

FELIPE ABRAHÃO FERREIRA

**Projeto e análise de um conjunto amortecedor por meio do método dos elementos finitos
em aplicativos comerciais**

Felipe Abrahão Ferreira

**Projeto e análise de um conjunto amortecedor por meio do método dos elementos finitos
em aplicativos comerciais**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em (Engenharia Mecânica) da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em (Engenharia Mecânica).

Orientador: Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva

F383p Ferreira, Felipe Abrahão
Projeto e análise de um conjunto amortecedor por meio do método dos elementos finitos em aplicativos comerciais / Felipe Abrahão Ferreira – Guaratinguetá, 2022.
63 f : il.
Bibliografia: f. 49-51

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2022.

Orientador: Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva

1. Automóveis - Molas e suspensão.
 2. Método dos elementos finitos - Programas de computador.
 3. Simulação por computador.
- I. Título.

CDU: 62-272

FELIPE ABRAHÃO FERREIRA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“ENGENHARIA MECÂNICA”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
ENGENHARIA MECÂNICA



Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna
Coordenador

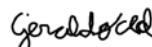
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva
Orientador/UNESP-FEG



Prof. Dr. Erick Siqueira Guidi
UNESP-FEG



Prof. Msc. Geraldo César Rosário de Oliveira
UNESP-FEG

DADOS CURRICULARES

FELIPE ABRAHAO FERREIRA

NASCIMENTO 28.12.1993 – São Paulo / SP

FILIAÇÃO Lauro Lopes Ferreira
Sandra Regina Abrahão

2013/2020 Engenharia Mecânica
Faculdade Júlio Mesquita Filho (UNESP)

dedico este trabalho
de modo especial, à minha família, que sempre
incentivou os meus estudos

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço ao meu orientador, *Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva* que jamais deixou de me incentivar. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível;

aos meus pais, *Lauro e Sandra*, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos;

aos meus amigos, pelo suporte que me deram durante os anos de faculdade e pelo companheirismo durante esse período;

aos funcionários da Faculdade de Engenharia do Campos de Guaratinguetá pela dedicação e alegria no atendimento.

“O único homem que está isento de erros é
aquele que não arrisca acertar.”

Albert Einstein

RESUMO

O trabalho de graduação focou no estudo de uma mola de compressão, desde a teoria de projeto, até sua aplicação em uma suspensão frontal de moto. Para isso, o conjunto final foi projetado de forma a evitar falhas estruturais ou dinâmicas de todos os componentes envolvidos durante a operação. A análise desse tipo de sistema foi feita através do uso do método dos elementos finitos em aplicativos comerciais de engenharia, os quais entregam uma boa aproximação dos valores obtidos na prática. O projeto foi definido para ser realizado completamente em ambiente virtual, focando na análise estática e de vibrações. Por se tratar de um sistema dinâmico, ele não está isento de efeitos de vibração ou de esforços cíclicos, podendo levar a ruptura dos componentes por ressonância ou fadiga. Aplicando as simulações computacionais de estrutura para análise com elementos finitos e a teoria de projeto de molas para verificação da eficiência, pode-se garantir a qualidade do sistema e evitar tais problemas.

PALAVRAS-CHAVE: Mola de compressão. Suspensão frontal. Método dos elementos finitos. Simulações computacionais de estrutura.

ABSTRACT

The graduation work focuses on a compression spring, from the design theory to its application in a motorcycle front suspension. For this, the final assembly design avoided structural or dynamic failures of all components during operation. The analysis of this type of system through the use of the finite element method in commercial engineering applications present a good approximation of the values obtained in practice. The project was defined to be carried out completely in a virtual environment, focusing on static and vibration analysis. As it is a dynamic system, it is not exempt from effects of vibration or cyclic efforts, which can lead to component failure due to resonance or fatigue. Applying computer structure simulations with finite element analysis and spring design theory to verify spring efficiency, it is possible to guarantee the quality of the system and avoid such problems.

KEYWORDS: Compression spring. Motorcycle front suspension. Finite element method. Computer structure simulations.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Ponte <i>Tacoma Narrows</i> entrando em colapso por ressonância	15
Figura 2 – Exemplo de suspensão dianteira (garfo) de moto	16
Figura 3 – Visão em corte dos componentes dentro do tubo externo.....	19
Figura 4 – Dimensões de uma mola de compressão helicoidal.....	21
Figura 5 – Tipos de extremidades de molas	23
Figura 6 – Comprimentos e deflexões de uma mola de compressão	23
Figura 7 – Curvas de estabilidade para flambagem.....	24
Figura 8 – Tipos de elementos para a discretização	25
Figura 9 – Exemplo de uso dos elementos em uma malha.....	26
Figura 10 – Interface <i>Autodesk Inventor</i>	27
Figura 11 – Interface <i>Autodesk Fusion 360</i>	27
Figura 12 – Distribuição de cargas na moto	30
Figura 13 – Moto Honda XL 125cc.....	31
Figura 14 – Demais peças que compõem a suspensão dianteira com vistas em corte e do conjunto	31
Figura 15 – Vista em corte da região aparafusada do cilindro externo	32
Figura 16 – Vista em corte com o encaixe de um retentor de pó	32
Figura 17 – O-rings posicionados no sistema com respectivos rasgos.....	33
Figura 18 – Parafusos posicionados no sistema	34
Figura 19 – Interface com opções de componentes no <i>Autodesk Inventor</i>	34
Figura 20 – Exemplo de entalhe: rasgo para posicionamento de um O-ring	35
Figura 21 – Fluxo de óleo com base no movimento de amortecimento da bengala.....	35
Figura 22 – Fluxo de óleo com base no movimento de relaxamento da mola	36
Figura 23 – Opção para liberação para todos os tipos de contatos na simulação.....	37
Figura 24 – Valores de referência para criar material ASTM 228 no CAE.....	37
Figura 25 – Restrição de movimentação no furo do eixo da roda.....	38
Figura 26 – Carga aplicada em um dos lados da suspensão	39
Figura 27 – Configurações de malha no <i>Autodesk Fusion 360</i>	40
Figura 28 – Resultado simulação estática para o CS (a) A232 (b) A228	42
Figura 29 – Resultado simulação estática para tensão	42
Figura 30 – Resultado simulação de vibração para obter a frequência natural	43
Figura 31 – Resultados simulação de um lado da suspensão	44

Figura 32 – Resultados simulações apoios superior (a e c) e inferior (b e d).....	45
Figura 33 – Resultado simulação um lado do conjunto para vibração.....	46
Figura 34 – Primeira etapa de montagem com bengala e pistão	46
Figura 35 – Fixação do cilindro externo.....	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coeficientes para projeto de molas com base no material	22
Tabela 2 – Propriedades do óleo para garfo do fabricante <i>Motul</i>	36
Tabela 3 – Valores de coeficientes e variáveis obtidos do material teórico	41
Tabela 4 – Valores obtidos com malhas mais refinadas	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

CS	Coeficiente de segurança
k	Constante da mola
g	Aceleração da gravidade
γ	Densidade em massa
p	Passo da mola
d	Diâmetro do fio
D	Diâmetro médio
D_i	Diâmetro interno
D_o	Diâmetro externo
L_f	Comprimento livre
N_t	Número total de espiras
N_a	Número de espiras ativas
C	Índice de curvatura da mola
τ	Tensão de cisalhamento
F	Carga aplicada
K_s	Fator multiplicativo da tensão cisalhante
S_{ut}	Resistência à última tração do material
A	Coeficiente 'A' do material da mola
b	Expoente 'b' do material da mola
S_{ys}	Resistência ao escoamento sobre torção
τ_{max}	Tensão máxima de cisalhamento
N_{ys}	Coeficiente de segurança da mola
G	Módulo de rigidez
$y_{inicial}$	Deflexão inicial
L_s	Comprimento fechado da mola
y_{interf}	Comprimento de interferência
$y_{trabalho}$	Deflexão de trabalho da mola
L_m	Comprimento mínimo de trabalho
L_a	Comprimento montado
y	Razão de deflexão
f_n	Frequência natural
f_{car}	Frequência carregamento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	MOTIVAÇÃO	15
1.2	OBJETIVOS	17
2	REVISÃO DA LITERATURA	18
2.1	COMPONENTES DE UMA SUSPENSÃO	18
2.2	PROJETO MECÂNICO	19
2.3	MOLAS	20
2.4	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	25
2.4.1	SOFTWARE CAD E CAE	26
2.5	ESTUDOS NA ÁREA	28
3	METODOLOGIA	30
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	30
3.2	DESENVOLVIMENTO DO PROJETO	31
3.2.1	SISTEMA DE FLUXO DE ÓLEO	35
3.2.2	SIMULAÇÕES	36
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
4.1	PROJETO DA MOLA	41
4.2	OUTROS COMPONENTES	44
4.3	MONTAGEM DO CONJUNTO	46
5	CONCLUSÃO	48
	REFERÊNCIAS	49
	BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	51
	ANEXO A – DESENHOS TÉCNICOS MECÂNICOS DO CONJUNTO	
	SUSPENSÃO	52

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

Um bom projeto precisa levar em consideração diversos parâmetros, desde influências internas que o próprio sistema possa oferecer ao conjunto, como vibrações devido ao movimento ou a interação entre os componentes, até influenciadores externos como umidade do ambiente, calor, vento, dentre outros. Os responsáveis por esse projeto necessitam ter um bom conhecimento dessas questões para não gerar riscos à vida de trabalhadores que farão uso desse maquinário. Um excelente exemplo de erro de projeto é o colapso da ponte *Tacoma Narrows*, a qual teve sua estrutura comprometida por ressonância em função da força do vento que incidia nela, como ilustrado na Figura 1 (BRITANNICA, 2021).

Figura 1 – Ponte *Tacoma Narrows* entrando em colapso por ressonância.

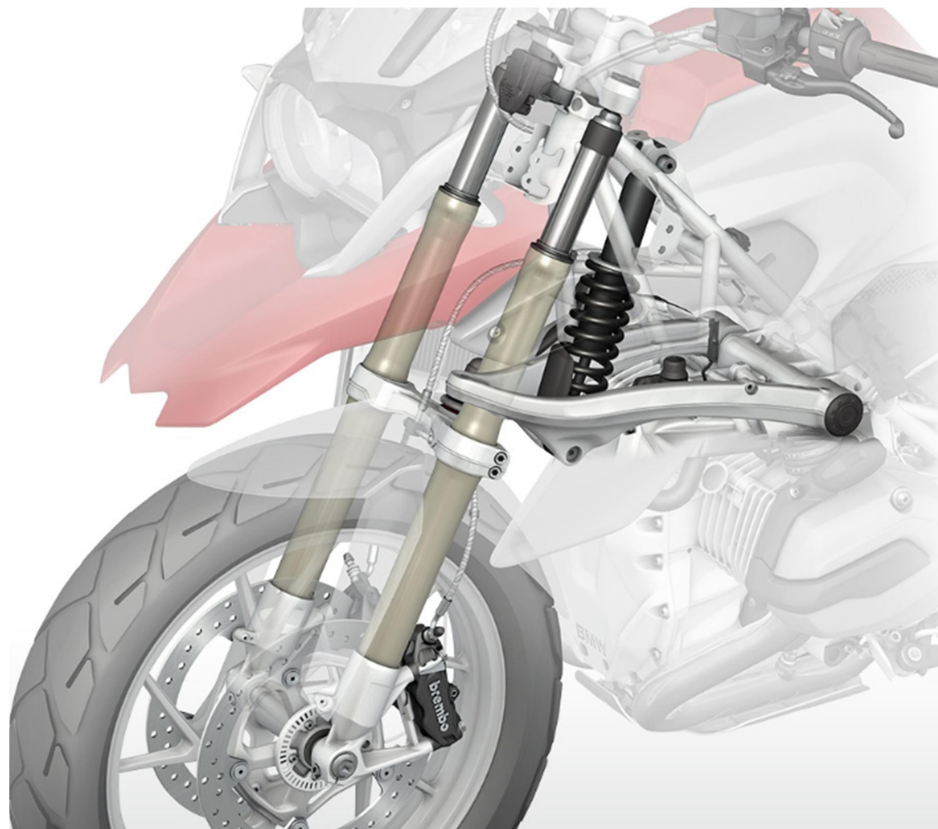


Fonte: BRITANNICA (2021).

Qualquer suspensão veicular tem como principal restrição o impacto que acaba se tornando um limitante para sua estrutura mecânica, sendo que em circunstâncias extremas de

direção pode-se atingir o limite de impacto que ela é capaz de suportar (Colombo et al., 2017). Suspensões (Figura 2) são planejadas para suportar a força desses esforços e para manter a estabilidade do veículo em terrenos irregulares, evitando assim o comprometimento de componentes estruturais pela propagação desses choques, além de reduzir a vibração constante que também pode gerar problemas nas peças, garantindo assim uma maior longevidade e reduzindo o risco de acidentes. Desenvolvimentos conturbados de suspensões podem comprometer a qualidade das peças e evitar que a empresa responsável seja competitiva no mercado.

Figura 2 – Exemplo de suspensão dianteira (garfo) de moto.



Fonte: BMW MOTORRAD (2022).

O conjunto necessita responder de forma elástica sem que ultrapasse seu limite de escoamento. Um bom exemplo de novas tecnologias são as suspensões semiativas, que se destacaram no mercado automobilístico na última década, devido ao fato de apresentarem a melhor relação entre desempenho e consumo de energia para controle vertical dos veículos (Colombo et al., 2017). As molas comumente utilizadas em suspensões tipo garfo são helicoidais de compressão, variando geralmente o tamanho e o passo. A vida útil de uma mola

depende dos efeitos da condição da extremidade, do acabamento superficial, das tensões residuais adquiridas durante a fabricação, da intensidade da carga, da temperatura de operação, do tipo de fixação, da concentração de tensões, dentre outros (Norton, 2013).

Com cada vez mais complexidade nos sistemas mecânicos o uso de métodos analíticos para análise dessas estruturas se tornou mais trabalhoso, demandando mais tempo. O avanço das tecnologias da computação permitiu a criação de ferramentas capazes de realizar essas análises de forma mais rápida, apresentando boa precisão referente ao que é observado na prática. Esses sistemas avançaram de forma exponencial, incluindo cada vez mais situações de operação para análise, além de considerar geometrias mais detalhadas e difíceis de analisar (Cook, 2001). Dessa forma, profissionais com um grande conhecimento dos parâmetros envolvidos na criação de uma estrutura, sendo capazes de englobar tanto a segurança dos usuários quanto os custos de construção e fabricação, e que, além disso, tenham o domínio desses aplicativos se tornam mais requisitados para áreas que envolvem projetos.

1.2 OBJETIVOS

Este projeto tem como principal objetivo analisar um sistema de suspensão frontal para motos de passeio, para tal foram escolhidas as seguintes ações a serem realizadas dentro do projeto:

- Desenvolver e analisar um conjunto de suspensão dianteira através de simulações estáticas pelo método dos elementos finitos;
- Executar análises de esforços e vibração referente às cargas aplicadas, desconsiderando efeitos do óleo utilizado;
- Renovar o protótipo a partir do resultado das simulações computacionais;
- Testar a eficiência da mola referente ao uso dos aços A228 (Fio Musical) e A232 (Cromo-V);

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 COMPONENTES DE UMA SUSPENSÃO

A suspensão frontal de uma moto, também conhecida como suspensão garfo pode ser projetada de diversas formas. Em suas versões mais simples temos o uso principalmente de molas de compressão helicoidais, cilindros externos, bengalas, pistões do garfo, retentores de pó e os apoios (Honda Motoroda, 2022).

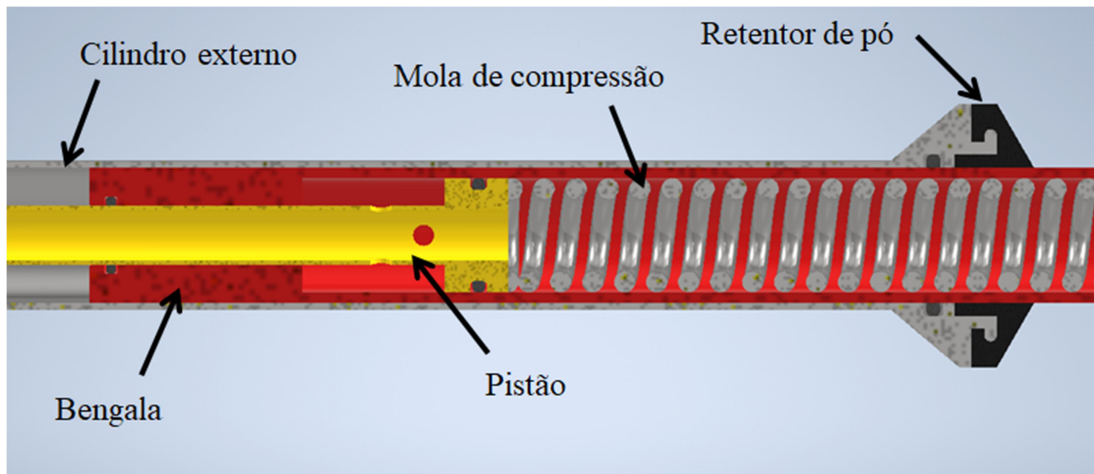
O principal elemento responsável pelo amortecimento é a mola de compressão, sendo comumente utilizadas em suspensões devido à locomoção em superfícies irregulares. Dessa forma, a mola permite a redução do efeito do impacto causado por essas irregularidades, evitando que outras componentes sejam afetadas pela propagação dessas forças (Yvars et al., 2014)..

O cilindro interno, também conhecido como bengala, é a peça que comporta a mola, permitindo que ela se mantenha alinhada e evitando a flexão na mesma durante operação. Ela acompanha o movimento da mola e conecta o sistema prendendo a sua extremidade no corpo do pistão. O cilindro externo é o componente que conecta o eixo da roda com o resto do sistema, além disso, comporta a área de contato entre o pistão, a bengala e a mola. O pistão do garfo serve como um dos apoios da mola, também sendo um guia para a bengala que se movimento através dele (Honda Motoroda, 2022).

O retentor de pó é um componente simples, mas importante nessa composição, tem como função evitar a entrada de partículas de poeira ou líquidos no interior do cilindro externo, evitando assim comprometer o funcionamento da suspensão e a contaminação do óleo. Os apoios são presos às duas bengalas da suspensão frontal, eles são a conexão entre a suspensão e o resto da moto. No caso, são usados duas ou mais de forma para manter uma melhor fixação e maior estabilidade durante o movimento (Honda Motoroda, 2022).

A Figura 3 apresenta o design em corte feito no *Autodesk Inventor* ilustrando melhor a relação entre cada componente que será desenvolvido ao longo desse projeto.

Figura 3 – Visão em corte dos componentes dentro do tubo externo.



Fonte: Elaborado pelo autor

2.2 PROJETO MECÂNICO

Vários fatores podem afetar o funcionamento de um equipamento, pode-se citar como exemplo a aplicação de cargas excessivas que dependendo de sua intensidade, elas podem gerar quebras ou deformações permanentes (Norton, 2013).

