

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Luiz Paulo Silveira Flôres

**PROJETO PRELIMINAR DE UMA BANCADA DIDÁTICA PARA
ESTUDO DE FLEXÃO EM VIGAS ENGASTADAS E BIAPOIADAS
UTILIZANDO EXTENSOMETRIA**

Santa Maria, RS
2022

Luiz Paulo Silveira Flôres

**PROJETO PRELIMINAR DE UMA BANCADA DIDÁTICA PARA ESTUDO DE
FLEXÃO EM VIGAS ENGASTADAS E BIAPOIADAS UTILIZANDO
EXTENSOMETRIA**

Trabalho de conclusão apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia
Mecânica, da Universidade Federal de
Santa Maria (UFSM, RS) como requisito
parcial para obtenção do grau de
Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Alexandre Aparecido Buenos, Dr. Eng.

Santa Maria, RS
2022

Luiz Paulo Silveira Flôres

**PROJETO PRELIMINAR DE UMA BANCADA DIDÁTICA PARA ESTUDO DE
FLEXÃO EM VIGAS ENGASTADAS E BIAPOIADAS UTILIZANDO
EXTENSOMETRIA**

Trabalho de conclusão apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia
Mecânica, da Universidade Federal de
Santa Maria (UFSM, RS) como requisito
parcial para obtenção do grau de
Engenheiro Mecânico.

Aprovado em 08 de julho de 2022:

Prof. Alexandre Aparecido Buenos, Dr. Eng. (DEM/UFSM)
(Presidente/Orientador)

Prof. Leandro Costa de Oliveira, Dr. Eng. (UFSM)

Prof. César Gabriel dos Santos, Dr. Eng. (UFSM)

Santa Maria, RS
2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, aos meus pais, Lígia Maria Silveira Flôres e João Batista da Luz Flôres, pelo amor incondicional, pela educação, pelo companheirismo, por estarem sempre ao meu lado, por me apoiarem e por tudo que fizeram por mim para que eu concluísse essa jornada.

Agradeço de forma muito especial a toda minha família especialmente meus irmãos Luiz Gustavo Silveira Flôres, Paulo Ricardo Silveira Flôres e minha dinda Nair da Luz e pelos meus sobrinhos Rafael Machado Flôres, Gabriela Machado Flores e Miguel Speroni Flôres e a minha namorada Renata Pase Ravello por todo amor e carinho.

À equipe Fórmula UFSM, por ter sido parte fundamental da minha formação acadêmica e ter me dado não só companheiros de equipe como também amigos.

Aos professores Mario Eduardo Santos Martins e Fernando Mariano Bayer, pela oportunidade de trabalhar no projeto Formula UFSM e principalmente pela orientação durante a faculdade.

Ao professor orientador, Alexandre Aparecido Buenos pela disponibilidade, pela motivação, auxílio na escolha do projeto e pelo total apoio para a realização do presente trabalho.

Ao técnico do Núcleo de Automação e Processos de Fabricação (NAFA), Luís Adolfo Limana Berni pela disponibilidade e pelo auxílio na fabricação dos componentes necessários para a realização deste trabalho.

*Não é conhecer muito, mas o que é útil, que
torna um homem sábio.*

THOMAS FULLER, M.D.

RESUMO

PROJETO PRELIMINAR DE UMA BANCADA DIDÁTICA PARA ESTUDO DE FLEXÃO EM VIGAS ENGASTADAS E BIAPOIADAS UTILIZANDO EXTENSOMETRIA

AUTOR: Luiz Paulo Silveira Flôres
ORIENTADOR: Alexandre Aparecido Buenos

Durante o curso de graduação em Engenharia Mecânica os alunos realizam diversas disciplinas, tais como mecânica dos sólidos, resistência dos materiais e instrumentação industrial, as quais são ministradas em grande parte com a apresentação de conceitos teóricos de tensões, deformações, deslocamentos, sensores e instrumentação para medições de grandezas. Para um melhor entendimento do conteúdo, bem como proporcionar a experiência prática, o desenvolvimento de ferramentas que auxiliam no processo de aprendizagem e melhoria na qualidade e estímulo do aluno, é forma de complementação desses conhecimentos. A bancada didática é um dispositivo com diversas configurações de montagem, envolvendo diferentes cargas e perfis de viga, sendo capaz de fornecer dados práticos para o estudo de flexão em vigas engastadas e biapoiadas. O presente trabalho tem como objetivo a realização do projeto preliminar de uma bancada didática para estudo de flexão em vigas engastadas e biapoiadas utilizando medições de deformação. A metodologia utilizada foi de prototipagem. Como resultado obtido tem-se o projeto preliminar de uma bancada didática voltada aos acadêmicos dos cursos de Engenharia, auxiliando na visualização, compreensão e relação teórico-prática. Ainda, restou demonstrada a viabilidade de sua construção, baseada na acessibilidade aos materiais e custo apurado. Também se destacam as alternativas de concepções para sua confecção, bem como facilidade e praticidade de uso.

Palavras chaves: Projeto de produto. Ensino de engenharia.

ABSTRACT

PRELIMINARY PROJECT OF A DIDACTIC BENCH FOR THE STUDY OF BENDING IN CANTILEVERED AND FIXED ENDED BEAMS USING EXTENSOMETRY

AUTHOR: Luiz Paulo Silveira Flôres
ADVISER: Alexandre Aparecido Buenos

During the undergraduate course in Mechanical Engineering, students take several subjects, such as mechanics of solids, strength of materials and industrial instrumentation, which are taught largely with the presentation of theoretical concepts of stresses, deformations, sensors and instrumentation for measurements of quantities. For a better understanding of the content, as well as providing a practice experience, the development of tools that help in process of learning and improvement in the quality and stimulation of the student, it is a way of complementing this knowledge. The didactic bench is a device with different assembly configurations, involving different loads and beam profiles, being able to provide practical data for the study of bending in cantilevered and fixed ended beams. The present work aims to carry out the preliminary project of a didactic bench to study bending in cantilevered and fixed ended beams using strain measurements. The methodology used was projection. As a result, we have the preliminary design of a didactic bench aimed at student of Engineering courses, helping in the visualization, understanding and theoretical-practice relationship. Still the feasibility of its construction remained demonstrated, based on accessibility to materials and cost. Also stand out the alternatives of conceptions for its confection, as well as easiness and practicality of use.

Keywords: Product design. Engineering teaching.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Tensão na área A da barra submetida a uma carga axial P	19
Figura 2 - Diagramas de corpo livre, força cortante e momento fletor de uma viga biapoiada.....	20
Figura 3 - Corpo sujeito as forças de cisalhamento	21
Figura 4 – Ensaio de flexão.....	22
Figura 5 – Características do extensômetro.....	25
Figura 6 – Ponte de Wheatstone.....	27
Figura 7 – Arranjo de 14 de ponte.....	28
Figura 8 - 12 de Ponte assimétrica.....	28
Figura 9 - 12 de Ponte simétrica	29
Figura 10 - Ponte Completa	30
Figura 11 – Módulo de aquisição	31
Figura 12 - Interface do software LabVIEW	33
Figura 13 – Bancada didática para viga engastada	35
Figura 14 – Bancada didática para viga biapoiada.....	36
Figura 15 – Base de uma bancada didática	37
Figura 16 – Base de uma bancada didática	38
Figura 17 – Apoio de uma bancada didática	38
Figura 18 – Suporte de fixação de uma bancada didática	39
Figura 19 – Porta peso padrão de uma bancada didática.....	40
Figura 20 – Peso padrão de uma bancada didática.....	40
Figura 21 – Processo de desenvolvimento de produto	44
Figura 22 – Fluxo de informações e entrega do projeto informacional.....	44
Figura 23 – Entrada, fluxo de informações e entrega da etapa do projeto conceitual	45
Figura 24 - Fluxo de informações e entrega da etapa do projeto preliminar	45
Figura 25 – Entrada, Fluxo de informações e entrega da etapa de projeto preliminar e detalhado.....	46
Figura 26 - Diagrama de Mudge.....	51
Figura 27 – Estrutura funcional	56
Figura 28 - Diagrama funcional	56
Figura 29 - Princípios de soluções para a Função Segurança	59

Figura 30 - Princípios de solução para a função de sustentação da estrutura	59
Figura 31 - Princípios de solução para a função de fixação do corpo de prova	60
Figura 32 - Princípios de solução para a função de carregamento dinâmico	61
Figura 33 - Princípios de solução para a função de controlar o carregamento	61
Figura 34 - Representação do perfil de alumínio e suas dimensões em milímetros .	66
Figura 35 – Informações técnicas do perfil L.....	66
Figura 36 - Árvore do produto	68
Figura 37 – Esboço da bancada didática com suas dimensões em milímetros.	71
Figura 38 – Concepção final da bancada didática.....	72
Figura 39 – Extensômetro instalado.....	73
Figura 40 - Estrutura com as condições de contorno para simulação (a) engastes e (b) carga aplicada	77
Figura 41 - Malha refinada	78
Figura 42 - Simulação da estrutura da bancada didática com as tensões pelo critério de Von Mises.....	78
Figura 43 – Simulação da estrutura da bancada didática com o deslocamento total	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Requisitos em ordem de importância	51
Tabela 2 – Ordem de prioridade dos requisitos de projeto.....	51
Tabela 3 - Matriz decisão de requisitos para o projeto.....	64
Tabela 4 - Perfis de alumínio extrudado.....	65
Tabela 5 - Estimativa de valores da bancada didática	67
Tabela 6 - Lista de componentes da bancada didática	69

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Benchmarking de bancadas didáticas existentes.....	47
Quadro 2 - Necessidade dos clientes.....	48
Quadro 3 - Transformação das necessidades em requisitos dos clientes	49
Quadro 4 - Classificação e descrição dos requisitos.....	50
Quadro 5 - Conversão dos requisitos de clientes em requisitos de projeto.....	53
Quadro 6 - Matriz morfológica do sistema estrutural.....	57
Quadro 7 - Combinação dos princípios de solução.....	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
CAE	<i>Computer-Aided Engineering</i>
DAQ	<i>Data Acquisition</i>
NAFA	Núcleo de Automação e Processos de Fabricação
MEF	Método de elementos finitos
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria
QFD	Quality Function Deployment
FMEA	Failure Mode and Effect Analysis

LISTA DE SÍMBOLOS

E	Módulo de elasticidade
P	Designação genérica de carga
$P_{\text{máx}}$	Carga máxima
I_X	Momento de inércia ao plano yz
$M_{\text{máx}}$	Momento fletor máximo
L	Vão livre
σ_r	Tensão de ruptura do material
$\sigma_{\text{máx}}$	Tensão máxima
τ	Tensão de cisalhamento
τ_a	Tensão de cisalhamento admissível
$\tau_{\text{máx}}$	Tensão de cisalhamento máxima
δ	Flexão calculada
δ_a	Flexão admissível

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. OBJETIVOS	17
1.2. DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS	17
2. REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1. RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS	18
2.1.1. Tensão normal	18
2.1.2. Flexão	20
2.1.3. Tensão de cisalhamento	20
2.2. ENSAIO DE FLEXÃO.....	21
2.2.1. Normas de projeto	23
2.3. EXTENSOMETRIA.....	24
2.3.1. Extensômetro	24
2.3.2. Ponte de Wheatstone	26
2.3.3. Sistema de aquisição	30
2.3.4. Condicionadores de sinal	33
2.3.5. Software	33
2.4. BANCADAS DIDÁTICAS.....	34
2.4.1. Tipos de bancadas didáticas	34
2.5. COMPONENTES DA BANCADA DIDÁTICA	36
2.6. PROJETAÇÃO	41
2.6.1. Projeto informacional	41
2.6.2. Projeto conceitual	41
2.6.3. Projeto preliminar	42
2.6.4. Projeto detalhado	43
3. METODOLOGIA	44
3.1. PROJETO INFORMACIONAL.....	44
3.2. PROJETO CONCEITUAL	45
3.3. PROJETO PRELIMINAR.....	45
3.4. PROJETO DETALHADO.....	46
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
4.1. PROJETO INFORMACIONAL.....	47
4.1.1. Benchmarking dos produtos existentes	47
4.1.2. Definição dos requisitos de clientes	48
4.1.3. Valoração dos requisitos de cliente	50
4.1.4. Requisitos de projeto	52

4.1.5. Hierarquização dos requisitos de projeto	53
4.1.6. Características do projeto	54
4.2. PROJETO CONCEITUAL	55
4.2.1. Determinação da estrutura funcional	55
4.2.2. Diagrama funcional	56
4.2.3. Matriz morfológica.....	57
4.2.4. Combinação de princípios de soluções	61
4.2.5. Avaliação das concepções alternativas	63
4.3. PROJETO PRELIMINAR.....	65
4.3.1. Seleção dos materiais.....	65
4.3.2. Lista de materiais e estimativa de valores	67
4.3.3. Árvore do produto	68
4.3.4. Lista de componentes.....	69
4.3.5. Definições da estrutura.....	70
4.3.6. Instrumentação.....	72
4.3.7. Dimensionamento da estrutura da bancada	74
4.4. PROJETO DETALHADO.....	76
4.4.1. Análise computacional	76
4.4.2. Desenhos Técnicos.....	79
5. CONCLUSÃO	80
6. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	81

1. INTRODUÇÃO

Um dos fatores mais importantes na graduação de alunos de engenharia é conhecer as propriedades dos materiais, pelas suas características e também pela sua utilização em projetos. Desta forma, a utilização de um equipamento capaz de realizar ensaios mecânicos auxiliando de forma prática para a melhoria do entendimento do conteúdo nas disciplinas onde são ministrados os conceitos teóricos de tensões, deformações, deslocamentos, sensores e instrumentação para medições de grandezas, facilitará o entendimento dos alunos auxiliando no processo de aprendizagem e contribuindo para a melhoria na formação acadêmica. Mesmo com os investimentos e dedicação pela busca de melhores práticas de ensino, o corpo discente vivencia uma ânsia por aplicar de forma prática o conhecimento teórico adquirido em sala de aula (FLAUZINO et al., 2013).

Esse último pode ser medido utilizando diferentes métodos de medição, mas nenhum deles tem uma utilização tão ampla quanto os extensômetros em relação a sua aplicabilidade. Isso se dá, devido a precisão, capacidade de aquisição das deformações quanto pela facilidade de manuseio. Um equipamento que simule os diferentes carregamentos e realize a medição de deformação seria uma solução para analisar e validar a teoria ensinada em sala de aula, sendo uma base importante nas atividades de ensino, pesquisa e extensão.

Com isso, essa bancada irá auxiliar no processo de aprendizagem dos alunos de engenharia, como forma de incrementar experiências práticas em sua formação acadêmica. Também irá permitir análises e estudos de deformação por flexão em diferentes perfis de vigas, assim os alunos podem realizar experimentos, interpretar e aprender com os dados coletados através da bancada didática.

1.1. OBJETIVOS

O trabalho tem como objetivo geral desenvolver uma bancada didática para estudo de tensões e deformações em diferentes perfis engastados e biapoiados sob flexão utilizando extensometria. Especificamente pretende-se:

- a) Definir as especificações de projeto;
- b) Selecionar a concepção que melhor atenda as especificações de projeto;
- c) Verificar a viabilidade econômica do projeto;
- d) Realizar o detalhamento geométrico da bancada.

1.2. DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS

O presente trabalho está dividido em cinco capítulos principais, sendo eles: introdução, revisão bibliográfica, metodologia, resultados e discussões, e conclusões.

O Capítulo 1, Introdução, mostra a contextualização do tema, bem como as considerações iniciais e objetivo do trabalho. No Capítulo 2, Revisão bibliográfica, são apresentados os conceitos básicos, descrição de produtos existentes e normas vigentes para o desenvolvimento de bancadas didáticas, propriedades do material usado, fatores que influenciam nas medições.

No Capítulo 3, Metodologia, é apresentada a metodologia de projeto adotada neste trabalho, onde são descritos os passos do projeto com as macrofases e fases. Já no Capítulo 4, Resultados e Discussões, são apresentados os resultados e discussões obtidas a partir da aplicação da metodologia adotada.

Por fim, o Capítulo 5, Conclusão e Sugestões para Trabalhos Futuros, mostra as conclusões obtidas com o trabalho baseando nos resultados. Também são deixadas sugestões de trabalhos futuros para interessados darem continuidade nesse trabalho. Além disso, após esse capítulo podem ser vistos as referências bibliográficas, anexos e apêndices utilizados no trabalho.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Nesse capítulo foi realizada uma revisão dos conceitos básicos sobre resistência dos materiais, aplicações e estudos realizados, permitindo verificar de forma analítica os esforços que atuam na estrutura. Uma breve revisão de metodologia de projeto de produto foi realizada por ser extremamente importante para a escolha da concepção a ser desenvolvida. Também são apresentadas formas de medição e aquisição dos dados através de extensometria, bem como o estudo de bancadas didáticas existentes e seus componentes.

Ainda, são apresentados alguns conceitos básicos e informações pertinentes ao projeto da bancada didática que será desenvolvido. Desta forma, são prescritas informações sobre as bancadas didáticas, suas configurações, tipos de medição e seu funcionamento.

2.1. RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS

A seguir são apresentados elementos referentes a resistência dos materiais que influenciam no projeto de execução de uma bancada didática.

2.1.1. Tensão normal

Segundo Beer e Johnston (2012), o conceito de tensão é introduzido através de uma barra onde é aplicada uma carga axial. Assim, a tensão normal ou intensidade das forças distribuídas em uma certa seção transversal A , é obtida dividindo-se o módulo da força P da carga, pela área da seção A da barra, como demonstrado na Figura 1.

Figura 1 - Tensão na área A da barra submetida a uma carga axial P



Fonte: Norton (2013).

Já Hibbeler (2010) acresce que a carga P precisa passar pelo centroide da seção transversal, assim, os momentos serão nulos em torno dos eixos que passam por esse ponto através da distribuição uniforme de tensão. É utilizado sinal negativo para indicar uma tensão de compressão e um sinal positivo para indicar uma tensão de tração do componente.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (1)$$

Onde:

σ = tensão normal (Pa);

P = resultante da força normal interna, aplicada no centroide da área da seção transversal (N);

A = área da seção transversal da barra (m^2).

2.1.2. Flexão

A fórmula da flexão é resultado de um momento fletor que tende a produzir uma variação linear de deformações normal no interior de uma viga, desde que o material seja homogêneo e, que se aplique a lei de Hooke. Assim, relaciona-se o momento interno na viga com a distribuição de tensão por meio da utilização do equilíbrio. A tensão normal máxima que é decorrente da flexão pura (HIBBELER, 2010), que pode ser calculada pela Eq. (2):

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{MC}{I} \quad (2)$$

Onde:

$\sigma_{m\acute{a}x}$ = tensão normal máxima no elemento (Pa);

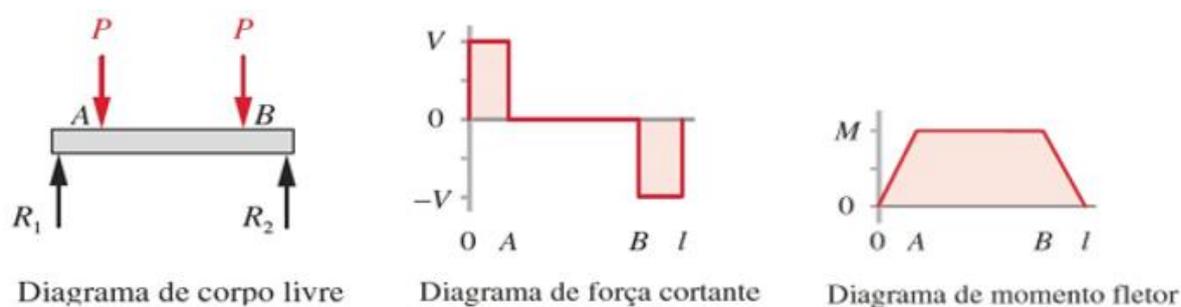
M = momento interno resultante (Nm);

I = momento de inércia da área da seção transversal (mm⁴);

c = distância perpendicular do eixo neutro ao ponto mais afastado desse eixo (mm).

A seguir é apresentada a Figura 2, que nos traz os diagramas de corpo livre, força cortante, bem como o momento fletor de uma viga biapoiada.

Figura 2 - Diagramas de corpo livre, força cortante e momento fletor de uma viga biapoiada



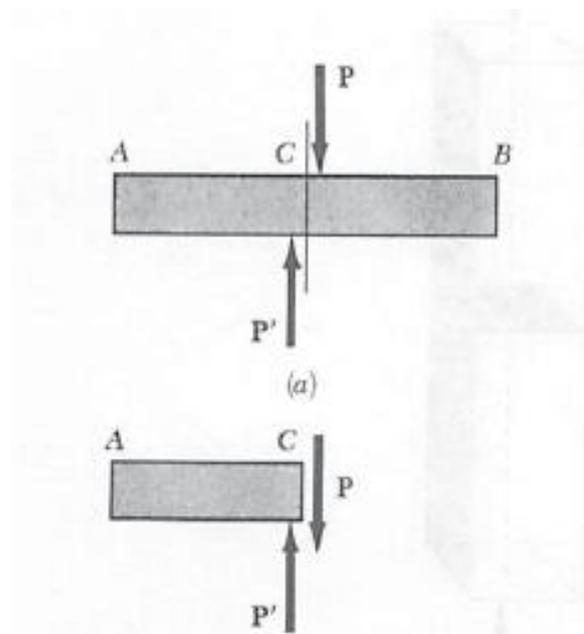
Fonte: Norton (2013).

2.1.3. Tensão de cisalhamento

Existe também um outro tipo de tensão quando são aplicadas forças transversais P e P', em sentidos opostos e de mesma intensidade, aplicadas em um corpo de seção AB, como mostra a Figura 3. Em uma seção que se encontra em C, entre os pontos de aplicação das forças, criam-se tensões de cisalhamento. A tensão

de cisalhamento é definida como a componente da tensão que age no plano da área seccionada (HIBBELER, 2010).

Figura 3 - Corpo sujeito as forças de cisalhamento



Fonte: Beer e Johnston (2012).

Segundo Beer e Johnston (2012), a tensão de cisalhamento média na seção pode ser calculada pela Eq. (3).

$$\tau_{méd} = \frac{P}{A} \quad (3)$$

Onde:

$\tau_{méd}$ = tensão de cisalhamento média na seção (Nm²);

P = força de cisalhamento interna resultante na seção determinada pelas equações de equilíbrio (N);

A = área da seção (m²).

2.2. ENSAIO DE FLEXÃO

Os ensaios mecânicos são de extrema importância, pois é possível obter elementos numéricos ou dados que podem ser utilizados para medir a resistência e

ductilidade dos materiais em várias condições de operações e o cálculo das tensões de trabalho. Para Garcia et al. (2000) esse tipo de ensaio consiste na aplicação de uma carga que vai crescendo em determinados pontos de um corpo de prova de geometria padronizada. É o tipo de ensaio de grande utilidade na indústria, porque fornece alguns dados quantitativos da deformação dos materiais quando são sujeitos a cargas de flexão. Este tipo de ensaio caracteriza-se por trabalhar apenas no regime elástico da deformação, podendo ser aplicado em materiais frágeis e duros.

Essa carga aplicada é medida instantaneamente pela célula de carga do equipamento. Dessa forma, é possível gerar um gráfico de tensão x deformação que com ajuda de um software, realiza-se a leitura desses dados gerados e assim, é possível obter as propriedades obtidas no ensaio e analisar o comportamento do material. A Figura 4 mostra como é realizado o ensaio de flexão.

Figura 4 – Ensaio de flexão



Fonte: Afinkopolimeros (2022).

Geralmente o ensaio de flexão é feito para reproduzir em laboratório as condições de prática. Então, é possível simular de várias formas diferentes esse

ensaio, desde que a peça possa ser fixada diretamente em uma máquina comum (SOUZA, 1982).

Os esforços normais e tangenciais da seção transversal do corpo que ocorrem durante o ensaio, geram um complexo estado de tensões em seu interior. Porém, admitem-se algumas hipóteses para a simplificação do problema, quais sejam:

- Corpo de prova inicialmente retilíneo;
- Material homogêneo e isotrópico;
- Validade da Lei de Hooke – material elástico;
- Consideração de Bernoulli – as seções planas permanecem planas;
- Existência de uma linha neutra no interior do corpo de prova, que não sofre tensão normal, esta linha encontra-se no centro de gravidade da seção transversal do corpo de prova, e não se desloca durante a flexão;
- Distribuição linear da tensão normal na seção transversal, com a máxima compressão na superfície interna do corpo de prova e a máxima tração na superfície externa.

2.2.1. Normas de projeto

Como legislação basilar para o desenvolvimento do presente trabalho foi utilizada a norma ASTM E855 08 2013: “*NORMA ASTM E855 08 2013: Método de teste padrão para testes de flexão de materiais planos metálicos para aplicações de mola envolvendo carga estática*”.

Essa norma traz orientações básicas para os cálculos e auxilia na determinação de solicitações e as combinações de solicitações as quais devem ser consideradas, os tipos de aplicação e como os testes devem ser realizados.

A norma utilizada compreende os seguintes métodos de teste:

- Método de teste A - um teste de viga engastada;
- Método de teste B - um ensaio de viga de três pontos (viga apoiada em dois apoios com uma carga central);
- Método de teste C - ensaio de viga de quatro pontos (viga apoiada em dois apoios e carregada em dois pontos com espaçamento igual entre cada apoio).

2.3 EXTENSOMETRIA

A extensometria é uma técnica bastante utilizada visando a finalidade de analisar experimentalmente as tensões e deformações em elementos de máquinas e elementos mecânicos. Elementos que através de carregamento ou variação de temperatura apresentam deformações. Para se realizar uma análise de deformações através da extensometria, é formado um sistema com sensores de deformação, extensômetro. Com isso a deformação mecânica é transformada em variação equivalente da sua resistência elétrica.

Os extensômetros são montados através de um circuito elétrico chamado de ponte de Wheatstone, que é capaz de realizar a medição de variação da resistência elétrica em seus braços do circuito. Esse circuito é alimentado por uma corrente elétrica, por uma fonte de energia. Devido à deformação ocorrida na estrutura, a variação de tensão de saída da ponte, diante da necessidade de recuperação do equilíbrio da ponte através de um amplificador de voltagem, é lida em uma placa de aquisição de dados.

Os dados coletados pela placa geralmente são de tensão elétrica. Esses dados são processados e transformados em grandezas que são especificadas de acordo com a utilização do operador, como tensão ou força. Conforme constatado por Charles Wheatstone (1843), através dos efeitos da variação da resistência de um condutor elétrico e da evolução da eletroeletrônica, esses podem ser utilizados para a medição de deformações.

