizar o mesmo software que soluciona a equação para o design dos componentes, mas normalmente utiliza-se algum software que seja dedicado para tal.
- Definição das propriedades do material: Neste estudo de análise estrutural, as propriedades que mais influenciam o resultado são: o módulo de elasticidade (fator que determina a rigidez do material e usada para calcular deformação quando submetido a uma carga), coeficiente de Poisson (medida da capacidade do material se contrair lateralmente quando submetido a uma carga axial e usado na análise de tensões e deformações) e densidade (medida de massa por unidade de volume).
- Aplicação de condições de contorno e carga: Condições de contorno, como fixações e suportes, são aplicadas no modelo para simular o ambiente de carregamento real. Essas condições além de determinarem os graus de liberdade do sistema, também são responsáveis por permitir a solução da equação diferencial. Neste modelo, as condições de contorno permitem a rotação do conjunto em torno de um eixo e permitem o posicionamento das massas.
- Resolução da equação de equilíbrio: A equação de equilíbrio é resolvida pelo software de simulação para cada elemento finito, considerando as condições de contorno e as cargas aplicadas.
- Análise dos resultados (Pós-processamento): Os resultados da simulação são apresentados em gráficos e tabelas, permitindo a visualização da deformação, tensão, deslocamento e outros parâmetros em diferentes pontos da estrutura. A análise desses resultados permite avaliar a resistência da estrutura, identificar pontos críticos e realizar ajustes no projeto para melhorar seu desempenho.

Capítulo 5

Metodologia experimental

Como descrito, o presente estudo tem dois pontos de interesse: uma análise modal e em seguida, uma análise dinâmica para representar o ensaio de queda. Para tal, modelização da geometria foi realizada utilizando o software CATIA V5, a seguir importa-se este modelo para o software ABAQUS®//Standard onde desenvolve-se toda a simulação, ambos desenvolvidos pela Dassault Systèmes. Para o pós-tratamento do dados e geração de gráficos foi utilizado o software Excel, da Microsoft.

Enquanto a análise modal tem interesse em validar o modelo, assegurando-se que o conjunto se comporta como uma única peça, comprova a existência de apenas um modo de corpo rígido numericamente igual à zero e determina a otimização do diâmetro externo da seção transversal, é através da análise dinâmica, onde efetivamente o teste é reproduzido, o interesse passa a ser a otimização do modelo através das dimensões de espessura do conjunto, ou seja, um modelo que retorne os maiores valores de tensão para os menores valores geométricos, que pode ser traduzido em um conjunto mais leve.

5.1 Etapas do cálculo

5.1.1 Geometria

A geometria é usada para determinar as propriedades da seção transversal dos elementos estruturais, como área, momento de inércia e raio de giração.

O momento de inércia é calculado com base na distribuição de massa em torno do eixo polar, que é perpendicular ao plano da seção transversal do tubo. É definido como a soma dos produtos das massas elementares multiplicadas pelo quadrado de sua distância ao eixo polar.

Para um tubo de seção transversal circular, o momento de inércia pode ser calculado usando a fórmula:

$$I = \frac{\pi}{4} * (R^4 - r^4) \quad (5.1)$$

Onde:

- I: o momento de inércia do tubo;
- π : constante matemática, aproximada para 3,14159;
- R: o raio externo do tubo;
- r: o raio interno do tubo.

O momento de inércia é uma propriedade com extrema relevância na análise estrutural, pois influencia a rigidez e a capacidade de suportar cargas de flexão de um tubo circular, logo atua diretamente na matriz de rigidez presente nas equações análises modal e dinâmica (3.1 e 3.2).

A geometria inicial é composta por tubos de seção transversal uniforme com as seguintes dimensões:

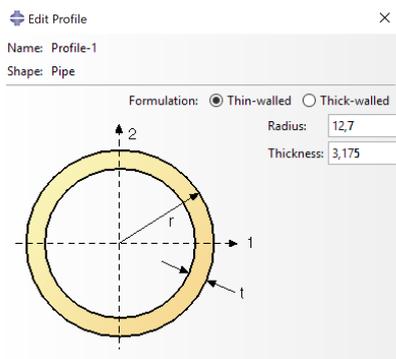


Figura 5.1: Dimensões da seção transversal da estrutura.

Fonte: ABAQUS®/Standard

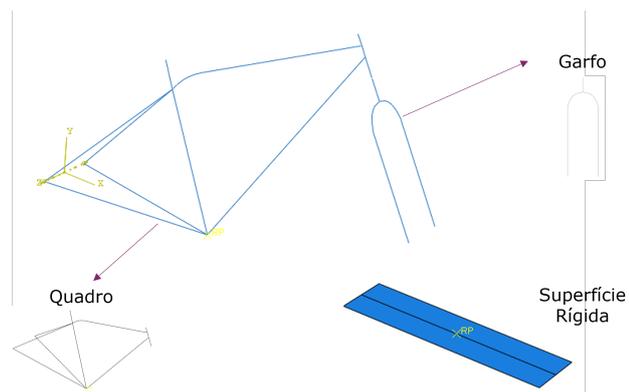


Figura 5.2: Representação da geometria e dos componentes do modelo viga.

Fonte: ABAQUS®/Standard

5.1.2 Material

Dentre os diferentes tipos de aço que podem ser utilizados na fabricação de bicicletas, para este estudo foi escolhido um entre os mais comuns, o aço cromo-molibdênio (também conhecido como cromo-moly ou CrMo). Esse tipo de aço é uma liga de cromo, molibdênio e carbono, que apresenta alta resistência e durabilidade, além de uma boa relação entre peso e resistência.

Sua escolha deve-se pelos seguintes fatores:

- Alta resistência e rigidez: alta resistência à tração e à fadiga, tornando-o um material ideal para a construção de quadros de bicicletas que precisam suportar cargas e forças repetitivas.

- Durabilidade: altamente resistente à corrosão, o que aumenta a durabilidade e vida útil da bicicleta.
- Baixo peso: apesar de ser uma liga de aço, o CrMo apresenta uma relação resistência-peso favorável, o que o torna um material relativamente leve.
- Facilidade de soldagem: permite uma boa soldabilidade.
- Flexibilidade: apresenta uma certa flexibilidade, o que pode proporcionar um conforto adicional ao ciclista, absorvendo vibrações e impactos.

Essas propriedades que tornam o CrMo um material popular na indústria de bicicletas e motivaram sua escolha como material para o quadro.