Seguindo esse raciocínio, existe um parâmetro que permite observar se o projeto é capaz de superar os esforços de operação sem apresentar falhas, o coeficiente de segurança (CS). Ele é um dos principais fatores para definir se um projeto é viável, seu valor ideal varia de acordo com o tipo de projeto e o nível de segurança desejado, por exemplo, aparelhos que envolvem vidas humanas tendem a ter valores maiores com elevadores. O CS é calculado a partir da relação da maior tensão que os esforços geram no sistema com a resistência limite referente ao tipo de esforço que a estrutura é submetida. Dessa forma, um projeto otimizado possui um CS acima de 1, mostrando que os esforços gerados não ultrapassam o limite que o material suporta. O ideal para um projeto é possuir um CS próximo de 1, mas nunca abaixo desse valor, pois isso representa que ocorrerá falha durante a operação (Norton, 2013).

Um possível problema é o superdimensionamento, ou seja, peças com dimensões maiores do que necessitam. Isso faz com que seja gasto mais material na sua produção, além de ter um peso maior. Um bom exemplo disso são veículos aéreos que mesmo precisando ser muito seguros tem a necessidade de ser leves para poder decolar, necessitando de um bom planejamento durante a fase de projeto.

Para a obtenção do CS é necessário à análise das tensões internas geradas pela atuação de agentes externos. Um componente pode ser submetido a forças de tração, compressão,

flexão e torcionais. Essas forças podem romper a peça ou criar uma deformação permanente dependendo das características do material.

A deformação é outro ponto importante, ela depende da capacidade elástica do material, podendo ser deformado até o seu ponto de escoamento (região elástica) e ainda retornar a sua forma original. Ultrapassando esse limite entra-se na zona de deformação plástica (permanente), inutilizando o componente (Norton, 2013).

A geometria também é relevante em um projeto, uma vez que entalhes no material são acumuladores de tensão, dessa forma é viável evitá-las. Superfícies circulares são mais recomendadas para operações com altas cargas envolvidas, já que acumulam menos tensões que geometrias com pontas vivas, como quadrados e triângulos.

Outro fator a ser considerado é o fenômeno da ressonância, a qual ocorre quando a frequência de excitação atinge o valor da frequência natural (f_n) da estrutura. Quando a vibração do sistema atinge esse patamar temos um aumento excessivo dos esforços e o possível comprometimento da estrutura, como o exemplo apresentado na Figura 1. Os esforços resultantes desse efeito podem ultrapassar os limites elásticos do material, tendo como consequência a falha estrutural. O sistema se baseia no seu grau de liberdade, trazendo diferentes valores de frequência natural dependendo do seu tipo de fixação (Rao, 2009).

Outros pontos a serem considerados são as frequências dos harmônicos, que também geram o efeito da ressonância. Qualquer objeto físico está sujeito a isso, mas para um projeto de um mecanismo geralmente temos como referência o primeiro harmônico, uma vez que a sua frequência de oscilação é a frequência natural (Rao, 2009).

2.3 MOLAS

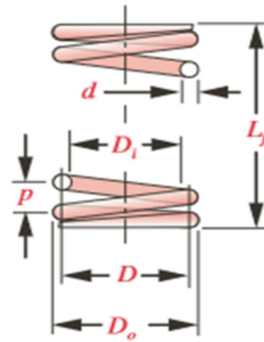
A mola é um elemento utilizado em máquinas, capaz de transmitir força ou armazenar energia potencial através de sua deflexão. Os tipos de molas são variados dependendo do trabalho que ela desempenhará, podendo transmitir forças de tração, compressão ou torque. Teoricamente qualquer material com um teor elástico pode atuar com uma mola ao ser implementado em uma estrutura (Norton, 2013).

O principal parâmetro de uma mola é a sua capacidade de defletir em relação à força aplicada na mesma, sendo a mensurado pela constante da mola k . É possível associar molas para obter resultados melhores, no caso da suspensão bengala de uma moto é comum encontrar uma associação de duas molas helicoidais de compressão no mesmo sistema, dependendo de como o projeto foi planejado. O foco desse projeto é o uso de molas de

compressão, dessa forma, alguns detalhes devem ser levados em consideração, como as dimensões da mola, material, acabamento da extremidade, pré-carga e a possibilidade de flambar (Norton, 2013).

As dimensões de uma mola de compressão helicoidal estão apresentadas na Figura 4, sendo p o passo das espiras, d o diâmetro do fio, D o diâmetro médio da espira, D_i o diâmetro interno, D_o o diâmetro externo, L_f o comprimento livre e N_t o número de espiras.

Figura 4 – Dimensões de uma mola helicoidal de compressão.



Fonte: Norton (2013).

Utilizando algumas relações matemáticas é possível prever as dimensões da mola, tendo como base alguns parâmetros já definidos da mola. O índice de curvatura da mola ou índice da mola (C), é uma relação entre o diâmetro média e o diâmetro do fio do arame, como ilustrado na Equação (1), seu valor recomendado está entre 4 e 12, uma vez que valores abaixo de 4 indicam uma mola de difícil fabricação e acima de 12 aumentam a chance de flambar e do arame se entrelaçar (Norton, 2013).

$$C = D/d \quad (1)$$

A partir disso, devemos calcular a tensão cisalhante máxima que atuará nas espiras durante o funcionamento da mola. Representada pela Equação (2), onde τ é a tensão de cisalhamento e F a carga aplicada, seguindo esse raciocínio apenas deve-se substituir a carga máxima na equação para alcançar o valor desejado.

$$\tau = K_s \left(\frac{8FD}{\pi d^3} \right) \quad (2)$$

Para obter o valor de K_s (fator multiplicativo da tensão cisalhante) temos a relação apresentada na Equação (3):

$$K_s = 1 + \frac{0,5}{c} \quad (3)$$

O próximo passo é a obtenção da resistência à última tração do material (S_{ut}), o qual pode ser aproximado através da Equação (4):

$$S_{ut} = Ad^b \quad (4)$$

Onde, A e b são coeficientes obtidos da Tabela 1, referentes ao material da mola.

Tabela 1 – Coeficientes para projeto de molas com base no material.

N° ASTM	Material	Intervalo (mm)	Expoente b	Coefficiente A (MPa)
A227	Repuxado a frio	0,5-16	-0,1822	1753,3
A228	Fio musical	0,3-6	-0,1625	2153,5
A229	Revenido em óleo	0,5-16	-0,1833	1831,2
A232	Cromo-v	0,5-12	-0,1453	1909,9
A401	Cromo-s	0,8-11	-0,0934	2059,2

Fonte: Norton (2013).

Devemos obter a resistência ao escoamento sobre torção (S_{ys}) que possui uma estimativa razoável de 60 a 70% da resistência à última tração, ilustrada na Equação (5) (Norton, 2013).

$$S_{ys} = 0,65S_{ut} \quad (5)$$

Relacionando a resistência ao escoamento sobre torção com tensão de cisalhamento máximo obtemos o valor do coeficiente de segurança da mola, para obter um valor que aprova o projeto é necessário que a resistência ao escoamento seja maior que a tensão de cisalhamento. A Equação (6) apresenta essa relação:

$$N_{ys} = \frac{S_{ys}}{\tau_{max}} \quad (6)$$

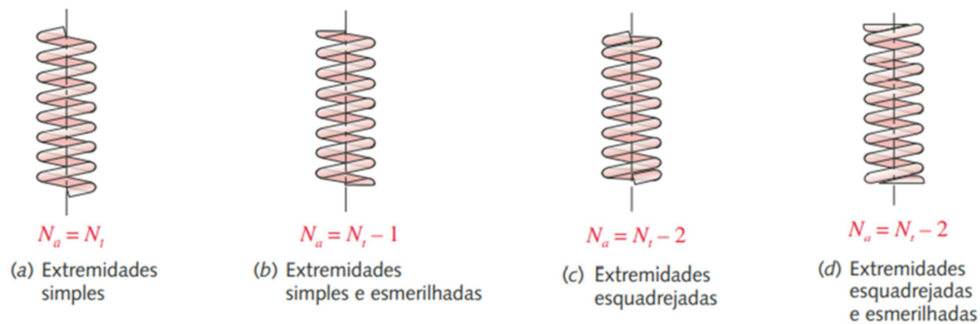
A constante elástica real da mola pode ser calculada através da Equação (7):

$$k = \frac{d^4 G}{8D^3 N_a} \quad (7)$$

Onde k representa a constante da mola, G o módulo de rigidez característico do material e N_a o número de espiras ativas.

O tipo de extremidade é relevante para os cálculos, uma vez que o número de espiras total varia de acordo com a extremidade, além disso, o acabamento da extremidade pode interferir no alinhamento da mola de compressão em operação. A Figura 5 ilustra os tipos de acabamentos e a relação entre o número de espiras ativas e o número total de espiras.

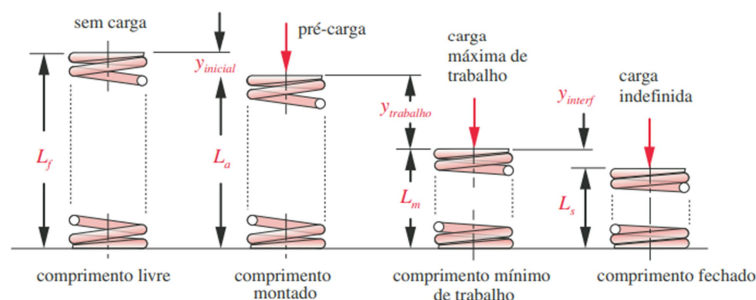
Figura 5 – Tipos de extremidades de molas.



Fonte: Norton (2013).

Um fator que se mostra importante nesse momento é a pré-carga, a qual representa a força aplicada durante a montagem da mola na estrutura, nessa situação a mola sofre a deflexão inicial ($y_{inicial}$). A Figura 6 ilustra melhor como são as relações de compressão da mola e os seus respectivos comprimento e deflexões.

Figura 6 – Comprimentos e deflexões de uma mola de compressão.



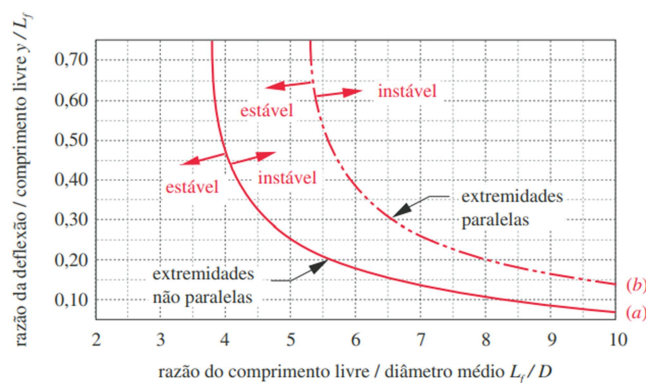
Fonte: Norton (2013).

Utilizando o número total de espiras e o diâmetro do fio de arame pode-se obter o comprimento fechado da mola (L_s). O comprimento de interferência (y_{interf}) tem como recomendação ter de 10 a 15% da deflexão estimada de trabalho da mola ($y_{trabalho}$). O comprimento livre será calculado ao final somando todos os valores anteriores (Norton, 2013).

Para validação da mola em seu estado completamente fechado é necessário obter a força aplicada para manter a mola nesse estado e aplicar esse valor na Equação (2), comparando novamente esse valor com a resistência ao escoamento sobre torção para obter o coeficiente de segurança dessa situação. Os mesmos parâmetros de avaliação desse valor serão aplicados nele, validando ou não o projeto.

Nesse momento, com os comprimentos calculados pode-se analisar a questão da flambagem, sendo é um fenômeno caracterizado pela flexão devido às forças axiais durante a compressão. A Figura 7 apresenta um gráfico que permite identificar se a mola está estável para esse efeito, seu eixo horizontal é obtido dividindo o comprimento livre pelo diâmetro médio enquanto o eixo vertical é a divisão entre a deflexão máxima e o comprimento livre (Norton, 2013). Caso a intersecção dos valores esteja à direita do gráfico a mola se comportará de forma instável e a esquerda de forma estável.

Figura 7 – Curvas de estabilidade para flambagem.



A possibilidade de flambar é um fator importante no projeto de uma mola de compressão, mas para casos de molas demasiadamente longas o uso de um cilindro envolvendo-as é recomendável para manter a mola alinhada e evitar que tal fenômeno ocorra.

Para o cálculo da frequência natural em Hertz tem-se a Equação (8):

$$f_n = \frac{2}{\pi N a} \frac{d}{D^2} \sqrt{\frac{Gg}{32\gamma}} \quad (8)$$

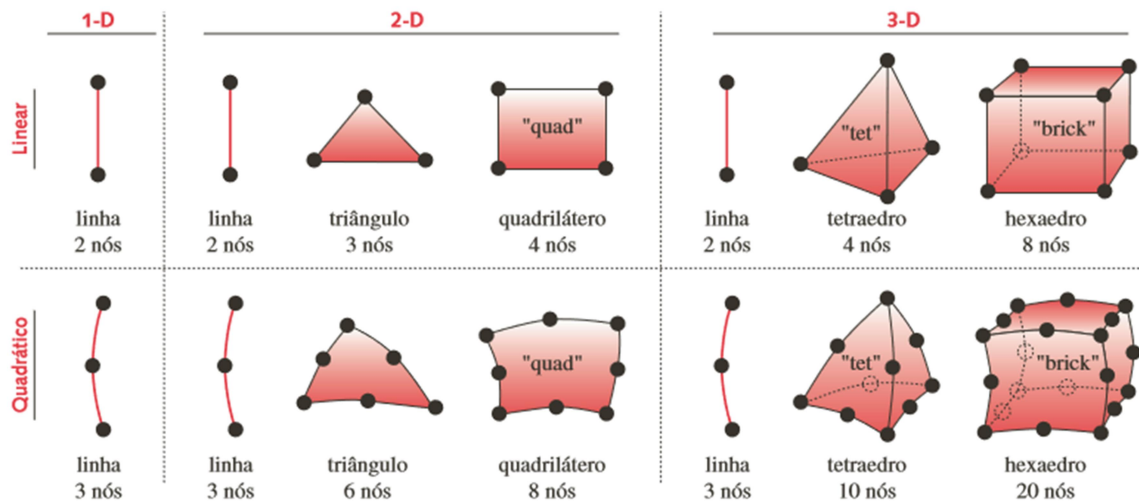
A partir desse valor é necessário converter a frequência natural em ciclos por minuto para verificar se a mesma é no mínimo treze vezes maior que a frequência de carregamento (f_{car}), sendo o valor recomendado desse parâmetro que é referente ao. Atendendo essa relação à mola não sofrera ressonância e esta aprovada (Norton, 2013).

2.4 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

A aplicação desse método permite uma confiável aproximação dos valores que seriam obtidos na prática, sendo um artifício viável capaz de solucionar problemas de alta complexidade através da discretização do objeto de estudo (Cook, 2001).

A análise por elementos finitos é um método numérico diferencial que consiste subdivisão de uma estrutura física em finitas partes (discretização), convertendo-o em um sistema discreto que permite a análise das interações entre cada parte. Essas partes são chamadas de elementos, podendo variar no número de dimensões, no tamanho e na geometria. Além deles, deve-se prestar atenção aos nós, que são as conexões existentes entre elementos adjacentes e permitem a análise da propagação dos esforços entre os elementos (Filho, 2009). A Figura 8 demonstra os elementos mais comuns e a suas relações com os nós.

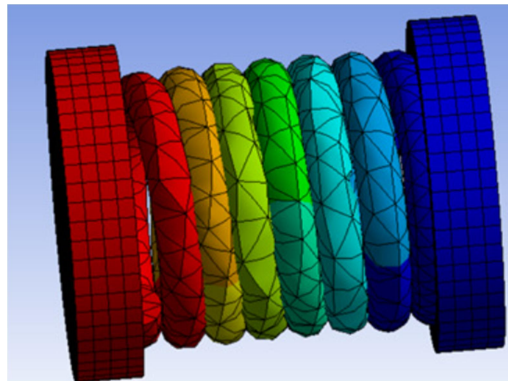
Figura 8 – Tipos de elementos para a discretização.



Fonte: Norton (2013).

Outro parâmetro importante para a análise é a malha, sendo a visão geral da peça analisada com as subdivisões criadas. Uma malha bem feita é muito importante, uma vez que permite maior precisão no resultado, além disso, um método para conferir o resultado e melhorar a sua precisão é refinar a malha, ou seja, reduzir o tamanho dos elementos e consequentemente aumentar a sua quantidade, dessa forma terão mais interações para serem analisadas (Chandrupatla, 2015). Alguns elementos são mais recomendados para tipos específicos de geometrias, de forma a não deformar muito a peça quando a malha for gerada (Figura 9), podemos citar: tetraedros para regiões curvas próximas a furos ou superfícies de molas; hexaedros para superfícies planas e regulares (Norton. 2013).

Figura 9 – Exemplo de uso dos elementos em uma malha.



Fonte: Elaborado pelo autor

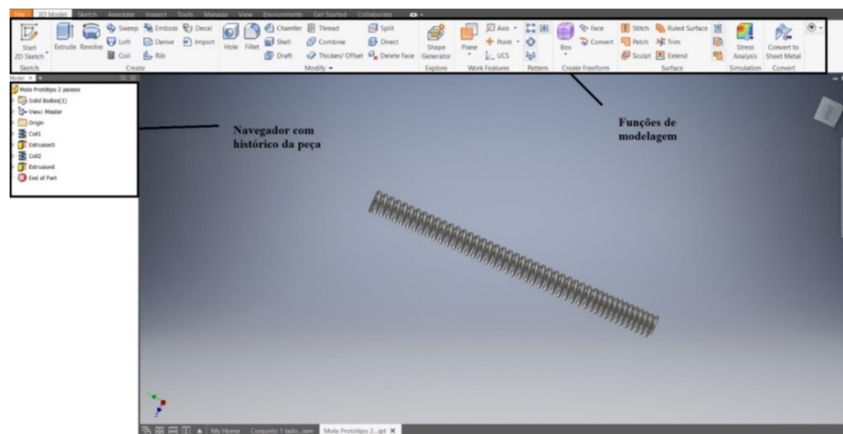
Esse método aplica a resolução desses sistemas complexos utilizando matrizes e vetores de forma a englobar todos os elementos e as forças aplicadas em seus nós. Sendo assim a principal relação que permite a solução (Yvars et al., 2014). A relação entre análise inicial do elemento e ao final da estrutura mostra a lógica de coordenadas locais e globais que o sistema apresenta (Yvars et al., 2014).