2.2.2. Extensômetro

Para Weber (2008), os extensômetros (*strain gauges*) são dispositivos de medida que transformam pequenas variações nas dimensões em variações equivalentes em sua resistência elétrica. São sensores utilizados para medir deformações em diversos tipos de estrutura. Os extensômetros disponibilizam um excelente método de conversão de deformações em quantidade elétrica. Tendo como características das medidas com extensômetros:

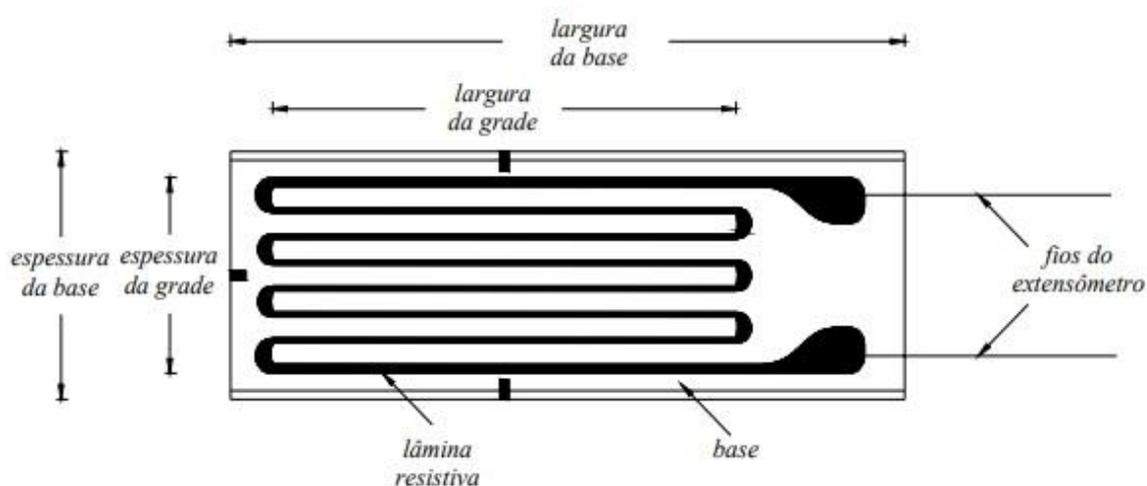
- Alta precisão de medição;
- Ótima resposta aos fenômenos dinâmicos;
- Excelente linearidade;

- Possibilita a medida em locais remotos;
- Possibilidade de medição em ampla faixa de temperatura;

Segundo Doebdlin (2007), os extensômetros de resistência elétrica são principalmente utilizados em dois casos: a construção de transdutores de força, pressão e torque e análise experimental de tensões em estruturas e máquinas. Sendo colados diretamente na estrutura que será medida com uma fina camada adesiva, que serve para transmitir as deformações da estrutura ao extensômetro, sendo também utilizada como isolante.

A grade é colada à uma fina película, chamada de veículo, que é colada na estrutura que se deseja fazer o teste. Assim, a deformação sofrida pela estrutura de teste é transferida diretamente para o extensômetro, que responde com uma mudança linear na sua resistência elétrica (BORCHARDT, 1982). A Figura 5 demonstra um extensômetro e seus componentes.

Figura 5 – Características do extensômetro



Fonte: Andolfato, Camacho e Brito (2004).

Os extensômetros são produzidos com materiais que apresentam bastante sensibilidade (K_g) e resistividade (ρ), soldabilidade boa e resistência a corrosão. É de extrema importância que o material apresente uma tensão de escoamento alta, baixa histerese e baixa sensibilidade a variação térmica (WEBER, 2008).

Eles funcionam por meio da lei de Kelvin, ou seja, através da variação de seu comprimento uma variação em sua resistência elétrica ocorre. A medida de tensão é

obtida pela deformação do extensômetro colado a peça. A medida dessa deformação pode ser demonstrada através da Eq. (4).

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (4)$$

Onde:

σ = tensão (Pa);

E = módulo de Young (N/m²);

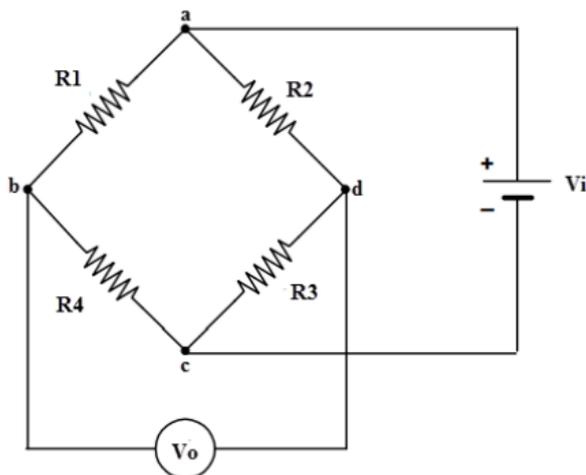
ε = deformação específica.

2.2.3. Ponte de Wheatstone

Foi desenvolvida em 1843 por Charles Wheatstone é um circuito de medição, onde o extensômetro é uma das resistências dos componentes do circuito. Uma corrente elétrica passa por esses componentes e obtém-se um sinal útil. No momento que a resistência do extensômetro se modifica devido a uma deformação, o circuito da Ponte perde sua simetria e se torna balanceada. A saída de tensão da ponte é proporcional ao desbalanceamento da mesma (GALLINA, 2003).

A Figura 6 mostra a estrutura do circuito de uma Ponte de Wheatstone, que consiste de quatro braços resistivos R_1 , R_2 , R_3 , R_4 representam os extensômetros. Eles são conectados com uma fonte de alimentação entre dois pontos centrais. A estrutura constitui divisores independentes aos pares, onde um deles tem como função comparar e o outro par realizar as medições das variações das resistências.

Figura 6 – Ponte de Wheatstone



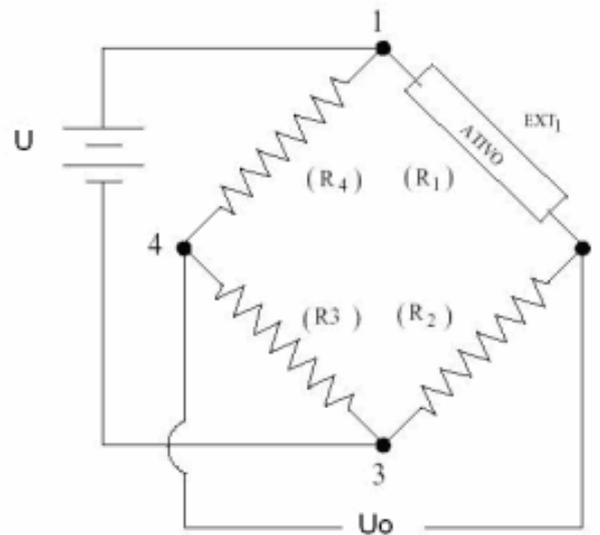
Fonte: Adaptado de Adolfato, Camacho e Brito (2004).

A medição com a Ponte de Wheatstone é realizada de forma que cada resistores presentes possui sua função no processo da medição. A resistência R_1 simboliza o extensômetro ativo, fixado sobre a estrutura que é deformada. O extensômetro R_2 tem a função de eliminar os efeitos de origem térmica para que elas não influenciem nas medições das deformações detectadas. Já R_3 e R_4 são as resistências elétricas puras (VALIDO; SILVA, 1997).

O método de medição de deformação, possui quatro tipos de ligações de ponte de Wheatstone com extensômetros. A ligação de $1/4$ de ponte, a com $1/2$ ponte assimétrica, $1/2$ ponte simétrica e a ligação em ponte completa, onde a configuração da ponte que será utilizada dependerá do estado de tensão do local de medição (HOFFMANN, 1989).

- **Arranjo - $1/4$ de Ponte**

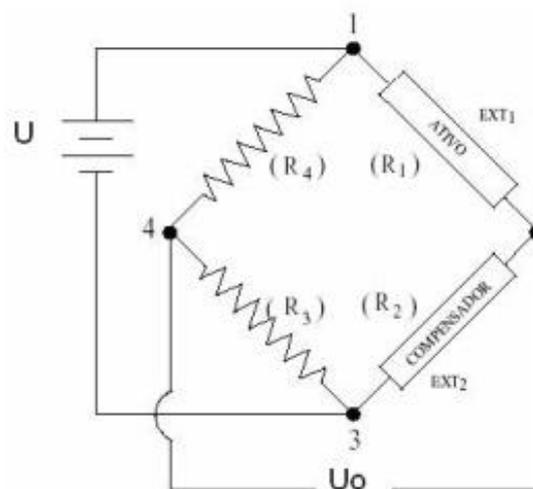
Se a temperatura não exerce alguma influência muito significativa nas medidas das deformações, como em ensaios de curta duração ou dinâmicos, é substituído um dos resistores R_1 do circuito por um extensômetro ativo e os demais resistores selecionados com o intuito de satisfazer o equilíbrio da Ponte, conforme apresenta a Figura 7.

Figura 7 – Arranjo de $1/4$ de ponte

Fonte: Carpes (2006).

- **Arranjo - $1/2$ de Ponte assimétrica**

Neste tipo de arranjo, substituem-se as resistências R_1 e R_2 por extensômetros. Porém, um desses dois extensômetros (Figura 8), será responsável pela compensação do efeito da temperatura sobre o circuito, de maneira que evite que o mesmo apresente até 50% a menos de eficiência devido a influência da temperatura na medida.

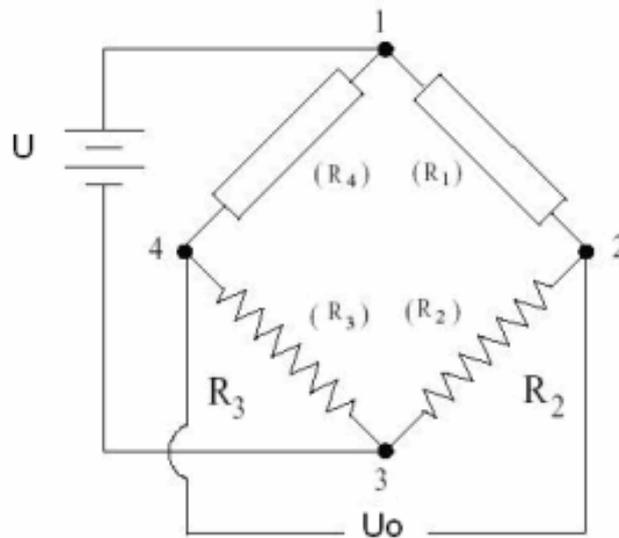
Figura 8 - $1/2$ de Ponte assimétrica

Fonte: Carpes (2006).

- **Arranjo - $1/2$ de Ponte simétrica**

Neste tipo, os resistores R_1 e R_4 são substituídos por extensômetros, como apresentado na Figura 9, onde os demais resistores são mantidos com o mesmo valor. Neste tipo de arranjo, o circuito é auto-compensado em relação aos efeitos da temperatura sem reduzir a sua sensibilidade.

Figura 9 - $1/2$ de Ponte simétrica

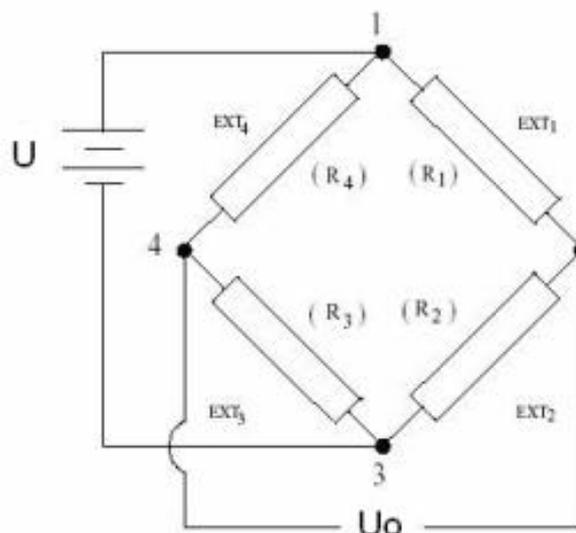


Fonte: Carpes (2006).

- **Arranjo – Ponte completa**

Nos arranjos de Ponte completa, todos os resistores do circuito são substituídos por extensômetros (Figura 10). Este é o tipo de arranjo mais recomendado para uso de transdutores como célula de cargas, submetidas aos carregamentos dinâmicos e estáticos (ALMEIDA,1996).

Figura 10 - Ponte Completa



Fonte: Carpes (2006).

Segundo Almeida (1996), todos os tipos de configurações de Ponte na investigação experimental, a colagem dos extensômetros é feita em peças estruturais afastadas dos condicionadores de extensometria. Dependendo da distância entre o condicionador e o sensor, o sinal emitido pelo sensor, proporcional à deformação da peça, que pode ser atenuado significativamente ou sofrer perturbações, como ruído, o que acarreta erros de medida da grandeza de interesse.

2.2.4. Sistema de aquisição

Segundo Rodrigues (2002), o controle de dados e os sistemas de aquisição através do computador são utilizados quando a coleta dos dados envolve bastante tempo de aquisição manual, bem como quando uma série de cálculos complexos e que possam demorar muito tempo, precisam ser obtidos durante uma dinâmica onde a quantidade de dados é muito grande.

A exatidão e precisão dos instrumentos utilizados nas medições é relacionada diretamente a confiabilidade dos dados de um teste. Um sistema de aquisição de dados, exato e preciso, é fruto da combinação da qualidade da calibração de cada um dos instrumentos que o compõem, dos sensores, do circuito de condicionamento (ASAD *et al.*, 2011).

Atualmente, o desenvolvimento tecnológico possibilita a utilização de equipamentos que facilitam os meios entre a medida e o resultado, como, por exemplo, com a utilização do sistema de aquisição de sinais da NI (National Instruments), que possibilita a realização de toda a configuração do sistema através de *software*, com opções de escolhas de taxas de amostragem e conversão de escalas em tempo real, arranjo de Pontes de Wheatstone. Na Figura 11, exemplo de um módulo de aquisição.

Figura 11 – Módulo de aquisição



Fonte: National Instruments, 2022.

Para qualquer estrutura de aquisição de sinais, existem algumas características que precisam ser consideradas, por influenciarem diretamente sobre a validade e qualidade do sinal coletado, conforme Creus (1985). Podemos listar as seguintes:

- **Resolução**

Segundo Beckwith, Marangoni e Lienhard (1995), a resolução é determinada pelo menor incremento de mudança na proporção que a escala de um equipamento pode medir. Em quantidades relativa, a resolução descreve o grau ao qual uma mudança pode ser detectada.

- **Precisão**

A precisão dos dados coletados pelo sinal de aquisição depende do dispositivo utilizado para a aquisição. A avaliação da precisão requer, um conhecimento dos dados e as fontes que podem contribuir para o erro. Para Beckwith, Marangoni e Lienhard (1995), ela é representada pela diferença entre os valores medidos pelo instrumento durante medidas repetidas da mesma magnitude, sendo ele determinado por meio da análise estatística de medidas repetidas.

- **Amostragem**

Para que o processo de amostragem do sinal não venha a apresentar perda de dados, é necessário que a frequência de amostragem seja, pelo menos 2 vezes, maior à frequência máxima presente no sinal. Se a frequência de amostragem for baixa, acontece o efeito de *aliasing*, acarretando o surgimento de frequências que aparentam serem falsas no sinal mostrado, acarretando a perda de informações importantes, como um pico, positivo ou negativo (RODRIGUES, 2002).

- **Calibração**

É um procedimento relevante para se alcançar uma maior precisão na medição realizada com o equipamento. É possível escolher vários tipos de sistemas de calibração, onde cada um possui uma precisão diferente. Basicamente se tem uma relação linear entre a resposta e excitação. Segundo Creus (1985), na prática, geralmente os instrumentos determinam valores inexatos na saída, onde nem sempre são iguais aos valores de entrada, constituindo o erro da medida. O erro é inevitável e universal, acompanhando toda a medida, ainda que ela seja conduzida de forma elaborada ou repetida várias vezes. Desta maneira, o valor verdadeiro não pode ser estabelecido com exatidão, sendo necessário encontrar os limites que o definem, de maneira que seja prático calcular a incerteza da medida.

2.2.5. Condicionadores de sinal

Os sinais elétricos provenientes dos sensores, por vezes podem ser muito perigosos para serem medidos diretamente pelo sistema de aquisição ou muito ruidosos. Os condicionadores colocam o sinal em um formato adequado para a entrada de um sistema DAQ. Esse tipo de circuito pode incluir filtragem, ampliação ou podem ser projetados para a medição de sensores específicos (NI,2022).

2.2.6. Software

O software é uma plataforma de programação gráfica que possibilita uma integração com o módulo de aquisição de dados, através de protocolos de comunicação via cabo USB, possibilitando controle total dos testes a partir de um computador.

O LabVIEW é um ambiente de programação gráfica versátil e poderoso, especialmente desenvolvido para facilitar o controle de instrumentos utilizados em testes, onde é realizada a aquisição e análise dos dados produzidos nos ensaios (WANG et al., 2012).

Segundo Wang et al., (2012), o LabVIEW é uma escolha inteligente para a manipulação dos dados brutos coletados com o dispositivo DAQ e criar uma aplicação para cada utilização específica. Na Figura 12, interface do LabVIEW.

Figura 12 - Interface do software LabVIEW



Fonte: NI (2022).

2.3. BANCADAS DIDÁTICAS

Para Giordani *et al.* (2003), as bancadas didáticas são instrumentos que tem a função de auxiliar na execução dos testes e experimentos. Elas possibilitam ao operador obter uma variação nos seus parâmetros de teste, permitindo montar uma infinidade de sistemas e tipos de ensaios diferentes.

As bancadas didáticas são importantes ferramentas de aprendizado, pois possibilitam a consolidação e a análise da teoria ensinada em sala de aula. A utilização dessas bancadas auxilia no desenvolvimento de discentes de áreas diversas, principalmente nos cursos de bacharelado em engenharia, pois através existe a possibilidade de contato com a prática, onde são simulados processos industriais e sistemas reais (FABIÁN, 2017).

As bancadas abordam uma elevada quantidade das dificuldades técnicas, enfrentadas em situações reais do cotidiano. Com a atualização do mercado e o avanço da tecnologia, formar profissionais qualificados e preparados para atender as demandas do mercado de trabalho e da indústria é imprescindível (TEIXEIRA et al., 2018).

Alguns modelos de bancadas existentes foram pesquisados para compreender melhor o que existe de disponível no mercado, bem como compreender o funcionamento e os componentes utilizados. Isso serve de base para o desenvolvimento da bancada didática proposta neste trabalho, sendo os mesmos apresentados em detalhes a seguir.

2.3.1. Tipos de bancadas didáticas

Dentre as bancadas existentes foram encontrados alguns modelos tais como bancada didática de viga engastada e viga biapoiada.

- **Bancada didática de viga engastada**

Esse tipo de bancada tem como objetivo fazer a medição da flexão em uma viga engastada, onde toda a carga recebida é transmitida a um único ponto de fixação. Nesta bancada, a viga tem as dimensões da seção transversal muito menores do que o comprimento e é submetida à uma carga perpendicular ao seu eixo longitudinal. A

carga perpendicular ao eixo longitudinal causa a deformação da viga.

A Figura 13, apresenta uma bancada para viga engastada onde a viga é fixada por um ponto.

Figura 13 – Bancada didática para viga engastada



Fonte: Edutech Lahore (2021).

Para a realização do teste de flexão em bancada de viga engastada, o corpo de prova em formato de barra, é colocado e fixado no apoio por uma de suas extremidades de maneira que o corpo de prova fique rígido e firme. Assim, a probabilidade de algum erro de medição devido a fixação diminui drasticamente. Após, com o corpo de prova já alocado, é posicionado o porta peso na região onde se deseja aplicar a carga, então, é colocado um peso padrão de cada vez de forma crescente e realizada a medição. Durante o ensaio, a carga que é aplicada é medida em tempo real pelos extensômetros ou relógios comparadores, enquanto a deflexão do corpo de prova é medida simultaneamente durante todo o ensaio.

- **Bancada didática de viga biapoiada**

O quadro principal do aparelho consiste em um membro cruzado superior carregando escalas graduadas e dois membros inferiores aparafusados as pernas T

para formar um conjunto rígido. As células de cargas e o pilar de suporte da viga deslizam ao longo dos membros inferiores e podem ser firmemente fixados em qualquer posição. Nesse tipo de bancada, o corpo de prova é apoiado em dois pontos diferentes e a carga é aplicada entre eles. A Figura 14, apresenta uma bancada para viga biapoiada.

Figura 14 – Bancada didática para viga biapoiada



Fonte: Tecquipment (2021)

Para a realização do teste de flexão em bancada de viga biapoiada, o corpo de prova em formato de barra, é posicionado de maneira que seja possível fixá-lo em dois apoios, por duas extremidades ao mesmo tempo, niveladas. Após isso, com o corpo de prova já alocado e com a distância desejada, são posicionados um ou mais porta pesos nas regiões onde se deseja aplicar as cargas, então, são colocados os pesos padrões de forma crescente. Durante o ensaio, a carga que é aplicada é medida em tempo real pelos extensômetros ou relógios comparadores, enquanto a deflexão do corpo de prova é medida simultaneamente durante todo o ensaio.

2.4. COMPONENTES DA BANCADA DIDÁTICA

As bancadas didáticas são formadas pelos seguintes elementos principais: sapata niveladora de sustentação, base, apoio, suporte de fixação, porta peso padrão e as massas padronizadas (pesos padrões), a seguir descritos.

- **Apoio de sustentação**

Peça que tem como função promover uma melhor conservação da estrutura preservando os elementos que a compõe, prolongando sua vida útil e melhorando a eficiência do apoio da bancada no local de utilização, devido a possibilidade de regulagem de altura. A Figura 15, apresenta o apoio.

Figura 15 – Base de uma bancada didática

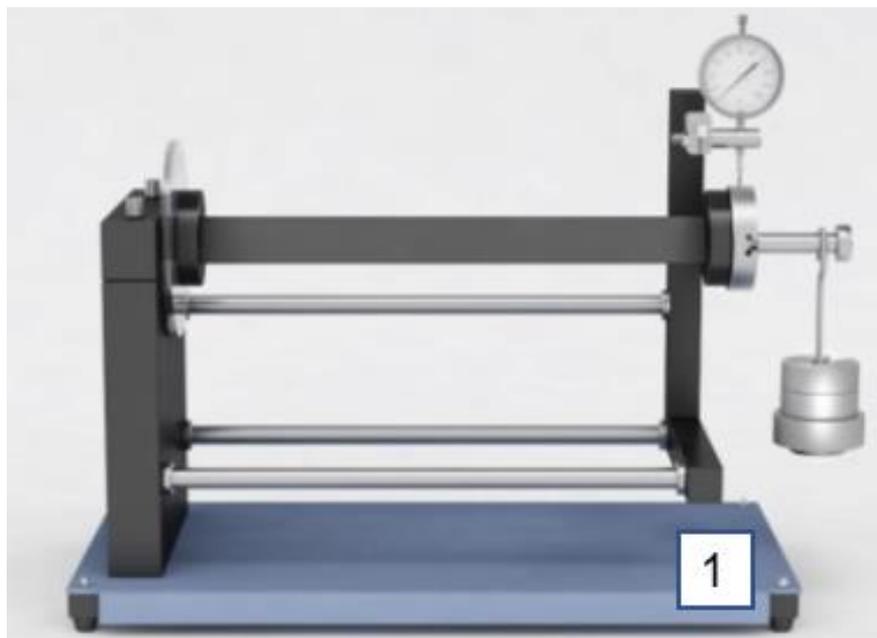


Fonte: Jeet Tecnologia em Plástico (2022)

- **Base**

É a estrutura de base do equipamento, que equilibra e sustenta todo o conjunto da bancada. A base é responsável por suportar todos os componentes da bancada, pois é nela que o apoio é fixado. Existe uma grande variedade de tipos de base, normalmente são construídas em formato “T”, “J”, “V” ou no formato de “retângulo”. A Figura 16, apresenta a base representado pelo número 1.

Figura 16 – Base de uma bancada didática



Fonte: adaptado de Infnit Technologies (2022).

- **Apoio**

O apoio pode ser posicionado em qualquer ponto da estrutura possibilitando diferente tipos de medições e tipos de perfis. Ele é responsável por apoiar e estabilizar os corpos de prova e o conjunto de medição. A Figura 17, apresenta o apoio representado pelo número 2.

Figura 17 – Apoio de uma bancada didática

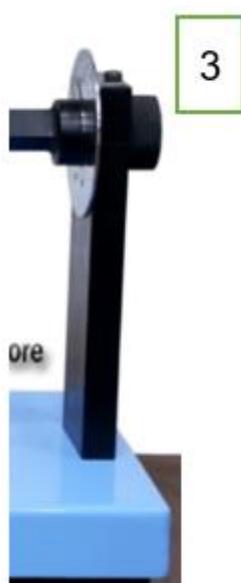


Fonte: adaptado de Infnit Technologies (2022)

- **Suporte de fixação**

Esse componente é responsável por interligar e fixar o corpo de prova no apoio da bancada, garantindo assim a transmissão dos esforços do ensaio ao corpo de prova. O seu encaixe é capaz de se adaptar com vários tipos de corpos de prova, com ele o objeto de experimento pode ser posicionado e apertado. A Figura 18, apresenta o apoio representado pelo número 3.

Figura 18 – Suporte de fixação de uma bancada didática



Fonte: adaptado de Edutech (2021).

- **Porta peso padrão**

Conhecido também como gancho de apoio, ele é colocado diretamente no corpo de prova. É responsável por sustentar os pesos com massa aferida para a realização do experimento de medição. A Figura 19, apresenta o porta peso padrão.

Figura 19 – Porta peso padrão de uma bancada didática



Fonte: Metaquimica (2022).

- **Peso padrão**

O peso padrão é o responsável por alterar as condições dos testes. Eles são colocados diretamente no porta peso padrão e são empilhados até que o peso desejado seja alcançado. A Figura 20, apresenta os pesos padrão.

Figura 20 – Peso padrão de uma bancada didática



Fonte: Solotest (2021).

2.5. PROJETAÇÃO

Segundo Shigley, Mischke e Budynas (2005), projetar consiste tanto em formular um plano para a satisfação de uma necessidade específica quanto em solucionar um problema. Se tal plano resultar na criação de algo tendo uma realidade física, então o produto deverá ser funcional, seguro, confiável, competitivo, utilizável, manufaturável e mercável.

2.5.1. Projeto informacional

O projeto informacional tem a finalidade de analisar detalhadamente o problema do projeto, destinado a buscar as informações necessárias para que se alcance o entendimento do problema. Nessa etapa de desenvolvimento, ainda que não exista uma definição precisa do produto, é necessário traduzir os requisitos do cliente em requisitos possíveis de quantificação (PAHL *et al.* 2007).

2.5.2. Projeto conceitual

Para o projeto conceitual da bancada didática proposta nesse trabalho é realizada análise aprofundada das necessidades do projeto com o objetivo de gerar concepção que solucione o problema. Nessa fase ocorre a concepção da bancada didática, por meio da busca, criação, representação e seleção de soluções (ROZENFELD *et al.*, 2006).

Esta etapa é onde utiliza-se de criatividade e conhecimento para transformar as ideias em algo concreto através de modelos e protótipos, auxiliando no processo de decisão das concepções. A fim de ser selecionada uma concepção é necessário, primeiramente, uma análise comparativa entre as alternativas, levando em consideração as especificações do projeto, o custo meta, risco do desenvolvimento do projeto de produto e do plano de manufatura (complexidade, prazo, custo e etc.) (BACK *et al.*, 2008).

Esta etapa do projeto tem por objetivo o desenvolvimento das concepções do produto, as quais precisam ser eficazes para satisfazer as necessidades levantadas pelo desejo dos clientes, já explanadas em fase anterior. Através das definições dos

requisitos do projeto informacional, é possível prosseguir para o projeto conceitual e definir suas funções e conceito. Desta forma, esta etapa será responsável por definir as funções que irão satisfazer as especificações técnicas e seus requisitos.

As soluções encontradas nessa etapa serão utilizadas como o projeto conceitual da bancada didática. Esta é a etapa de maior potencial de otimização do projeto, onde representa o maior benefício e o custo mais baixo (BAXTER, 2000).

2.5.3. Projeto preliminar

A partir da definição de uma concepção inicial viável tecnicamente, a próxima etapa é o projeto preliminar, no qual são realizados os cálculos, dimensionamento, análises estáticas e dinâmicas e simulações numéricas (VALDIERO, 1999).