Segundo a ASM International, o aço CrMo apresenta as seguintes propriedades:

Parâmetro	Unidade	Valor
Módulo de Elasticidade	GPa	200,00
Coefficiente de Poisson	adimensional	0,30
Densidade	g/cm ³	7,85

Tabela 5.1: Tabela de propriedades do aço CrMo.
Fonte: AMS Internacional

Em relação ao garfo, o material escolhido foi alumínio por possuir elevada resistência à relação de peso, trata-se de um material leve, porém oferece alta resistência mecânica, o que o torna ideal para tal aplicação.

Segundo a ASM International, o alumínio apresenta as seguintes propriedades:

Parâmetro	Unidade	Valor
Módulo de Elasticidade	GPa	70,00
Coefficiente de Poisson	adimensional	0,30
Densidade	g/cm ³	2,70

Tabela 5.2: Tabela de propriedades do alumínio.
Fonte: AMS Internacional

O material foi modelizado a apresentar um comportamento elástico-plástico perfeito, ou seja, é assumido que o material se comporta de maneira elástica até atingir um determinado limite de tensão, chamado de limite de elasticidade ou limite elástico.

No regime elástico, o material retorna à sua forma original quando a carga é removida, ou seja, não há deformação permanente. Nesse regime, a relação entre

tensão e deformação é linear e obedece à lei de Hooke. O módulo de elasticidade do material determina a rigidez e a inclinação dessa relação tensão-deformação.

$$E = \epsilon * \sigma \quad (5.2)$$

No entanto, quando a tensão aplicada excede o limite de elasticidade, o material começa a apresentar deformação plástica. Nesse estágio, o material sofre deformações irreversíveis e a relação tensão-deformação não é mais linear. O material pode continuar se deformando mesmo que a tensão aplicada seja reduzida.

No modelo elástico-plástico perfeito, a deformação plástica é considerada perfeitamente reversível. Isso significa que, se a carga for removida, o material retornará à sua forma original sem nenhuma deformação permanente. No entanto, cada vez que a tensão é aplicada além do limite de elasticidade, o material sofre uma deformação plástica adicional, acumulando a chamada deformação plástica total.

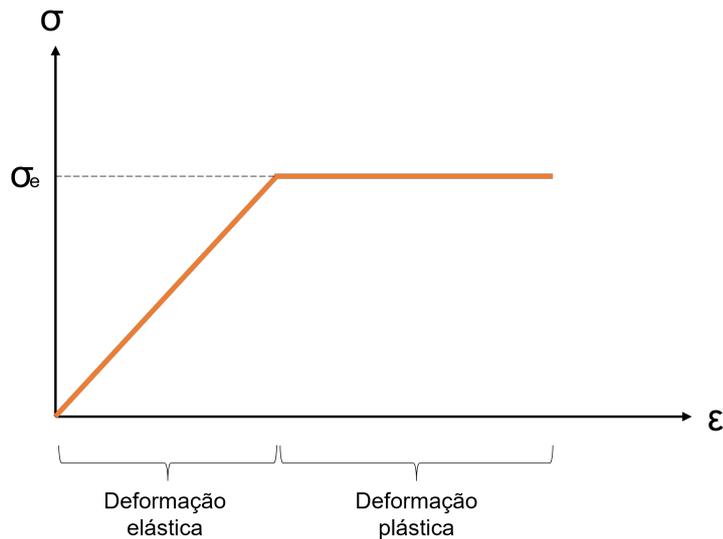


Figura 5.3: Comportamento do modelo elasto-plástico perfeito.

Fonte: Autoria própria.

Embora o comportamento elástico-plástico perfeito seja um modelo simplificado, ele é útil para entender e prever o comportamento de materiais em muitas aplicações de engenharia. No entanto, é importante ressaltar que a maioria dos materiais reais apresenta comportamentos elástico-plásticos mais complexos, que podem incluir endurecimento, amaciamento, fluência, anisotropia e outros fenômenos.

5.1.3 Condições limites

Por definição, as chamadas condições limites em análise de elementos finitos referem-se às condições impostas nas fronteiras de um volume de controle, sendo

ela externa ou interna de uma estrutura modelada por este método. São essas condições que limitam do comportamento do modelo e influenciam os resultados da análise.

As condições de contorno são fundamentais nesta análise, pois cabe a elas definir a solução da equação diferencial que rege o problema. Caso as condições de contorno não forem definidas corretamente, a solução pode ser incoerente ou até mesmo impossível de ser alcançada.

As condições de contorno podem ser classificadas em dois tipos principais: condições de deslocamento e condições de carga. As condições de deslocamento especificam como as estruturas estão fixadas ou sujeitas a deformações em sua fronteira externa ou interna. Além das duas condições mencionadas, como fator externo sob o conjunto também age a força da gravidade, responsável por fazer proporcionar o movimento de rotação desejado no ensaio.

Grandeza	Unidade	Valor
Aceleração da gravidade	m/s^2	9,81

Tabela 5.3: Valor adotado para aceleração da gravidade.

Condições de Deslocamento

A respeito das condições de deslocamento, para representar o ensaio foi definido um suporte de segundo grau de modo a deixar o conjunto livre para girar em torno de um eixo. Uma maneira de avaliar a modelização está de acordo com o descrito pelo ensaio, é através da análise do primeiro modo de vibração na calculo modal e esta modelização de apoio é semelhante entre os dois modelos propostos.

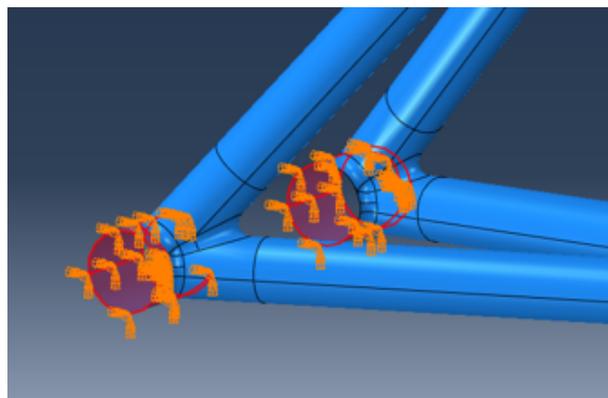


Figura 5.4: Representação da fixação do eixo traseiro para modelo casca.
Fonte: ABAQUS®/Standard

Condições de Carga

Neste estudo, a aplicação de cargas externas são representadas pelas massas posicionadas no canote do assento, no eixo de direção e na altura dos pedais, modelizadas no software através de pontos de referência fixos na geometria.