2.4.1 SOFTWARE CAD E CAE

É importante conhecer a diferença entre CAD (Computer-Aided Design) e CAE (Computer-Aided Engineering), uma vez que eles se complementam para a realização desse trabalho. Um software CAD é utilizado para desenhar peças ou estruturas em duas ou três dimensões, permitindo a montagem de componentes em estruturas mais complexas. A Figura 10 a seguir ilustra como é a interface desse software, evidenciando algumas funcionalidades. Um *software* CAE é responsável por aplicar o método de análise, atribuindo um material para

cada peça do mecanismo, aplicando seus esforços de operação e gerando uma malha com base nas especificações do responsável. Esse *software* entrega vários tipos de resultados, podendo ser a deformação total, o fator de segurança, a tensão máxima normal etc. O uso de aplicativos comerciais permitem agilizar a aplicação do método numérico e trazem uma excelente aproximação das informações obtidas na prática (Chandrupatla, 2015)

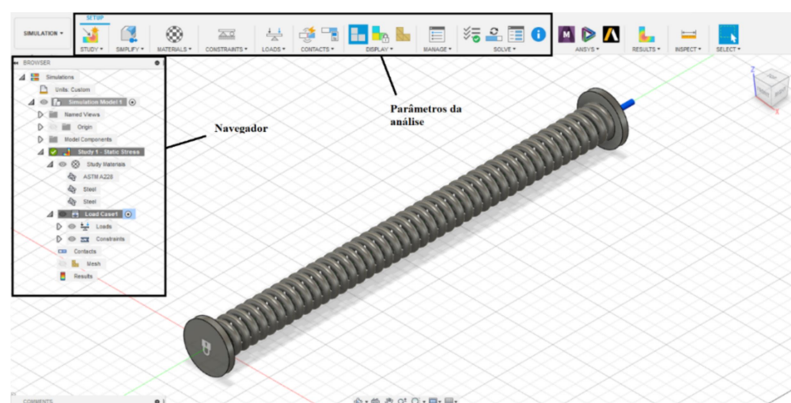
Figura 10 – Interface *Autodesk Inventor*.



Fonte: Elaborado pelo autor

O software CAE pode realizar diversos tipos de análises, como o caso de análises estáticas e modais. Simulações estáticas permitem observar os efeitos que cargas podem causar em sua estrutura, considerando que ela esteja parada e fixa. Simulações modais permitem analisar a mesma situação, mas com um enfoque nos harmônicos referentes à estrutura, dessa forma o programa apresenta a deflexão gerada quando a frequência de excitação, gerada pelos esforços de operação, atinge um desses harmônicos. A Figura 11 mostra a interface de simulação do *Autodesk Fusion 360*.

Figura 11 – Interface *Autodesk Fusion 360*.



Fonte: Elaborado pelo autor

2.5 ESTUDOS NA ÁREA

Nesta seção serão apresentados alguns artigos que demonstram estudos referentes a projetos ou análises envolvendo suspensões, molas ou elementos finitos, demonstrando a relevância do tema apresentado nesse trabalho.

Colombo (2017) e Delvecchio (2017) apresentaram uma estimativa de alongamento de suspensão semiativa através da técnica de filtro Kalman para uma análise teórica e do uso de sensores posicionados no chassi e na roda frontal para o teste prático. Ambos resultam em gráficos de deflexão por tempo com base nos efeitos dos impactos aplicados na suspensão. Esse tipo de trabalho coloca em evidência o risco de quebra do sistema por impactos não previstos no projeto.

Kushwah (2021) busca melhorias de projeto, comparando diversos materiais comuns para molas através de comparações entre a teoria e simulações no *ANSYS Mechanical* para valores de tensão e deformação. Em sua análise conclui que o material que mais se destaca é o ASTM 228 por apresentar bons resultados, mas principalmente devido ao seu valor comercial, tornando-o mais viável que os demais.

Ahamed (2022) realiza uma análise semelhante à de Kushwah (2021) para os materiais aço, alumínio e um composto a base de epóxi compondo o sistema de suspensão de um carro. A aplicação de elementos finitos em aplicativos comerciais permite verificar a deformação presente em cada um deles, concluindo que o aço apresenta a menor deformação, sendo seguido pelo alumínio e em último o composto epóxi que apresenta uma deformação muito maior em relação aos dois primeiros, podendo ser corrigida na adição de materiais que contribuam no amortecimento.

Apresentando outra abordagem, temos o trabalho de Prawoto (2008) que apresenta a análise por elementos finitos para estudos de falhas de molas devido a problemas de fabricação que geram quebras durante a operação. A análise é inteiramente realizada em ambiente virtual realizando a modelagem das falhas, assim, mostrando o potencial que esse método numérico tem tanto no desenvolvimento de novos projetos quanto na investigação de defeitos.

Expandindo o estudo de suspensões para outras situações, temos um estudo teórico prático com molas de compressão de um metro em um teste controlado, sendo realizado por Zhou Cheng (2020). Para o teste são utilizados câmeras e acelerômetros para observar as vibrações da mola, sensores de deslocamento para medir a deflexão relativa durante a operação e extensômetros para verificar a tensão gerada. Os dados práticos eram analisados

em conjunto com modelos simulados por elementos finitos visando identificar as causas de vibrações anormais e falhas.

Pawar (2018) busca melhorias para o projeto de suspensão frontal através de novos designs simulados no *ANSYS Mechanical* e testados em ensaios de compressão. Em seus resultados observa a aproximação que os resultados simulados e reais têm referentes à carga e vibração, podendo definir quais melhorias os novos designs trazem para o projeto.

Além disso, temos estudos para desenvolvimento de uma mola elíptica de composto leve para suspensão, realizado por Mahdi (2006) em um estudo teórico prático envolvendo o foco na análise de fadiga tendo o suporte por ensaios de compressão do composto e por simulações. Dessa forma, apresentou valores melhores que no uso de molas helicoidais convencionais referentes ao comportamento da fadiga.

3 METODOLOGIA

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

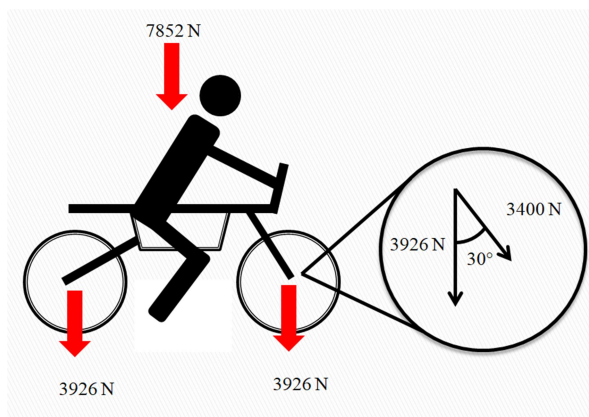
O projeto tem como base o uso de programas de engenharia focados na modelagem de estruturas físicas em ambientes virtuais, dessa forma, foi escolhido o *Autodesk Inventor* para a modelagem das estruturas em 3D e o *Autodesk Fusion 360* como para simulação por elementos finitos, ambos em sua versão estudante.

O conjunto foi desenvolvido para situações de transporte urbano, desconsiderando regiões irregulares, fator que tende a exigir muito mais do sistema de amortecimento, além disso, o CS mínimo aceitado foi de 1 para situação estática.

As simulações dos protótipos finais foram feitas três vezes, reduzindo o tamanho dos elementos da malha a cada teste. Esse método permite obter uma convergência dos resultados, aumentando a confiabilidade e precisão deles, considerando uma diferença menor que 10% em relação ao valor obtido na simulação anterior (Norton, 2013). Após cada simulação as peças serão remodeladas conforme a necessidade a fim de evitar superdimensionamentos, buscando um projeto otimizado.

Todos os cálculos foram feitos considerando uma carga máxima 3400 N diretamente na suspensão frontal, sendo assim temos 1700 N em cada um dos lados da suspensão. Dessa forma, a carga máxima apresentada na moto será de aproximadamente 7852 N, de acordo a distribuição de forças apresentado na Figura 12. Foi considerada uma carga mínima de 500 N em cada mola, sendo assim, repetindo a lógica de distribuição das forças da carga máxima, temos 2309 N aplicados na moto e 1154 N em cada roda.

Figura 12 – Distribuição de cargas na moto.



Fonte: Elaborado pelo autor

3.2 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

A referência dimensional para o desenvolvimento do primeiro protótipo da suspensão frontal foi retirada de uma moto Honda XL 125cc (Figura 13). As medidas foram feitas com o auxílio de uma trena e um paquímetro digital na parte externa da suspensão, com base nesses valores as primeiras peças foram modeladas.

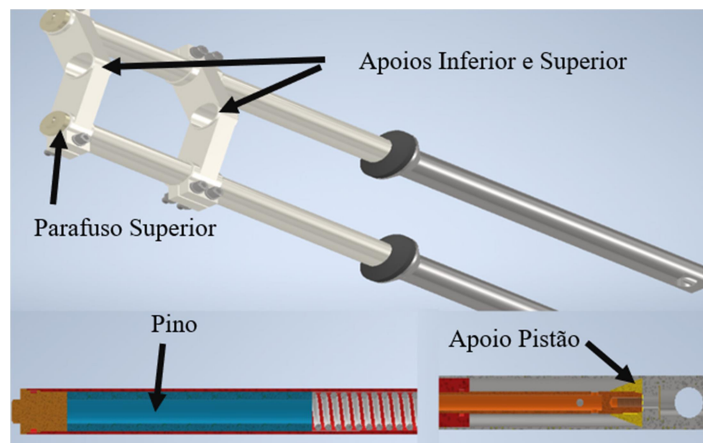
Figura 13 – Moto Honda XL 125cc.



Fonte: MOTO PEÇAS HONDA (2022).

O sistema foi montado utilizando duas molas de compressão, dois pistões, dois apoios para alinhamento de cada pistão, dois cilindros externos, duas bengalas, dois retentores de pó, dois parafusos de fixação do conteúdo da bengala, dois pinos para compensação do espaço devido ao tamanho da mola, um apoio superior e um apoio inferior (A Figura 14).

Figura 14 – Demais peças que compõem a suspensão dianteira com vistas em corte e do conjunto.

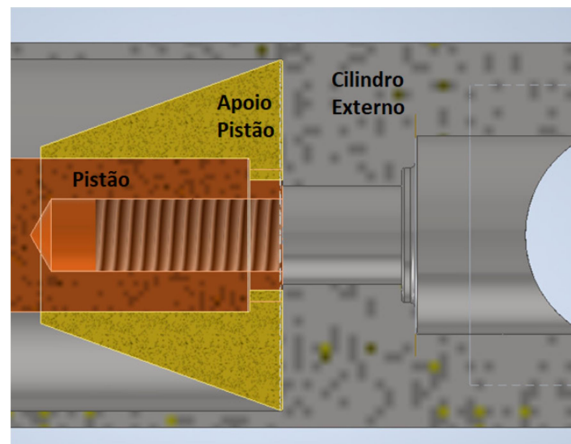


Fonte: Elaborado pelo autor

O principal componente desse estudo, a mola de compressão, foi projetada seguindo o modelo teórico inicialmente, realizando os cálculos para definir as dimensões e considerando dois materiais como foco do estudo (ASTM 228 Fio Musical e ASTM 232 Cromo-V). Os cálculos foram feitos considerando uma deflexão de 80 mm.

O apoio do pistão tem como função garantir um melhor alinhamento para parafusar o conjunto no cilindro externo e reduzir os esforços na base do pistão. O parafuso que fixa esses componentes utiliza um furo que passa pela base inferior do cilindro externo, pelo apoio do pistão e é parafusado na base inferior do pistão (Figura 15).

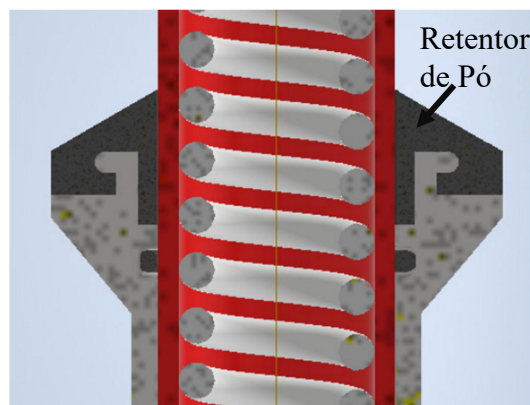
Figura 15 – Vista em corte da região aparafusada do cilindro externo.



Fonte: Elaborado pelo autor

O retentor de pó foi planejado de forma a ter uma fixação simples na parte superior do cilindro externo, seu encaixe está ilustrado na Figura 16.

Figura 16 – Vista em corte com o encaixe de um retentor de pó.



Fonte: Elaborado pelo autor

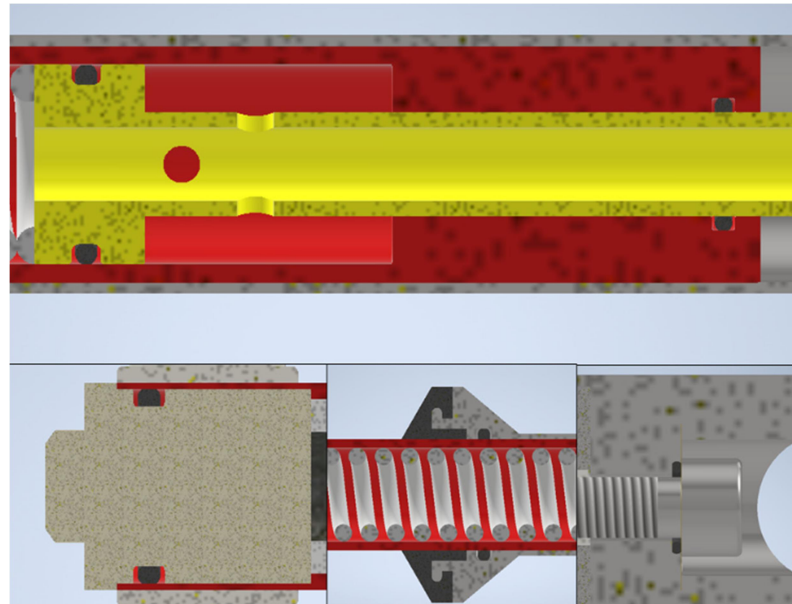
Para a questão de vedação do sistema foram utilizados O-rings específicos para o tipo de movimento do conjunto, variando nos capazes de suportar esforços dinâmicos e estáticos. O uso desse tipo de componente foi escolhido devido ao fácil acesso, praticidade na montagem e ao baixo custo envolvido.

Os o-rings posicionados exclusivamente para vedação e que não possuem influência da movimentação do sistema são: um posicionado no parafuso que fixa a bengala e o conteúdo interno da mesma e um posicionado no cilindro externo próximo ao furo para o eixo da roda.

Os o-rings capazes de suportar esforços de movimentação entre os componentes são: um no cilindro externo próximo ao furo de entrada da bengala, um na cabeça do pistão a 7 mm da superfície de contato com a mola e um a 5 mm da extremidade da bengala que tem contato com corpo o pistão. Os dois últimos são utilizados para tornar o fluxo de óleo mais eficiente, evitando o contato entre o óleo nas “câmaras”.

A Figura 17 apresenta todos os o-rings que foram considerados para o projeto em uma vista em corte.

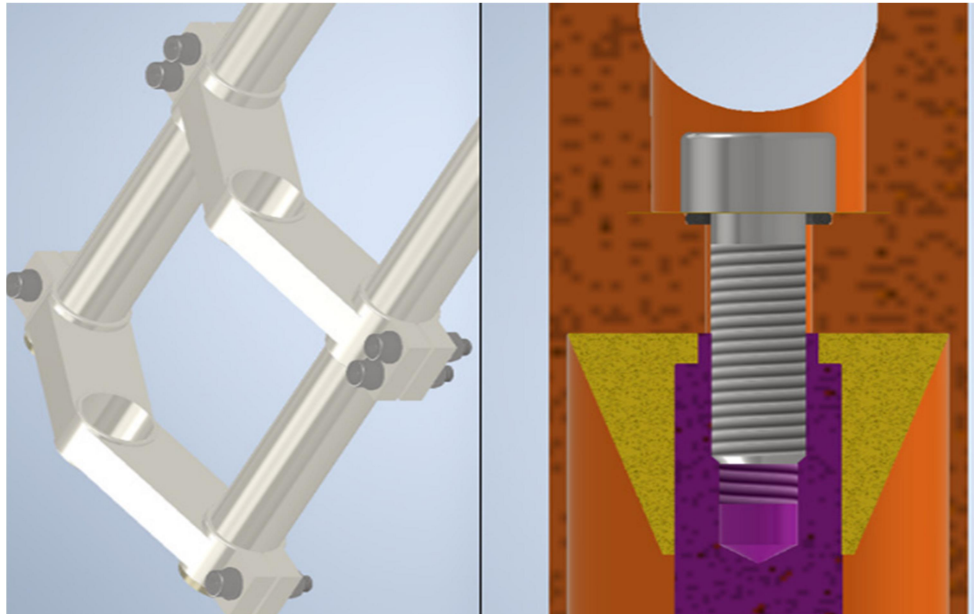
Figura 17 – O-rings posicionados no sistema com respectivos rasgos.



Fonte: Elaborado pelo autor

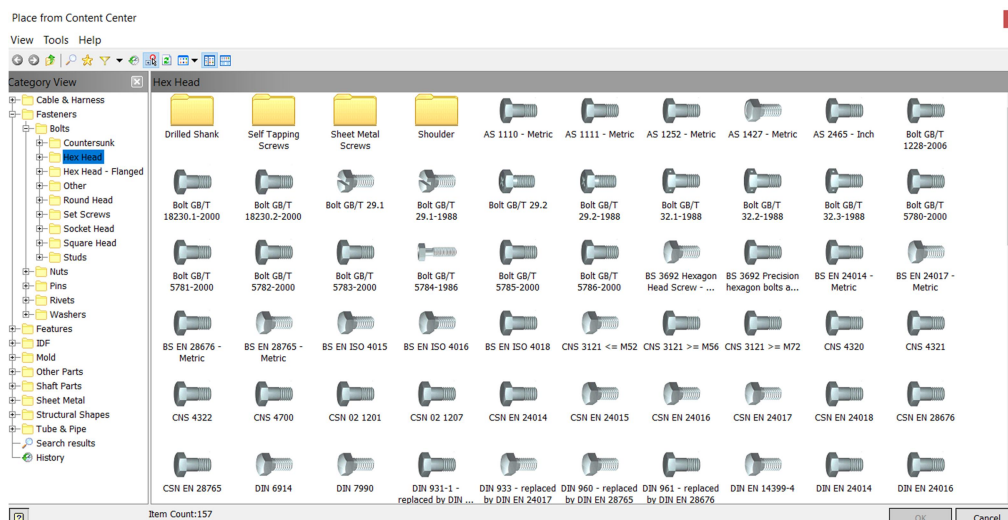
Além dos o-rings, outro componente importante para a estrutura é o parafuso, sendo utilizados oito ao todo, seis para a fixação dos apoios na bengala e 1 para fixar o pistão no cilindro externo. A Figura 18 a seguir apresenta a posição desses componentes:

Figura 18 – Parafusos posicionados no sistema.