Segundo Pahl *et al.* (2007), as vezes não é possível a elaboração de um plano que seja definido para esta etapa, porém, são sugeridas abordagens gerais com as principais fases do trabalho, onde as soluções dos problemas devem ser orientadas, considerando-se a ocorrência de problemas e modificações devem ser executadas.

Conforme Valdiero (1997) descreve, o projeto preliminar é a fase de projeto em que se realizam “os cálculos, dimensionamentos, análises estáticas e dinâmicas, simulações numéricas e/ou otimizações necessárias”. Esta é a etapa, onde a concepção que foi selecionada no capítulo anterior, será estudada, melhorada e mensurada através de variados aspectos relacionado ao tema proposto por esse trabalho.

Assim, esta etapa tem a finalidade de estabelecer a configuração final da bancada didática e apresentada a maquete eletrônica, desenvolvido em *software* de CAD/CAE, onde sejam atendidas as especificações de projeto, análises estáticas, simulações numéricas dos componentes e a determinação da sua viabilidade. Por fim, uma análise da estrutura da bancada é realizada analiticamente, onde são considerados os materiais que serão utilizados na fabricação do protótipo da bancada didática e também, será apresentada a análise da estrutura através de método de elementos finitos (MEF) e seus resultados.

2.5.4. Projeto detalhado

O projeto detalhado é a parte do processo de projeto que completa a incorporação de produtos técnicos com instruções finais sobre as formas, dimensões e características de superfície de todos os componentes individuais, a seleção definitiva de materiais e uma análise final dos métodos de produção, procedimentos e custos. Os documentos elaborados nessa etapa são a base para a execução de ordens e para a programação de produção, ou seja, para o planejamento e controle de operações (PAHL *et al.*, 2007).

Nesta última etapa é desenvolvido o projeto detalhado da bancada didática, que se destina ao detalhamento completo do projeto. Juntamente com o detalhamento de cada componente, são efetuadas melhorias de detalhes com relação à materiais, tolerâncias, forma, superfícies e ajustes.

3. METODOLOGIA

O presente trabalho usa a metodologia baseada em Romano (2013), no qual é separado por macro fases de planejamento, projeção e implementação, dando ênfase a projeção, contendo as fases de projeto informacional, conceitual, preliminar e detalhado. A Figura 21, ilustra o processo de desenvolvimento do produto, com destaque na macro fase de projeção e as fases subsequentes as quais são apresentadas nesse trabalho.

Figura 21 – Processo de desenvolvimento de produto

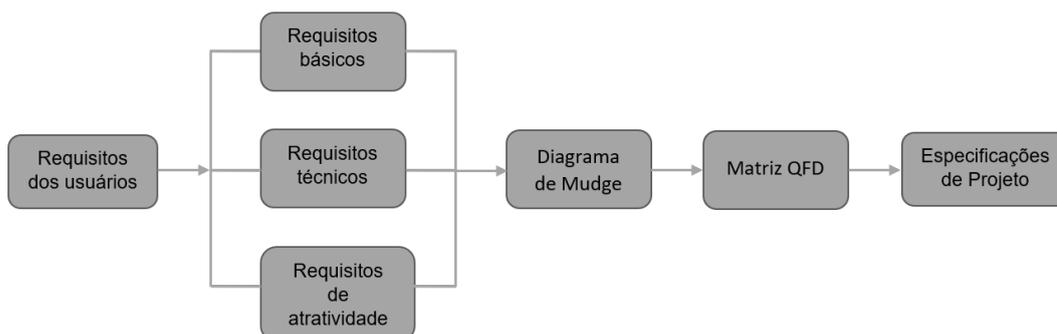


Fonte: adaptado de Romano (2013).

3.1. PROJETO INFORMACIONAL

As especificações de projeto são resultantes da finalização dessa etapa de modelagem de produtos, onde são listados os objetivos que o produto que está sendo projetado deve conter, o que é chamado de requisito de projeto. A Figura 22 demonstra o fluxo de informações de projeto informacional e a saída do projeto informacional, onde alimenta com informações o projeto conceitual.

Figura 22 – Fluxo de informações e entrega do projeto informacional

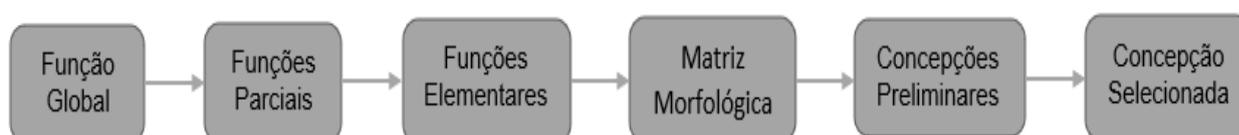


Fonte: Autor (2022).

3.2. PROJETO CONCEITUAL

É realizada inicialmente a análise funcional, transformando os requisitos do projeto em funções que são necessárias para o projeto. A determinação do problema deste projeto compreende a realização de demonstração de flexão em barras para aula prática de mecânica dos sólidos de forma prática, precisa e segura. A Figura 23, demonstra o fluxo de informações do projeto conceitual.

Figura 23 – Entrada, fluxo de informações e entrega da etapa do projeto conceitual



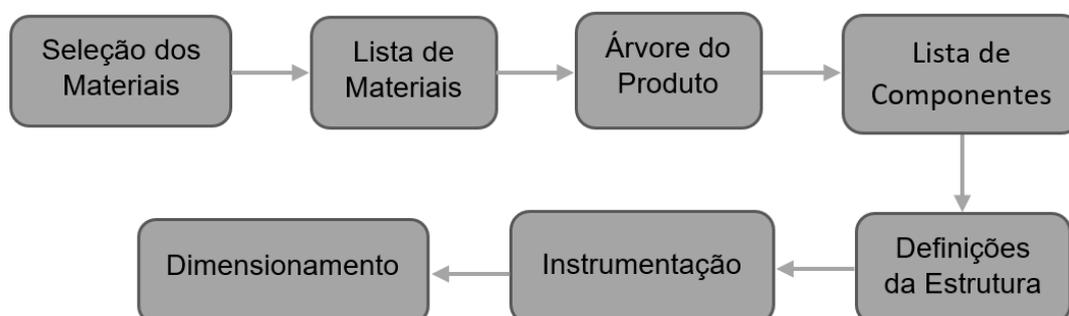
Fonte: Autor (2022).

3.3. PROJETO PRELIMINAR

Na fase do projeto preliminar estão definidas as especificações da geometria do projeto, logo após o levantamento dos dados obtidos através do projeto conceitual.

Essa fase tem por finalidade o dimensionamento dos componentes da bancada didática, especificamente os perfis da estrutura responsáveis por suportarem as cargas aplicadas no ensaio. Aqui atêm-se as particularidades da bancada didática, como, a definição do tipo de base, colocação do corpo de prova, aplicação da carga, os materiais e a segurança. Como mostra a Figura 24.

Figura 24 - Fluxo de informações e entrega da etapa do projeto preliminar



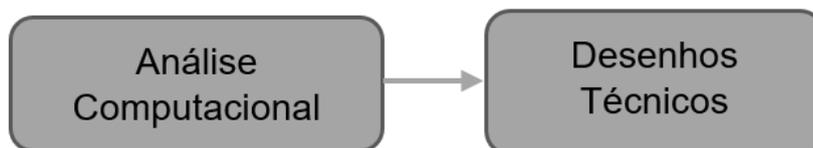
Fonte: Autor (2022).

3.4. PROJETO DETALHADO

Nessa fase é utilizado como entrada o projeto conceitual definido anteriormente, tornando possível o detalhamento do conceito. Desta forma é possível fazer o detalhamento do sistema e componentes. O desenvolvimento deste projeto foi realizado através da utilização de ferramentas de modelagem com o auxílio do computador para o detalhamento dos desenhos dos componentes. As especificações dos materiais utilizados foram baseadas nas solicitações mecânicas previstas e aplicadas em software de modelagem digital e análise numérica (simulação). Pela dificuldade de se obter as propriedades dos materiais através de fornecedores, foram utilizadas como referência, as propriedades mecânicas encontradas na literatura e em catálogos de materiais.

Essa é a última fase de projeção onde é realizada a aprovação da bancada didática, são decididos os detalhes de finalização do projeto, como o detalhamento do plano de manufatura e finalização das especificações dos componentes. A Figura 25, ilustra a etapa onde são entregues a documentação de dimensionamento, detalhamento e sua finalização.

Figura 25 – Entrada, Fluxo de informações e entrega da etapa de projeto preliminar e detalhado



Fonte: Autor (2022).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nessa etapa são apresentados os resultados obtidos com a aplicação da metodologia de projeto de produto descrita no capítulo anterior, para que ao final do projeto sejam alcançados os objetivos propostos.

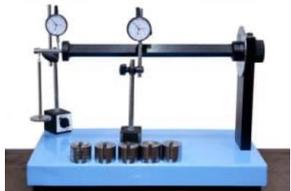
4.1. PROJETO INFORMACIONAL

4.1.1. *Benchmarking* dos produtos existentes

Para a realização do *benchmarking*, foram realizadas buscas de bancadas didáticas de inúmeras empresas que fornecem e produzem esse tipo de produto e, que atendessem ao objetivo geral ou que de alguma forma tornasse esse objetivo viável. Todos os itens que constam no Quadro 1, foram classificados em diversas categorias para delimitar suas funções.

Quadro 1 - Benchmarking de bancadas didáticas existentes

(continua)

Marca	Tipo	Arquitetura	Estrutura	União	Modelo
Edutech Lahore	Engastada	Integrada	Retangular	Parafusada	
Tecquipment	Biapoiada	Modular	Quadrada	Parafusada	
Infinet Technologies	Engastada	Integrada	Retangular	Soldada	
PA Hilton	Biapoiada	Modular	Quadrada	Parafusada	

Quadro 2 - Benchmarking de bancadas didáticas existentes

(conclusão)

Marca	Tipo	Arquitetura	Estrutura	União	Modelo
Tecquipment	Biapoiada	Modular	Retangular	Parafusada	
Echoscaninc	Biapoiada	Modular	Quadrada	Parafusada	
Armfield	Biapoiada	Integrada	Retangular	Parafusada	

Fonte: Autor (2022)

4.1.2. Definição dos requisitos de clientes

A bancada para o teste de flexão servirá para o desenvolvimento de novos componentes, possibilitando o estudo de novos materiais, processos de fabricação e geometrias. Os requisitos do usuário são baseados na necessidade do desenvolvimento de uma bancada para realizar testes de flexão de vigas engastadas e biapoiadas. No Quadro 2 são identificados os requisitos para o desenvolvimento do presente projeto.

Quadro 2 - Necessidade dos clientes

Nº	Descrição
1	Ser seguro.
2	Ter vida útil elevada.
3	Ter capacidade para suportar as cargas aplicadas.
4	Ser fabricado com materiais leves.
5	Ser compatível com a base de apoio.
6	Ser fácil de manusear.
7	Ter fácil manutenção.
8	Ter baixo custo de fabricação.

Fonte: Autor (2022)

Através da metodologia e identificando as necessidades e vontades dos clientes, foram estabelecidos alguns requisitos de cliente, apresentados no Quadro 3.

Quadro 3 - Transformação das necessidades em requisitos dos clientes

Nº	Necessidades dos clientes	Nº	Requisitos de cliente
1	Ser seguro.	1	Não conter cantos pontiagudos ou cortantes.
2	Ter vida útil elevada.	2	Ser resistente à corrosão.
		3	Ser mecanicamente resistente.
3	Ter capacidade para suportar as cargas aplicadas.	4	Possuir materiais que resistam aos esforços aplicados.
4	Ser fabricado com materiais leves.	5	Oferecer facilidade de transporte.
5	Ser compatível com a base de apoio.	6	Permitir utilização em qualquer tipo de superfície.
6	Ser fácil de manusear.	7	Possuir comandos e utilização de fácil operação.
7	Ter fácil manutenção.	8	Possuir peças de fácil montagem e desmontagem.
8	Ter baixo custo de fabricação.	9	Ter materiais disponíveis no mercado e de baixo custo.

Fonte: Autor (2022)

Conforme o Quadro 3, as necessidades dos clientes de um projeto podem ser satisfeitas por mais de um requisito, da mesma forma, que um requisito pode satisfazer mais de uma necessidade. Com isso, a classificação e a descrição dos requisitos de clientes são apresentadas no Quadro 4.

Quadro 4 - Classificação e descrição dos requisitos

Nº	Classificação	Requisito	Descrição
1	Requisito Básico	Não conter cantos pontiagudos ou cortantes.	O aparelho tem como uma das prioridades, a segurança durante a utilização do mesmo. Esse Item se refere a segurança que o aparelho proporciona ao operador.
2	Requisito Básico	Ser resistente à corrosão.	O aparelho deve ter uma boa resistência à corrosão visto que a bancada poderá ser utilizada em locais onde serão passíveis de intempéries.
3	Requisito Básico	Ser mecanicamente resistente.	O aparelho deve ser composto por materiais resistentes.
4	Requisito Básico	Possuir materiais que resistam aos esforços aplicados.	O aparelho deve suportar as cargas necessárias para os experimentos.
5	Requisito Básico	Oferecer facilidade de transporte.	O aparelho deve ser leve para poder ser transportado com facilidade.
6	Requisito Técnico	Permitir utilização em qualquer tipo de superfície.	O aparelho deve ser compatível com o local de utilização.
7	Requisito de Atratividade	Possuir comandos e utilização de fácil operação.	O aparelho pode ser operado por qualquer pessoa, depois de algumas instruções.
8	Requisito de Atratividade	Possuir peças de fácil montagem e desmontagem.	Torna o aparelho mais barato.
9	Requisito de Atratividade	Ter materiais disponíveis no mercado e de baixo custo.	Custo de fabricação do aparelho mais barato.

Fonte: Autor (2022)

4.1.3. Valoração dos requisitos de cliente

O método utilizado para a valoração dos requisitos de clientes é o diagrama de Mudge. É uma ferramenta que permite comparar aos pares um conjunto de critérios, para que ao final se possa conhecer a sua importância relativa. Ele é preenchido com o valor numérico (1 a 9), que representam os requisitos dos clientes, junto com sua respectiva importância (A, B ou C), como demonstra a Figura 26.

Figura 26 - Diagrama de Mudge

DIAGRAMA DE MUDGE										
	2	3	4	5	6	7	8	9	Soma	%
1	1B	3B	4B	1A	1B	1A	1B	1B	22	19,65
	2	3B	4B	2B	2B	2B	2B	2B	15	13,39
		3	4C	3A	3A	3A	3B	3A	29	25,89
			4	4A	4A	4A	4A	4B	30	26,78
				5	6B	5B	8C	5C	4	3,58
					6	6B	8C	6B	9	8,09
						7	8C	7C	1	0,89
							8	8C	2	1,78
								9	0	0
								Total	112	100,00

Legenda:	
A=5	Muito mais importante
B=3	Mediamente importante
C=1	Moderadamente mais importante

Fonte: Autor (2022).

Através do diagrama de Mudge é possível organizar por ordem de importância os requisitos dos clientes Tabela 1.

Tabela 1 - Requisitos em ordem de importância

Classificação	Requisitos	Valor	%
1º	Possuir materiais que resistam aos esforços aplicados	30	26,78
2º	Ser mecanicamente resistente	29	25,89
3º	Não conter cantos pontiagudos ou cortantes	22	21,69
4º	Ser resistente à corrosão	15	13,39
5º	Permitir utilização em qualquer tipo de superfície	9	8,04
6º	Oferecer facilidade de transporte	4	3,58
7º	Possuir peças de fácil montagem e desmontagem	2	1,78
8º	Possuir comandos e utilização de fácil operação	1	0,89
9º	Ter materiais disponíveis no mercado e de baixo custo.	0	0

Fonte: Autor (2022)

Os valores encontrados através do Diagrama de Mudge apontam que o requisito de cliente que mais importa para o projeto da bancada didática é o requisito 4 (Possuir materiais que resistam aos esforços aplicados), seguido pelo requisito 3 (Ser mecanicamente resistente) e o terceiro mais importante sendo o requisito 1 (Não conter cantos pontiagudos ou cortantes).

Os resultados encontrados vão ao encontro ao esperado, visto se tratar de uma bancada de ensaio mecânico, onde se observa que a resistência da estrutura e a segurança são sempre abordados, assim como aponta o diagrama. O requisito mais importante e fundamental para a satisfação do objetivo funcional da bancada é resistir a carga aplicada do ensaio. O segundo requisito, está relacionado com o primeiro, onde são necessários materiais que sejam resistentes as cargas aplicadas de maneira que não sejam necessárias super dimensionar a estrutura. O terceiro requisito, apesar de ter uma nota menor que as anteriores, também é importante, visto que trata da integridade dos operadores e por serem operadores sem a capacitação para manusear a bancada, faz-se necessário um maior cuidado quanto a sua utilização.

Ao se analisar o diagrama como um todo, é possível notar que os requisitos que possuem as maiores pontuações referem-se à realização do ensaio, o que confirma a verdadeira necessidade do cliente de ter uma bancada resistente para realizar o ensaio. Outro fator importante que deve ser destacado, é que o requisito com a menor pontuação dos requisitos 9 (Ter materiais com facilidade de serem encontrados e de baixo custo), não foi desconsiderado, apenas foi considerado menos importante em relação aos outros requisitos.

4.1.4. Requisitos de projeto

Os requisitos de projeto são determinados a partir dos pré-requisitos anteriormente identificados. Sua principal característica é a maneira com que os requisitos são expressos de uma forma estimável. Essa estimativa possui elevada relevância porque está conectada com as características que o produto poderá ter.

O Quadro 5, ilustra a conversão dos requisitos de cliente em requisitos de projeto.

Quadro 5 - Conversão dos requisitos de clientes em requisitos de projeto

Nº	Requisitos de clientes	Requisitos de projeto		
1º	Possuir materiais que resistam aos esforços aplicados.	(1) – Limite de escoamento do material (MPa)		
2º	Ser mecanicamente resistente.	(2) – Carga (N)	(3) – Deflexão (mm)	
3º	Não conter cantos pontiagudos ou cortantes.	(4) – Número de componentes de proteção (unidades)		
4º	Ser resistente à corrosão.	(5) - Nível de proteção superficial (unidade)		
5º	Permitir utilização em qualquer tipo de superfície.	(6) – Dimensões/Geometria (m)		
6º	Oferecer facilidade de transporte.	(6) – Dimensões/Geometria (m)	(7) – Massa total (kg)	
7º	Possuir peças de fácil montagem e desmontagem.	(8) – Tempo de montagem (H)	(9) – Número de componentes (Unidades)	(10) – Número de ferramentas (Unidades)
8º	Possuir comandos e utilização de fácil operação.	(9) – Número de componentes (Unidades)		
9º	Ter materiais disponíveis no mercado e de baixo custo.	(11) – Custo (R\$)	(9) – Número de componentes (Unidades)	

Fonte: Autor (2022)

4.1.5. Hierarquização dos requisitos de projeto

Da mesma forma como realizou-se com os requisitos de clientes, os requisitos de projeto são hierarquizados e irão definir as especificações técnicas da bancada. É importante salientar que existem inúmeros tipos de estruturas de Matriz QFD e, para este projeto, utilizou-se um tipo mais objetivo e simples, conforme em Projeto de Produto (BAXTER, 2000).

A Matriz QFD desenvolvida para este projeto pode ser visualizada na tabela constante no Apêndice A, com base nos dados demonstrados na tabela referida, definiu-se a ordem de prioridade dos requisitos disposta na Tabela 2.

Tabela 2 - Ordem de prioridade dos requisitos de projeto

Prioridade	Nº	Requisitos de Projeto	Pontuação
1º	2	Carga (N)	50
2º	1	Limite de escoamento do material (MPa)	44
3º	3	Deflexão (mm)	32
4º	11	Custo (R\$)	30
5º	7	Massa total (kg)	26
6º	5	Nível de proteção superficial (unidades)	22
7º	4	Número de componentes de proteção (unidades)	20
8º	8	Tempo de montagem (H)	18
9º	6	Dimensões/Geometria (m)	10
10º	9	Número de componentes (unidades)	8
11º	10	Número de ferramentas (unidades)	6

Fonte: Autor (2022)

Através da Tabela 2 é possível afirmar que os requisitos de projeto mais importantes são os que se referem diretamente ao ensaio, a sua segurança e os efeitos que o ensaio proporciona. Justifica-se que o requisito de projeto com a grandeza de Carga (N), ao qual é responsável pela capacidade de trabalho da bancada, seja o requisito mais importante da tabela, pois possibilita a execução do ensaio.

Abaixo das relações práticas e físicas, encontram-se relações mais preocupadas com a vida útil e a questão de orçamento da bancada didática, às vezes, sendo fatores limitantes de um projeto.

4.1.6. Características do projeto

Nesta etapa do projeto, algumas variantes não apresentam um valor específico, porém, apresentam resultados satisfatórios. Logo, algumas especificações

demonstradas anteriormente, se referem as características da bancada didática, valores meta e limitantes que devem ser alcançados.

Referidas as considerações, é possível listar as características do projeto da bancada didática para estudo de flexão:

- Carga suportada: 100 quilos;
- Altura da bancada didática: menor que 1 metro;
- Largura da bancada didática: menor de 500 milímetros;
- Comprimento da bancada didática: menor que 1 metro;
- Massa da bancada didática: menor que 12 quilos.

As especificações de projeto definidas têm suas justificativas apresentadas abaixo com algumas explicações em um contexto geral de utilização ao qual a bancada deverá desempenhar. A carga de 100 quilos que a bancada deve suportar foi definida para que a mesma seja capaz de executar o ensaio em diferentes tipos de materiais e perfis.

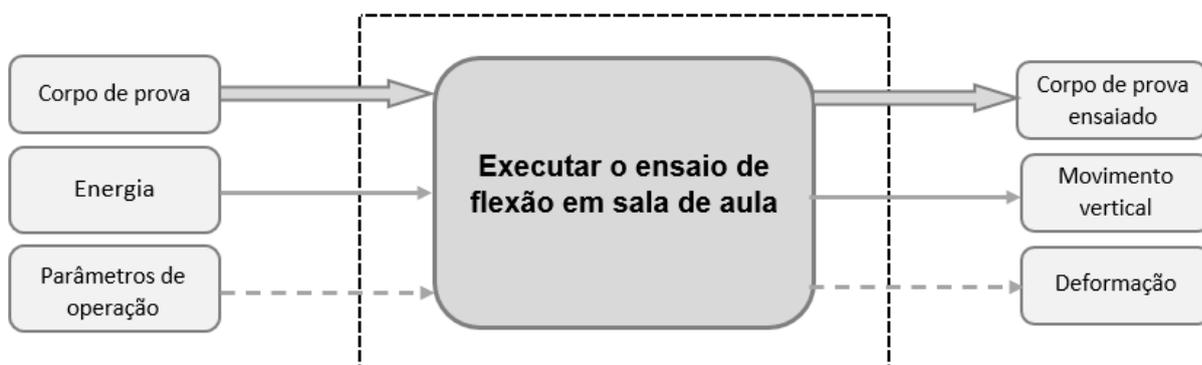
Quanto às dimensões da bancada didática, a altura e comprimento deve ser menor que 1 metro e a largura menor que 500 milímetros. Tais medidas dão-se pela necessidade de a bancada ser compacta, de fácil manuseio e que atenda às necessidades de usabilidade. Além disso, para facilitar o transporte e movimentação da bancada, definiu-se que a mesma tenha massa total inferior a 12 quilos.

4.2 PROJETO CONCEITUAL

4.2.1 Determinação da estrutura funcional

Nessa fase são determinados todos os *inputs* e *outputs* de maneira simplificada, bem como a função global do produto (Figura 27). A função global do projeto contempla o experimento de flexão em sala de aula, onde o principal *input* é aguentar as cargas verticais aplicadas e confiabilidade na fixação, o *output*, por sua vez, é a precisão na medição e segurança de operação.

Figura 27 – Estrutura funcional



Fonte – Autor (2022)

Na estrutura, estimam-se como entradas a energia e os parâmetros de operação. A energia se converte em energia mecânica para acionar os componentes responsáveis pela função global de ensaiar os corpos de prova, que são controlados e acionados através dos parâmetros de operação. Após, têm-se como saídas do sistema, o corpo de prova ensaiado, movimento vertical e a deformação.

4.2.2 Diagrama funcional

Através da revisão das soluções existentes e de bancadas descritas na literatura, foi possível apresentar um diagrama funcional do projeto da bancada didática, determinando as funções necessárias existentes, Figura 28.

Figura 28 - Diagrama funcional



Fonte: Autor (2022)

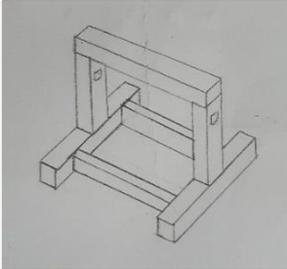
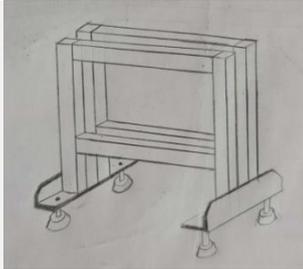
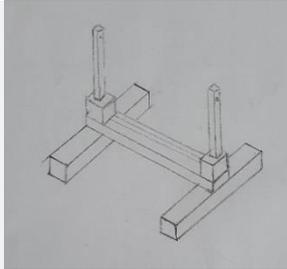
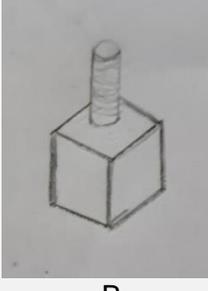
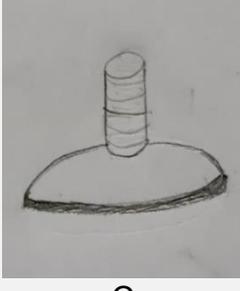
4.2.3 Matriz morfológica

A matriz morfológica é uma forma sistemática de gerar alternativas para todas as combinações de variáveis possíveis para solucionar algum problema. A partir das alternativas de soluções, geradas na busca por princípios de solução utiliza-se a matriz morfológica, que é um quadro que representa as alternativas, visando facilitar a visualização, memorização e combinação dos princípios, para que na sequência sejam formadas concepções. As alternativas são representadas na matriz por símbolos ou desenhos (VALDIERO, 1999).

Assim, foi desenvolvida a matriz morfológica mostrada no Quadro 6, onde é demonstrado visualmente as soluções encontradas através de esboços. Em seguida, as soluções foram combinadas a fim de encontrar concepções para o produto. As soluções não apresentadas não se mostraram viáveis dentro do contexto do projeto.