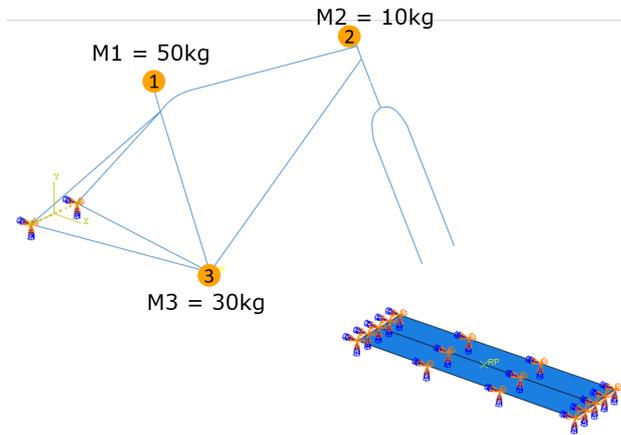


Figura 5.5: Representação da posição das massas e fixação da superfície rígida no modelo viga.

Fonte: ABAQUS®/Standard

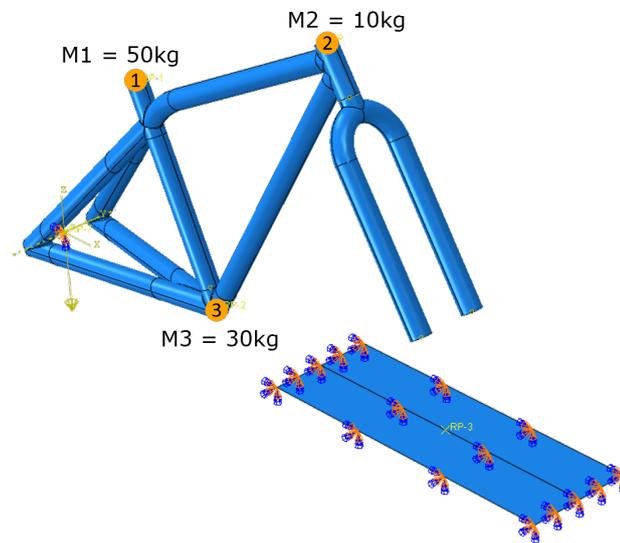


Figura 5.6: Representação da posição das massas e fixação da superfície rígida no modelo casca.

Fonte: ABAQUS®/Standard

5.1.4 Geração de malha

O processo de geração de malha no método de elementos finitos é uma etapa fundamental na construção do modelo numérico. A malha é uma representação discreta

do domínio físico a ser analisado, composta por um conjunto de elementos finitos conectados por nós. Cada elemento é uma aproximação local do comportamento do material na região em que está definido.

O processo de geração de malha envolve a subdivisão do domínio físico em elementos finitos, de modo que a geometria, as condições de contorno e as propriedades do material sejam preservadas. Esse processo pode ser realizado de diversas maneiras, que variam de acordo com a complexidade do problema, o tipo de geometria e as restrições computacionais.

Neste estudo, as técnicas usadas foram a divisão retangular e triangular. Esse método consiste em subdividir o domínio em pequenos retângulos ou triângulos, e cada um desses elementos é, em seguida, definido por um conjunto de nós. Os nós são os pontos onde os elementos se conectam, e são definidos de forma a preservar a forma e as características do domínio físico.

Independentemente da técnica de geração de malha adotada, é importante que a malha gerada seja de qualidade adequada, o que significa que ela deve ter uma boa relação entre a resolução e o custo computacional, e que deve atender aos requisitos de convergência e estabilidade da solução numérica. A qualidade da malha depende do tamanho, da forma e da distribuição dos elementos, bem como do número e da distribuição dos nós.

No modelo viga, o elemento escolhido foi o tetramétrico com quatro nós S4R para toda a geometria. Quanto ao modelo casca, devido à presença de chanfros nas regiões de mudança de geometria aguda, além de ter a malha mais refinada, foi também modificado para o modelo S3, triangular de 3 nós nestas zonas de interesse.

Elemento	Quantidade
Nós	802
Elementos quadrados do tipo S4R	758

Tabela 5.4: Tabela dos elementos de malha para modelo viga.
Fonte: ABAQUS®/Standard

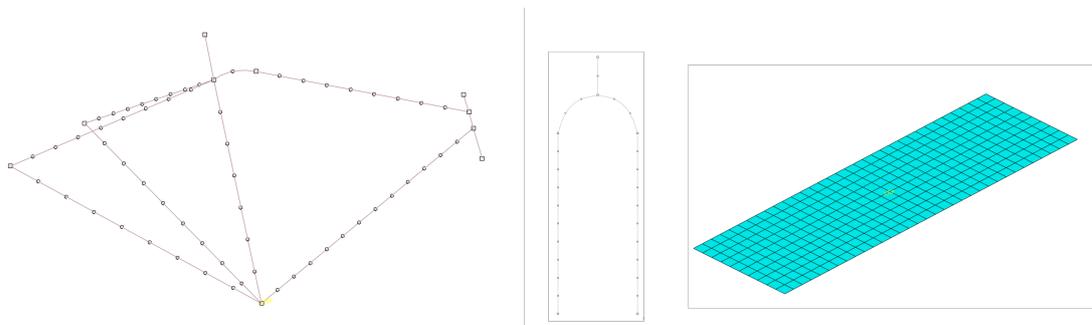


Figura 5.7: Representação de malha do conjunto no modelo viga.
Fonte: ABAQUS®/Standard

Elemento	Quantidade
Nós	8472
Elementos quadrados do tipo S4R	6211
Elementos triangulares do tipo S3	4174

Tabela 5.5: Tabela dos elementos de malha para modelo casca.
 Fonte: ABAQUS®/Standard

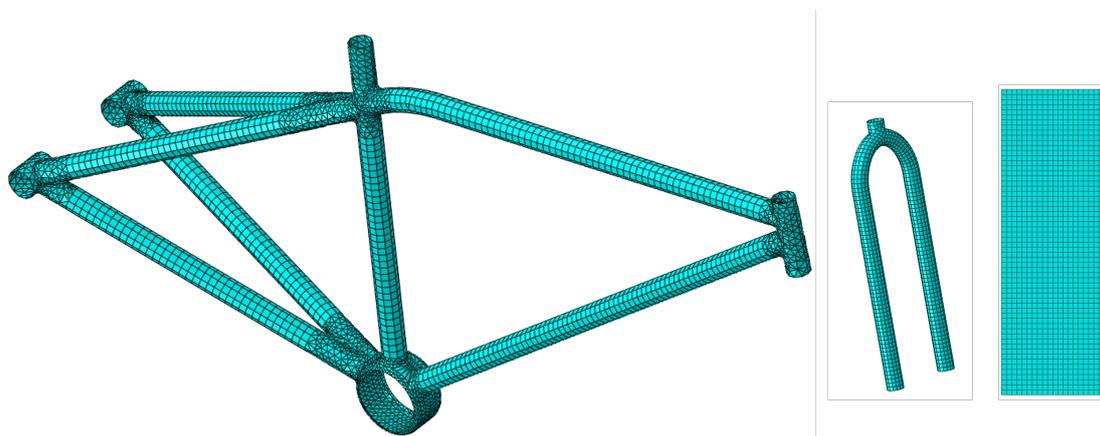


Figura 5.8: Representação de malha do conjunto no modelo casca.
 Fonte: ABAQUS®/Standard

No caso do estudo em viga, a malha é facilmente gerada uma vez que é suficiente de dividir o modelo em alguns segmentos. Já no modelo casca, para obter resultados mais precisos, se faz necessário uma malha mais refinada, principalmente nos locais onde espera-se valores mais elevados, como na conexão entre quadro-garfo e nas junções entre elementos estruturais, por tratar-se de regiões de descontinuidade como mudanças de geometria.