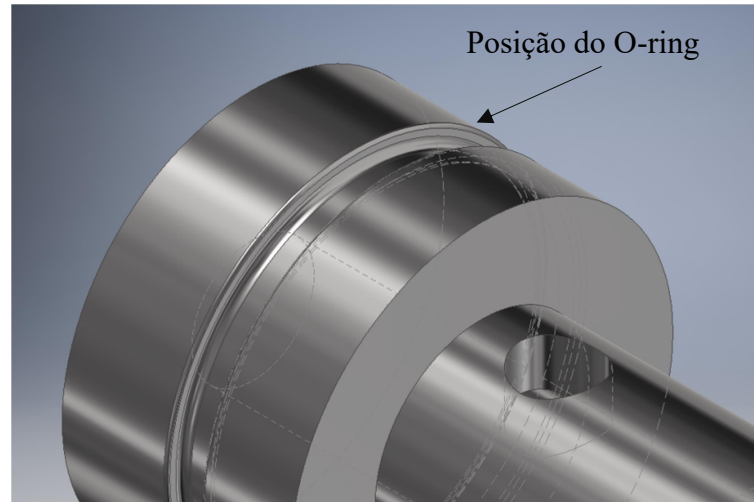
Fonte: Elaborado pelo autor

Todos esses componentes foram gerados automaticamente pelo *Autodesk Inventor* (Figura 19), junto com seus os entalhes (Figura 20). Os componentes serão desconsiderados nas simulações, analisando apenas os entalhes que esses componentes precisam para sua montagem no sistema. O principal motivo para essa escolha é para diminuir o tamanho do arquivo carregado e o tempo necessário para simular, focando principalmente em evitar o esforço excessivo do computador. As interações que esses componentes geram podem ser replicadas através das funções de contato e restrições no *Autodesk Fusion 360*.

Figura 19 – Interface com opções de componentes no *Autodesk Inventor*.

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 20 – Exemplo de entalhe: rasgo para posicionamento de um O-ring.



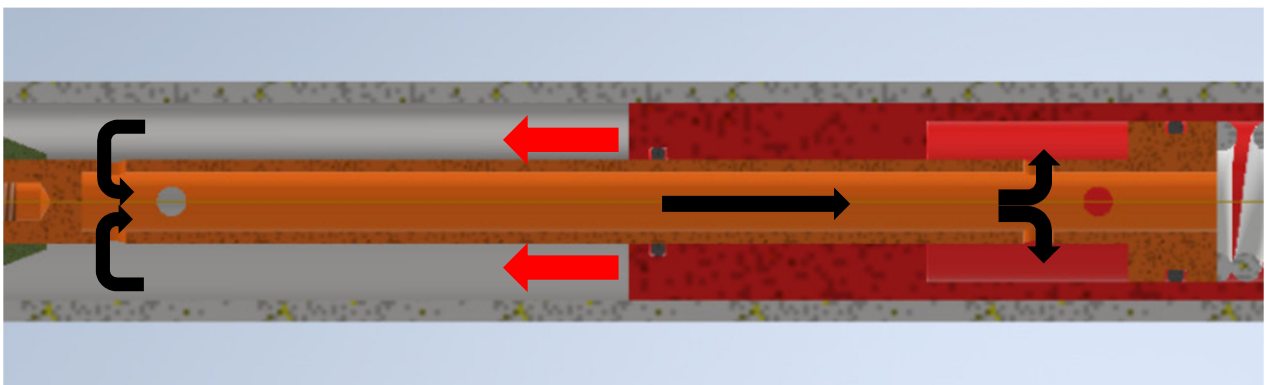
Fonte: Elaborado pelo autor

O retentor de pó também foi desconsiderado para essas simulações, uma vez que o foco de análise é a estrutura metálica. Seu modelo foi feito apenas pensando no encaixe de forma eficiente no conjunto (Figura 16).

3.2.1 Sistema de fluxo de óleo

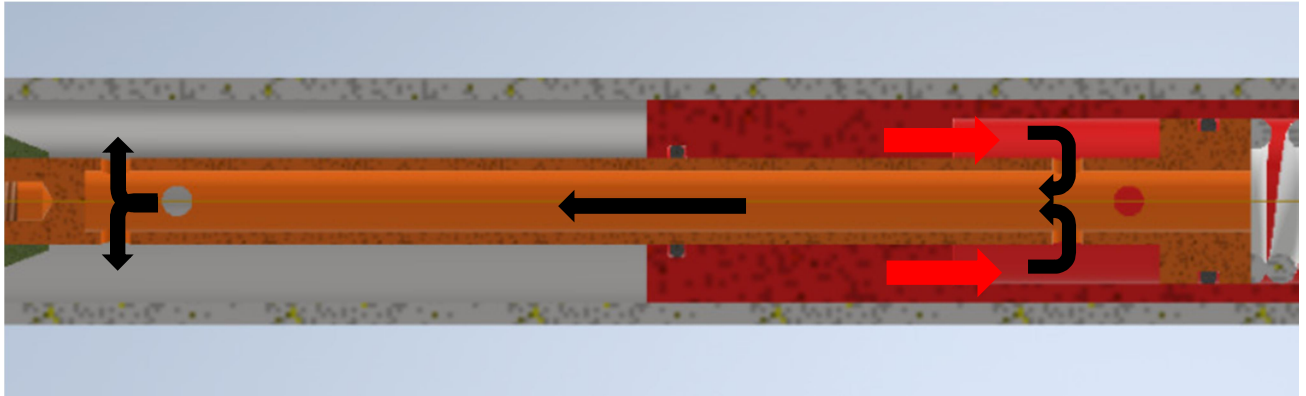
Para este projeto foi escolhido um sistema com uma única mola, seu funcionamento é baseado no fluxo constante de óleo no interior do pistão, preenchendo os vazios do êmbolo da bengala, mantendo o conjunto lubrificado. A Figura 21 ilustra o movimento da bengala durante o amortecimento, enquanto a Figura 22 apresenta o movimento oposto, no qual a mola retorna à sua posição inicial.

Figura 21 – Fluxo de óleo com base no movimento de amortecimento da bengala.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 22 – Fluxo de óleo com base no movimento de relaxamento da mola.



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 21 apresenta o movimento da bengala deslocando o óleo pelo interior do pistão e preenchendo a parte antes do êmbolo da bengala. Na Figura 22 o êmbolo da bengala força o óleo a fluir novamente pelo interior do pistão para preencher a outra câmara.

Outro fator importante no sistema de amortecimento é o óleo escolhido, uma vez que será um responsável direto pelo amortecimento além da mola. Foi o *Motul Fork Oil Expert Hearvy 20W*, um óleo do fabricante *Motul* específico para suspensões do tipo garfo. As propriedades desse óleo estão ilustradas na Tabela 2 abaixo:

Tabela 2 – Propriedades do óleo para garfo do fabricante Motul.

Densidade (20°C)	0,874
Viscosidade (40°C)	81,1 mm ² /s
Viscosidade (100°C)	10,1 mm ² /s

Fonte: Motul (2022).

O amortecimento gerado pelo óleo foi desconsiderado para esse projeto, uma vez que o foco é a análise do comportamento da mola e da estrutura.

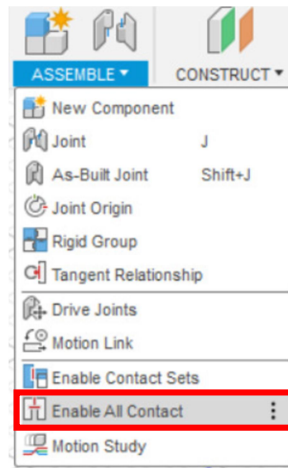
3.2.2 Simulações

Foram realizados quatro tipos de simulações: apenas com a mola, conferindo os valores da mesma obtida na teoria; apenas um lado da suspensão para verificar esforços mecânicos e vibração em cada uma das peças; com o conjunto completo para análise da frequência natural do sistema; com os apoios isolados para verificar a eficiência deles utilizando mais de um referencial. As simulações seguiram as etapas apresentadas a seguir:

Após abrir o arquivo do conjunto montado do *Inventor* no *Autodesk Fusion 360* é necessário liberar o uso de todos os tipos de contatos entre as peças na opção “Assembly”, conforme ilustrado na Figura 23, para usá-las nas simulações.

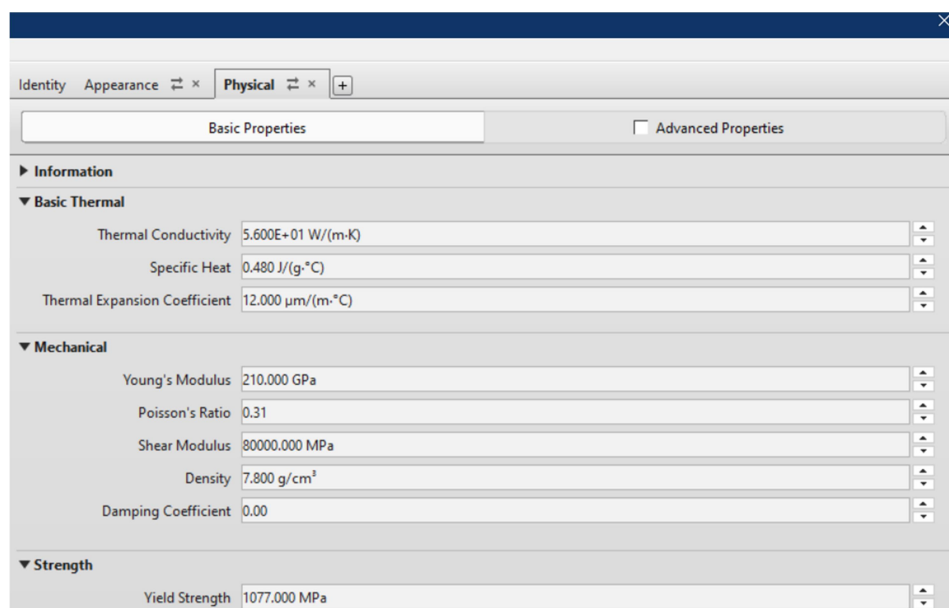
Foi aberta a opção de simulação estática transferindo o conjunto para outra aba, na qual se acompanhou a árvore de requisitos antes de simular. A primeira etapa foi a definição do material de cada peça, dessa forma foi necessário criar um material novo para poder ter as informações corretas na mola, a Figura 24 apresenta as informações utilizadas no *software* para definir o material da mola.

Figura 23 – Opção para liberação para todos os tipos de contatos na simulação.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 24 – Valores de referência para criar material ASTM 228 no CAE.

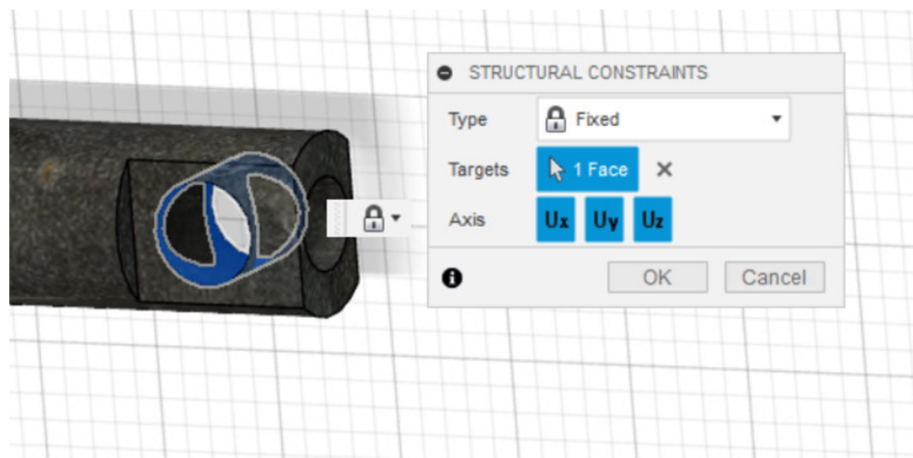


Fonte: Elaborado pelo autor

Um ponto importante é definir a resistência limite (Figura 24) que será utilizada no cálculo do CS, de acordo com o valor obtido na teoria das molas, pois caso não seja feito o *software* terá um referencial diferente e os valores não serão compatíveis.

Na sequência foram definidas as restrições: para as simulações com os apoios isolados deve-se colocar uma restrição nos furos dos eixos das bengalas ou no furo do eixo central; para as demais simulações foram colocadas nos furos dos eixos da roda; para a mola isolada temos uma restrição aplicada em uma das extremidades e outra na própria mola, mas apenas para os sentidos radiais ao movimento de compressão para reproduzir as restrições apresentadas pela superfície interna da bengala. Nas simulações isoladas dos apoios a restrição varia conforme a análise, sendo realizadas da seguinte forma: restrição no furo do eixo central e as cargas nos furos de eixo das extremidades; restrições nos furos dos eixos das bengalas e a carga aplicada no furo do eixo central. A Figura 25 apresenta a restrição usada no furo do eixo da roda:

Figura 25 – Restrição de movimentação no furo do eixo da roda.

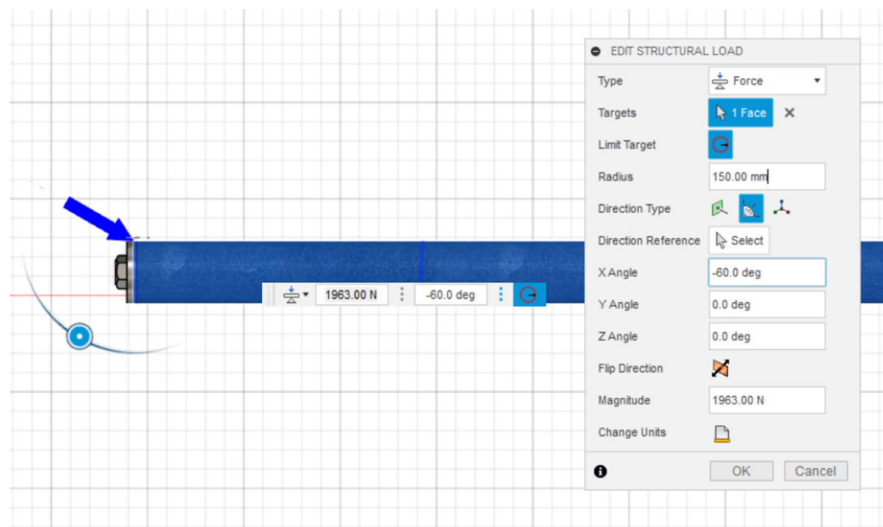


Fonte: Elaborado pelo autor

As cargas foram aplicadas da seguinte maneira: utilizando as forças resultantes devido à inclinação de 30% que o equipamento terá na moto, dessa forma, foram utilizados 1963 N para simular apenas um lado da suspensão e 3926 N para o conjunto completo, isso permite a verificação da resistência do sistema a flexão. Os pontos de aplicação são: na extremidade externa da bengala, com uma área de atuação de 150 mm de distância para representar os apoios, analisando apenas um lado do sistema e no eixo central dos apoios quando for realizada com o conjunto completo. Para simulações com a mola considera-se uma carga de 1700 N a favor da compressão e seguindo a lógica que a teoria aplica. As cargas aplicadas nos

testes com os apoios não devem estar na mesma superfície engastada, dessa forma, são de 1963 N se for aplicada no furo do eixo central ou 881,5 N se for dividida nos furos dos eixos que terão contato com as bengalas. Deve-se notar que em todas as simulações a gravidade será ativada e deverá ter a mesma angulação de 30° citada anteriormente. A Figura 26 ilustra a aplicação de força em um dos lados da suspensão até um comprimento de 150 mm, para representar a atuação dos apoios no conjunto:

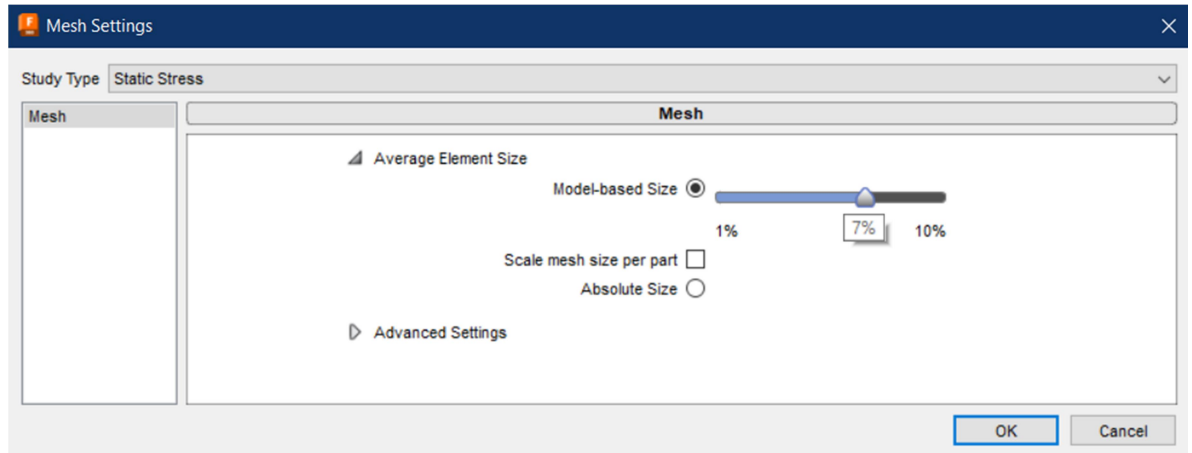
Figura 26 – Carga aplicada em um dos lados da suspensão.



Fonte: Elaborado pelo autor

Após a definição das cargas foram inseridos os contatos entre as peças, todos os contatos podem ser definidos como *bonded* (condição de contato rígido e sem possibilidade de movimento entre as superfícies) exceto os contatos entre peças que possuem movimento. Sendo as seguintes relações: mola e bengala; pistão e bengala; bengala e cilindro externo. Essas interações foram definidas como *sliding* (condição de contato com liberdade de movimento paralelo as superfícies). Analisando os apoios isoladamente, foi aplicado o contato *off-bonded* (condição de contato rígido, sem possibilidade de movimento entre as superfícies mas com um certo afastamento entre elas) nas áreas que os parafusos mantem fixadas.

Na sequência a malha de elementos finitos foi gerada de forma automática com o *software* CAE. O refinamento da malha foi feito utilizando a referencia do tamanho médio do elemento, como apresentado na Figura 27. Não foi possível explorar refinamentos maiores que os utilizados, pois isso exige muito esforço de computadores convencionais de baixo desempenho. Com essas etapas completadas o sistema pode rodar a solução.

Figura 27 – Configurações de malha no *Autodesk Fusion 360*.

Fonte: Elaborado pelo autor

Para realização da simulação com foco na obtenção da frequência natural, ao entrar na aba de simulação foi escolhida a opção de frequências modais e repetido exatamente o mesmo passo a passo apresentado na seção 3.2.2, referente a simulação estática. A única diferença será referente aos contatos, já que o sistema permite apenas o uso dos contatos *bonded* e *off-bonded*. Na simulação da mola os apoios das extremidades foram retirados, dessa forma não interferem no resultado final.

Realizando a solução de ambas as simulações, estática e de vibrações, o sistema apresentou uma escala de cores que representa a variação de um parâmetro analisado ao longo da peça.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Projeto da mola

Todas as dimensões finais dos componentes da suspensão e seus respectivos materiais estão apresentados no Anexo A, com os desenhos mecânicos detalhados de cada peça e a representação do conjunto completo ilustrando a posição de cada peça. Os detalhes de modelo e quantidade utilizada de o-rings e parafusos estão no desenho do conjunto montado.

A primeira etapa de análise foi feita com os resultados obtidos através dos cálculos teóricos da literatura, os valores estão apresentados para os dois materiais de análise na Tabela 3 abaixo:

Tabela 3 – Valores de coeficientes e variáveis obtidos do material teórico.