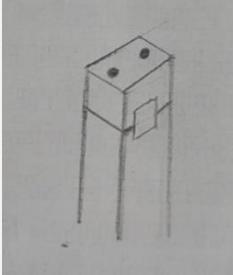
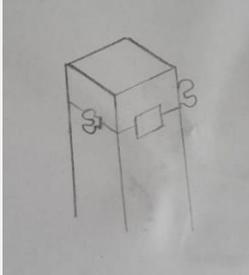
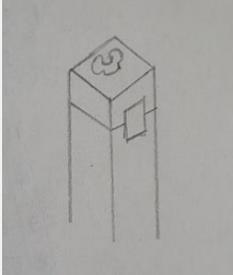
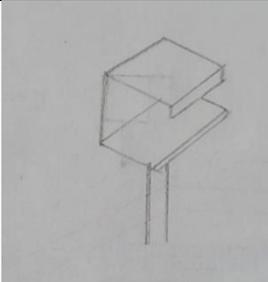
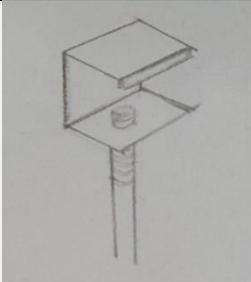
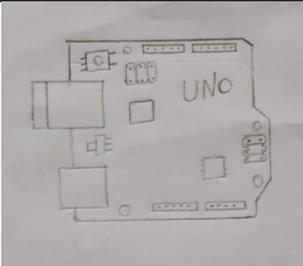
Quadro 6 - Matriz morfológica do sistema estrutural

(continua)

	Princípios de Solução		
Função Elementar	Solução A	Solução B	Solução C
Proporcionar estabilidade da bancada	 A	 B	 C
Manter a bancada estática	 A	 B	 C

Quadro 6 - Matriz morfológica do sistema estrutural

(conclusão)

Função Elementar	Solução A	Solução B	Solução C
Acoplar o corpo de prova	 A	 B	 C
Acomodar a carga	 A	 B	 C
Adquirir dados	 A	 B	

Fonte: Autor (2022)

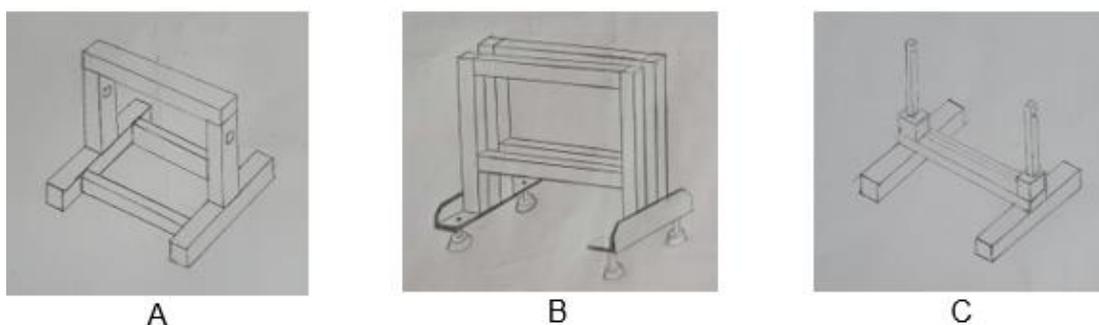
Para um melhor entendimento da matriz morfológica, cada função elementar e seus princípios de solução, serão explicados através da descrição e justificativa de escolha dos mesmos.

- **Princípios de solução: proporcionar estabilidade da bancada**

Esta função representa a necessidade de segurança da bancada didática para facilitar a realização do ensaio. Assim, procurou-se soluções que permitam que a estrutura seja segura. A Figura 29(A), é uma estrutura com dois travamentos inferiores e um superior, o que garantiria uma boa estabilidade. Na solução B, da Figura 29(B), a estabilidade é garantida vertical e horizontalmente através dos perfis duplos e uma

base firme. A solução C, mostrada na Figura 29(C), é um sistema mais simples composto por um perfil de união.

Figura 29 - Princípios de soluções para a Função Segurança

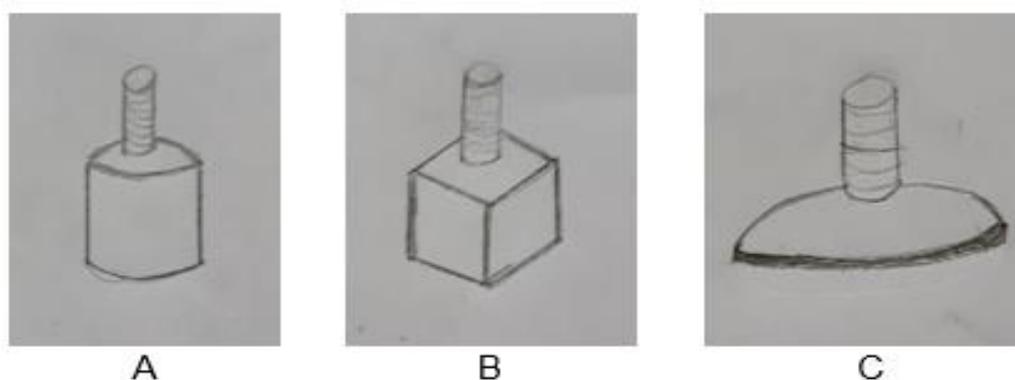


Fonte: Autor (2022)

- **Princípios de solução: manter a bancada estática**

Esta função representa a necessidade de sustentação da bancada didática para ser alcançada sua estabilidade para a aplicação do ensaio. Então, buscou-se soluções que permitam uma estrutura estável. O princípio de solução A, mostrado na Figura 30(A), é um sistema de sapatas arredondadas mais utilizados para pequenas regulagens de altura. O princípio de solução B, apresentado na Figura 30(B), é uma solução com um formato quadrado se tornando um modelo mais simples. O princípio de solução C, mostrado na Figura 30(C), é um modelo mais utilizado devido a área de contato ser maior em relação aos outros modelos.

Figura 30 - Princípios de solução para a função de sustentação da estrutura

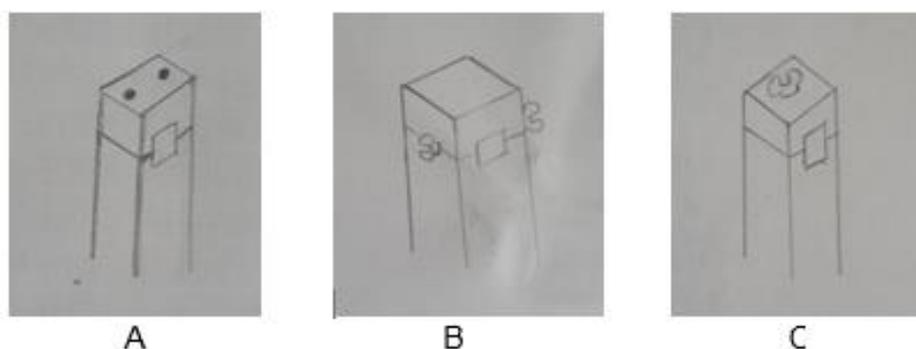


Fonte: Autor (2022)

- **Princípios de solução: acoplar o corpo de prova**

Representa a necessidade de apoiar e acomodar o corpo de prova de maneira que o mesmo fique bem fixado e não atrapalhe nas medições do ensaio. Desta forma, buscou-se soluções que permitam uma fixação confiável e prática. No princípio de solução A, apresentado na Figura 31(A), utiliza-se uma estrutura quadrada onde o aperto é realizado através de dois parafusos fixados no sentido vertical proporcionando uma maior confiabilidade. A solução B, mostrada na Figura 31(B), utiliza-se do mesmo perfil de estrutura, porém com a fixação realizada pelas suas laterais, tornando um sistema um pouco mais complexo. O princípio de solução C, apresentado na Figura 31(C), utiliza-se de uma fixação única, onde o corpo de prova é apertado diretamente pelo fixador.

Figura 31 - Princípios de solução para a função de fixação do corpo de prova

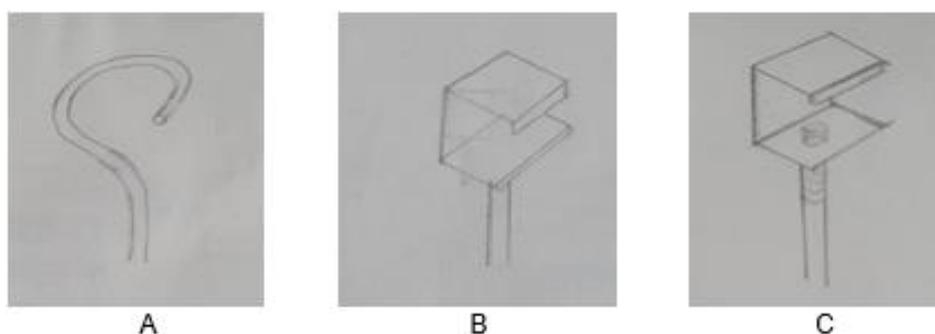


Fonte: Autor (2022)

- **Princípios de solução: acomodar a carga**

Esta função representa a necessidade de sustentação do carregamento aplicado no corpo de prova para que seja possível realizar o ensaio. Assim, buscou-se soluções que permitam um carregamento linear e estável. O princípio de solução A, apresentado na Figura 32(A), é um sistema de gancho com um perfil redondo ao qual é conformado especificamente para encaixar no corpo de prova. O princípio de solução B, apresentado na Figura 32(B), é uma solução que possui uma chapa dobrada e soldada em um perfil redondo para a ligação dos componentes. O princípio de solução C, mostrado na Figura 32(C), é um modelo com chapa dobrada, porém o sistema de ligação é através de elementos roscados.

Figura 32 - Princípios de solução para a função de carregamento dinâmico

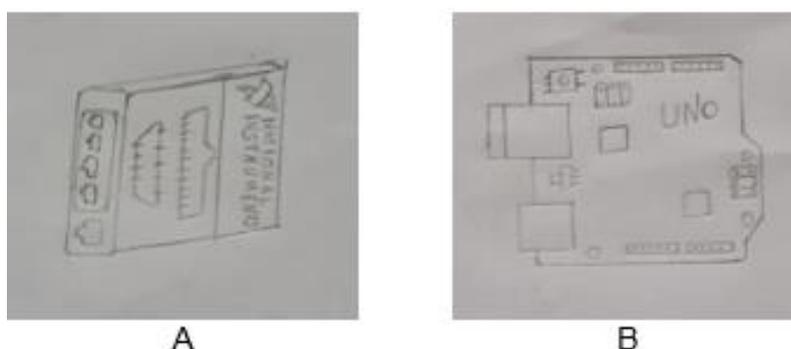


Fonte: Autor (2022)

- **Princípios de solução: adquirir dados**

Esta função representa a necessidade de controlar o carregamento do ensaio, utilizando-se de sensores para que o sistema de controle seja realimentado e garanta um baixo desvio da carga aplicada. A Figura 33(A), é um sistema de placa de aquisição de dados, que é bastante utilizado para esse tipo de ensaio e por ser um sistema versátil. Na solução B, da Figura 33(B), é um sistema bem mais simples e fácil de se utilizar, porém, com menor versatilidade.

Figura 33 - Princípios de solução para a função de controlar o carregamento



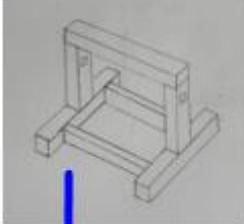
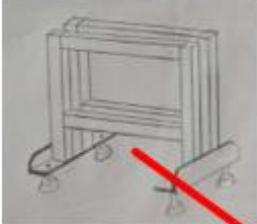
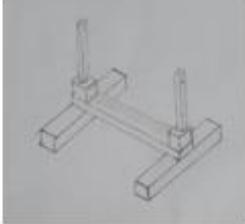
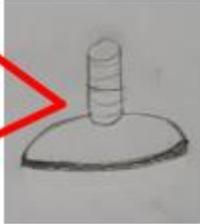
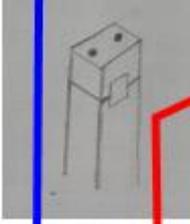
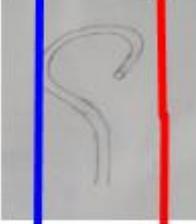
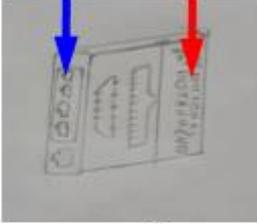
Fonte: Autor (2022)

4.2.4 Combinação de princípios de soluções

Após a escolha de algumas concepções, foi desenvolvida uma matriz com os requisitos de projeto visando o objetivo de escolher a combinação que melhor atenda os objetivos e necessidades do projeto da bancada didática. Para compor a matriz,

foram desenvolvidas outras duas concepções alternativas que compõem a estrutura funcional do equipamento, como mostra o Quadro 7. Para a concepção A, foi representada com a linha da cor azul e a concepção B, foi representada com a linha de cor vermelha.

Quadro 7 - Combinação dos princípios de solução

Função Elementar	Solução A	Solução B	Solução C
Estrutura do equipamento	 A	 B	 C
Base da estrutura	 A	 B	 C
Apoio	 A	 B	 C
Porta peso	 A	 B	 C
Aquisição de dados	 A	 B	

Para a concepção A, foi selecionado como estrutura principal do sistema A de duas bases de apoio e dois elementos de ligação. A base da estrutura, foi a do tipo arredondado A. O apoio para essa estrutura deve ser com dois pontos parafusados B, fixando os corpos de prova de uma maneira mais segura. Para a suspensão da carga, será utilizado um gancho A, pela melhor acomodação junto ao corpo de prova. Para a aquisição de dados, a concepção A, foi escolhida por se tratar de um sistema mais completo.

Para a concepção B, foi definido como estrutura principal do equipamento B, sistema composto com dois perfis de apoio de cada lado e quatro elemento de ligação. A base da estrutura deve ser com uma área de contato maior C. O apoio para fixação do corpo de prova para essa concepção deve ser de um sistema com dois pontos parafusados A, para uma melhor fixação. Para o sistema de suspensão da carga, será utilizado um gancho A, com esse tipo de sistema é mais seguro e estável para se utilizar. A concepção para o sistema de aquisição, será utilizado a placa de aquisição A por sua maior versatilidade.

4.2.5 Avaliação das concepções alternativas

Após serem elaboradas as duas concepções para o projeto, é feita a avaliação das mesmas para a conformidade dos requisitos. Com o intuito de se alcançar a alternativa mais viável e que melhor se adeque para sua utilização nas aulas práticas. Será utilizada a matriz decisão como método de avaliação.

A matriz decisão, é utilizada para listar os requisitos e concepções analisadas e, é dividida pelos seguintes valores: 5 (atende muito bem), 3 (atende moderadamente) ou 1 (atende fracamente). A escolha da concepção foi realizada através do somatório dos valores mencionados anteriormente e, utilizando os requisitos de projeto como critério de avaliação. A concepção que tiver o resultado maior, será a escolhida. A Tabela 3 apresenta a matriz de decisão.

Tabela 3 - Matriz decisão de requisitos para o projeto

Requisitos dos clientes	Pont.	Concepção A		Concepção B	
		Grau	PxG	Grau	PxG
Possuir materiais que resistam aos esforços aplicados	30	5	150	5	150
Ser mecanicamente resistente	29	5	145	5	145
Não conter cantos pontiagudos ou cortantes	22	5	110	5	110
Ser resistente à corrosão	15	5	75	5	75
Permitir utilização em qualquer tipo de superfície	9	3	37	5	45
Oferecer facilidade de transporte	4	3	12	5	20
Possuir peças de fácil montagem e desmontagem	2	5	10	5	10
Possuir comandos e utilização de fácil operação	1	3	3	5	5
Ter materiais disponíveis no mercado e de baixo custo	0	4	0	3	0
Total			542		560

Fonte: Autor (2022)

Em alguns aspectos, ambas as concepções se mostraram muito semelhantes, assim a escolha dessas duas concepções é adequada e pertinente. Através da matriz decisão escolheu-se a concepção que melhor atendia os requisitos de projeto citados anteriormente, no caso, a concepção escolhida foi a B. Isso se deve ao fato de a estrutura poder ser transportada com maior facilidade, auxiliando no armazenamento e deslocamento. Além disso, ela se adapta com maior facilidade em qualquer superfície plana se comparada com a concepção A.

4.3 PROJETO PRELIMINAR

4.3.1 Seleção dos materiais

Foram utilizados diferentes tipos de materiais para a construção da estrutura da bancada didática. Esses materiais precisam resistir aos esforços resultantes dos ensaios de flexão e acomodar os elementos necessários para a realização dos testes. Os componentes utilizados na estrutura sofrem baixas solicitações e além de garantirem a rigidez e estabilidade durante os testes, esses foram escolhidos levando em consideração seu custo e disponibilidade comercial. Assim, escolheu-se o alumínio 6063-T5, um material que suporta todas cargas atuantes da bancada. Além disso, por ser um material de grande utilização, seu custo é relativamente barato se comparados a outros materiais disponíveis no mercado.

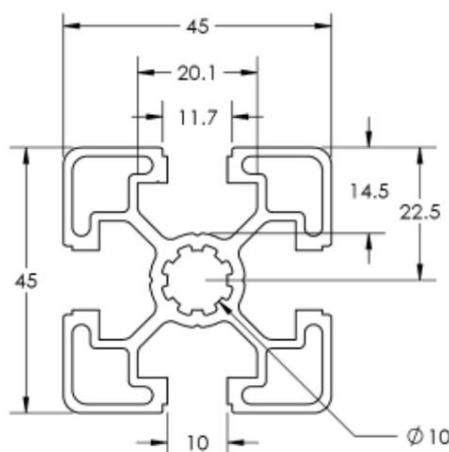
Outro fator importante é que a estrutura será utilizada em locais que não exigem algum tipo de acabamento para serem protegidos de oxidação. Portanto, este foi o material escolhido por ser mais adequado para fabricar os componentes da bancada didática. Definiu-se então o perfil de alumínio extrudado (Tabela 4), um perfil quadrado (45x45) que possui o valor de inércia de $15,42 \times 10^4$ e uma área de 713 mm^2 , assim com as dimensões respectivas apresentadas na Figura 34.

Tabela 4 - Perfis de alumínio extrudado

Perfil extrudado	Altura x Largura (mm)	Módulo da seção $\times 10^3 \text{ (mm}^3\text{)}$	Momento de inércia da seção transversal $\times 10^4 \text{ (mm}^4\text{)}$
4545	45 x 45	6,85	15,42

Fonte: Adaptado de PARCO (2022)

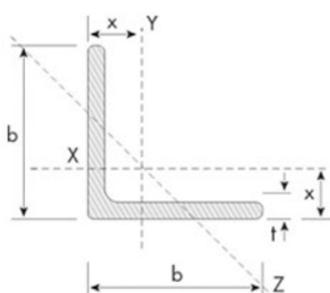
Figura 34 - Representação do perfil de alumínio e suas dimensões em milímetros



Fonte: Adaptado de PARCO (2022)

Em seguida, o perfil L precisa apresentar propriedades mecânicas que atenda as solicitações dos ensaios, com um percentual de carbono baixo, facilidade de compra e com custo acessível. Entre as opções de materiais disponíveis no mercado, a que melhor atende aos requisitos de projeto é o aço ASTM A36 que tem como propriedades $\sigma_e = 250 \text{ MPa}$, $\sigma_r = 400 \text{ MPa}$ e $E = 200 \text{ GPa}$ cujas informações são apresentadas na Figura 35.

Figura 35 – Informações técnicas do perfil L



Peso nominal Kg/m	t (mm)	Área (cm ²)	I _x =I _y (cm ⁴)	W _x =W _y (cm ³)	r _x =r _y (cm)	R _z min. (cm)	X (cm)
2,46	3,18	6,85	15,42	2,13	1,60	1,02	1,40

Fonte: Adaptado de GERDAU (2006)

Conforme um dos objetivos definidos para esta bancada, a mesma pode ser utilizada para diversos tipos de ensaio de flexão, entre eles: 1 apoio, 2 apoios, 3 apoios e até 4 apoios. Por ser uma bancada bastante versátil e dinâmica, foi pensado para o tipo de fixação, uma maneira onde fosse possível fixar diversas geometrias de perfil transversal de materiais metálicos diferentes. Pode-se exemplificar como opções de corpo de prova, seções retangulares ou circulares, que são perfis mais utilizados no mercado e no dia a dia.

4.3.2 Lista de materiais e estimativa de valores

Aqui é apresentada uma lista dos materiais utilizados e uma estimativa de valores para a construção da bancada didática. Para estimativa de valores dos produtos comprados, foi feita uma pesquisa de preço, Tabela 5.

Tabela 5 - Estimativa de valores da bancada didática

Nº	COMPONENTE	DESCRIÇÃO	QT.	VALOR (R\$)	TOTAL (R\$)
1	Perfil Quadrado 45x45mm	Peso do perfil 6 metros 8,4 kg.	01	R\$ 33,00	R\$ 198,00
2	Chapa de aço 3mm	Cantoneira 50x50mm.	02	R\$ 8,50	R\$ 17,00
3	Sapata Niveladora	Kit de sapatas de termoplástica.	01	R\$ 45,00	R\$ 45,00
4	Vergalhão de aço 1020	Vergalhão conformado para manuseio	02	R\$ 3,50	R\$ 7,00
5	Porca sextavada Inox 304	Porca de aperto para a base M8x6,5mm	08	R\$ 0,66	R\$ 5,28
6	Arruela lisa	Arruela para apoio da porca e chapa de aço M8x1,60mm.	08	R\$ 3,00	R\$ 24,00
7	Parafuso Allen Inox 304	Parafuso para aperto do porta apoio M6x50mm.	04	R\$ 0,78	R\$ 3,12
8	Parafuso Allen Inox 304	Parafuso para fixação dos perfis de alumínio M8x60mm.	04	R\$ 4,25	R\$ 17,00
9	Tampa de fechamento	Tampa de acabamento dos perfis	04	R\$ 25,00	R\$ 100,00
10	Chapa de aço 1020	Base redonda para o peso Ø80x5mm	01	R\$ 8,50	R\$ 8,50
11	Perfil quadrado 40x40mm	Perfil para apoio do corpo de prova 1000mm	01	R\$ 22,50	R\$ 22,50
				TOTAL	R\$ 447,40¹

Fonte: Autor (2022)

Conforme a Tabela 5, é possível observar os valores unitários dos respectivos

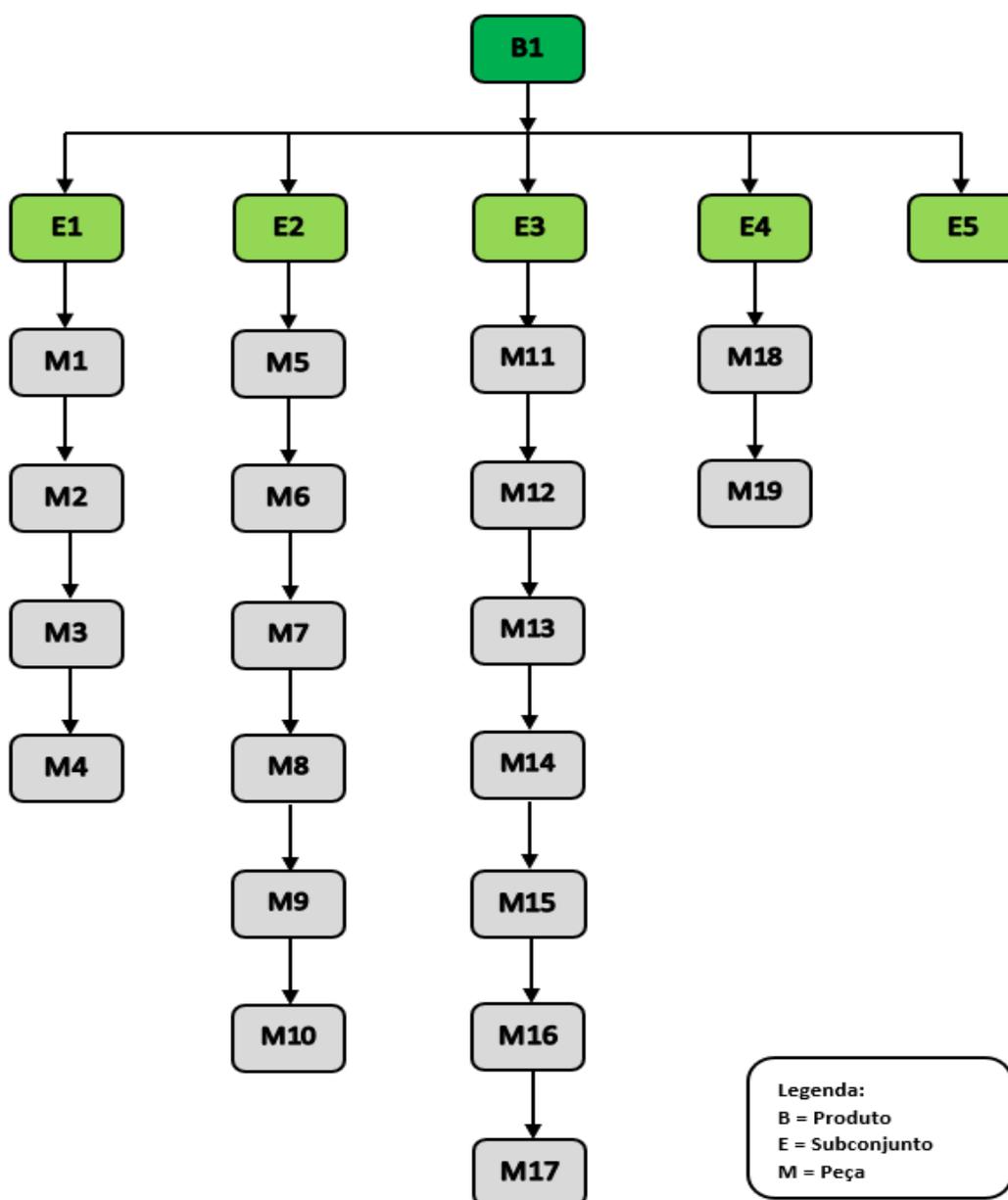
¹ Os valores constantes na estimativa de valores foram pesquisados em sites especializados no período de maio a junho de 2022.

itens que compõem a bancada didática, a partir disso, foi possível calcular o custo total para a compra do material para a construção da bancada didática, R\$ 447,40.

4.3.3 Árvore do produto

O formato da árvore do produto é apresentado na Figura 36, onde classificam-se da seguinte forma: B como produto, E como subconjunto e M como peça.

Figura 36 - Árvore do produto



Fonte: Autor (2022)

No próximo tópico, cada item de classificação da árvore do produto relaciona-se com um código de projeto e sua equivalência na tabela com a lista dos componentes, respectivamente.

4.3.4 Lista de componentes

Configurada de maneira em que as colunas são demonstradas a classificação da árvore de produto, quantidade total do componente, o código de projeto e a descrição do componente, podendo ser observada na Tabela 6.