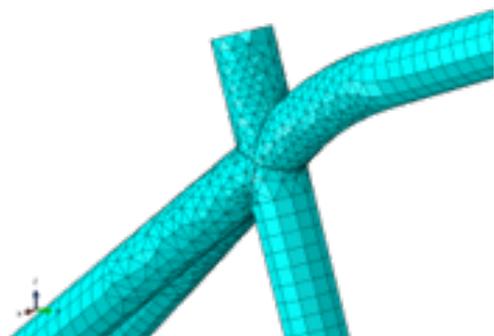


Figura 5.9: Vista detalhada da malha na região do canote do assento.
 Fonte: ABAQUS®/Standard

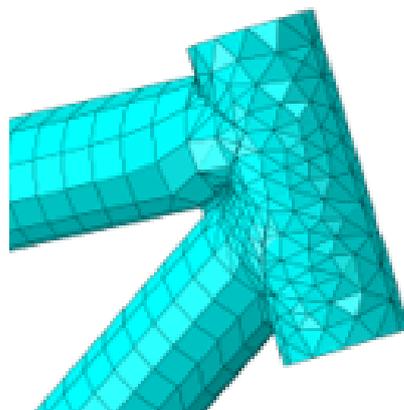


Figura 5.10: Vista detalhada da malha na região do tubo de direção.
 Fonte: ABAQUS®/Standard

Capítulo 6

Resultados e Discussões

É proposto a seguir uma comparação e posterior análise entre dois modelos elementos finitos: modelo em viga e modelo em casca. Os modelos representam o mesmo ensaio, logo são mantidos a mesma geometria, materiais, condições limites e tipo de contato, as diferenças se dão principalmente na etapa de geração de malha, uma vez que a convergência de malha no modelo em casca determina que a malha deve ser em um maior grau de refino.

Em seguida, apresenta-se o critério para duração da simulação, a otimização do diâmetro externo através da análise modal e a otimização da espessura dos componentes, definida pela análise dinâmica.

6.1 Deslocamento vertical do ponto P e tempo de análise

Com a finalidade de definir o tempo de duração do ensaio, foi analisado a deslocção vertical Y do ponto P localizado na extremidade inferior do garfo. Uma vez que o primeiro elemento à tocar a superfície rígida retornasse ao seu estado estático, o ensaio pode se entender como concluído e as devidas análises propostas realizadas. Esse tempo fica definido como tempo de estabilização do deslocamento vertical e é retirado a partir da geração de um gráfico temporal do deslocamento do ponto P apresentado a seguir.

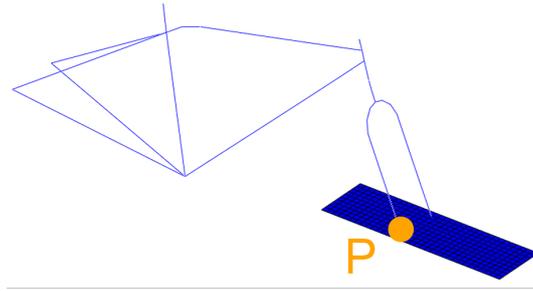


Figura 6.1: Representação do ponto P no modelo viga.
 Fonte: ABAQUS®/Standard

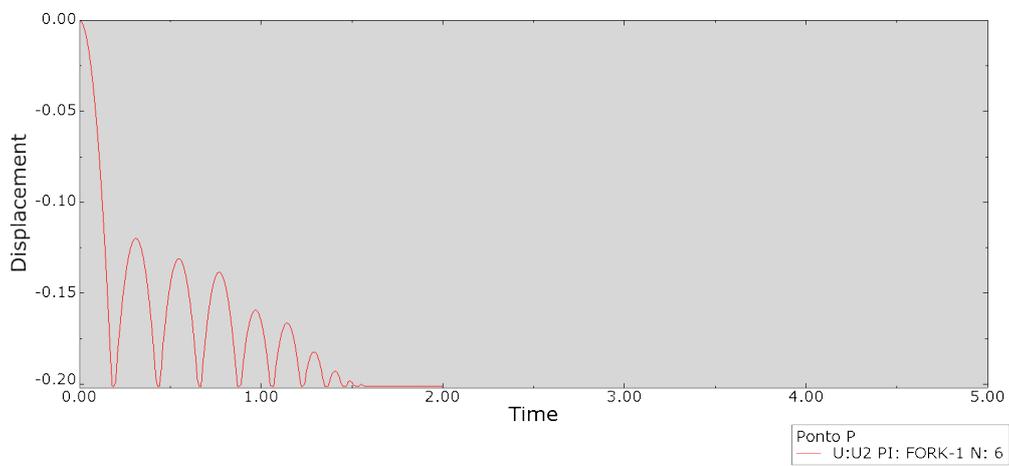


Figura 6.2: Deslocamento vertical do ponto P para modelo viga.
 Fonte: ABAQUS®/Standard

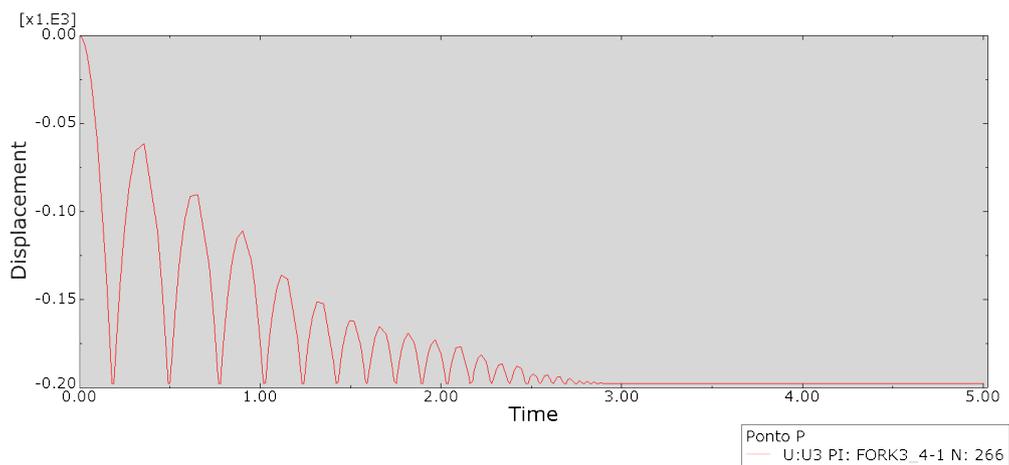


Figura 6.3: Deslocamento vertical do ponto P para modelo casca.
 Fonte: ABAQUS®/Standard