Parâmetro	A228 Fio Musical	A232 Cromo-V
D		22 mm
d		5 mm
C		4,4
S_{ut}	1657,91 MPa	1511,65 MPa
S_{ys}	1077,64 MPa	982,57 MPa
N_{ys}	1,27	1,16
τ_{max}		848,49 MPa
N_a		40 espiras
N_t		42 espiras
y_{interf}		12,15 mm
L_f		336,85 mm
$y_{inicial}$		33,74 mm
f_n		293,00 Hz
f_{car}		1352,29 ciclos/min

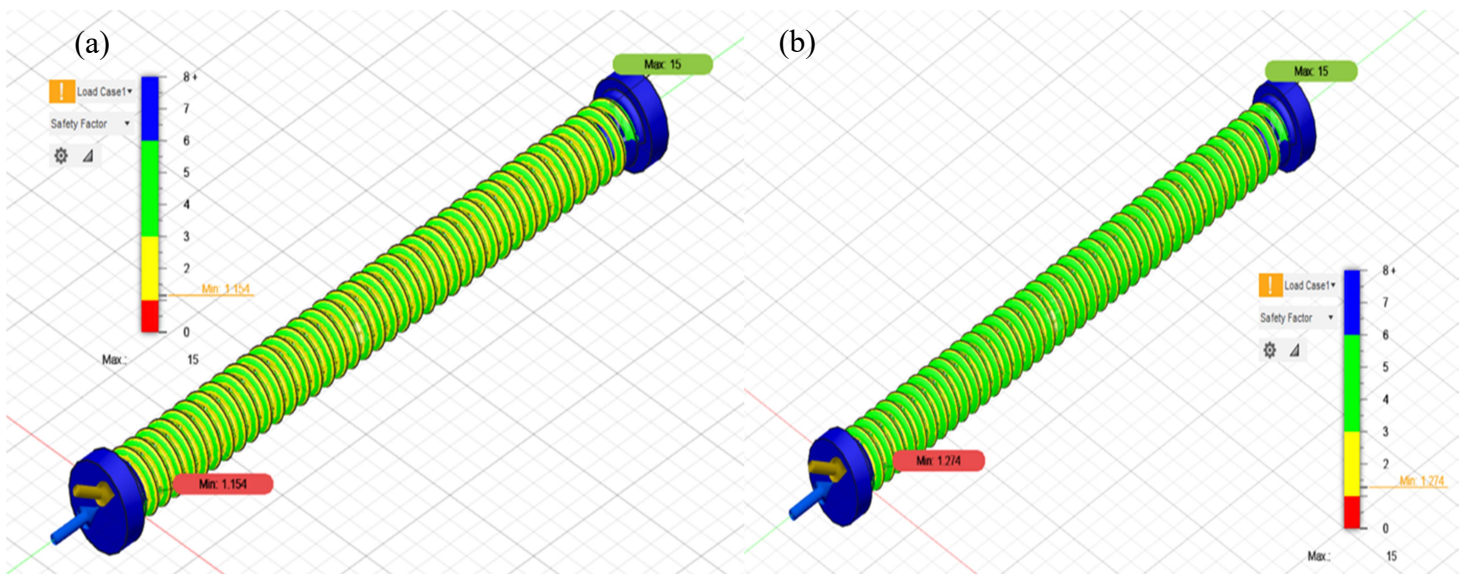
Fonte: Elaborado pelo autor

Dentre todas as opções de diâmetro médio e do arame testadas a de 20 mm e 5 mm, respectivamente, apresentou um bom resultado com dimensões aceitáveis para as parte interna da bengala. Vemos que para o aço A228 temos um valor maior de CS (1,27), dessa forma a

mola feita desse material é mais superdimensionada comparando com o A232 apresentando um CS de 1,16. De acordo com a relação apresentada por Kushwah S. (2021) temos embasamento para assumir que o fio musical se mostra mais viável devido ao seu menor valor de mercado, além da diferença entre os CS não ser tão significativa.

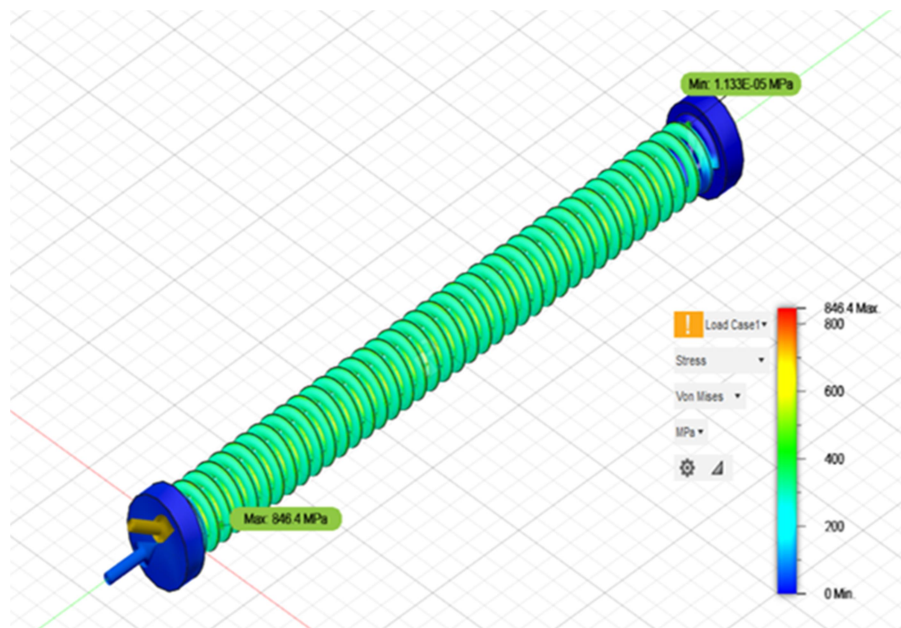
Resultados das simulações da mola para CS estão na Figura 28, para tensão na Figura 29 e vibração na Figura 30.

Figura 28 – Resultado simulação estática para o CS (a) A232 (b) A228.



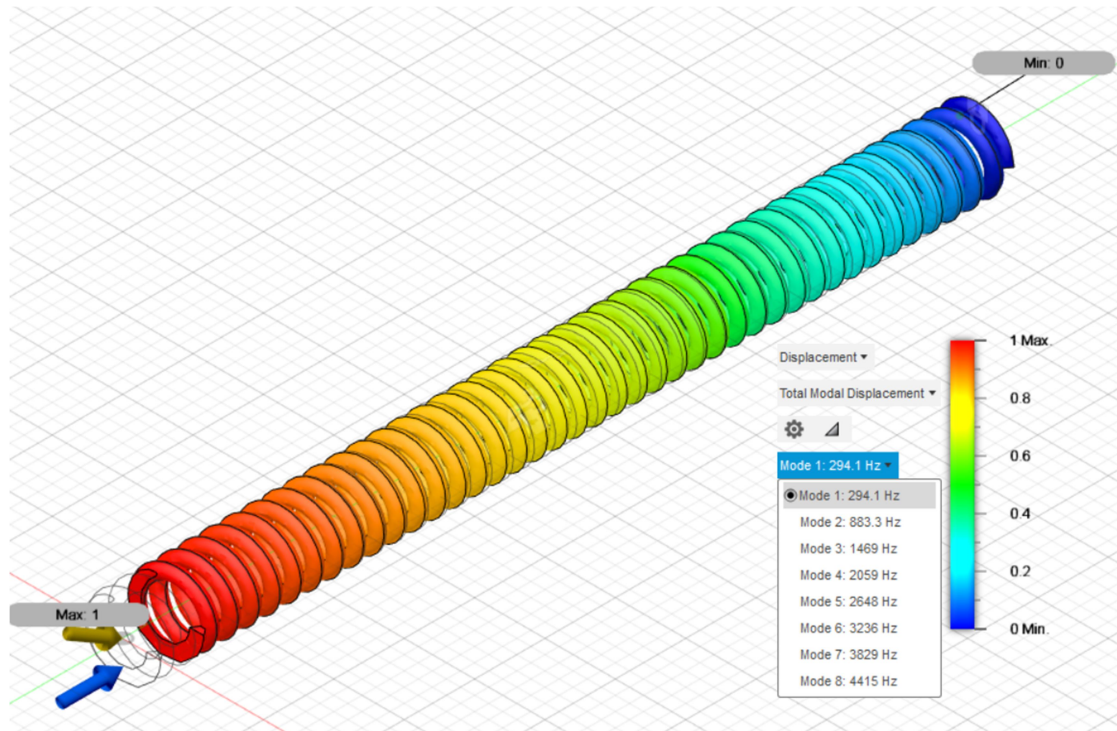
Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 29 – Resultado simulação estática para tensão.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 30 – Resultado simulação de vibração para obter a frequência natural.



Fonte: Elaborado pelo autor

Os resultados das simulações realizadas com a malha mais refinada estão apresentados na Tabela 4 a seguir:

Tabela 4 – Valores obtidos com malhas mais refinadas.

Número de Elementos	Número de Nós	Tensão (MPa)	CS ASTM 228	CS ASTM 228
40628	73144	719	1,50	1,37
50378	89361	819,2	1,32	1,20
50803	91027	846,4	1,27	1,15

Fonte: Elaborado pelo autor

Com base nos valores da Tabela 4 observa-se uma convergência, com uma diferença menor que 10% entre os dois últimos valores de cada parâmetro (Norton, 2013), assim a tensão se aproxima de 846 MPa e o CS de 1,27. Os valores se mantêm próximos do obtido no teórico, tendo uma diferença na tensão de aproximadamente 0,2% em relação ao teórico. A margem de erro é aceitável para a escala desse projeto, além disso, o CS se encontra acima de

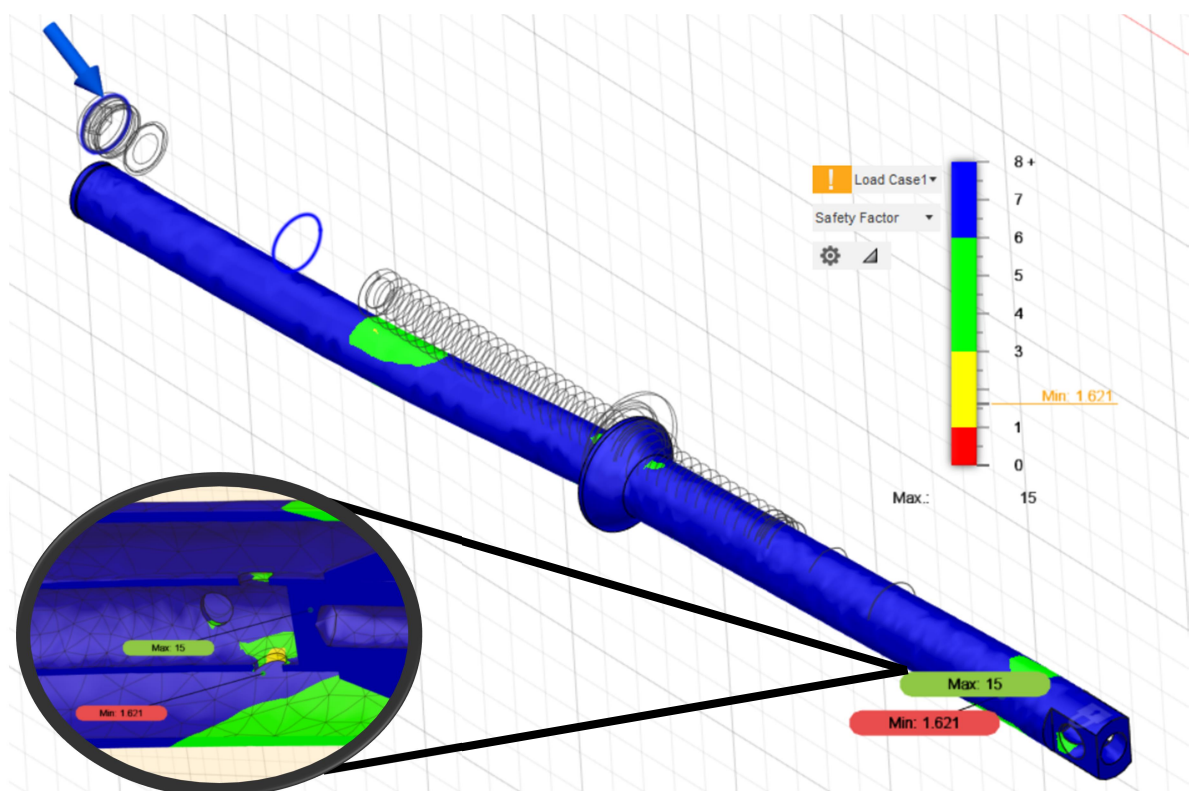
1 viabilizando o projeto referente as cargas máximas e mínimas definidas inicialmente em situação estática.

Em relação aos valores obtidos para frequência natural temos uma diferença mínima de 0,4% entre o modelo simulado e a teoria, enquanto a simulação apresenta um valor de 294,1 Hz, a teoria nos entrega um valor de 293 Hz. Com esse valor podemos estimar que o valor mínimo da frequência de carregamento do sistema deve ser de aproximadamente 1353 ciclos/min, valor recomendado para evitar ressonância (Norton, 2013).

4.2 Outros componentes

Os valores obtidos através da simulação do conjunto final estão ilustrados na Figura 31:

Figura 31 – Resultados simulação de um lado da suspensão.



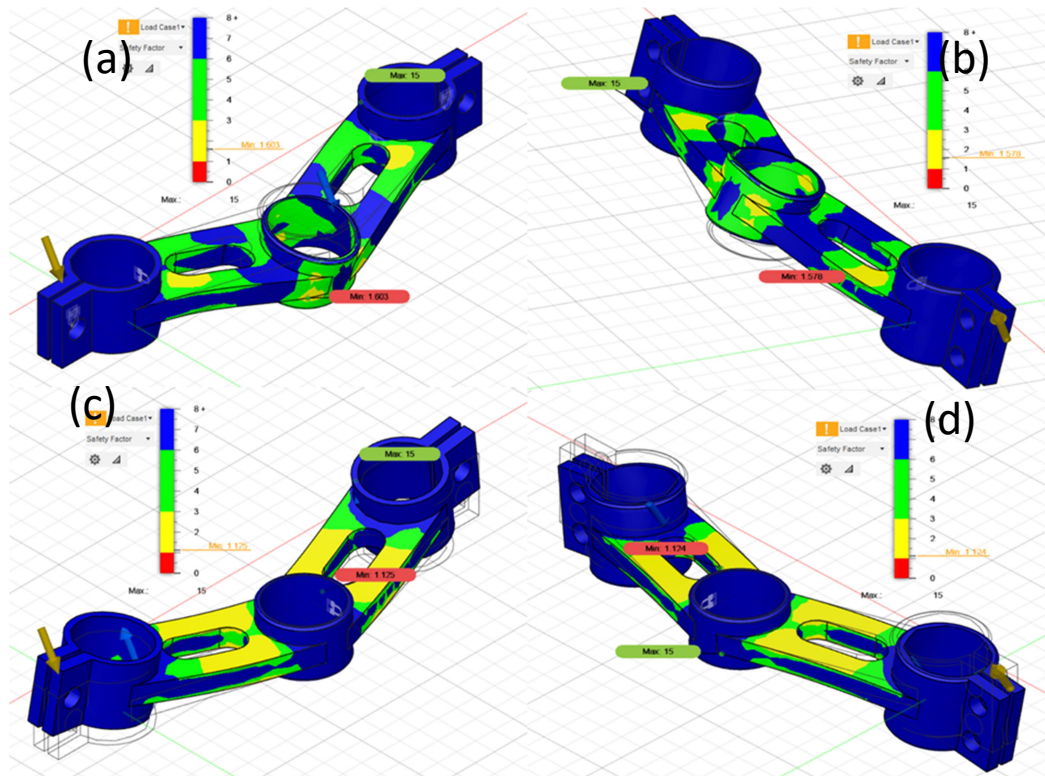
Fonte: Elaborado pelo autor

O sistema apresenta bons valores de CS, sendo mais crítico na região dos furos de fluxo de óleo. Um CS de 1,62 significa uma boa margem de segurança (62%) caso alguma carga saia muito além do que foi projetado. Não foram identificadas outras opções para

reduzir a massa nessas regiões além do que já foi reduzido no diâmetro dos cilindros, sendo considerado uma espessura mais próxima de 1 mm de aço, sem afetar a geometria necessária para ser funcional. Pela Figura 31 também podemos observar que existe um maior acúmulo de tensões na área de fixação do retentor de pó, na região de contato entre a bengala e o apoio inferior e na base do cilindro externo, onde fica a base do pistão. Esses pontos não demonstram criticidade referente ao que foi observado no modelo virtual para a situação em análise.

A Figura 32 apresenta os resultados para a simulação dos apoios que conectam a suspensão ao corpo da moto:

Figura 32 – Resultados simulações apoios superior (a e c) e inferior (b e d).

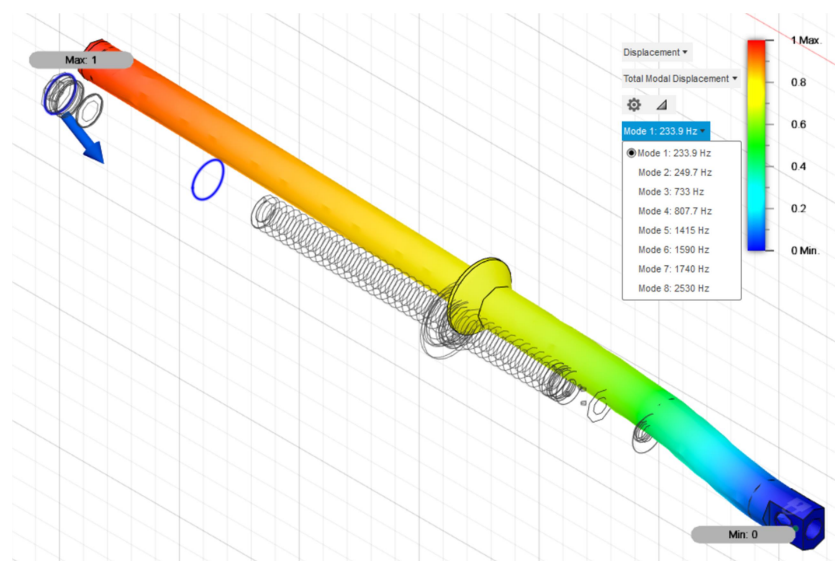


Fonte: Elaborado pelo autor

Os apoios apresentam um valor mais crítico quando simulados restringindo o centro e aplicando as cargas na área de contato com as bengalas (imagens 'c' e 'd' da Figura 32) do que realizando a restrição nas extremidades e aplicando a carga no eixo do centro (imagens 'a' e 'b' da Figura 32). As dimensões foram reduzidas ao máximo, incluindo os entalhes com a função de aliviar o peso. Atingindo os CS críticos para situação estática de: 1,125 (superior) e 1,124 (inferior).

Referente à questão de vibração, temos o resultado na Figura 33:

Figura 33 – Resultado simulação um lado do conjunto para vibração.