Tabela 6 - Lista de componentes da bancada didática

(continua)

Classificação	Quantidade	Código	Descrição
B1	01	01.00.00	Bancada Didática
E1	01	01.01.00	Estrutura
M1	01	01.01.01	Barra de perfil quadrado 6063-T5
M2	08	01.01.02	Conectores de aço galvanizado
M3	04	01.01.03	Parafuso Allen inox
M4	04	01.01.04	Tampa de fechamento de perfil
E2	02	01.02.00	Base da estrutura
M5	04	01.02.01	Apoio termoplástico
M6	04	01.02.02	Barras roscadas de aço inox
M7	02	01.02.03	Chapa perfil L
M8	02	01.02.04	Barra redonda em aço
M9	08	01.02.05	Porca sextavada inox
M10	08	01.02.06	Arruela lisa de aço
E3	02	01.03.00	Apoio do corpo de prova

Tabela 6 - Lista de componentes da bancada didática

(conclusão)

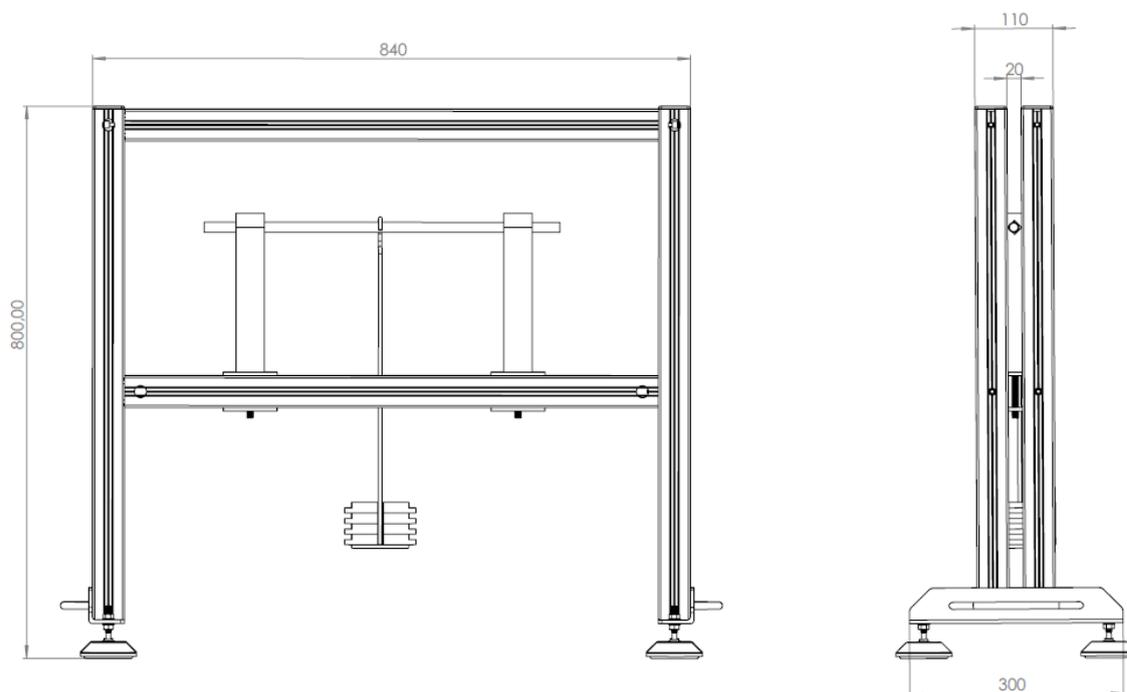
Classificação	Quantidade	Código	Descrição
M11	02	01.03.01	Tubo quadrado de aço
M12	04	01.03.02	Chapa de aço
M13	02	01.03.03	Barra roscada de aço
M14	02	01.03.04	Porca sextavada
M15	08	01.03.05	Arruela lisa de aço
M16	04	01.03.06	Parafuso Allen inox
M17	02	01.03.07	Tampa de aperto
E4	01	01.04.00	Porta peso
M18	01	01.04.01	Barra de aço inox
M19	01	01.04.02	Chapa de aço
E5	05	01.05.00	Pesos padrão

Fonte: Autor (2022)

4.3.5 Definições da estrutura

Com o auxílio das etapas anteriores, onde trouxeram algumas características da estrutura, bem como, a utilização prática e a maneira como deve ser realizado o ensaio de flexão, de *benchmarking* de outras bancadas disponíveis, é possível determinar a dimensão de alguns componentes mais importantes da estrutura e, assim, ser desenvolvido o modelo computacional utilizando software de modelagem digital. Portanto, as dimensões determinadas anteriormente, são representadas no desenho detalhado da bancada didática da Figura 37. É importante comentar que elas atendem a variados tipos de modelos de bancadas didáticas. Respeitando essas dimensões, é possível aplicar alterações de acordo com a necessidade encontrada no dimensionamento.

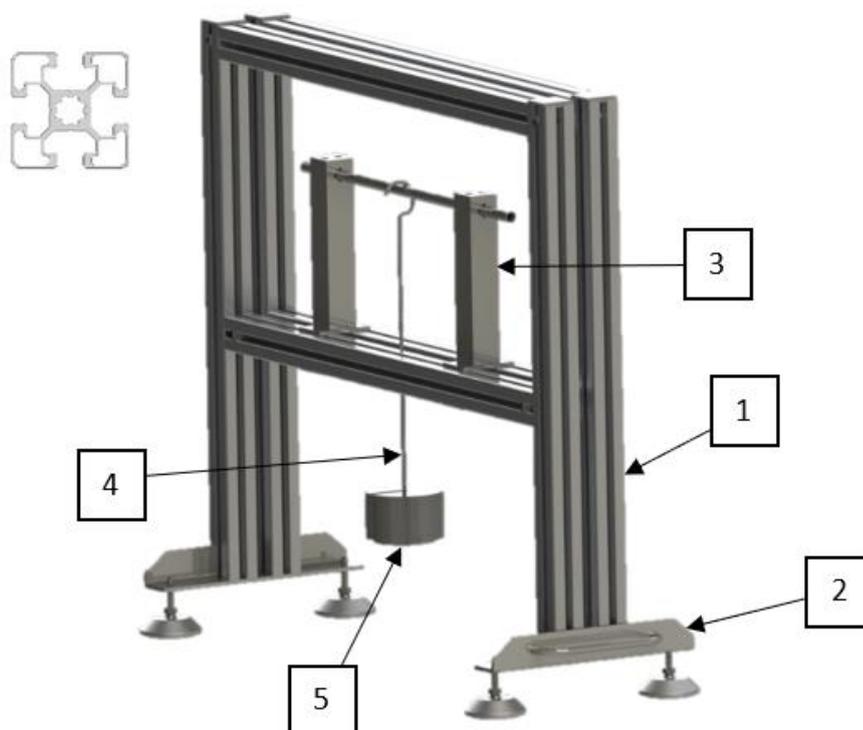
Figura 37 – Esboço da bancada didática com suas dimensões em milímetros.



Fonte: Autor (2021)

Determinadas as principais dimensões da estrutura, é possível realizar o modelamento em software de modelagem digital. A concepção final é composta por duas bases com chapas dobradas (1), onde a estrutura é fixada e montada através de ligações parafusadas (2). O que irá comportar e possibilitar o deslocamento do apoio e o suporte de fixação do corpo de prova (3 e 4), o porta peso (5) será colocado no corpo de prova e comportará os pesos (6), como mostra a Figura 38, onde apresenta-se a vista isométrica da bancada didática.

Figura 38 – Concepção final da bancada didática



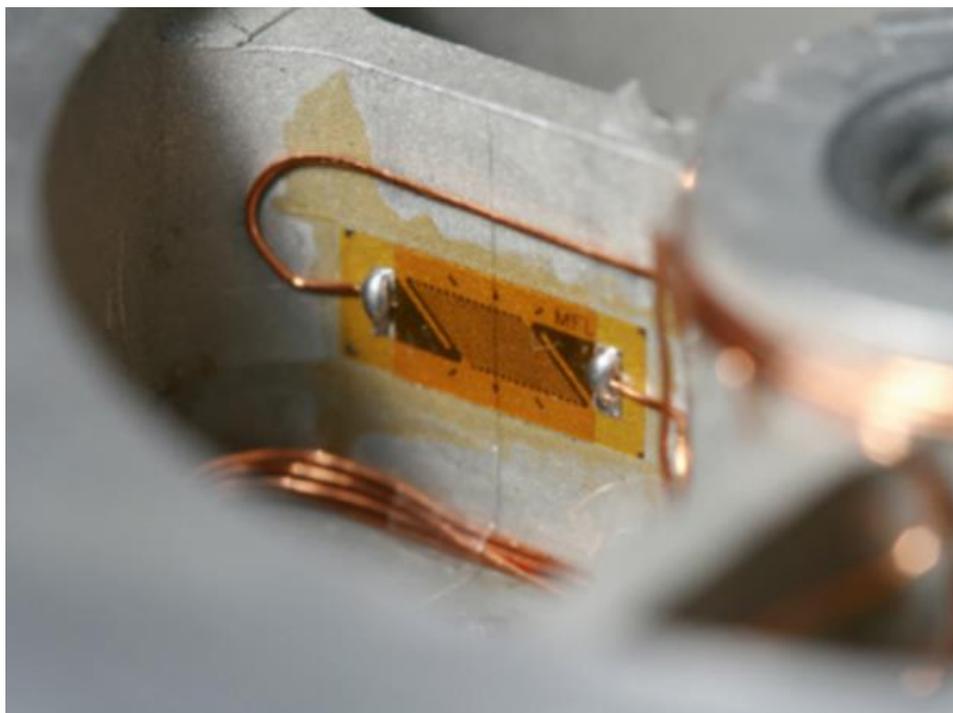
Fonte: Autor (2022)

4.3.6 Instrumentação

Para possibilitar a análise dos esforços, é preciso colocar o extensômetro no ponto onde o corpo de prova esteja sujeito as deformações causadas pela aplicação da carga para o ensaio. É importante salientar que, o local escolhido deve ser onde a deformação ocorra apenas em um eixo, assim, os dados não serão prejudicados por forças combinadas.

Para a colagem dos extensômetros é preciso seguir uma rotina, onde é preciso realizar a preparação da superfície, aplicação da cola e a cura da mesma. A preparação da superfície inicia-se ao lixá-la até garantir que esteja lisa, mas com rugosidade suficiente para facilitar a colagem e limpar a região com álcool etílico ou isopropílico para desengordurar a região de colagem e após a secagem, a aplicação de uma fita adesiva especial para extensômetros para a proteção dos mesmos conforme a Figura 39.

Figura 39 – Extensômetro instalado



Fonte: Ensus (2022)

Para a configuração de Ponte de Wheatstone é possível utilizar $1/2$ de ponte simétrica, de forma que um extensômetro funcione como o principal e o outro para o coeficiente de Poisson.

Realizada a colagem dos extensômetros, é necessária fazer a ligação elétrica dos mesmos. A configuração de ligação depende da placa de aquisição que é utilizada, servindo para o auxílio da montagem, balancear a Ponte de Wheatstone e medir e amplificar as variações da tensão de saída ao longo do tempo, transferindo em tempo real as informações coletadas.

Após a montagem do sistema de aquisição dos dados, é necessária realizar a calibração do conjunto, onde são aplicadas cargas conhecidas com pesos padrão e os valores das deformações capturados pela placa de aquisição. Esses são plotados por um sistema de coordenadas para se obter uma relação entre a deformação e a força que a provocou. Feito esses procedimentos é possível realizar o ensaio de flexão com a certeza do resultado das medições realizadas.

4.3.7 Dimensionamento da estrutura da bancada

Através da teoria de elemento de máquinas e resistência dos materiais, foram determinadas as principais tensões e forças que atuam na estrutura da bancada para a realização do teste de flexão e avaliação do comportamento da estrutura analiticamente. No dimensionamento é muito importante que os perfis da estrutura sofram o mínimo de deformação devido aos esforços de deflexão, dessa forma, o alinhamento dos apoios para o corpo de prova não será afetado.

Conforme a Figura 34 apresentada anteriormente, o perfil foi fixado por ambas as extremidades sua deflexão máxima, δ_{max} , pode ser calculada pela Equação 5:

$$\delta = \frac{P \cdot L^3}{192 \cdot E \cdot I} \quad (5)$$

$$\delta = \frac{550 \cdot 880^3}{192 \cdot 69 \cdot 15,42 \cdot 10^4} = 0,18 \text{mm}$$

Onde:

P é a carga aplicada, neste caso 550N;

L é a distância entre os pontos de fixação, com o valor de 880 mm;

E é o módulo de elasticidade do material, para o alumínio 6063-T5 tem o valor de 69 GPa e;

I o momento de inércia da seção transversal, com o valor de $15,42 \times 10^4$.

O fabricante do material selecionado estabelece que para os perfis com o diâmetro do círculo circunscrito maior que 38mm, a flecha máxima admissível é $0,3 \times L / 300$.

$$0,3 \times \frac{L}{300} \quad (6)$$

Desta maneira, verifica-se que o deslocamento vertical calculado é inferior ao admissível, $\delta_a = 0,88 \text{mm}$. Assim, o perfil quadrado contempla os requisitos do projeto.

Como o apoio é amparado por dois perfis iguais, esse valor é distribuído entre ambos, resultando em um deslocamento de 0,09 mm. Assim, pode-se observar que a

deflexão, mesmo que para condição mais crítica, não afetará a montagem da estrutura, nem a medição no corpo de prova.

As forças de reações nas extremidades denominadas de A e B, são encontradas através da Equação 7:

$$R_A = R_B = \frac{P}{2} \quad (7)$$

$$R_A = R_B = \frac{500N}{2} = 250N$$

Encontradas as forças de reação, é preciso determinar a intensidade do momento máximo através da Equação 8:

$$M_P = \frac{PL}{8} \quad (8)$$

$$M_P = \frac{500N \cdot 880mm}{8} = 55Nmm$$

Com o momento máximo e o momento de inércia, é calculada a máxima tensão de flexão aplicada no perfil com a Equação 9, onde o c é a distância perpendicular do eixo neutro ao ponto mais afastado do eixo.

$$\sigma = \frac{Mc}{I} \quad (9)$$

$$\sigma = \frac{55 \cdot 22,5}{15,42} = 80,25 MPa$$

4.4 PROJETO DETALHADO

4.4.1 Análise computacional

Calculadas as tensões e os carregamentos determinados, realizou-se uma análise computacional (*Computer-Aided Engineering - CAE*) da estrutura modelada nas etapas anteriores. Foi utilizado um *software* de modelagem digital para simular as forças que são aplicadas na estrutura da bancada didática e verificar como a mesma irá se comportar e comparar com os cálculos resolvidos anteriormente com a simulação. Para validar a realização desta análise, utiliza-se de uma modelagem simplificada para otimizar a simulação, desta forma, os componentes mais complexos e detalhados foram suprimidos.

É importante lembrar que a estrutura foi desenhada com as mesmas dimensões da bancada didática e as condições de contorno aplicadas se mantiveram as mesmas e todas foram representadas. O *software* de modelagem computacional gera automaticamente o tipo de união entre os componentes da montagem, como os perfis da estrutura se tocam, nesse caso utilizou-se o contato global sem penetração, pois dessa forma, os elementos não se atravessariam devido a carga aplicada. Por se tratar de um perfil de geometria muito complexa, para a geração da malha utilizou-se um parâmetro de malha sólida com base em curvatura e um tamanho mínimo do elemento com 16 mm. A malha apresentou um total de 830108 nós e um total de 442088 elementos.

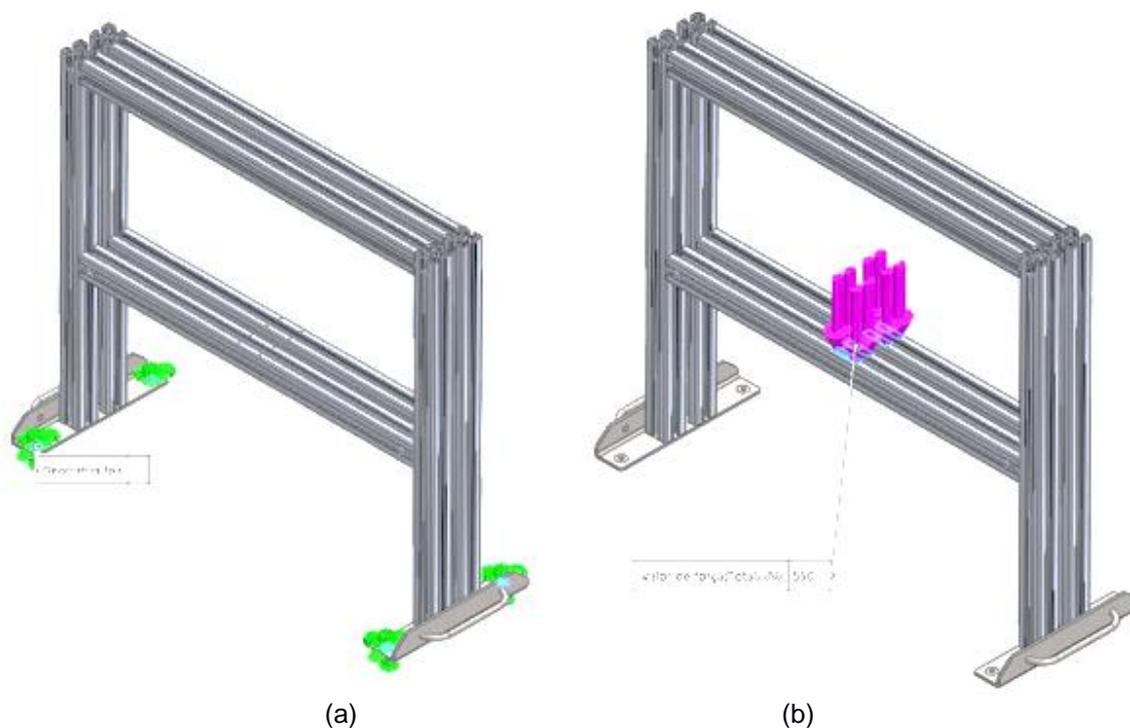
Sobre as condições de contorno, são utilizados pontos de fixação nas chapas da base onde são utilizados os fixadores parafusados, de maneira que a estrutura da bancada se mantenha fixa, fixando a face superior e inferior das bases com os fixadores (Figura 40a).

Como acessório de fixação, foi utilizada uma geometria de referência variável, onde a estrutura é fixada no eixo X e Z, com a face no sentido Y livre para que fosse possível analisar apenas a força que atua para baixo no sentido da carga dos pesos padrão. A força atuante é posicionada sobre a face superior dos perfis e aplicada bem no centro dos dois perfis de forma que os dois sejam encostados igualmente, com carga de 550N, onde se consideram o peso dos apoios, da gravidade e dos pesos padrões (Figura 40b).

O material utilizado nos perfis quadrados da estrutura, possuem as

características do Alumínio 6063-T5 $\sigma_e = 145\text{MPa}$, $\sigma_r = 185\text{MPa}$ e $E = 69\text{GPa}$. O material utilizado no perfil L possui as características do Aço ASTM A36 com $\sigma_e = 250\text{MPa}$, $\sigma_r = 400\text{MPa}$ e $E = 200\text{GPa}$.

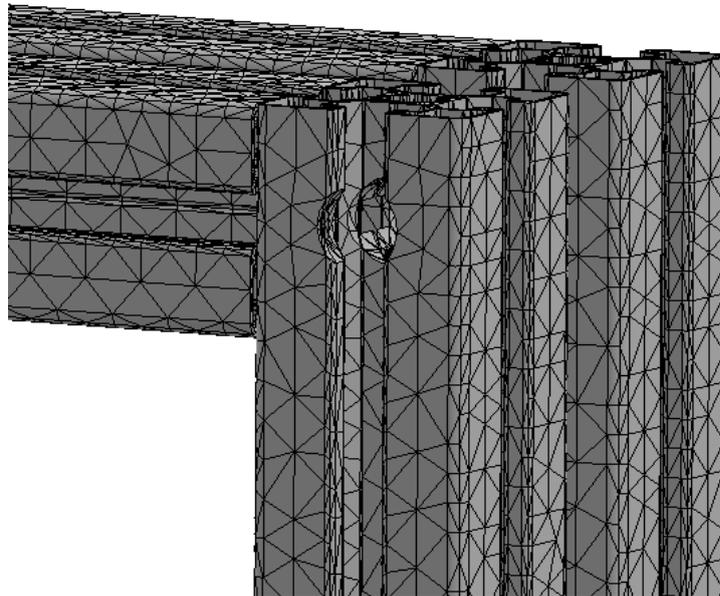
Figura 40 - Estrutura com as condições de contorno para simulação (a) engastes e (b) carga aplicada



Fonte: Autor (2022)

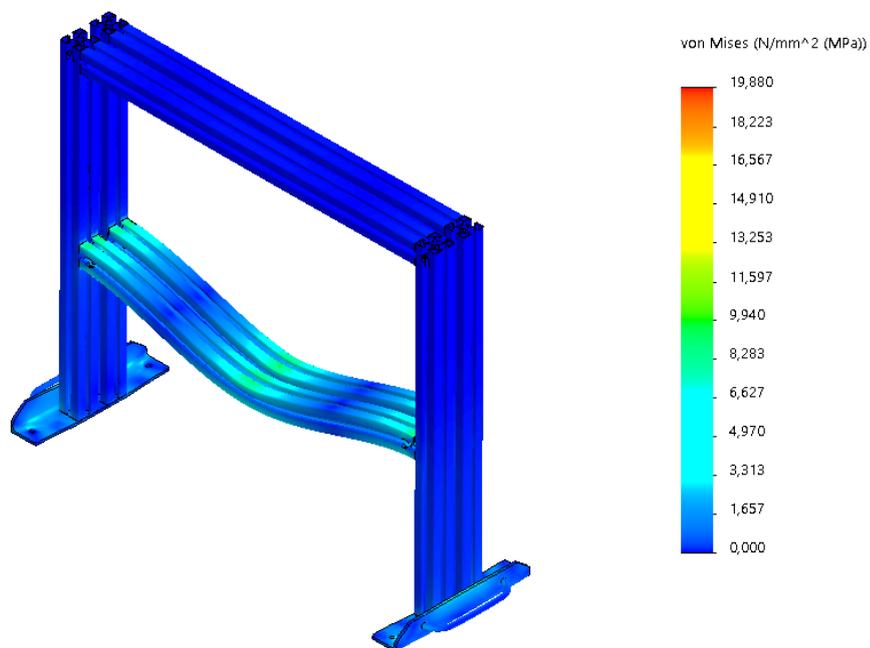
A Figura 41 mostra a geometria da malha gerada. É possível verificar através da Figura 42 que a tensão máxima da estrutura é encontrada nas extremidades e no centro do perfil através do critério de Von Mises. Assim como previsto, é possível verificar que a estrutura está longe do seu limite de escoamento. Isso é importante, pois, como o objetivo da bancada didática é estudar, medir a flexão das vigas e obter os dados através dos extensômetros, a estrutura deve deformar o mínimo possível para que a medição não seja afetada. Na Figura 43 são analisados os resultados da simulação quanto os deslocamentos totais da estrutura.

Figura 41 - Malha refinada



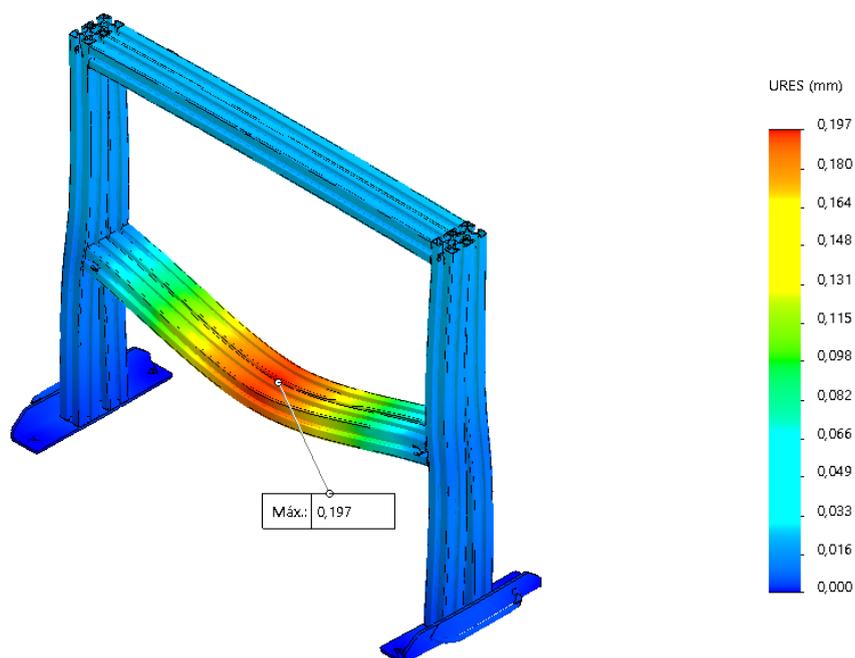
Fonte: Autor (2022).

Figura 42 - Simulação da estrutura da bancada didática com as tensões pelo critério de Von Mises



Fonte: Autor (2022).

Figura 43 – Simulação da estrutura da bancada didática com o deslocamento total



Fonte: Autor (2022)

Através da simulação e a convergência dos resultados, é possível observar que todos os componentes da estrutura atendem aos carregamentos aplicados. Foram necessárias 5 simulações e durante elas houveram alterações nos valores relacionados a Tensão de Von Mises e o refino de malha. Foi encontrada uma tensão máxima bem abaixo do limite de escoamento do material utilizado $\sigma_e = 145MPa$. Encontrou-se um fator de segurança de 7,3, confirmando que a bancada atende aos requisitos para a execução do ensaio.

4.4.2 Desenhos Técnicos

O detalhamento dos elementos presentes na Tabela 4 foram representados através de desenhos técnicos com vistas em perspectiva, cotas e características. Eles encontram-se no Apêndice B.

5 CONCLUSÃO

No presente trabalho foi desenvolvido o projeto de uma bancada didática para estudo de flexão em vigas engastadas e biapoiadas utilizando extensometria buscando a viabilidade da aplicação prática dos conhecimentos teóricos. A fim de serem alcançados os objetivos propostos, foi projetada uma solução viável, utilizando as teorias e conceitos de resistência dos materiais e elementos de máquinas, confirmando a importância dos conhecimentos teóricos e sua aplicação prática, de maneira que facilite o desenvolvimento e criação de elementos e estruturas em nosso dia a dia.

O projeto foi desenvolvido em quatro etapas, quais sejam, informacional, conceitual, preliminar e detalhada. Em cada uma foram apresentadas as respectivas especificidades, tanto de origem teórica, quanto de materiais. Com isso o projeto se delineou de forma a permitir a compreensão de sua formação e assim, sua futura realização e utilização prática.

Para tal foram realizadas revisões bibliográficas, pesquisas a respeito do tema em bancadas similares já desenvolvidas, determinadas configurações, verificados cálculos, determinados e classificados requisitos, elaboradas listagens de materiais e componentes, bem como desenvolvidos desenhos técnicos a fim de demonstração da bancada e sua viabilidade.

Com base na revisão da bibliografia foi apresentado o embasamento teórico e de conceitos básicos necessários para o desenvolvimento e dimensionamento do projeto da estrutura da bancada didática. A metodologia de projeto de produtos utilizada foi uma ferramenta de grande utilidade para auxiliar o desenvolvimento de uma concepção de estrutura que atendesse as necessidades de projeto. Mostrou a existência de várias formas de resolver o problema proposto, viabilizando a concepção de estrutura para a bancada didática de forma organizada e precisa.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para projetos futuros relacionados ao tema de estudo do presente trabalho, pode-se elencar as seguintes sugestões:

- O dimensionamento das ligações parafusadas.
- A construção de um protótipo de bancada didática para a realização de ensaios de flexão.
- Realizar uma Análise de Modos de Falha e Efeitos (*Failure Mode and Effect Analysis – FMEA*) na bancada didática.

REFERÊNCIAS

ANDOLFATO, Rodrigo Piernas; CAMACHO, Jefferson Sidney; BRITO, GA de. Extensometria básica. **Ilha**, 2004.

AFINKOPOLIMEROS. **O que é o Ensaio de Flexão**. 2021. Disponível em: <<https://afinkopolimeros.com.br/o-que-e-o-ensaio-de-flexao/>>. Acesso em 15 mar. 2022.

ALMEIDA, PAO. Introdução à Extensometria Elétrica de Resistência-Notas de aula. **DEEF-Escola Politécnica da Universidade de São Paulo-1999**, 1996.

ASAD, Usman et al. Precise instrumentation of a diesel single-cylinder research engine. **Measurement**, v. 44, n. 7, p. 1261-1278, 2011

MAINE, E.; ASHBY, M. F. Materials Selection and Mechanical Design. **Encyclopedia of Materials: Science and Technology**, p. 5230-5236, 2011.

BACK, Nelson et al. Projeto integrado de produtos: planejamento, concepção e modelagem. 2008.

BAXTER, M. **Projeto de Produto** - Guia prático para o design de novos produtos. Editora Edgard Blucher. 1995.

BECKWITH, Thomas G.; BUCK, Nelson Lewis; MARANGONI, Roy D. **Mechanical measurements**. Reading, MA: Addison-Wesley, 1969.