Esta diferença na ordem de 1 segundo pode ser justificada por uma superposição de matéria no modelo viga, o que aumenta a força da gravidade imposta sobre

a estrutura e conseqüentemente amortizando o impacto mais rapidamente. Vale ressaltar que, o deslocamento tem como referencial a posição inicial com o sistema inclinado, logo o conjunto se desloca ao longo do eixo Y no sentido negativo em -200 mm, conforme determinado pela norma e apresentado na tabela 2.1.

6.2 Convergência de malha

O objetivo principal desse estudo é verificar se os resultados obtidos estão convergindo para uma solução precisa e confiável à medida que a malha é refinada. Isso é feito através da análise de diferentes tamanhos de elementos ou densidades de malha para o mesmo problema.

O processo geralmente envolve a execução de várias simulações com diferentes níveis de refinamento da malha e a análise dos resultados obtidos. Essa análise pode incluir a comparação de valores numéricos, como tensões ou deslocamentos em pontos específicos da estrutura, bem como a observação de padrões de convergência e estabilidade.

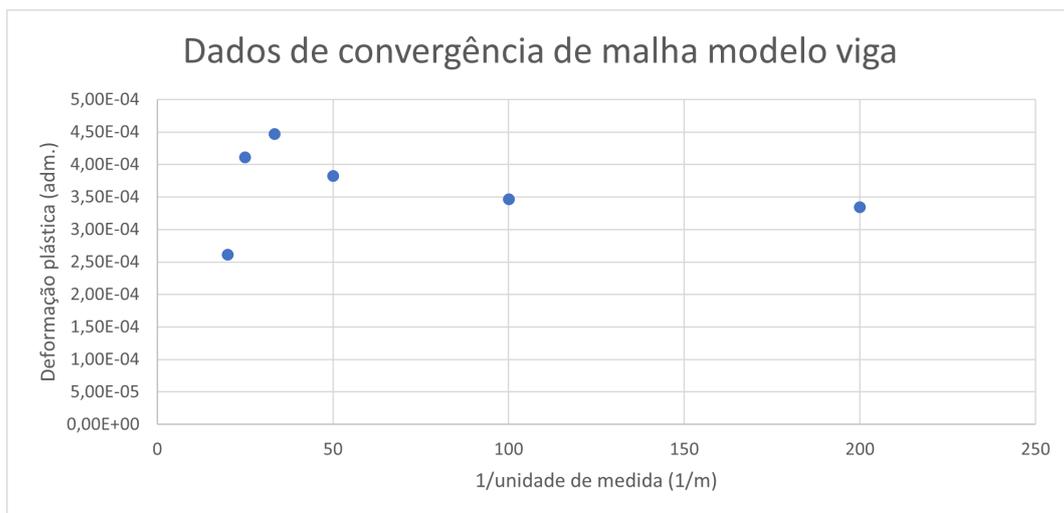


Figura 6.4: Análise de convergência de malha para modelo viga.

Fonte: ABAQUS®/Standard

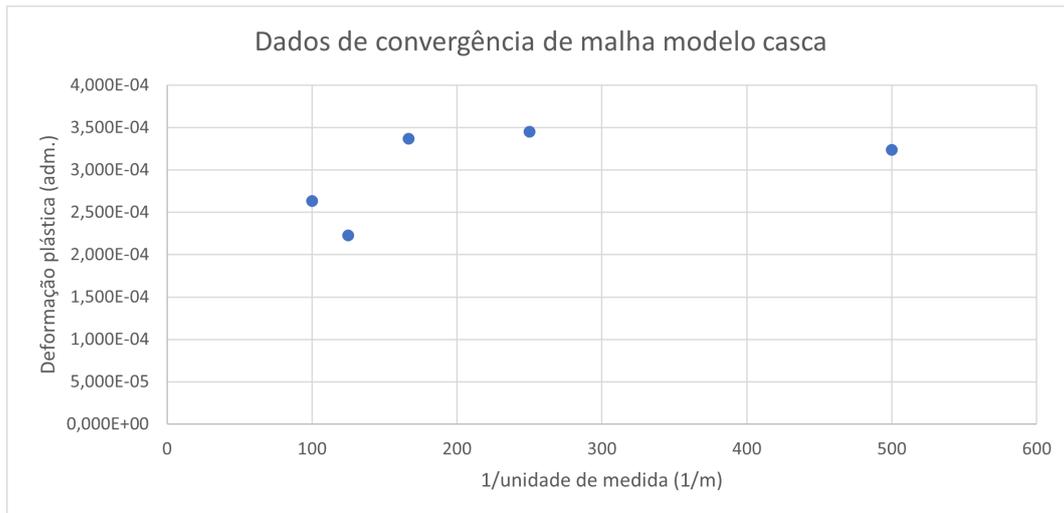


Figura 6.5: Análise de convergência de malha para modelo casca.
 Fonte: ABAQUS®/Standard

No modelo viga, o tamanho aproximado global da malha, uma relação entre densidade e tamanho dos elementos atinge valores satisfatório ao redor de $0,1 \text{ m}^{-1}$, ou seja refinar o modelo traria mais custos computacionais e a precisão dos resultados. Enquanto no modelo casca, a convergência ocorreu por volta de um valor global de $0,3 \text{ m}^{-1}$.

A convergência compreende-se atingida uma vez que o valor precedente e posterior apresentam valores próximos para deformação, entretanto essa diferença entre os dois modelos dá-se devido à adição de uma dimensão a mais na geometria, ou seja, enquanto em um modelo de viga, a malha geralmente é refinada ao longo do comprimento da viga, já em um modelo de casca, a malha é refinada em duas direções, ao longo da espessura da casca e na superfície da casca. A deformação plástica foi escolhida como parâmetro de estudo de convergência devido à sua importante influência direta na deformação permanente.

6.3 Resultados da análise modal

Para o modelo inicial, faz-se uma comparação entre os valores de frequência entre os modelos viga e casca a fim de avaliar a equivalência entre ambos e verificar que apresentam resultados numericamente iguais à zero. Em seguida, uma animação do primeiro modo de vibração é realizada a fim de validar o contato entre as peças e o comportamento do conjunto como um único elemento.