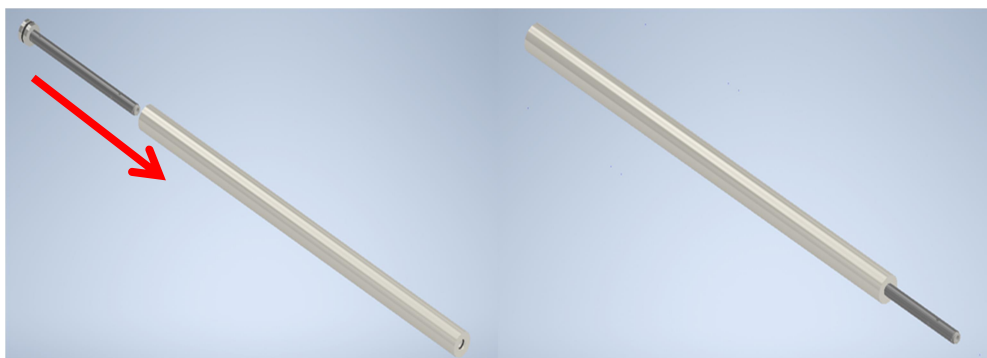
Fonte: Elaborado pelo autor

O conjunto apresenta uma frequência natural de 233,9 Hz, sendo um ponto de operação que o sistema deve evitar operar de forma a não sofrer ressonância. Deve-se atentar que a mola e o sistema apresentam pontos de restrição para ressonância diferentes, dessa forma, a vibração próxima a seus valores de harmônico devem ser evitados.

4.3 Montagem do conjunto

O conjunto foi planejado visando uma montagem simples. O primeiro passo é inserir o pistão na bengala, e manter a sua extremidade exposta do outro lado, como ilustrado na Figura 34, parafusando a base do pistão no pistão na sequência.

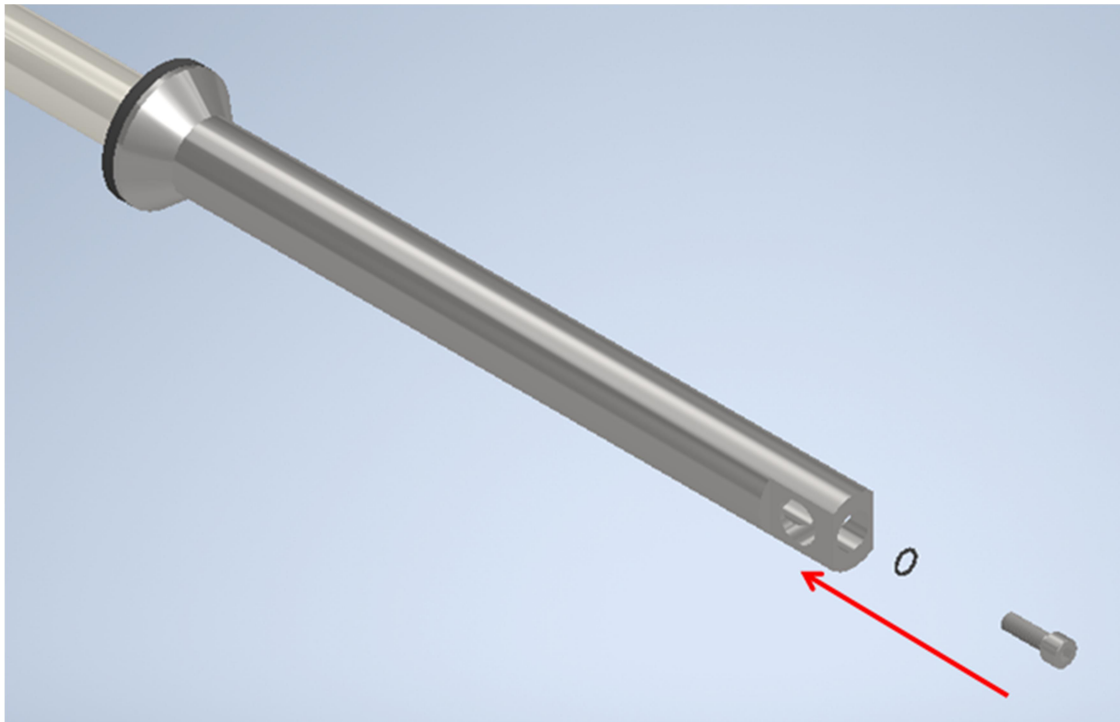
Figura 34 – Primeira etapa de montagem com bengala e pistão.



Fonte: Elaborado pelo autor

Para a próxima etapa deve-se inserir o sistema no cilindro externo e com o auxílio de uma ferramenta pressionar o pistão no interior da bengala enquanto insere o parafuso na extremidade do cilindro externo (Figura 35). Com a fixação do cilindro externo é possível preencher o interior com 120 ml de óleo através da abertura da bengala e na sequência, inserir a mola e o pino e aparafusar a bengala com o parafuso superior.

Figura 35 – Fixação do cilindro externo.



Fonte: Elaborado pelo autor

Até aqui temos um lado do sistema montado, basta repetir o processo para montar o outro lado. Finalmente, devem-se aparafusar os apoios superior e inferior para completar a montagem do sistema. Na necessidade de desmontar o sistema basta fazer o processo em ordem reversa.

5 CONCLUSÃO

Projetos mecânicos necessitam de precisão de forma a garantir não apenas um bom funcionamento, mas também a qualidade do produto, evitando riscos a vidas dependendo da escala do projeto, conseqüentemente permitindo a competitividade do produto no mercado. Dessa forma, suspensões que são uma parte importante de qualquer veículo precisam estar dentro dessa lógica, uma vez que elas protegem os componentes dos veículos amortecendo impactos e evitando a vibração exagerada ao longo dos percursos percorridos, contribuindo para evitar falhas e possíveis acidentes.

O método dos elementos finitos contribui para análises estruturais e o seu uso, de forma adequada permite maior agilidade em projetos mecânicos, pois trás resultados com uma boa aproximação em relação a prática.

O projeto em questão obteve um sistema com uma mola bem otimizada para a condição estática, atendendo em relação ao CS com um valor de 1,27 e conseqüentemente uma margem de segurança de 27%, além de ser a opção mais barata. Os demais componentes analisados mantiveram CS de 1,6 para cada lado da suspensão, apresentando uma margem de segurança de 60%. Com aproximadamente 1,12 para os apoios, mostrando um valor mais próximo do limite se comparado ao resto do conjunto. O projeto se mostra viável e funcional quanto ao CS para o modelo desenvolvido em situação estática, possuindo uma margem boa de segurança para um equipamento que transporta pessoas. Para dar sequencia no trabalho é sugerida uma análise dinâmica do sistema, de forma a averiguar se é capaz de suportar os esforços gerados na movimentação.

Sobre a situação da vibração, obtemos um sistema com uma frequência natural de 233,9 Hz enquanto a mola expõe uma de 293 Hz. O modelo virtual criado apresentou um desvio de 0,4% em relação ao valor teórico e do simulado na mola, mostrando a precisão. O sistema não deve operar em frequências próximas a esses valores e nem de seus respectivos harmônicos, uma vez que ocorrerá o fenômeno da ressonância.

REFERÊNCIAS

AHAMED, M. M.; NATRAYAN, L. Structural and dynamic analysis of automotive quarter car model suspension system for different materials. **Materials today: proceedings**, Chennai, v. 62, p. 2291-2296, jun. 2022. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221478532202171X>. Acesso em: 08 set. 2022.

BMW. **Bmw motorrad**. Munique: BMW, [2022]. Disponível em:

<https://www.bmw-otorrad.com.br/pt/experience/engineering/detail/suspension/telelever.html>. Acesso em: 08 set. 2022.

BRITANNICA. **Britannica**. Chicago: Britannica, [2021]. Disponível em:

<https://www.britannica.com/topic/Tacoma-Narrows-Bridge>. Acesso em: 08 set. 2022.

ZHOU, C. *et al.* An investigation of abnormal vibration: induced coil spring failure in metro vehicles. **Engineering failure analysis**, Chengdu, v. 108, jan. 2020. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1350630719303218>. Acesso em: 06 set. 2022.

COLOMBO, T.; DELVECCHIO, D.; SAVARESI, S. Fork elongation estimation in a motorcycle suspension via Kalman-filter techniques for semi-active end-stop avoidance control. *In: CONGRESSO MUNDIAL IFAC*, 50., 2017, Milão. **Trabalhos apresentados** [...]. Milão, 2017. p. 3738-3743. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896317309436>. Acesso em: 04 set. 2022.

HONDA. **Moto peças Honda**. Sumaré: Honda, [2022]. Disponível em:

<https://www.moto-pecas-honda.com/honda-motociclos/125-MOTO/XL/1982>. Acesso em: 08 set. 2022.

HONDA. **Honda motoroda**, Sumaré: Honda, [2022]. Disponível em:

<https://www.motoroda.com.br/noticias/8>. Acesso em: 10 out. 2022.

KUSHWAH, S.; PAREKH, S.; MANGROLA, M. Optimization of coil spring by finite element analysis method of automobile suspension system using different materials.

Materials today: proceedings, Surat, v. 42, p. 827-831, mar. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221478532039074X>. Acesso em: 04 set. 2022.

MAHDI, E. *et al.* Light composite elliptic springs for vehicle suspension. **Composite structures**, Serdang, v. 75, p. 24-28, set 2006. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263822306001139>. Acesso em: 05 ago. 2022.

MOTUL. **Motul**, Aubervilliers: Motul, [2022]. Disponível em:

<https://www.motul.com/br/pt-BR/products/fork-oil-expert-heavy-20w>. Acesso em: 06 out. 2022.

PAWAR, H. B.; DESALE D. D. Optimization of three wheeler front suspension coil spring.

Procedia manufacturing, Ahmednagar, v. 20, p. 428-433, fev. 2018. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978918300970>. Acesso em: 14 ago. 2022.

PRAWOTO, Y. *et al.* Design and failure modes of automotive suspension springs.

Engineering failure analysis, Wixom, v. 15, p. 1155-1174, dez. 2008. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1350630707001768>. Acesso em: 25 ago. 2022.

YVARS, P. A. *et al.* Interval computation and constraint propagation for the optimal design of a compression spring for a linear vehicle suspension system. **Mechanism and machine theory**, Sfax, v. 84, p.67-89, fev. 2015. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0094114X14002419#preview-section-cited-by>. Acesso em: 22 ago. 2022.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

ALVES FILHO, A. **Elementos finitos: a base da tecnologia CAE**. 6. ed. São Paulo: Editora Érica, 2009.

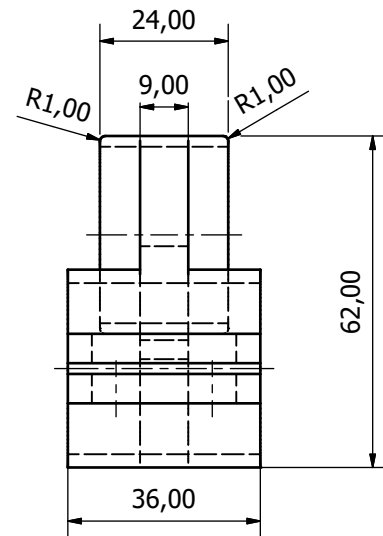
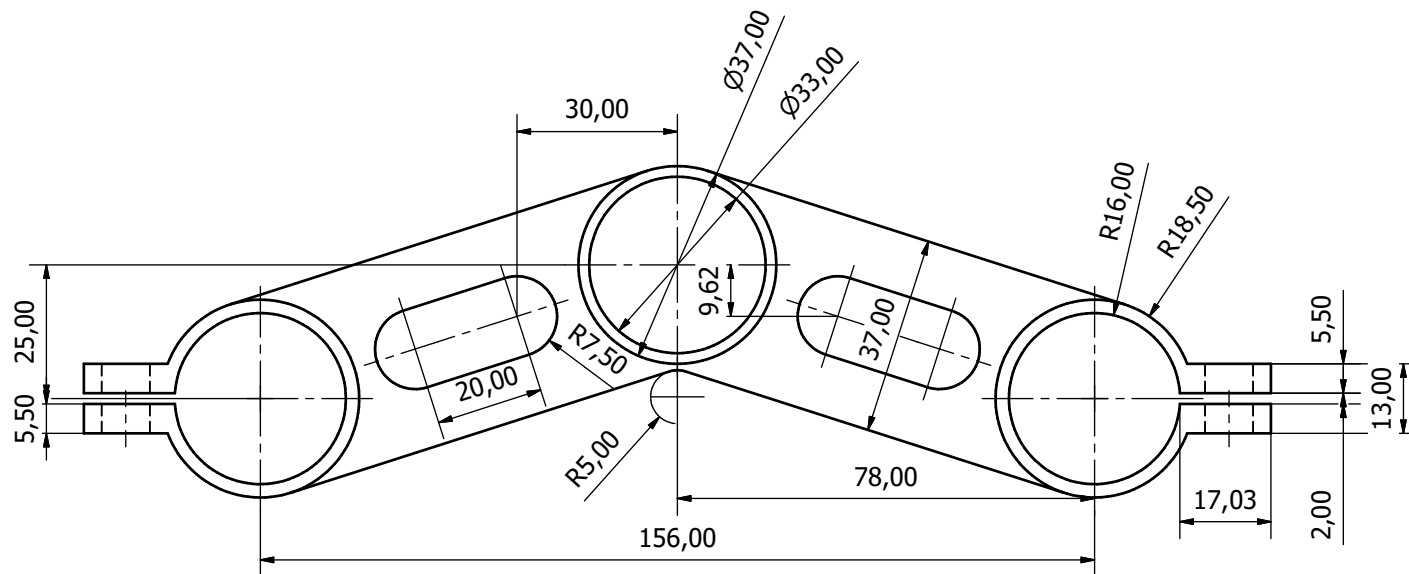
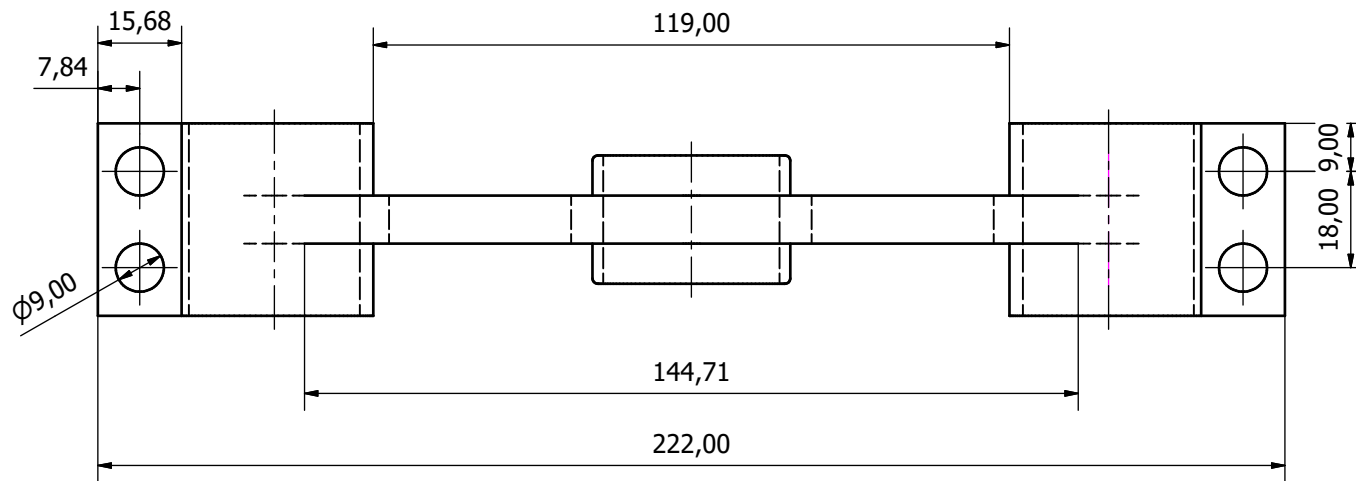
CHANDRUPATLA, T. R. **Elementos finitos**. 4. ed. São Paulo: Pearson, 2015.


COOK, R. D. **Concepts and applications for finite element analysis**. 3. ed. Nova York: John Wiley, 1989.

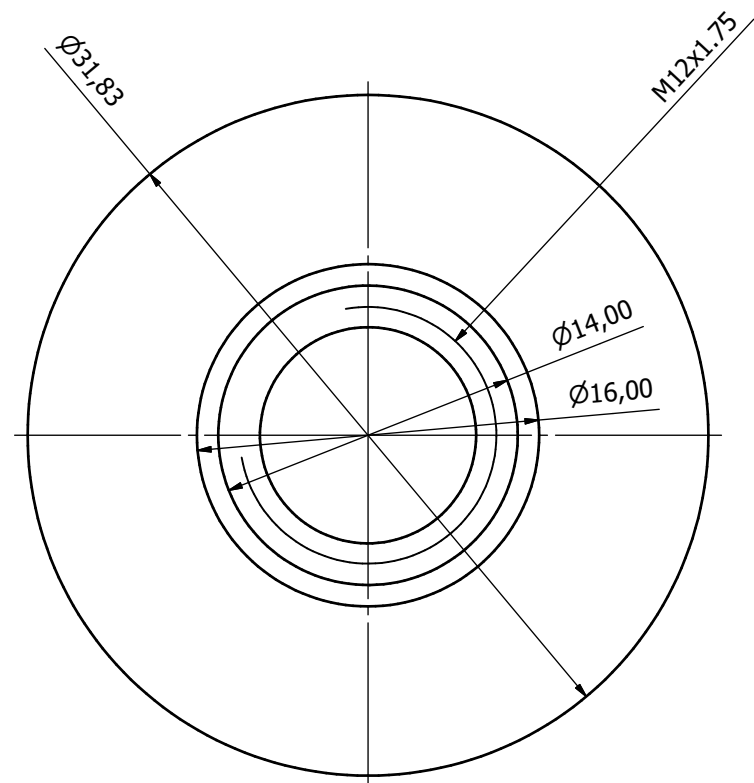
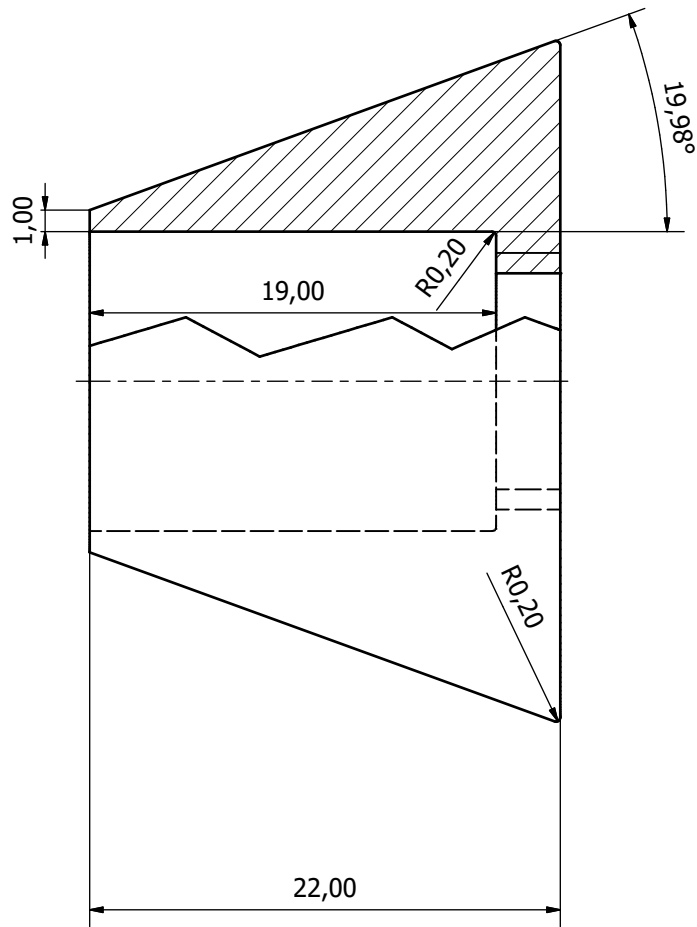
NORTON, R. L. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.