BEER JR, F. P. Russell Johnston E, DeWolf JT, Mazurek D F. **Mechanics of Materials (6th edition)**. New York: McGraw-Hill, 2012.

BORCHARDT, I. G.; ZARO, M. A.. **Extensômetros de resistência elétrica**: princípios de operação e utilização em transdutores. 1ed. Porto Alegre: Ed. Da Universidade, UFRGS, 1982.

SHIGLEY, Joseph E.; BUDYNAS, Richard G.; NISBETT, J. Keith. Elementos de máquinas de Shigley. **AMGH Editora Ltda, 8ª ed, São Paulo, Brasil**, 2011.

CARPES, Felipe P. et al. Bilateral Pedaling Asymmetry during a Simulated 40 km Cycling Time-Trial: 2206: Board# 143 3: 00 PM–4: 00 PM. **Medicine & Science in Sports & Exercise**, v. 38, n. 5, p. S394, 2006.

CREUS A. **Instrumentacion Industrial**. 3.ed. Marcombo: Barcelona, 1985.

DOEBELIN, Ernest O.; MANIK, Dhanesh N. Measurement systems: application and design. 2007.

EDUTECHLAHORE. **Cantilever Beam Apparatus**. 2021. Disponível em: <<https://www.edutechlahore.com/strength-of-materials/sm-201-cantilever-beam-apparatus>>. Acesso em: 15 mar. 2022.

ENSUS. **Instalação de extensômetro.** 2022. Disponível em: <<https://ensus.com.br/extensometria-strain-gauge-o-que-e-quando-utilizar/>>. Acesso em: 10 jun. 2022.

FABIÁN, Gabriel Gonçalves. Desenvolvimento de bancada didática voltada ao estudo de Sistemas pneumáticos. 2017.

GALLINA, R. Os extensômetros elétricos resistivos: evolução, aplicações e tendências. **Universidade de São Judas Tadeu, Dissertação de mestrado. São Paulo**, 2003.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; DOS SANTOS, C. A. **Ensaio dos materiais.** Edição única. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

GENEROSO, D. J. **Elementos de Máquinas.** Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de Santa Catarina. 2009.

GERDAU. **Catálogo de produtos.** 2006. Disponível em: <<https://www.slideshare.net/almeidafs/catalogo-tecnico-gerdau>>. Acesso em: 06 jun. 2022.

GIORDANI, Paolo; SÖDERLIND, Paul. Inflation forecast uncertainty. **European Economic Review**, v. 47, n. 6, p. 1037-1059, 2003.

HIBBELER, R. C. **Mechanics of Materials.** 8. ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2010.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais.** 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.

HOFFMANN, Karl. **An introduction to measurements using strain gauges.** Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, 1989.

HUTTON, D. V. **Fundamentals of Finite Element Analysis.** 1. ed. New York: McGraw- Hill, 2004.

INFINITTECHNOLOGIES. **SM-1415 Unsymmetrical Cantilever Apparatus.** 2022. Disponível em: <<https://infinitt-technologies.com/product/sm-1415-unsymmetrical-cantilever-apparatus/>>. Acesso em: 19 mar. 2022.

JEET. **Sapata Niveladora.** 2022. Disponível em: <<http://www.jeet.com.br/produto.php?url=sapata-niveladora>>. Acesso em: 19 mar.2022.

METAQUIMICA. **Porta peso padrão inox.** 2015 Disponível em: <<https://www.metaquimica.com/porta-peso-padrao-inox.html>>. Acesso em: 05 abr. 2022

MELCONIAN, Sarkis. **Elementos de máquinas.** 9ªed. Editora Érica. São Paulo 2008.

NI. **What Is Data Acquisition?** National Instruments. 2022. Disponível em:

<<https://www.ni.com/pt-br/shop/data-acquisition.html>>. Acesso em: 02 abr. 2022.

NI. **LabVIEW System Design Software**. 2022. Disponível em: <<https://www.ni.com/pt-br/shop/software/products/labview.html>>. Acesso em: 02 abr. 2022.

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

PAHL, G. et al. **Engineering Design: A Systematic Approach Third Edition**. Berlin, Springer Science+ Business Media Deutschland GmbH, 2007. 632, 2007.

PARCO. **45 SERIES, Lite 45mm x 45mm Smooth T Slot Aluminum Framing Extrusion**. 2022. Disponível em: <<https://parco-inc.com/product/45mm-x-45mm-lite-t-slotted-extrusion-smooth-cut-to-length/>>. Acesso em: 10 jul. 2022.

RODRIGUES, Marcelo Urdapilleta. Desenvolvimento de célula de carga para medir força aplicada durante a escovação dental. 2002.

ROMANO, L. N. **Desenvolvimento de máquinas agrícolas: planejamento, projeto e produção**. São Paulo: Blücher Acadêmico, 2013.

ROZENFELD, H. et al. **Gestão de desenvolvimento de produtos: uma referência para a melhoria do processo**. São Paulo: Saraiva, 2006. v. 53

SILVÉRIO, Hudson Alves; FLAUZINO NETO, Wilson Pires; PASQUINI, Daniel. Effect of incorporating cellulose nanocrystals from corncob on the tensile, thermal and barrier properties of poly (vinyl alcohol) nanocomposites. **Journal of Nanomaterials**, v. 2013, 2013.

SHIGLEY, J. E.; MISCHKE, C. R.; BUDYNAS, R. G. **Projeto de engenharia mecânica**. 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

SOLOTEST. **Jogo de peso total 50kg**. 2022. Disponível em: <<https://solotest.com.br/novo/produtos/adensamento--jogo-de-peso-total-50-kg-/1.055.007>>. Acesso em: 14 mar. 2022.

DE SOUZA, Sergio Augusto. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos: Fundamentos teóricos e práticos**. Editora Blucher, 1982.

TECQUIPMENT. **Beam apparatus**. 2022. Disponível em: <<https://www.tecquipment.com/beam-apparatus>>. Acesso em: 18 mar. 2022.

TEIXEIRA, Angélico Loreto; SCHERER, Lucas Giuliani; GORRETTI, Ana Alice Timm. Projeto de bancadas didáticas para laboratório de instalações elétricas. 2018.

VALDIERO, Antonio Carlos. Inovação e desenvolvimento do projeto de produtos industriais. Ijuí: Unijuí, 1997.

VALIDO, Aníbal; SILVA, J. Duarte. Introdução à extensometria elétrica de

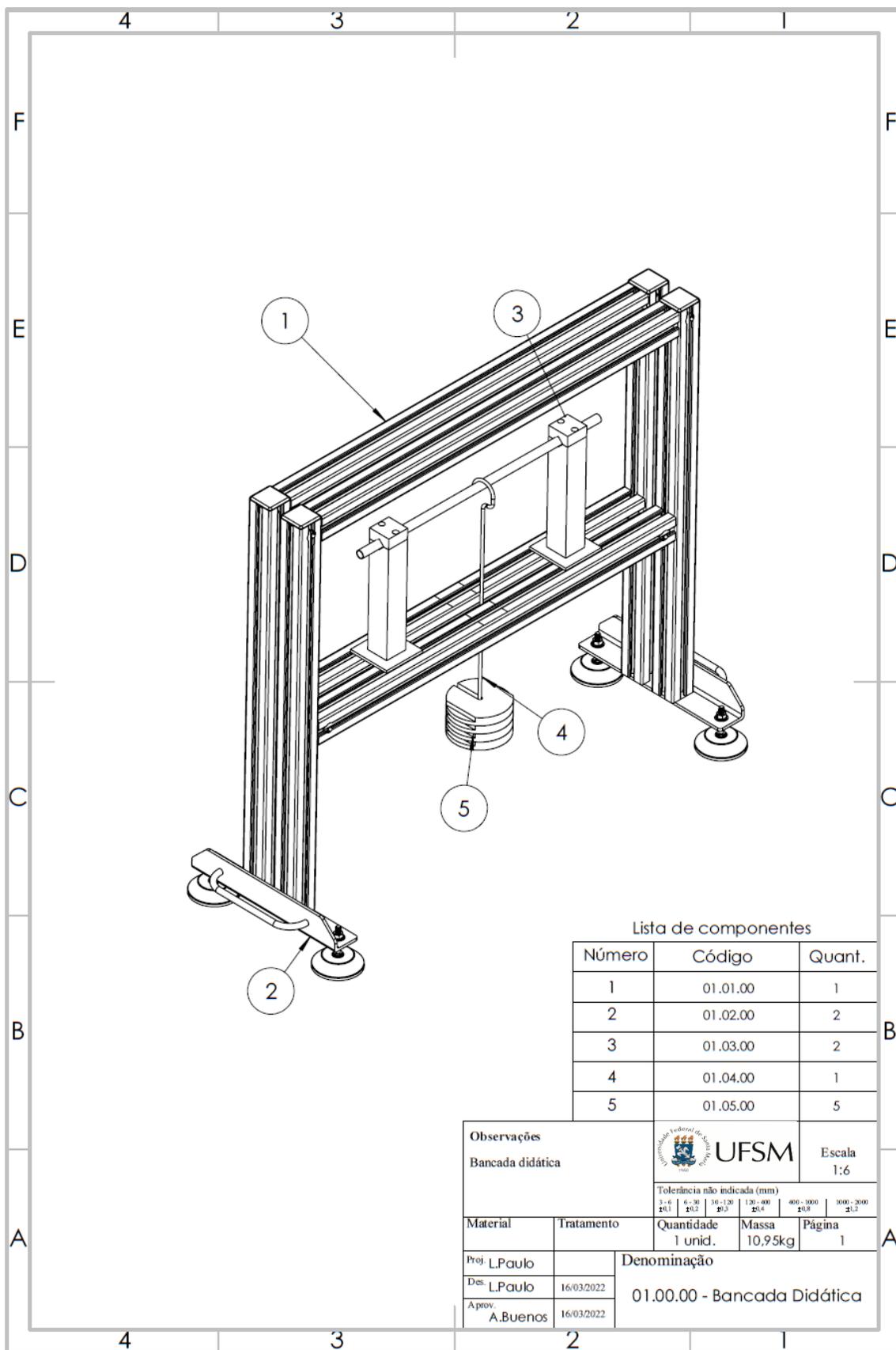
resistência. **Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Superior de Tecnologia, Setúbal**, 1997.

WANG, Lin; TAN, Ying Ying; CUI, Xiao Long. The application of LabVIEW in data acquisition system of solar absorption refrigerator. In: **Advanced Materials Research**. Trans Tech Publications Ltd, 2012. p. 581-585.

APÊNDICE A – MATRIZ QUALITY FUNCTION DEPLOYMENT (QFD)

Desdobramento da função qualidade (QFD). Equipamento: Bancada didática		Nível de relação														
		Peso	Relação		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
		9	Forte	⊖												
		3	Média	○												
		1	Fraca	▲												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11				
Número da coluna.		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11				
Número da linha.	Requisitos de Projeto.															
	Requisitos do Cliente.															
		Coeficiente de segurança (S)														
		Carga (N)														
		Deflexão (mm)														
		Número de componentes de proteção (unidades)														
		Nível de proteção superficial (unidade)														
		Dimensões/Geometria (m)														
		Massa total (kg)														
		Tempo de montagem (H)														
		Número de componentes (Unidades)														
		Número de ferramentas (Unidades)														
		Custo (R\$)														
	1	Possuir materiais que resistam aos esforços aplicados.	○	○	○					○						▲
	2	Ser mecanicamente resistente.	○	○	○					▲						○
3	Não conter cantos pontiagudos ou cortantes.	○	○	○					▲							
4	Ser resistente à corrosão.							⊖	▲						▲	
5	Permitir utilização em qualquer tipo de superfície.	▲	▲						⊖							
6	Oferecer facilidade de transporte.		○	▲											▲	
7	Possuir peças de fácil montagem e desmontagem								○		⊖	○	○			
8	Possuir comandos e utilização de fácil operação.					▲	▲					▲				
9	Ter materiais com facilidade de serem encontrados e de baixo custo.						▲								⊖	
10																
11																
12																
13																
14																
15																
Máximo relacionamento na coluna		9	9	3	9	1	1	9	9	3	3	1				
Somatório da importância (requisitos de projeto)		44	50	32	20	22	10	26	18	8	6	30				
Ordem de importância		2*	1*	3*	7*	6*	9*	5*	8*	10*	11*	4*				

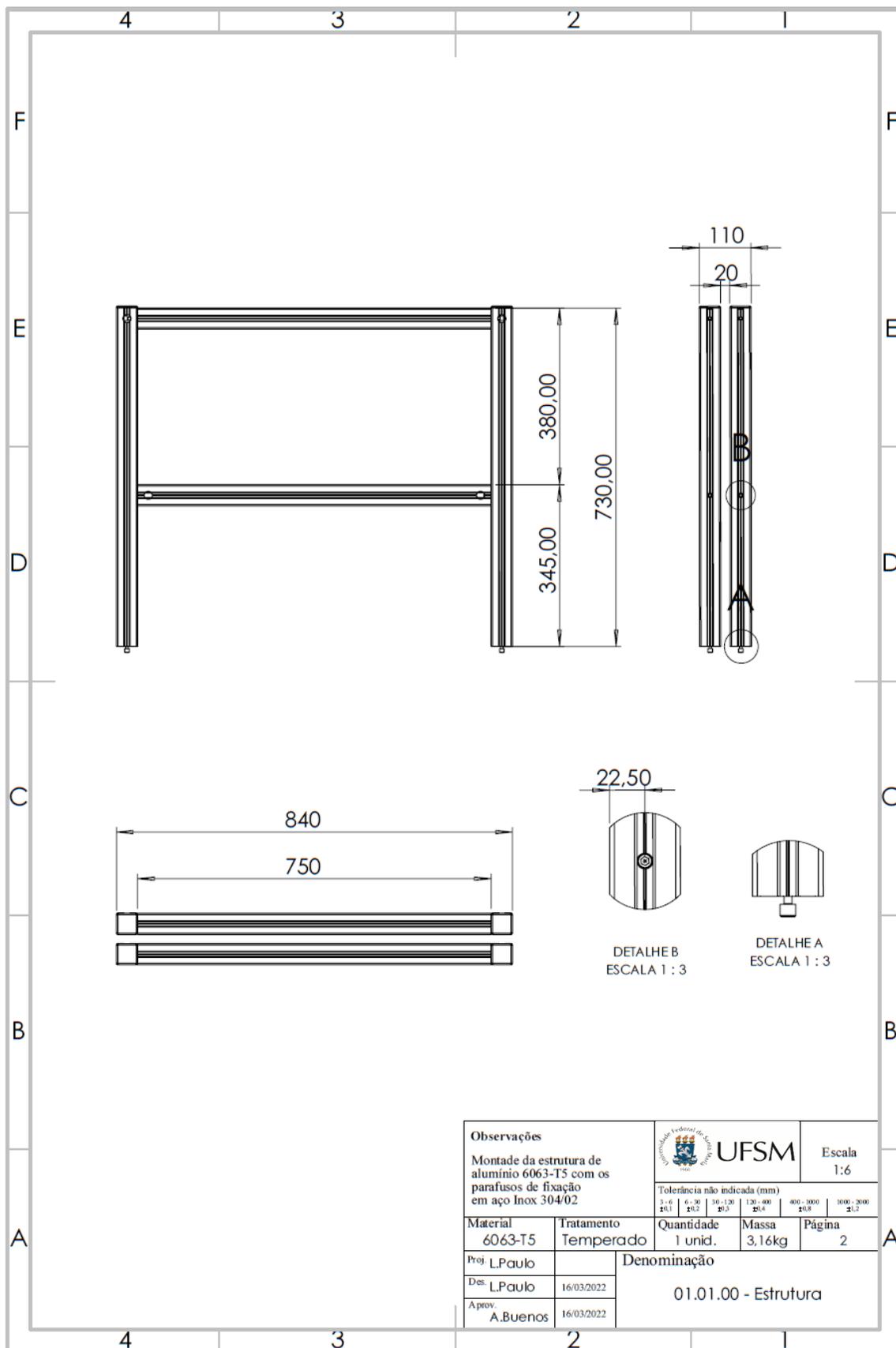
APÊNDICE B - DETALHAMENTO DOS COMPONENTES DA BANCADA DIDÁTICA



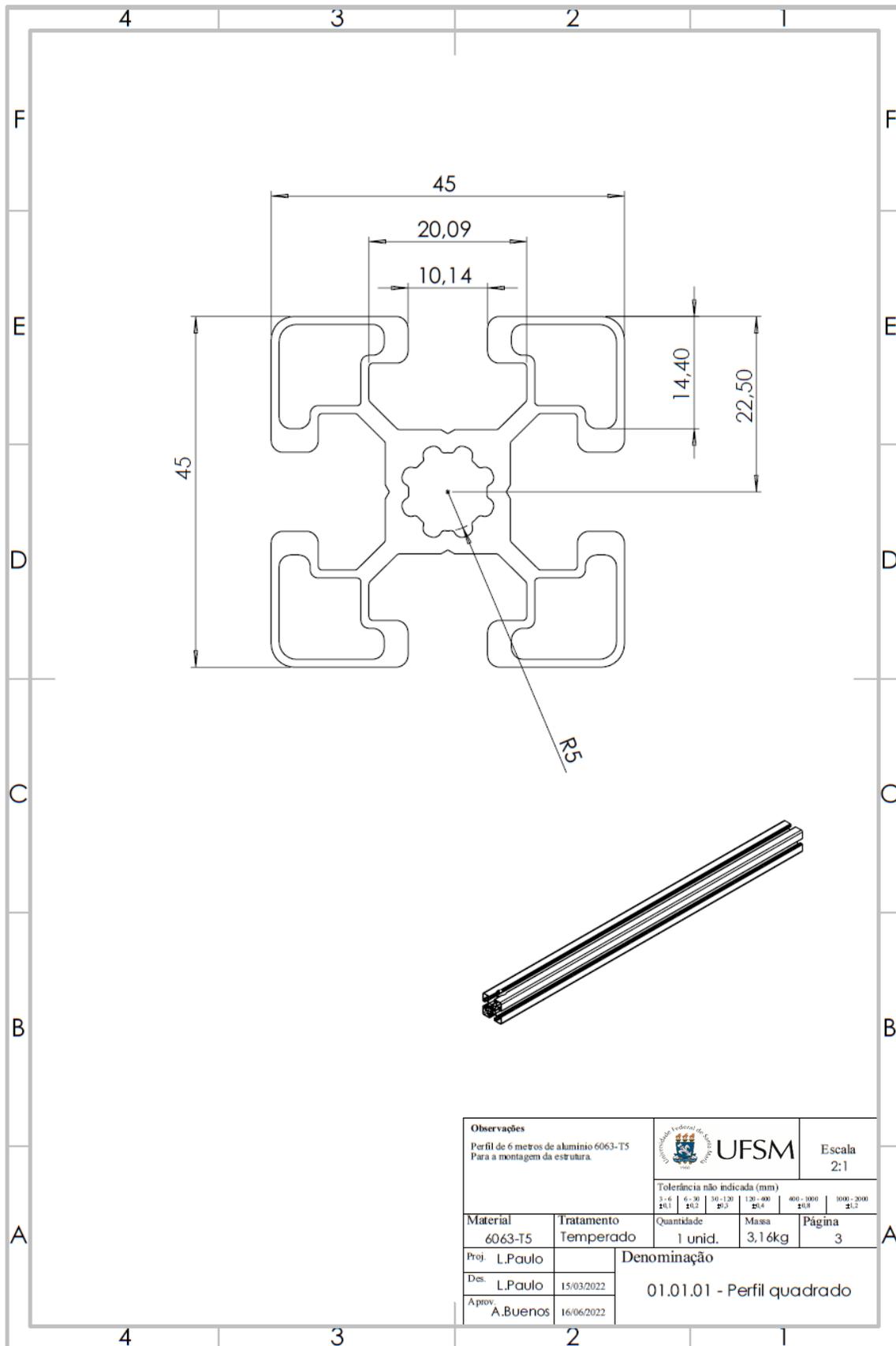
Lista de componentes

Número	Código	Quant.
1	01.01.00	1
2	01.02.00	2
3	01.03.00	2
4	01.04.00	1
5	01.05.00	5

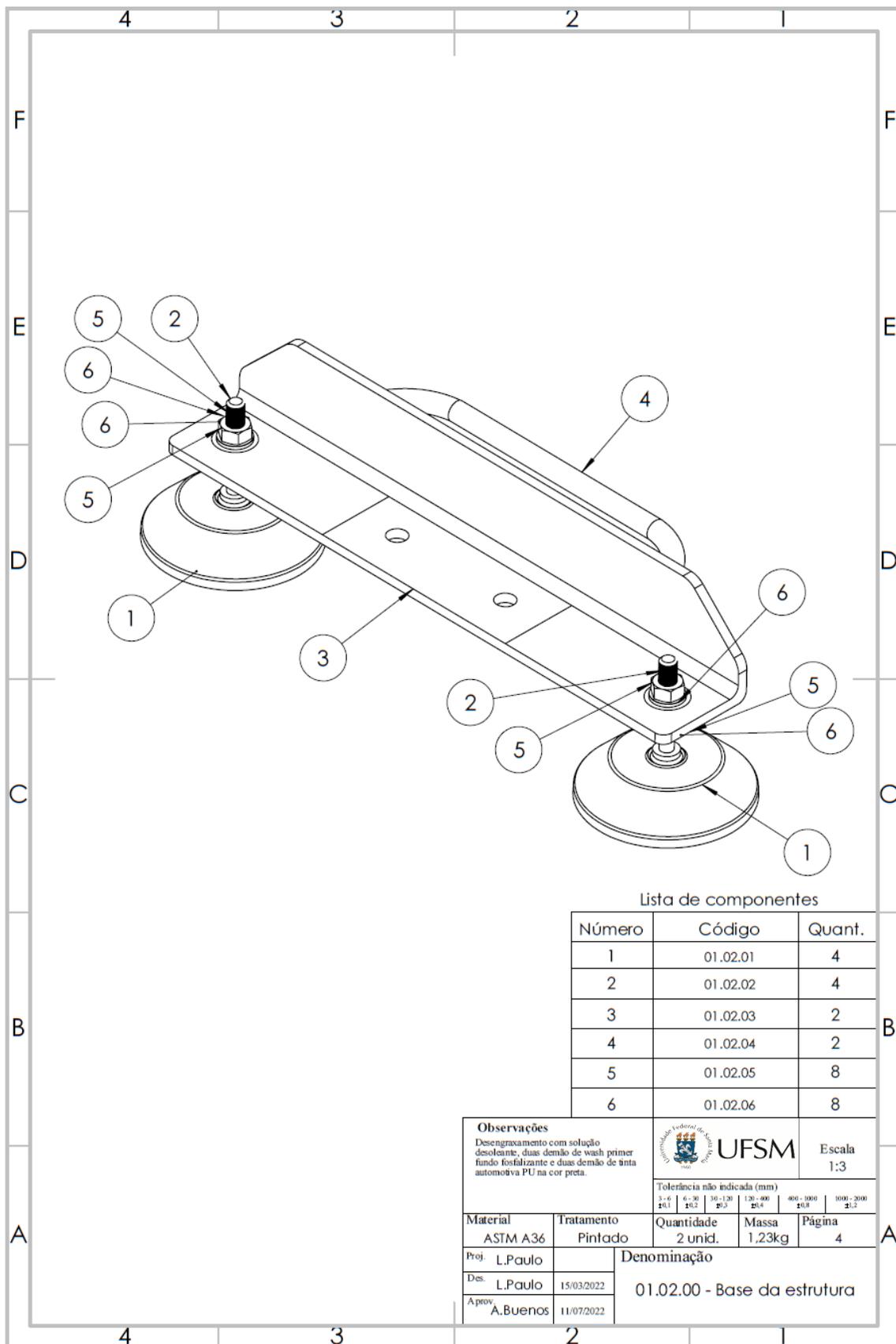
Observações Bancada didática		 UFSM		Escala 1:6
Tolerância não indicada (mm)				
3 - 6	6 - 30	30 - 120	120 - 400	400 - 1000
±0.1	±0.2	±0.3	±0.4	±0.8
Material	Tratamento	Quantidade 1 unid.	Massa 10,95kg	Página 1
Proj. L.Paulo		Denominação 01.00.00 - Bancada Didática		
Des. L.Paulo	16/03/2022			
Aprov. A.Buenos	16/03/2022			



Observações Montada da estrutura de alumínio 6063-T5 com os parafusos de fixação em aço Inox 304/02		 UFSM		Escala 1:6
		Tolerância não indicada (mm)		
		3 - 6	6 - 30	30 - 120
		±0,1	±0,2	±0,3
		120 - 400	400 - 1000	1000 - 2000
		±0,4	±0,8	±1,2
Material 6063-T5	Tratamento Temperado	Quantidade 1 unid.	Massa 3,16kg	Página 2
Proj. L.Paulo	Denominação			
Des. L.Paulo	16/03/2022	01.01.00 - Estrutura		
Aprov. A.Buenos	16/03/2022			



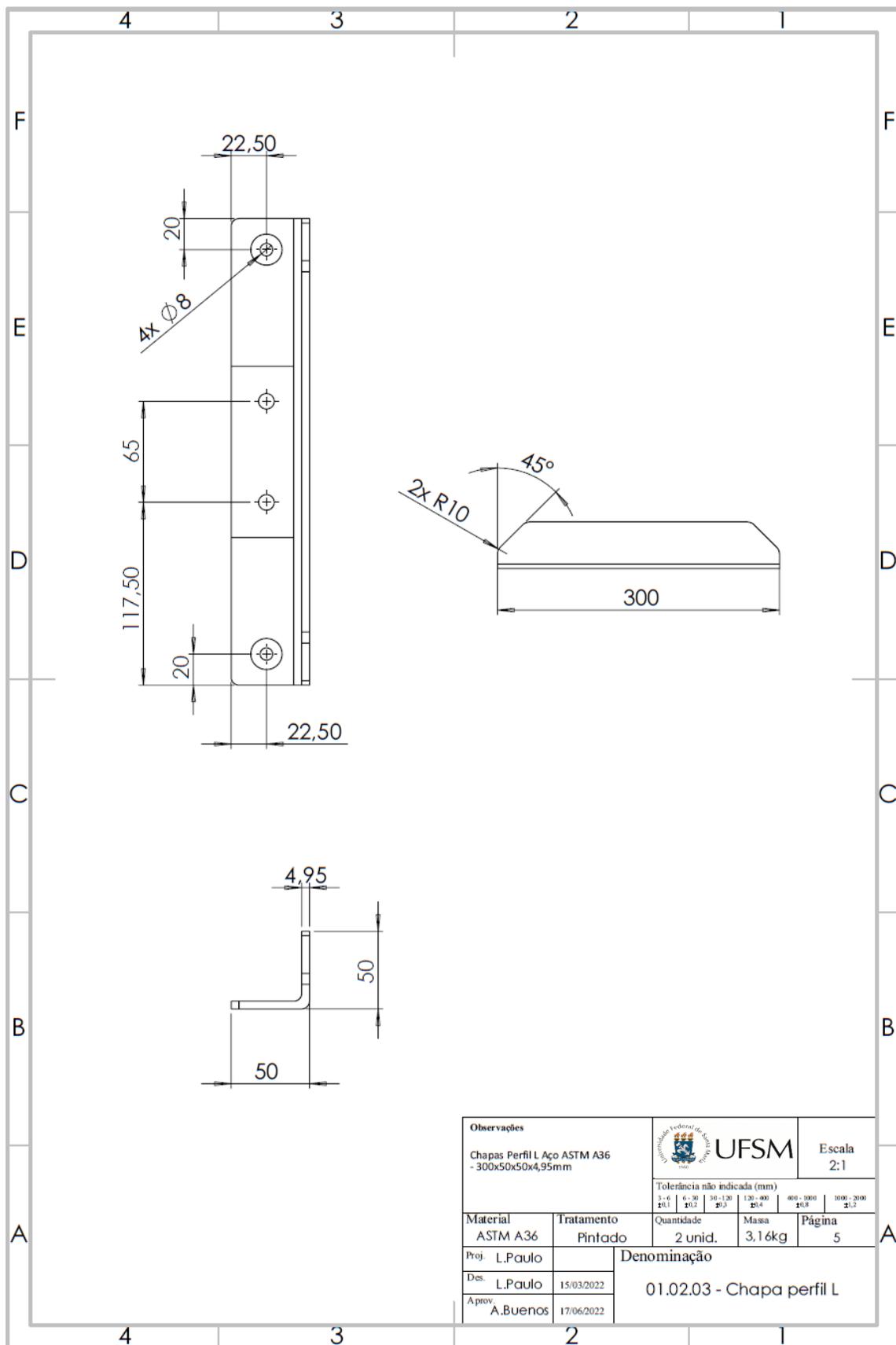
Observações Perfil de 6 metros de alumínio 6063-T5 Para a montagem da estrutura.		 UFESM		Escala 2:1
Tolerância não indicada (mm)				
		3-6 6-30 30-120 120-400 400-1000 1000-2000 ±0,1 ±0,2 ±0,3 ±0,4 ±0,8 ±1,2		
Material 6063-T5	Tratamento Temperado	Quantidade 1 unid.	Massa 3,16kg	Página 3
Proj. L.Paulo	Denominação			
Des. L.Paulo	15/03/2022	01.01.01 - Perfil quadrado		
Aprov. A.Buenos	16/06/2022			