Index	Description
0	Increment 0: Base State
1	Mode 1: Value = -4.30698E-07 Freq = 0.0000 (cycles/time)
2	Mode 2: Value = 24684. Freq = 25.005 (cycles/time)
3	Mode 3: Value = 1.83183E+05 Freq = 68.118 (cycles/time)
4	Mode 4: Value = 3.70223E+05 Freq = 96.839 (cycles/time)
5	Mode 5: Value = 6.17925E+05 Freq = 125.11 (cycles/time)
6	Mode 6: Value = 7.15658E+05 Freq = 134.64 (cycles/time)
7	Mode 7: Value = 1.05005E+06 Freq = 163.09 (cycles/time)
8	Mode 8: Value = 2.41450E+06 Freq = 247.31 (cycles/time)
9	Mode 9: Value = 2.43917E+06 Freq = 248.57 (cycles/time)
10	Mode 10: Value = 3.24018E+06 Freq = 286.49 (cycles/time)

Figura 6.6: Valores dos dez primeiros modos de vibração para modelo viga.
Fonte: ABAQUS®/Standard

Index	Description
0	Increment 0: Base State
1	Mode 1: Value = 3.82367E-07 Freq = 9.84148E-05 (cycles/time)
2	Mode 2: Value = 45259. Freq = 33.859 (cycles/time)
3	Mode 3: Value = 2.57676E+05 Freq = 80.790 (cycles/time)
4	Mode 4: Value = 5.03555E+05 Freq = 112.94 (cycles/time)
5	Mode 5: Value = 8.15554E+05 Freq = 143.73 (cycles/time)
6	Mode 6: Value = 8.54564E+05 Freq = 147.13 (cycles/time)
7	Mode 7: Value = 1.40583E+06 Freq = 188.71 (cycles/time)
8	Mode 8: Value = 2.06392E+06 Freq = 228.65 (cycles/time)
9	Mode 9: Value = 2.11751E+06 Freq = 231.60 (cycles/time)
10	Mode 10: Value = 3.13385E+06 Freq = 281.75 (cycles/time)

Figura 6.7: Valores dos dez primeiros modos de vibração para modelo casca.
Fonte: ABAQUS®/Standard

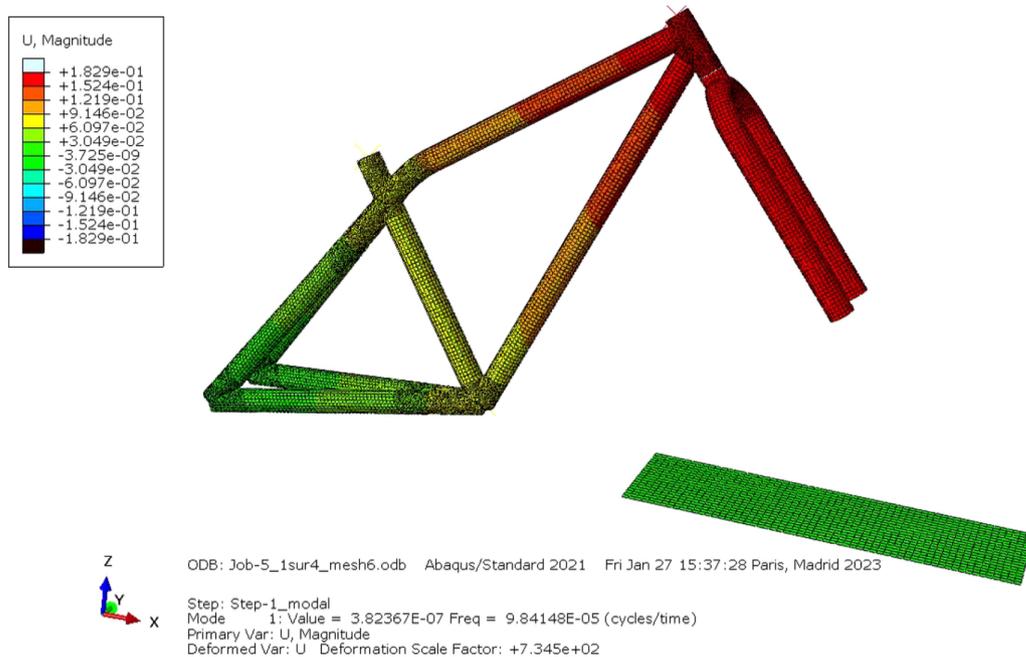


Figura 6.8: Início do primeiro modo de vibração.
 Fonte: ABAQUS®/Standard



Figura 6.9: Fim do primeiro modo de vibração.
 Fonte: ABAQUS®/Standard

A seguir, apresentam-se os resultados de deslocamento máximo do modelo após a otimização modal. O elemento de malha que representa este valor é localizado no ponto P, extremidade inferior do garfo, conforme figura 4.1, e este é o ponto usado como parâmetro para as demais simulações.

Tipo de modelo	Valor
Modelo viga	1,792e-3 m
Modelo casca	1,829e-3 m

Tabela 6.1: Valores de deslocamento máximo para modelo com 3/4 de polegada de diâmetro externo.

Fonte: ABAQUS®/Standard

Foram realizadas três simulações variando o diâmetro externo da estrutura a fim de definir o modelo que estivesse dentro do limite determinado (2 mm) e que representasse o menor diâmetro possível, ou seja, um modelo mais leve. O modelo que alinha melhor performance em termos de resistência e menor peso é o com 3/4 de polegada.

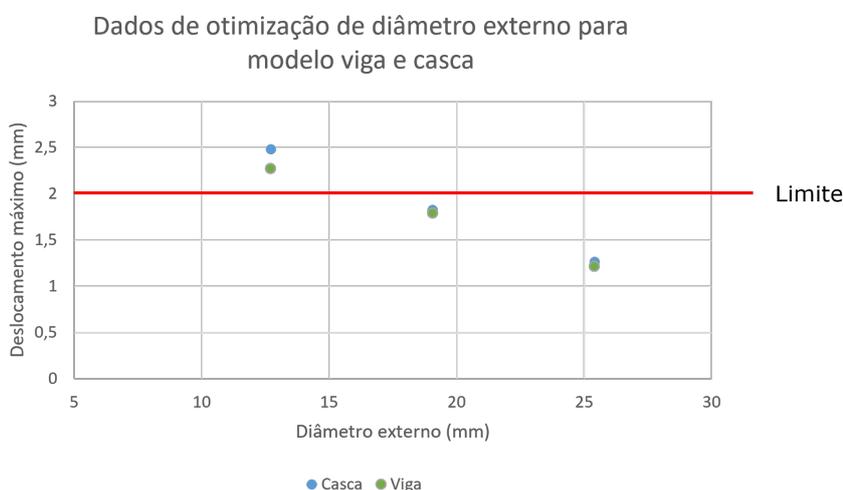


Figura 6.10: Dados de deslocamento máximo para modelos analisados em análise modal.