RAO, S. **Vibrações mecânicas**. 4. ed. São Paulo: Pearson Prentice-Hall, 2009.

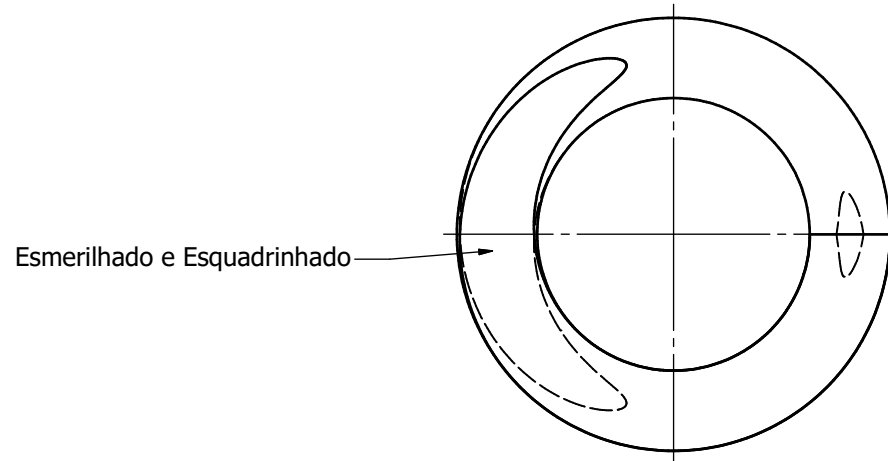
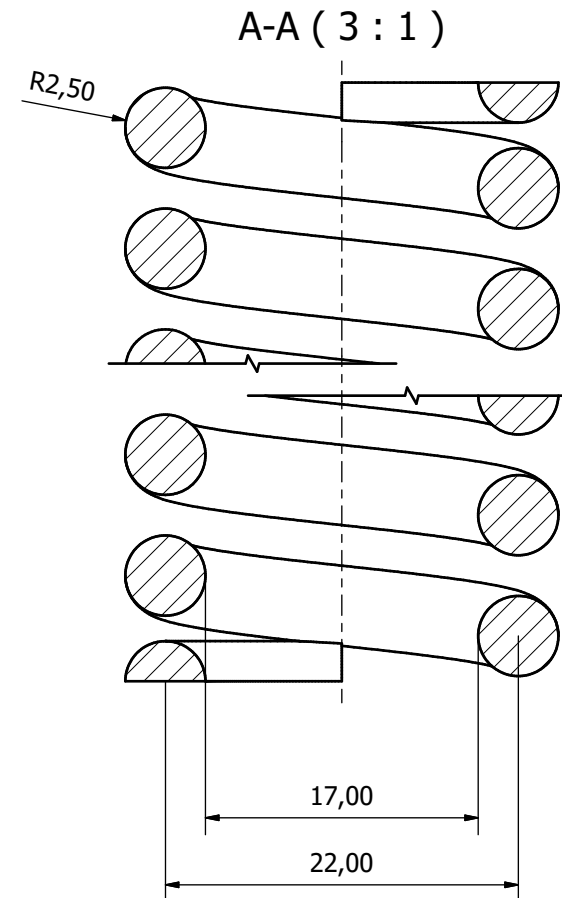
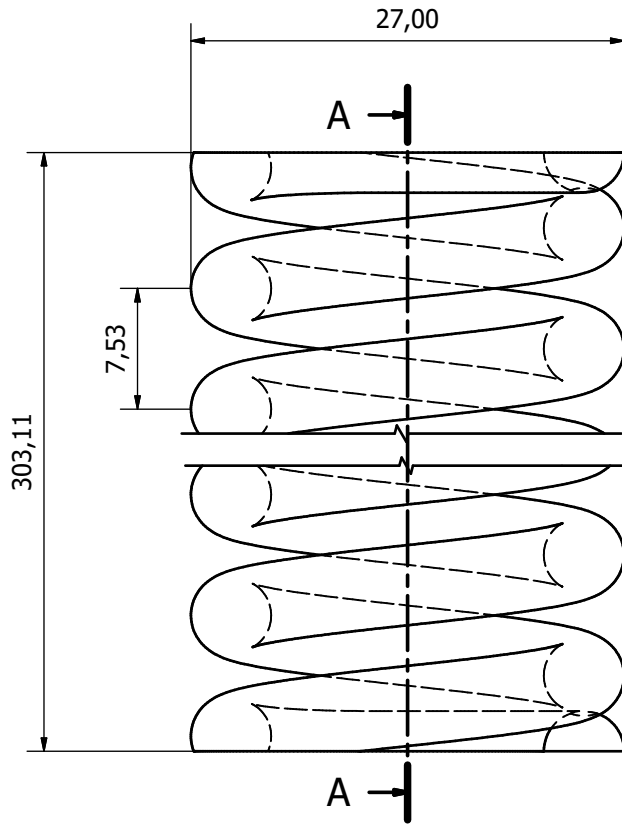
ANEXO A – Desenhos Técnicos Mecânicos do Conjunto Suspensão




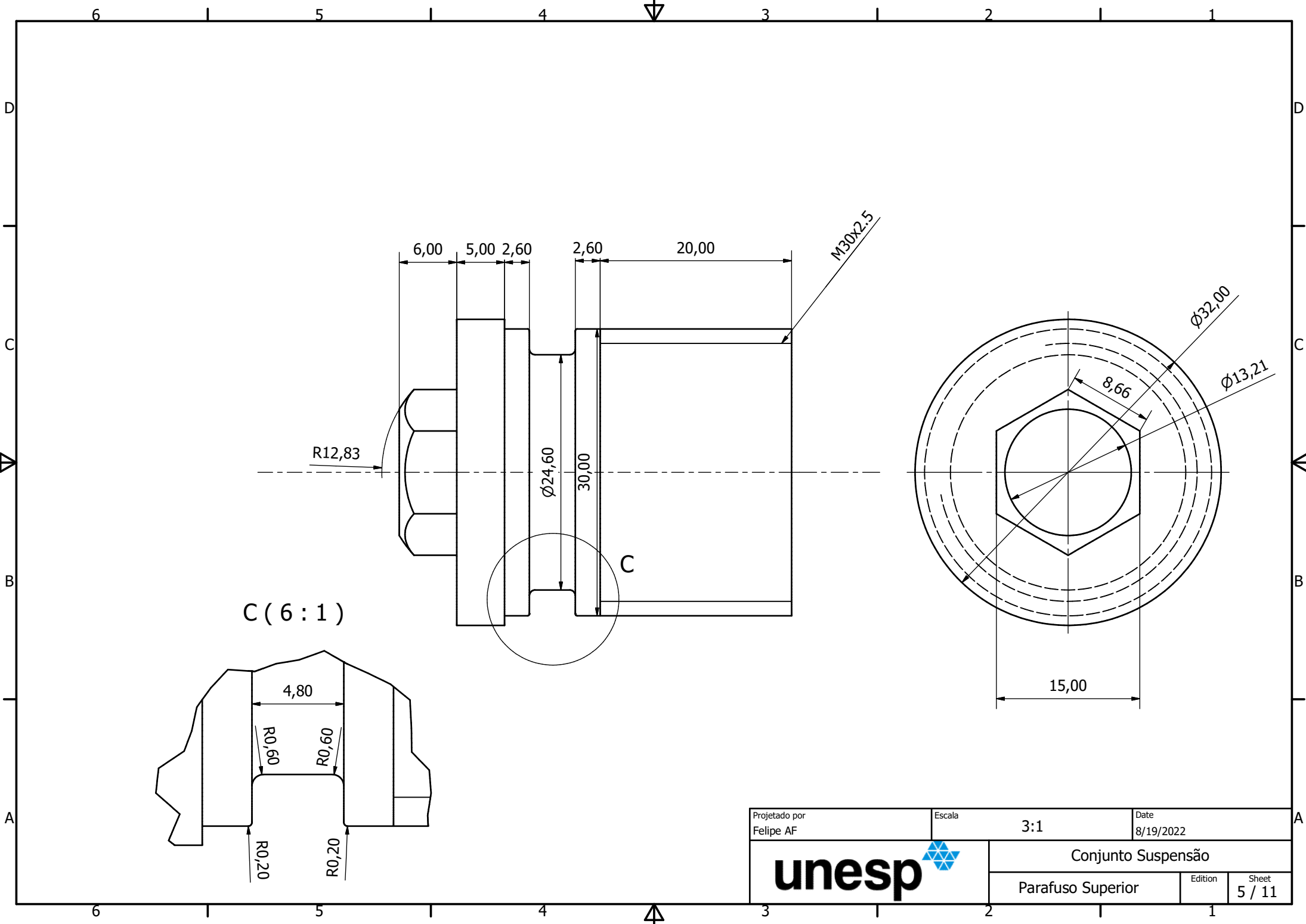
Projetado por Felipe AF	Escala 1:1	Date 8/19/2022
	Conjunto Suspensão	
	Apoio Inferior	Edition 1 / 11




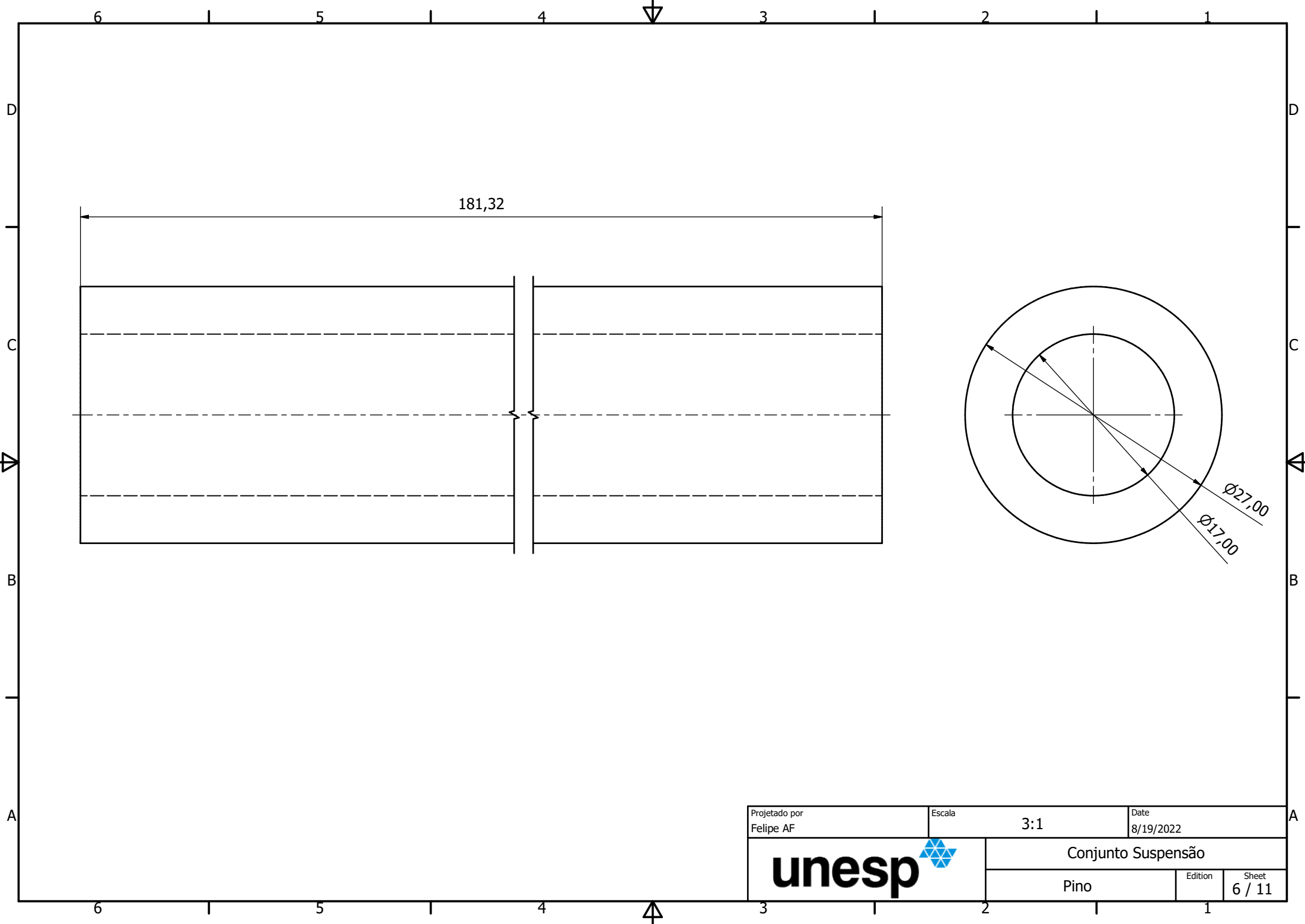
Projetado por Felipe AF	Escala 4:1	Date 8/19/2022
	Conjunto Suspensão	
	Base do Pistão	Edition 3 / 11




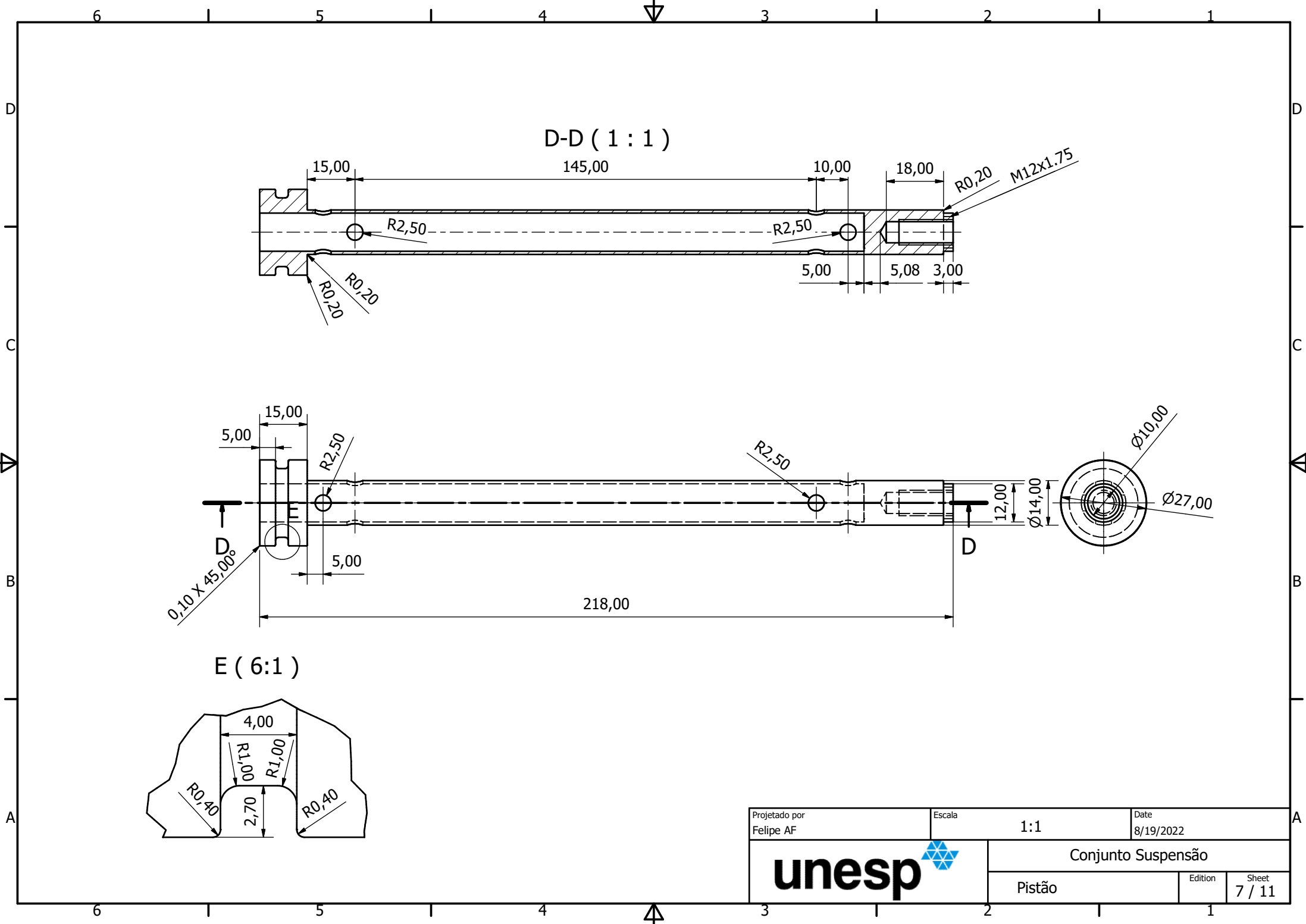
Projetado por Felipe AF	Escala 3:1	Date 8/19/2022
	Conjunto Suspensão	
	Mola de Compressão	Edition 4 / 11