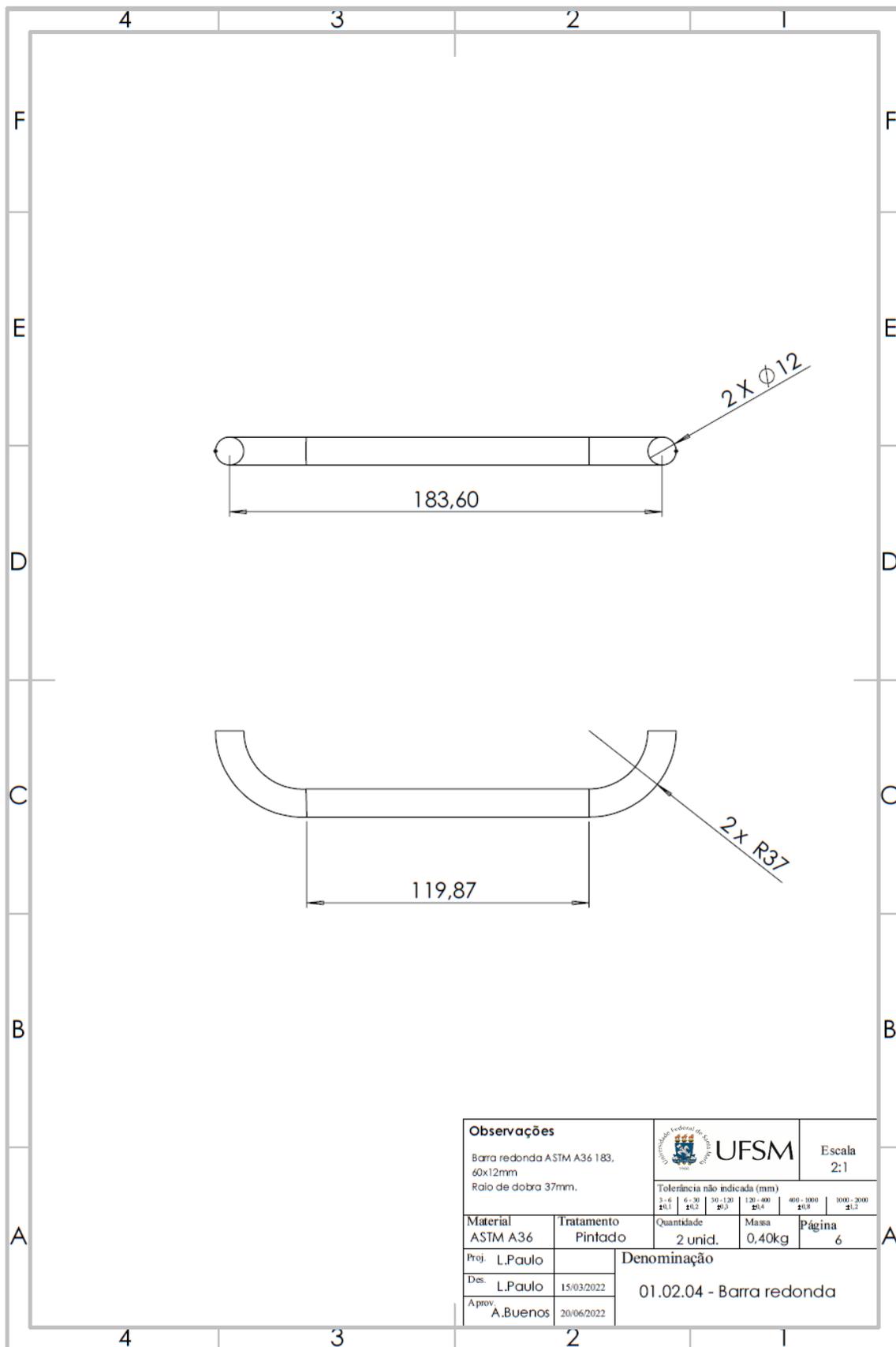
Lista de componentes

Número	Código	Quant.
1	01.02.01	4
2	01.02.02	4
3	01.02.03	2
4	01.02.04	2
5	01.02.05	8
6	01.02.06	8

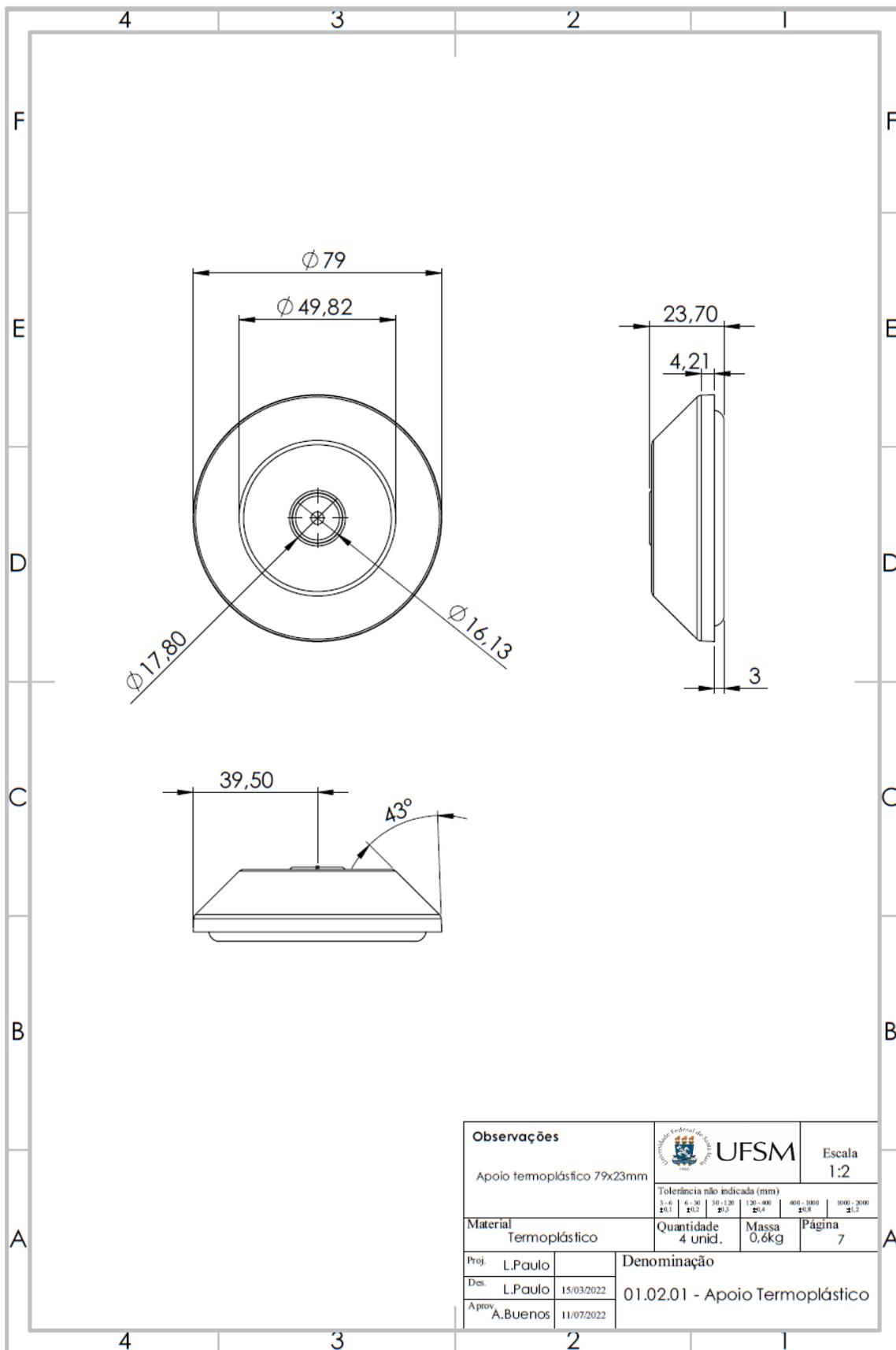
Observações Desengravar com solução desengrante, duas demão de wash primer fundo fosforante e duas demão de tinta automotiva PU na cor preta.		 UFMS		Escala 1:3
Tolerância não indicada (mm) 3 - 6 6 - 30 30 - 120 120 - 400 400 - 1000 1000 - 2000 ±0,1 ±0,2 ±0,3 ±0,4 ±0,5 ±0,7				
Material ASTM A36	Tratamento Pintado	Quantidade 2 unid.	Massa 1,23kg	Página 4
Proj. L.Paulo		Denominação 01.02.00 - Base da estrutura		
Des. L.Paulo	15/03/2022			
Aprov. A.Buenos	11/07/2022			



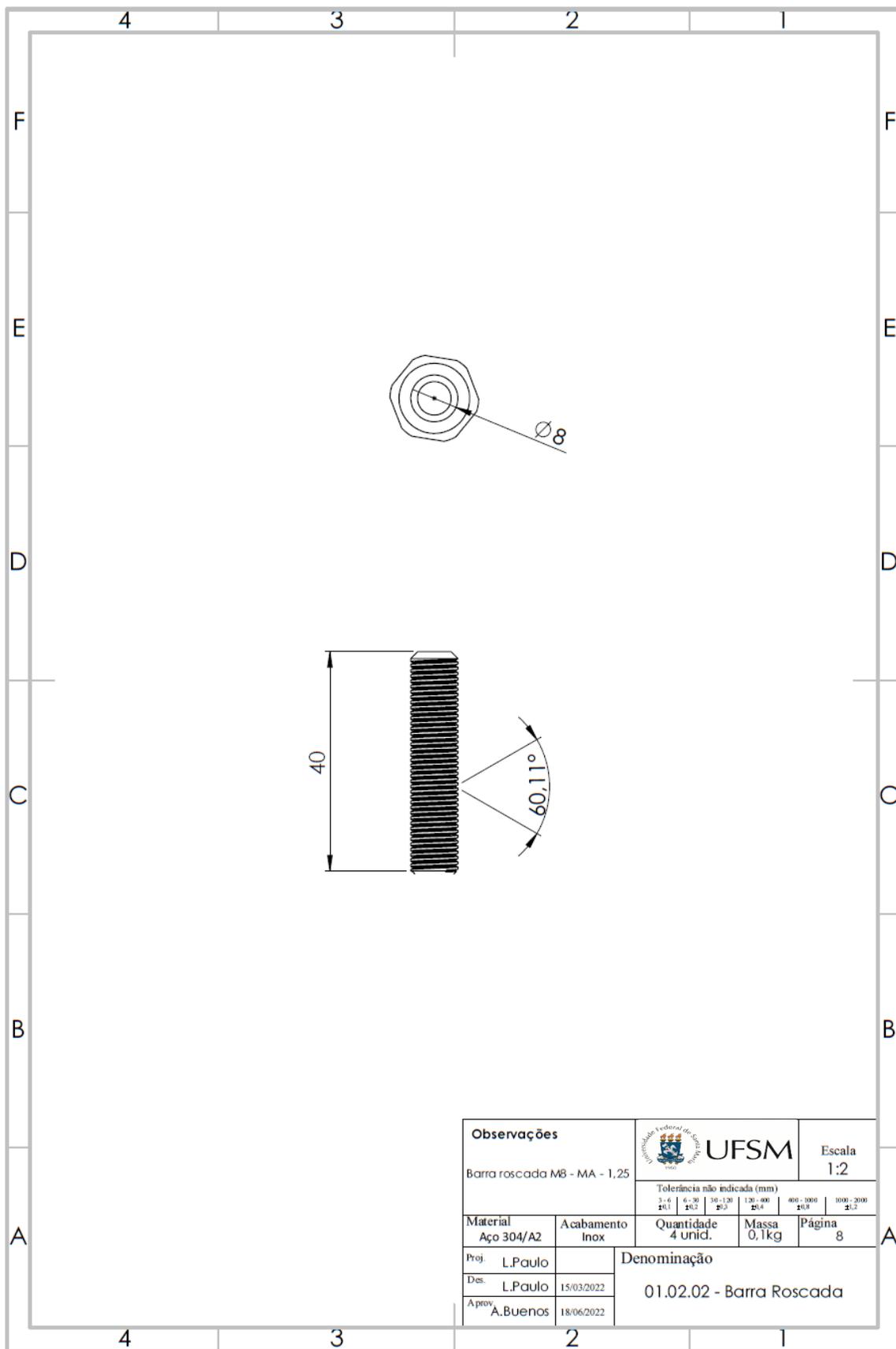
Observações Chapas Perfil L Aço ASTM A36 - 300x50x50x4,95mm		 UFSM		Escala 2:1	
Tolerância não indicada (mm)					
3-6	6-30	30-120	120-400	400-1000	
±0.1	±0.2	±0.3	±0.4	±0.5	
Material	Tratamento	Quantidade	Massa	Página	
ASTM A36	Pintado	2 unid.	3,16kg	5	
Proj. L.Paulo	Denominação 01.02.03 - Chapa perfil L				
Des. L.Paulo					15/03/2022
Aprov. A.Buenos					17/06/2022



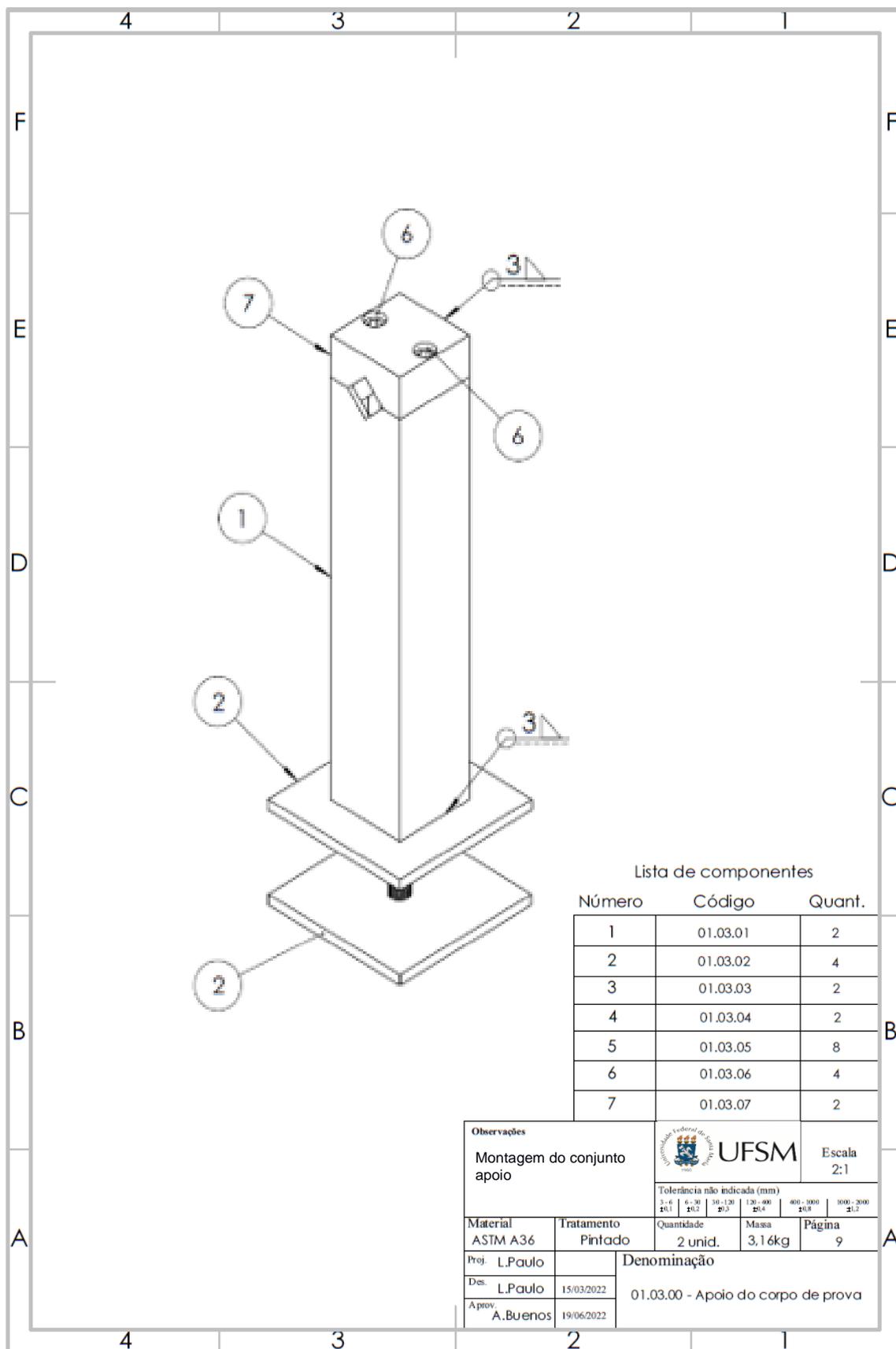
Observações		 UFESM		Escala			
Barra redonda ASTM A36 183,60x12mm Raio de dobra 37mm.				2:1			
		Tolerância não indicada (mm)					
		3 - 6	6 - 30	30 - 120	120 - 400	400 - 1000	1000 - 2000
		±0,1	±0,2	±0,3	±0,4	±0,8	±1,2
Material	Tratamento	Quantidade	Massa	Página			
ASTM A36	Pintado	2 unid.	0,40kg	6			
Proj.	Des.	Denominação					
L.Paulo	L.Paulo						
Aprov.	15/03/2022						
A.Buenos	20/06/2022	01.02.04 - Barra redonda					



Observações		 UFSM		Escala 1:2
Apoio termoplástico 79x23mm		Tolerância não indicada (mm)		
		3 - 6	6 - 30	30 - 120
		±0.1	±0.2	±0.3
		120 - 400	400 - 1000	1000 - 2000
		±0.4	±0.6	±1.0
Material	Termoplástico	Quantidade	4 unid.	Massa
				0,6kg
				Página
				7
Proj.	L.Paulo	Denominação		
Des.	L.Paulo 15/03/2022	01.02.01 - Apoio Termoplástico		
Aprov.	A.Buenos 11/07/2022			



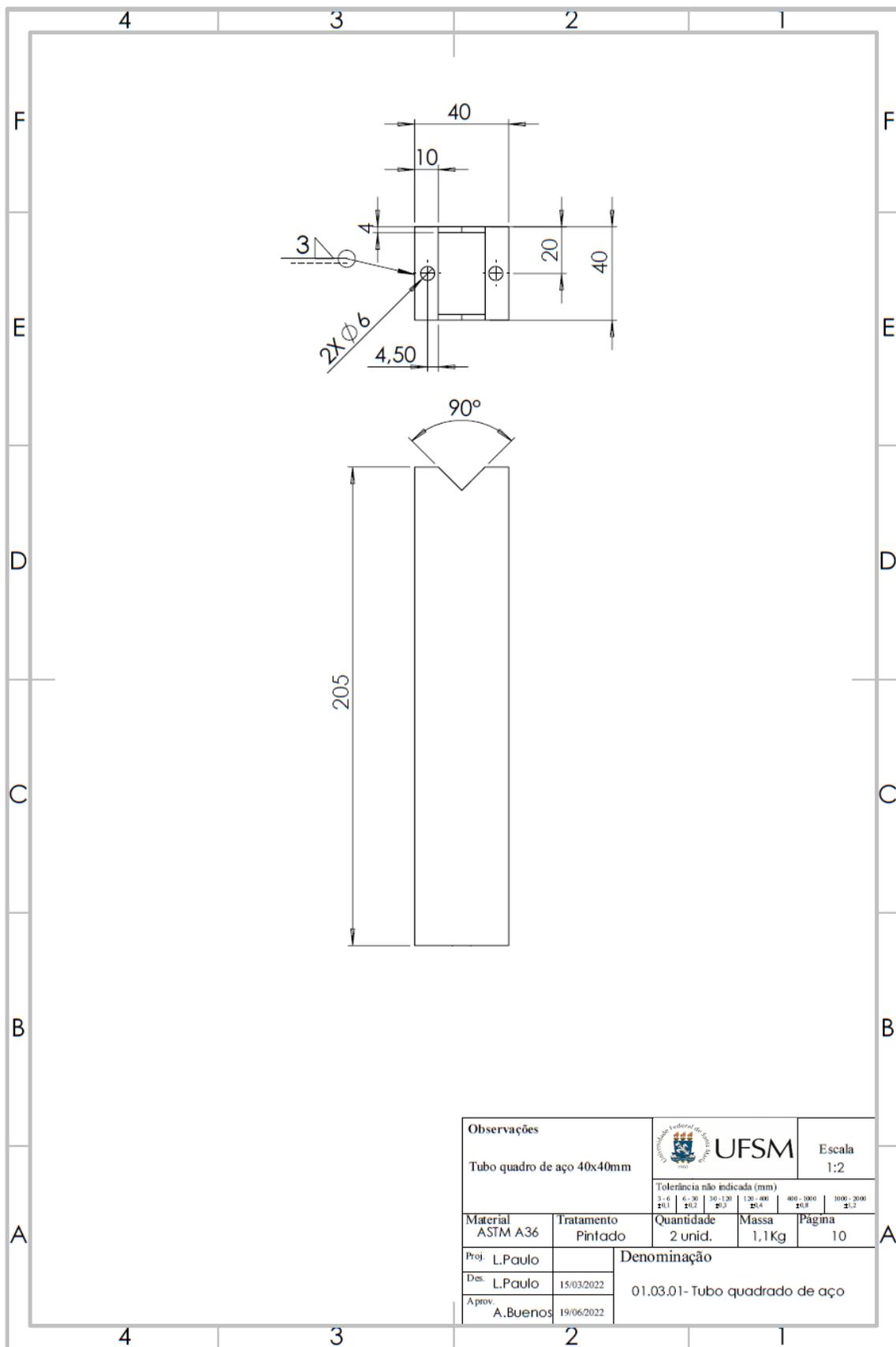
Observações		 UFESM		Escala 1:2	
Barra rosca M8 - MA - 1,25		Tolerância não indicada (mm) 3-6 6-30 30-120 120-400 400-1000 1000-2000 21,1 21,2 21,2 21,4 21,8 21,2			
Material Aço 304/A2	Acabamento Inox	Quantidade 4 unid.	Massa 0,1kg	Página 8	
Proj. L.Paulo	Denominação 01.02.02 - Barra Roscada				
Des. L.Paulo					15/03/2022
Aprov. A.Buenos					18/06/2022