Fonte: ABAQUS®/Standard

6.4 Resultados da análise dinâmica

Referente à análise dinâmica, o parâmetro definido como referência para o critério de escolha é a deformação permanente por Von Mises e este valor é encontrado similarmente entre os dois modelos à cerca do contato entre o quadro e o garfo.

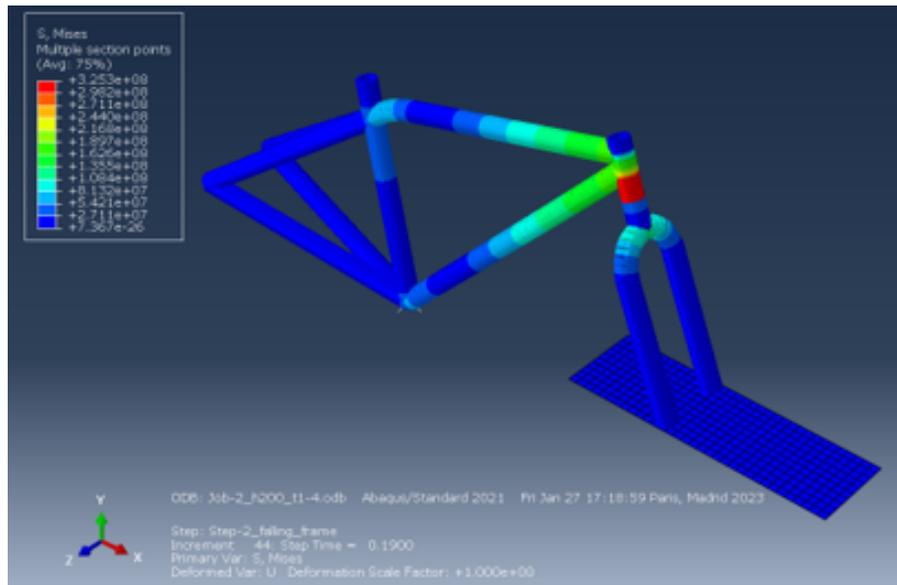


Figura 6.11: Deformação máxima para modelo viga.
 Fonte: ABAQUS®/Standard

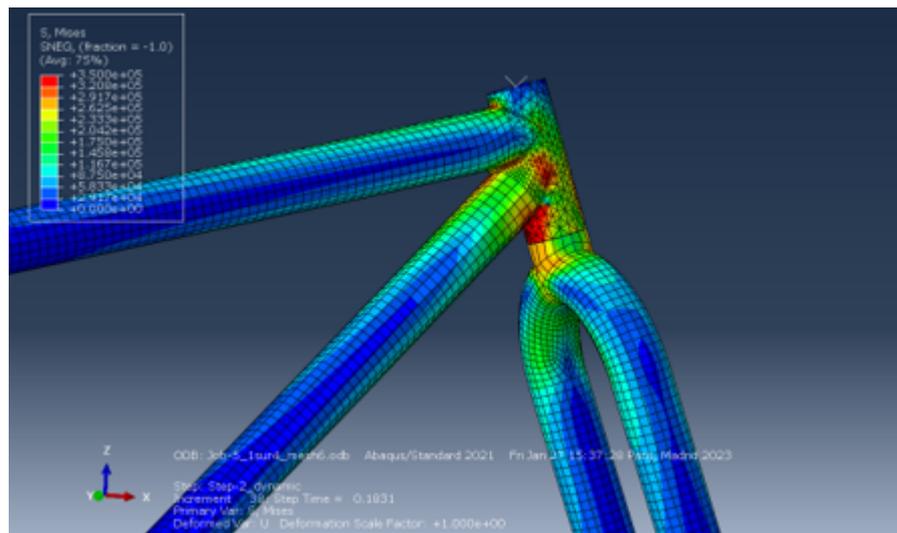


Figura 6.12: Deformação máxima para modelo casca.
 Fonte: ABAQUS®/Standard

Tipo de modelo	Valor
Modelo viga	3,253e+8 Pa
Modelo casca	3,500e+8 Pa

Tabela 6.2: Valores de tensão máxima segundo Von Mises.
 Fonte: ABAQUS®/Standard

À partir dos dados de diâmetro externo ideal encontrados na análise modal, este foi fixado e após três iterações alternando os valores de espessura, avalia-se os dados

no ponto de interesse. O primeiro modelo avaliado que se encontra dentro do limite da norma possui a espessura igual a 1/4 de polegada.

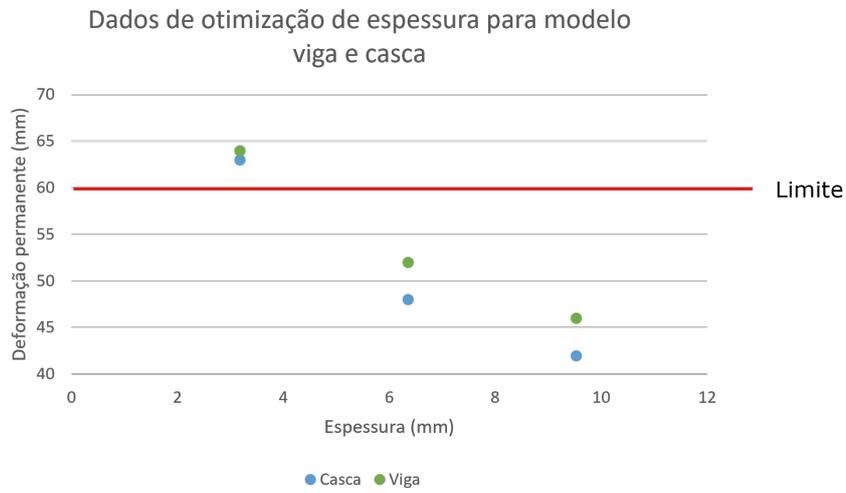


Figura 6.13: Dados de deformação máxima para modelos analisados em análise dinâmica.

Fonte: ABAQUS®/Standard

Por fim, o modelo é atualizado com os dados extraídos de ambas as soluções e o processo de otimização é concluído.