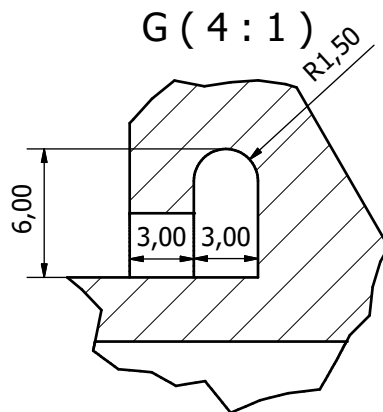
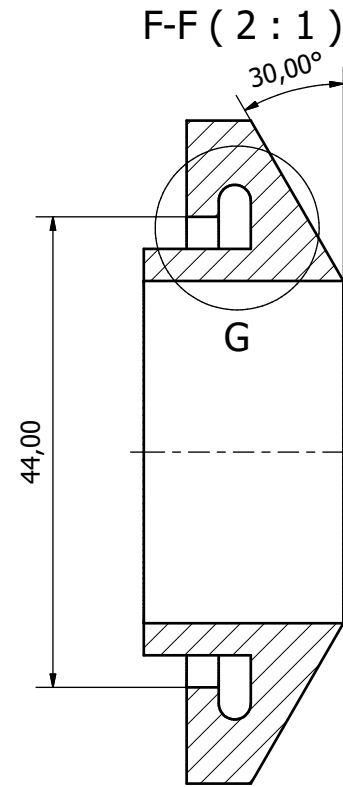
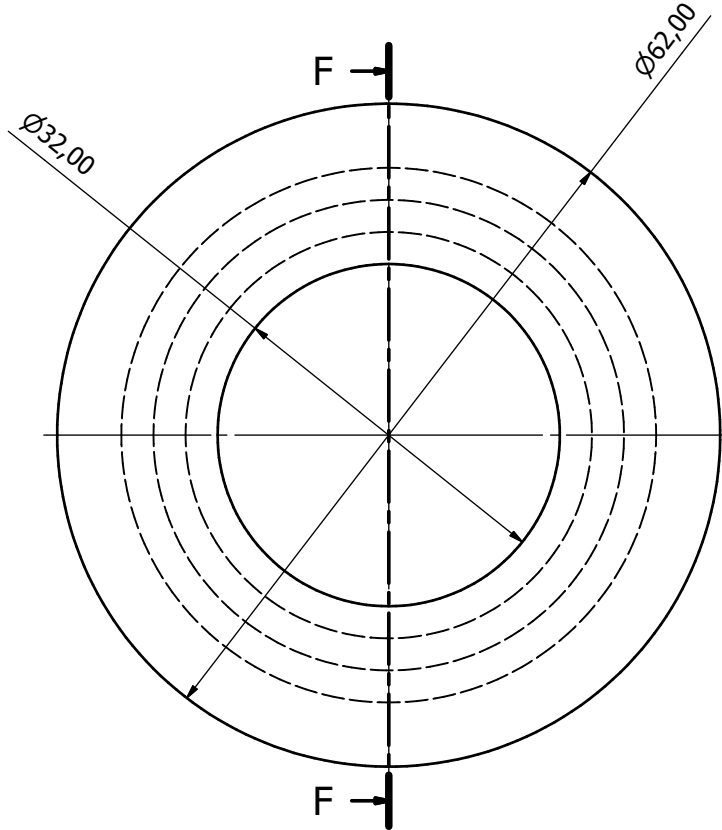
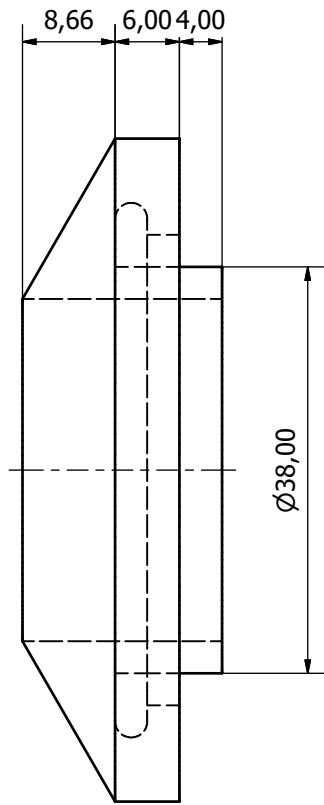
Projetado por Felipe AF	Escala 3:1	Date 8/19/2022
	Conjunto Suspensão	
	Parafuso Superior	Edition 5 / 11




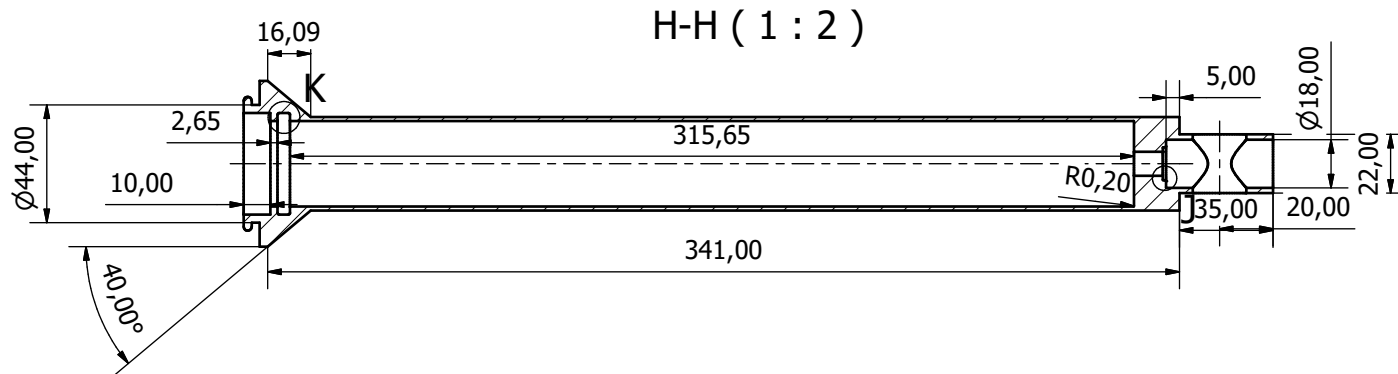
Projetado por Felipe AF	Escala 3:1	Date 8/19/2022
	Conjunto Suspensão	
	Pino	Edition 6 / 11



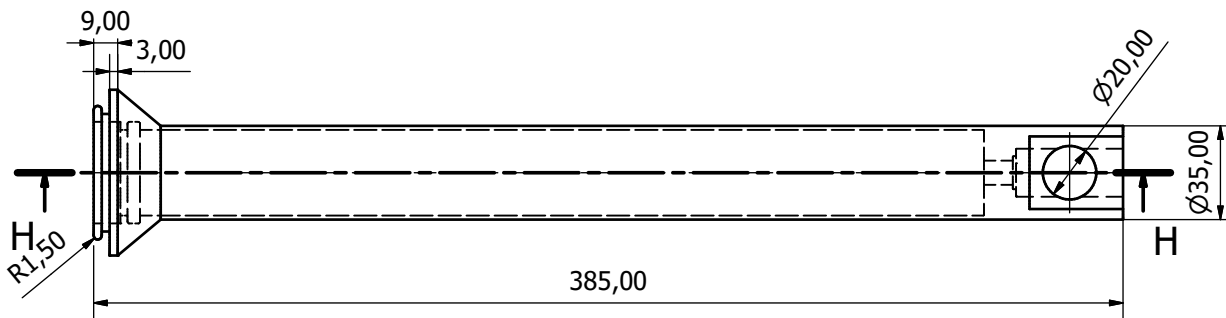
Projetado por Felipe AF	Escala 1:1	Date 8/19/2022
Conjunto Suspensão		
unesp	Pistão	Edition Sheet 7 / 11



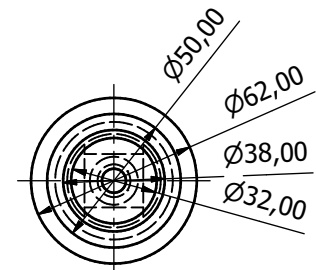
Projetado por Felipe AF	Escala 2:1	Date 8/19/2022
	Conjunto Suspensão	
	Retentor de Pó	Edition 8 / 11



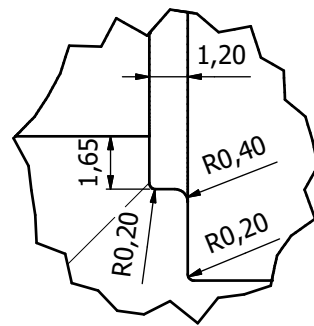
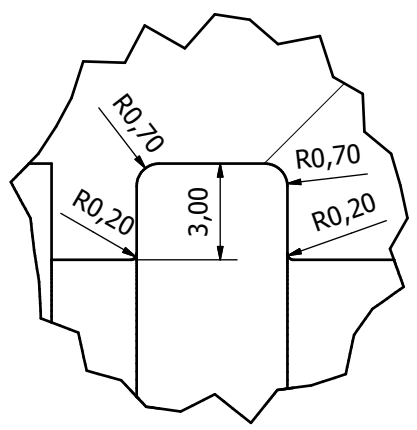
H-H (1 : 2)




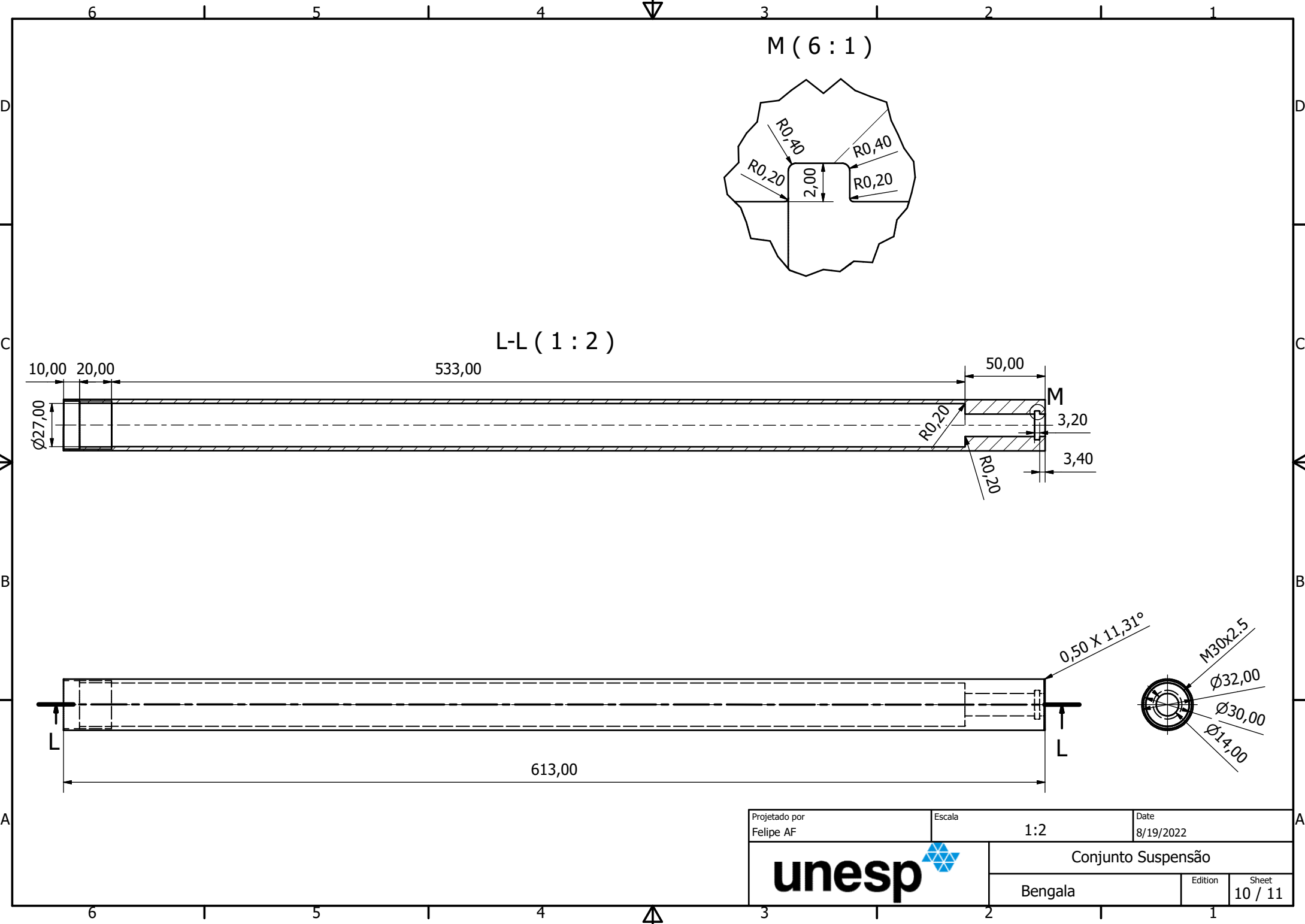
K (6 : 1)



J (6 : 1)

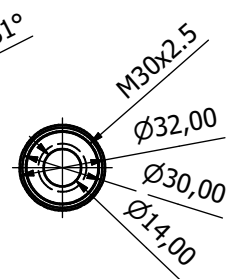
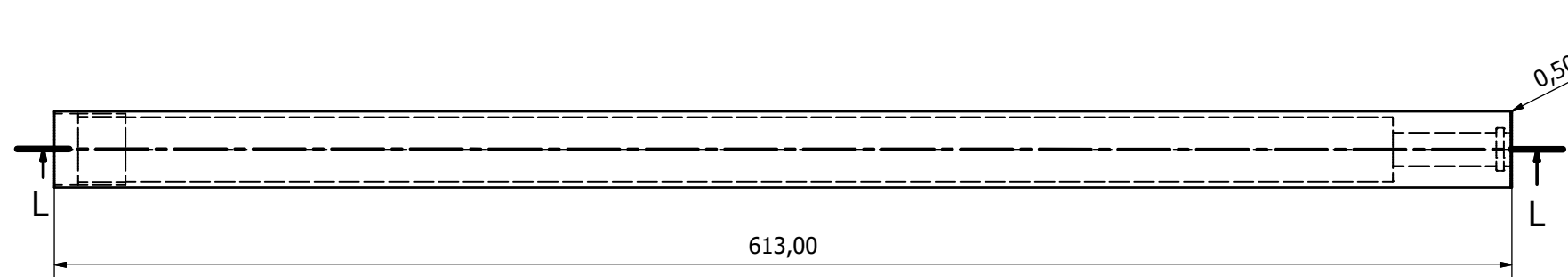
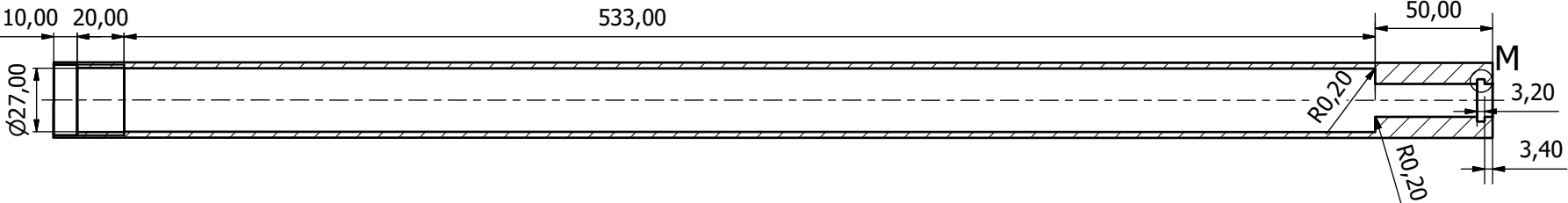



Projetado por Felipe AF	Escala 1:2	Date 8/19/2022
	Conjunto Suspensão	
	Cilindro Externo	Edition 9 / 11



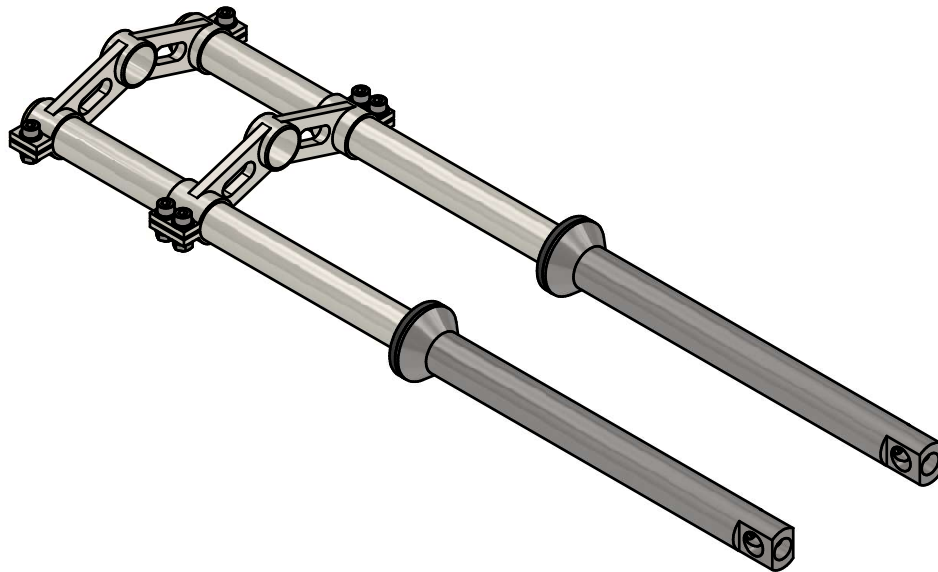
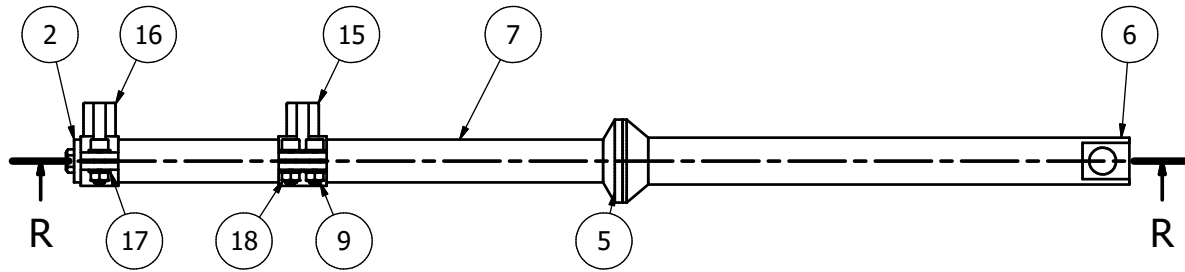
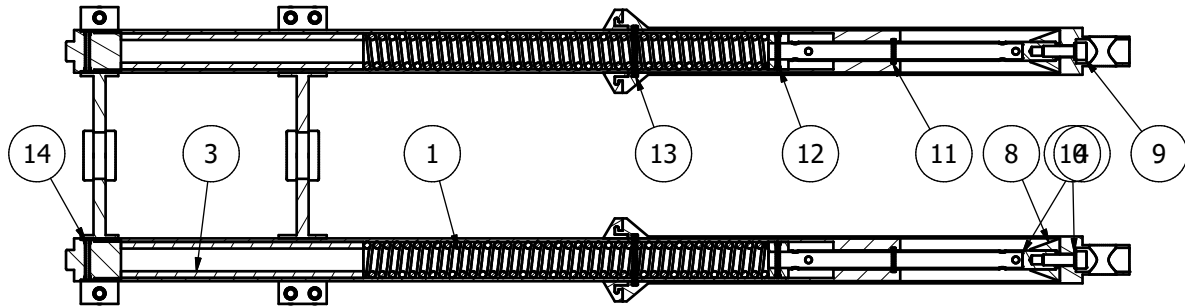
M (6 : 1)

L-L (1 : 2)




Projetado por Felipe AF	Escala 1:2	Date 8/19/2022
	Conjunto Suspensão	
	Bengala	Edition 10 / 11

R-R (1 : 4)



LISTA DE PEÇAS

ITEM	QUANTIDADE	COMPONENTE	MATERIAL
1	2	Mola de Compressão	ASTM 228 Fio Musical
2	2	Parafuso Superior	Aço Estrutural
3	2	Pino	Aço Estrutural
4	2	Pistão	Aço Estrutural
5	2	Retentor de Pó	Borracha Nitrílica
6	2	Cilindro Externo	Aço Estrutural
7	2	Bengala	Aço Estrutural
8	2	Base Pistão	Aço Estrutural
9	8	Parafuso ISO 4762 - M8 x 25	Padrão
10	2	O-ring BS 4518 - 0091-16	Padrão
11	2	O-ring KS B 2799 - P14	Padrão
12	2	O-ring BS 4518 - 0215-30	Padrão
13	2	O-ring KS B 2799 - P32	Padrão
14	2	O-ring ISO 3601-1 - C 0236 G	Padrão
15	1	Apoio Inferior	Aço Estrutural
16	1	Apoio Superior	Aço Estrutural
17	12	ISO 7089 - 8	Padrão
18	6	ISO 4032 - M8	Padrão

Projetado por Felipe AF	Escala 1:4	Date 8/19/2022
	Conjunto Suspensão	
	Suspensão Dianteira	Edition Sheet 11 / 11