Capítulo 7

Conclusões

Em termos de conclusão, constata-se que:

- **Tempo de calculo:** No que tange a rapidez de solução, o modelo em viga é calculado, em média, 20 vezes mais rápido do que o modelo em casca e essa diferença se dá devido ao maior nível de refino da malha, uma vez que o modelo em casca apresenta 10 vezes mais nós e 13 vezes mais elementos, conforme figuras A.1 e A.2 no apêndice A.
- **Equivalência dos modelos:** Pode-se comprovar que a simulação em modelo viga é suficiente para o ensaio proposto, uma vez que ambos cálculos apresentam resultados semelhantes, por volta de 7% de diferença no estudo dinâmico.
- **Valores de frequência naturais entre os dois modelos:** No que diz respeito os modos 2 ao 10, mesmo que possuam frequências também semelhantes, nunca têm exatamente o mesmo valor. Uma possível razão para isso pode ser a superposição de massa gerada pelo modelo de viga nas conexões, uma vez que o modelo representa a linha neutra, o que aumenta a massa total da estrutura. Por outro lado, para realizar as conexões no modelo de casca, foi necessário adicionar arredondamentos de borda, que adicionam massa e rigidez ao modelo. Assim, as diferenças nas massas e rigidez dos modelos resultaram em pequenas variações nas frequências naturais. No entanto, o fato de essas diferenças serem pequenas, apesar das justificativas apresentadas, pode indicar que os modelos são consistentes entre si.
- **Alternativas para uma concepção que não seja aprovada no teste:** Caso a otimização dos parâmetros geométricos não seja uma alternativa para o conjunto, existem outras maneiras de modelizar um conjunto quadro-garfo de modo a manter a geometria designada. Uma mudança no modo de elasticidade,

seja por tratamento térmico, seja pela escolha de outro de material altera os valores na matriz de rigidez.

Capítulo 8

Sugestões de trabalho futuro

- **Automação do processo de otimização através de programação usando ciclo de operações numéricas:** uma vez que, a interface do software de simulação gera um código que possui todos os valores nele impostos, através de um ciclo de operações do tipo "*while*", o processo de otimização poderia ser automatizado, ao invés de a cada nova simulação a mudança ser manual. Isto permitiria igualmente a análise de um maior número de alternativas, ao invés que apenas as 3 apresentadas.
- **Modelização com dimensões de diâmetro externo e espessura variáveis ao longo dos componentes:** neste estudo, a otimização leva em consideração que todo o conjunto quadro-garfo possua a mesma espessura ao longo de toda sua geometria, entretanto, ambos componentes podem possuir dimensões distintas entre os dois e ainda, podem ter dimensões variáveis ao longo dos tubos, principalmente visando reforçar as regiões onde a estrutura é mais solicitada e diminuir nas demais seções, assim diminuindo o peso da estrutura.

Apêndice A

Dados da simulação

As seguintes figuras e imagens foram retiradas do software ABAQUS®.

Submitted: Fri Jun 9 15:14:48 2023
Started: Analysis Input File Processor
Completed: Analysis Input File Processor
Started: Abaqus/Standard
Completed: Abaqus/Standard
Completed: Fri Jun 9 15:15:23 2023

Figura A.1: Tempo de calculo para modelo viga.
Fonte: ABAQUS®/Standard

Submitted: Fri Jun 9 13:58:53 2023
Started: Analysis Input File Processor
Completed: Analysis Input File Processor
Started: Abaqus/Standard
Completed: Abaqus/Standard
Completed: Fri Jun 9 14:30:56 2023

Figura A.2: Tempo de calculo para modelo viga.
Fonte: ABAQUS®/Standard

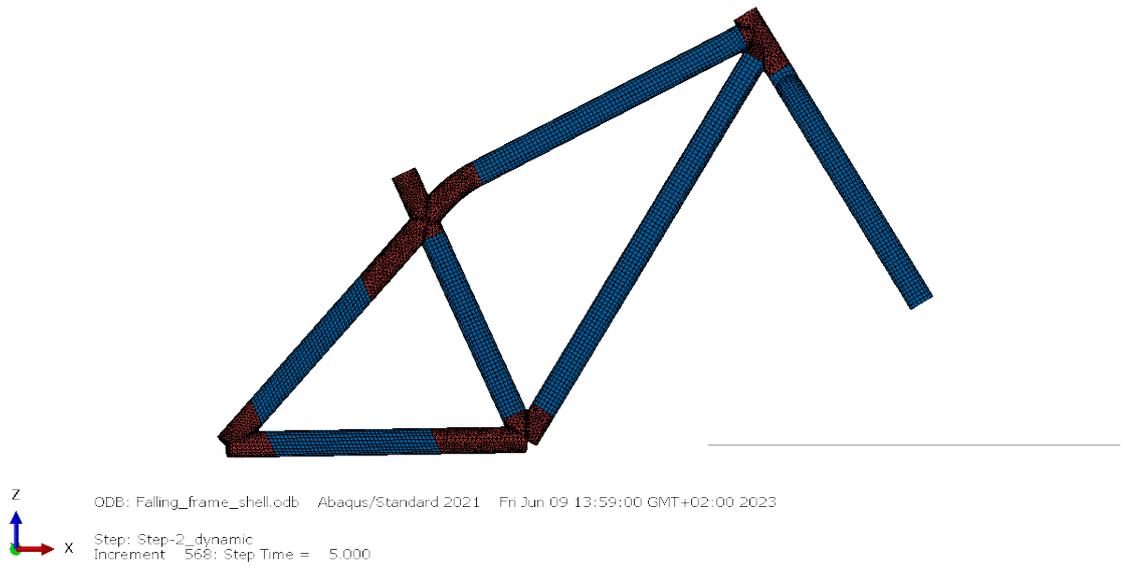


Figura A.3: Representação do modelo em casca repartido nas seções de mudança de geometria.

Fonte: ABAQUS®/Standard

Referências Bibliográficas

- [1] ASM/INTERNATIONAL. *Metals Handbook Vol. 2, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*. 10th ed. Ohio, US, ASM International, 1988.
- [2] ISO 4210-6: *Cycles – Safety requirements for bicycles – Part 6: Frame and fork test methods*. Geneva, CH, ISO, 2015.
- [3] ISO 4210-2: *Cycles – Safety requirements for bicycles – Part 2: Requirements for city and trekking, young adult, mountain and racing bicycles*. Geneva, CH, ISO, 2015.
- [4] HUGHES, Thomas J. R. *The Finite Element Method: Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis*. NJ, US, Prentice Hall, 1989.
- [5] EWINS, D. J. *Modal Testing: Practice and Application* 2nd ed. PA, US, Research Studies Press, 2000.
- [6] HIBBELER, R. C. *Resistencia dos Materiais* 7 Ed. São Paulo, Pearson Prentice Hall, 2015.
- [7] Dassault Systèmes SIMULIA Corp. *Abaqus Documentation*. Providence, USA, 2014.