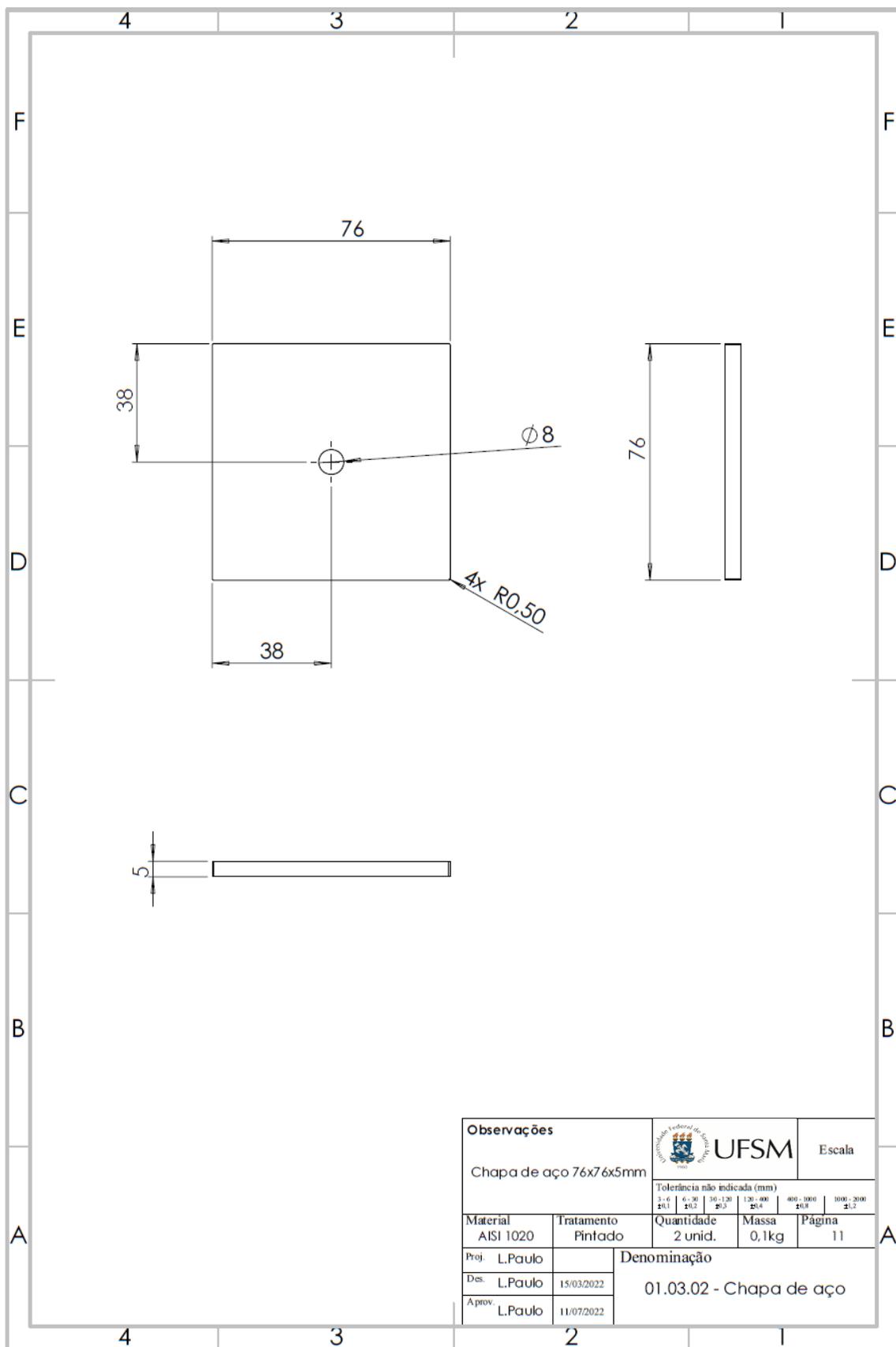
Lista de componentes

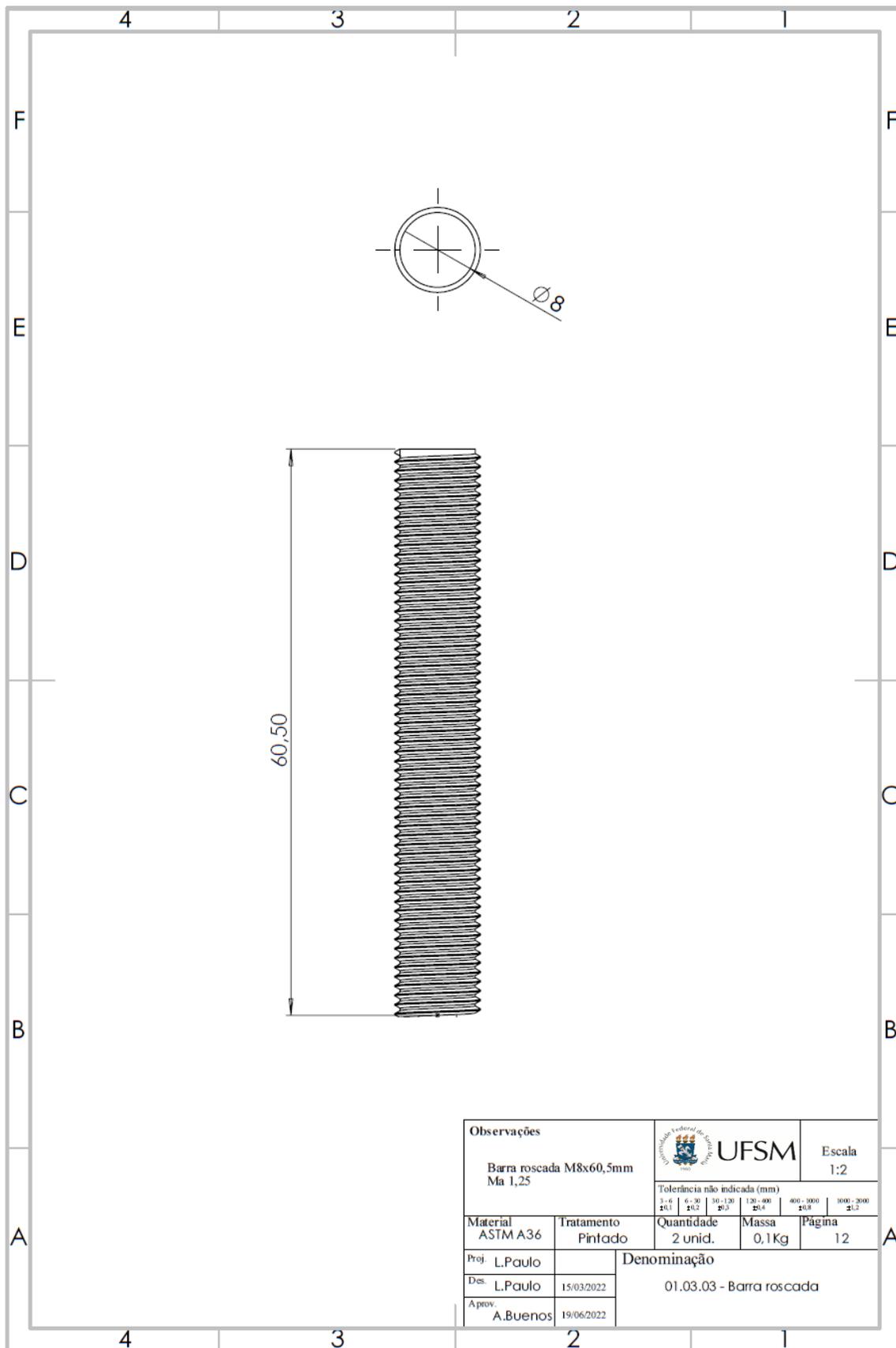
Número	Código	Quant.
1	01.03.01	2
2	01.03.02	4
3	01.03.03	2
4	01.03.04	2
5	01.03.05	8
6	01.03.06	4
7	01.03.07	2

Observações Montagem do conjunto apoio		 UFESM		Escala 2:1	
Tolerância não indicada (mm)					
		3 - 6	6 - 30	30 - 120	
		±0,1	±0,2	±0,3	
		120 - 400	400 - 1000	1000 - 2000	
		±0,4	±0,5	±0,7	
Material	Tratamento	Quantidade	Massa	Página	
ASTM A36	Pintado	2 unid.	3,16kg	9	
Proj. L.Paulo	Denominação 01.03.00 - Apoio do corpo de prova				
Des. L.Paulo					15/03/2022
Aprov. A.Buenos					19/06/2022

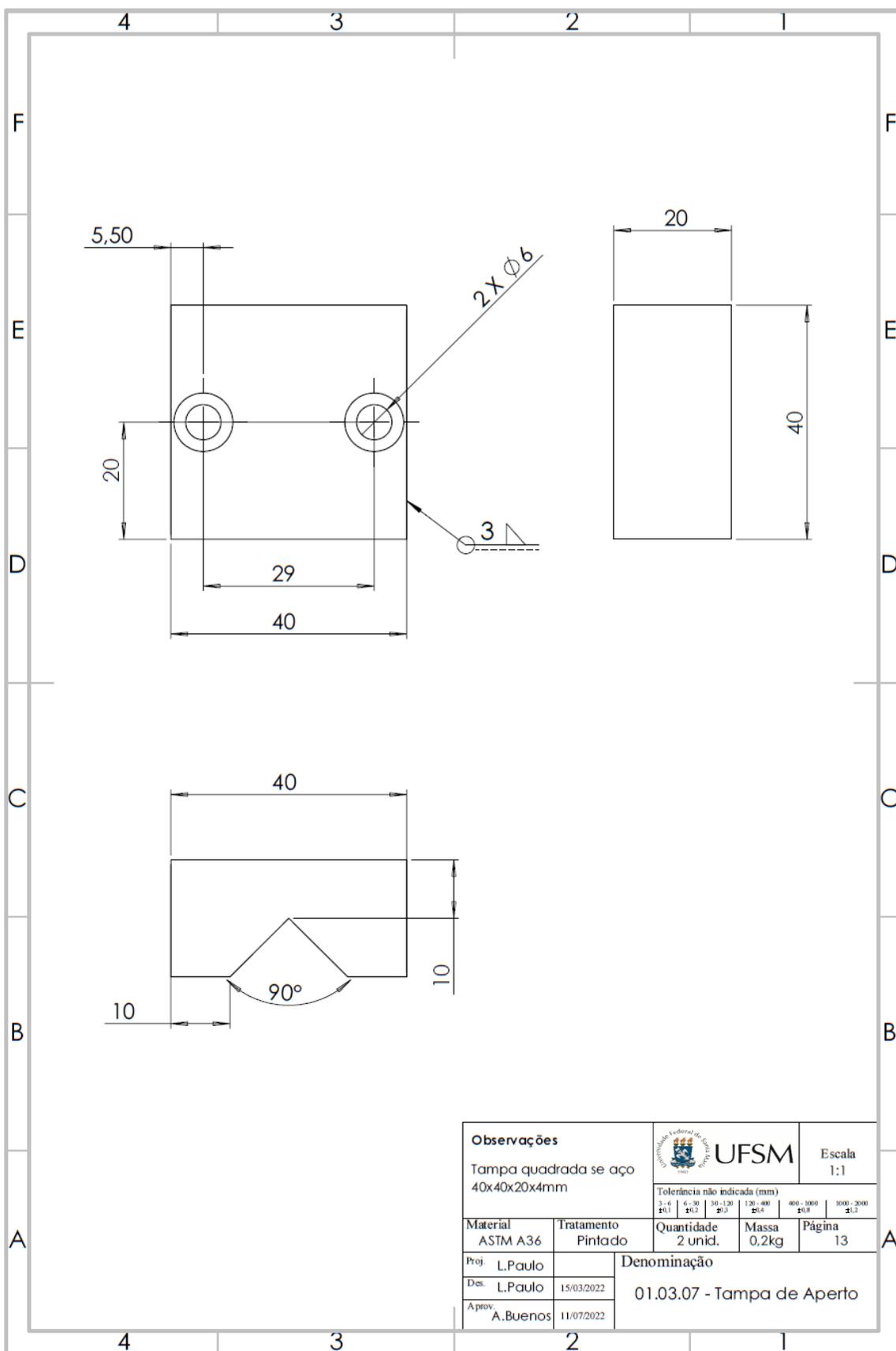


Observações		 UFESM Universidade Federal de Santa Maria		Escala 1:2													
Tubo quadro de aço 40x40mm				Tolerância não indicada (mm) <table border="1"> <tr> <td>3-6</td> <td>6-30</td> <td>30-120</td> <td>120-400</td> <td>400-1000</td> <td>1000-2000</td> </tr> <tr> <td>±0,1</td> <td>±0,2</td> <td>±0,3</td> <td>±0,4</td> <td>±0,8</td> <td>±1,2</td> </tr> </table>				3-6	6-30	30-120	120-400	400-1000	1000-2000	±0,1	±0,2	±0,3	±0,4
3-6	6-30	30-120	120-400	400-1000	1000-2000												
±0,1	±0,2	±0,3	±0,4	±0,8	±1,2												
Material ASTM A36	Tratamento Pintado	Quantidade 2 unid.	Massa 1,1Kg	Página 10													
Proj. L.Paulo	Denominação 01.03.01- Tubo quadrado de aço																
Des. L.Paulo						15/03/2022											
Aprov. A.Buenos						19/06/2022											

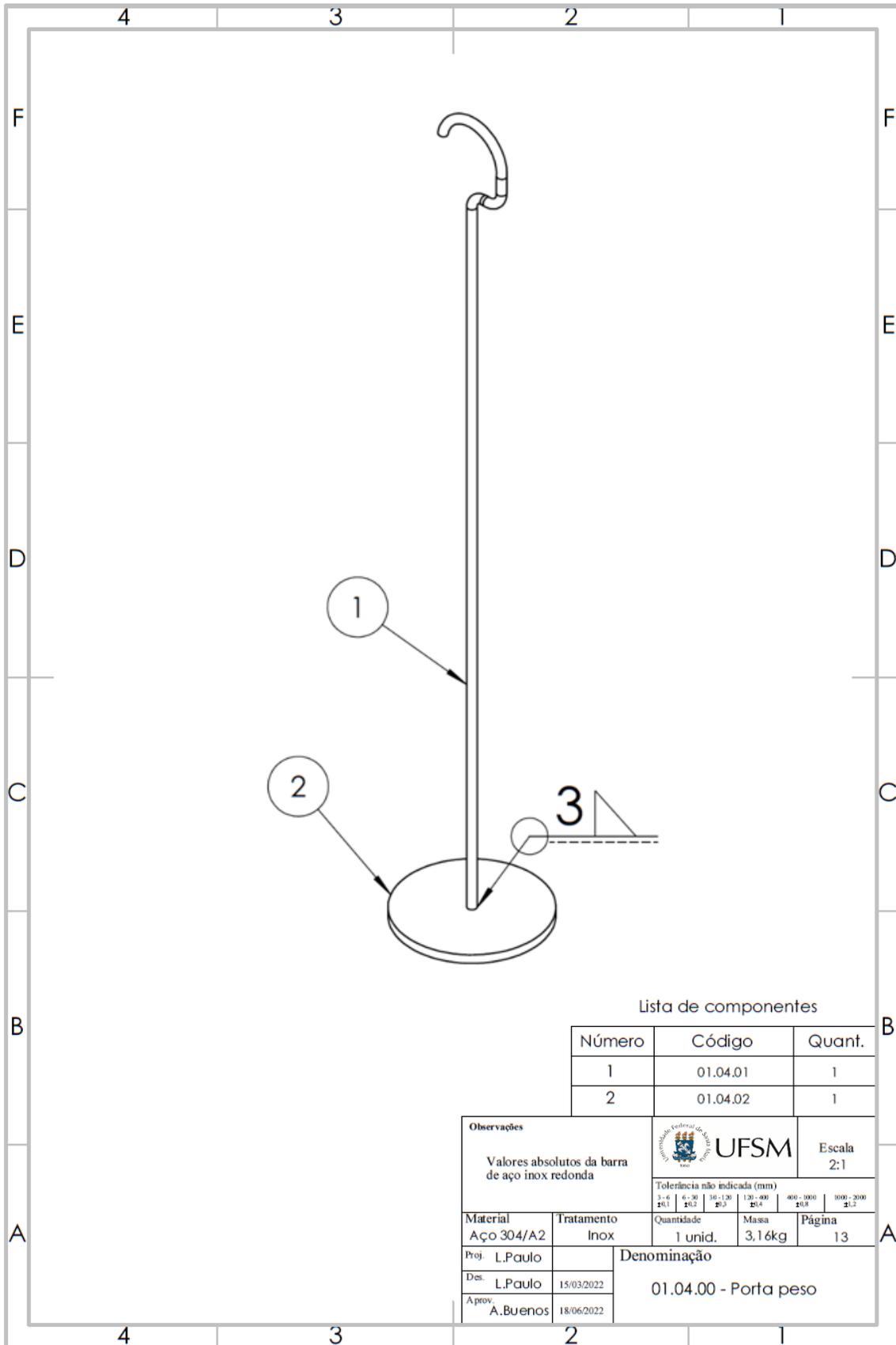




Observações Barra rosca M8x60,5mm Ma 1,25		 UFESM		Escala 1:2
Tolerância não indicada (mm)				
3 - 6	6 - 30	30 - 120	120 - 400	400 - 1000
±0,1	±0,2	±0,3	±0,4	±0,8
Material ASTM A36		Tratamento Pintado	Quantidade 2 unid.	Massa 0,1Kg
Proj. L.Paulo		Denominação 01.03.03 - Barra rosca		
Des. L.Paulo		15/03/2022		
Aprov. A.Buenos		19/06/2022		
		Quantidade 2 unid.		Massa 0,1Kg
		Denominação 01.03.03 - Barra rosca		
		15/03/2022		19/06/2022



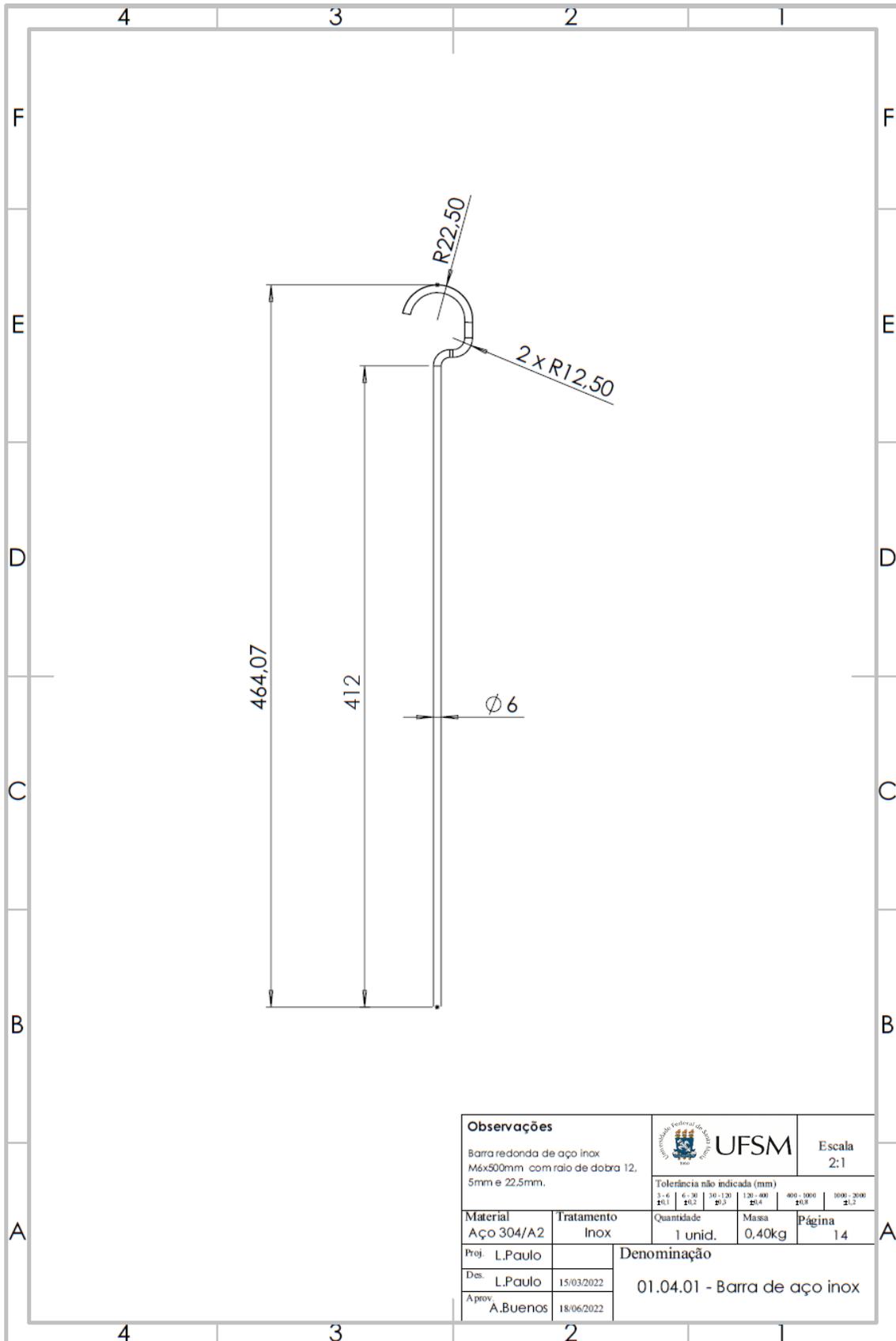
Observações				Escala			
Tampa quadrada se aço 40x40x20x4mm				1:1			
		Tolerância não indicada (mm)					
		3-6	6-30	30-120	120-400	400-1000	1000-2000
		±0,1	±0,2	±0,3	±0,4	±0,5	±1,2
Material	Tratamento	Quantidade	Massa	Página			
ASTM A36	Pintado	2 unid.	0,2kg	13			
Proj.	Des.	Denominação					
L.Paulo	15/03/2022						
Aprov.	11/07/2022						
		01.03.07 - Tampa de Aperto					



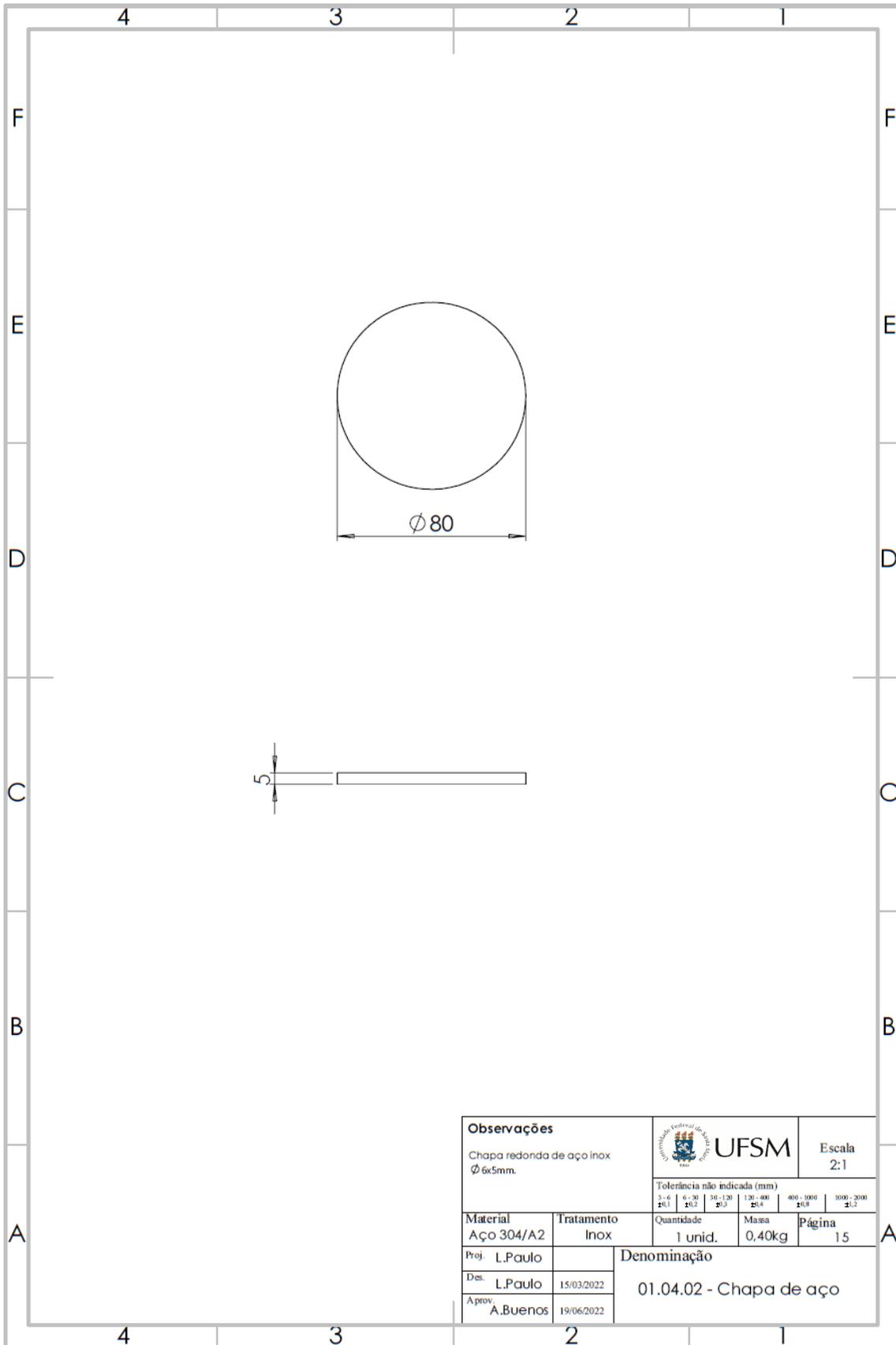
Lista de componentes

Número	Código	Quant.
1	01.04.01	1
2	01.04.02	1

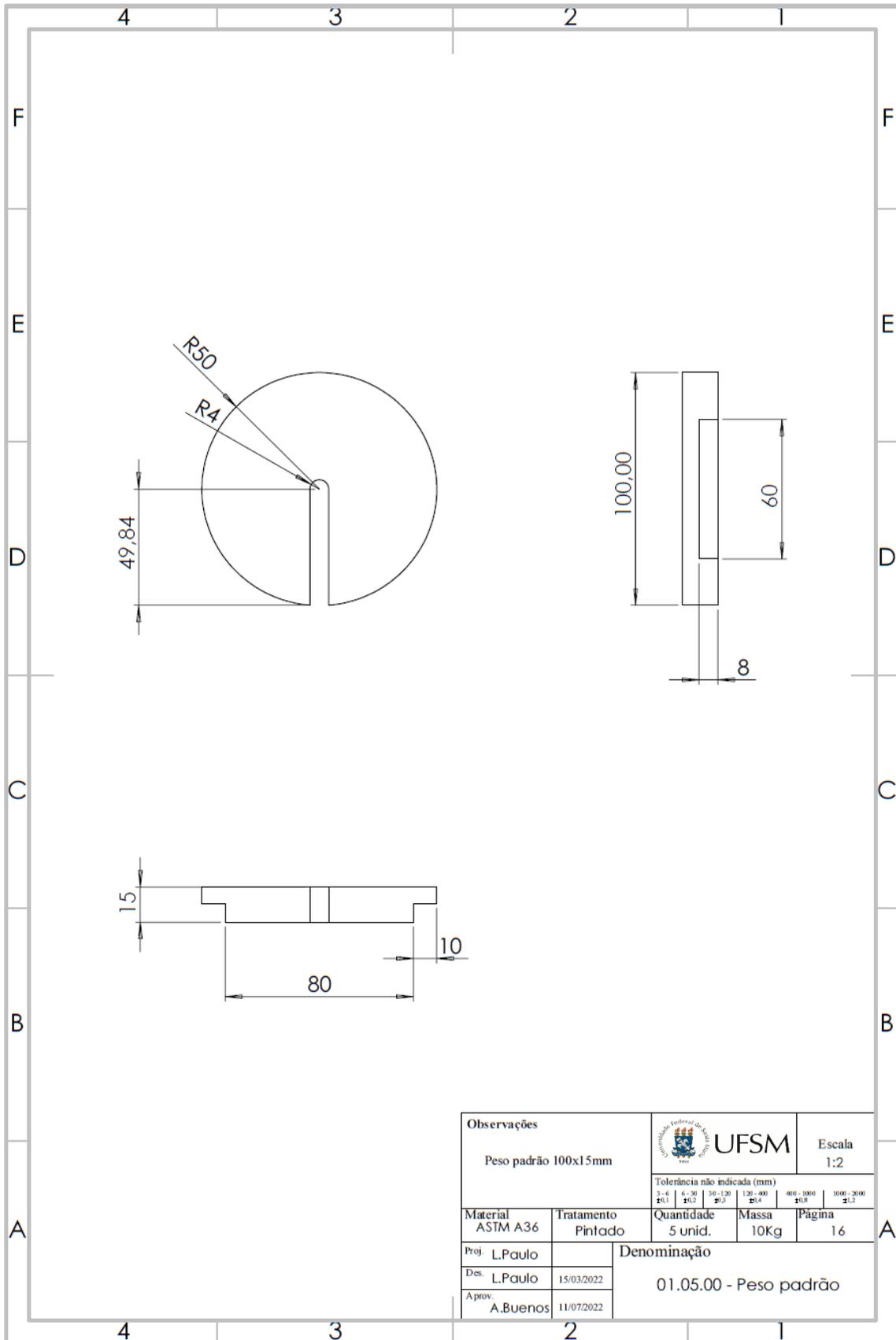
Observações		 UFSC		Escala 2:1			
Valores absolutos da barra de aço inox redonda							
		Tolerância não indicada (mm)					
		3 - 6	6 - 30	30 - 120	120 - 400	400 - 1000	1000 - 2000
		±0,1	±0,2	±0,3	±0,4	±0,8	±1,2
Material	Tratamento	Quantidade	Massa	Página			
Aço 304/A2	Inox	1 unid.	3,16kg	13			
Proj. L.Paulo		Denominação 01.04.00 - Porta peso					
Des. L.Paulo	15/03/2022						
Aprov. A.Buenos	18/06/2022						



Observações		 UFMS		Escala			
Barra redonda de aço inox M6x500mm com raio de dobra 12, 5mm e 22.5mm.				2:1			
		Tolerância não indicada (mm)					
		1 - 6	6 - 30	30 - 120	120 - 400	400 - 1000	1000 - 2000
		±0,1	±0,2	±0,3	±0,4	±0,6	±1,0
Material	Tratamento	Quantidade	Massa	Página			
Aço 304/A2	Inox	1 unid.	0,40kg	14			
Proj. L.Paulo		Denominação					
Des. L.Paulo	15/03/2022						
Aprov. A.Buenos	18/06/2022						
		01.04.01 - Barra de aço inox					



Observações		 UFSC		Escala	
Chapa redonda de aço inox Ø 6x5mm.				2:1	
Tolerância não indicada (mm)					
3 - 6	6 - 30	30 - 120	120 - 400	400 - 1000	1000 - 2000
±0,1	±0,2	±0,3	±0,4	±0,8	±1,2
Material	Tratamento	Quantidade	Massa	Página	
Aço 304/A2	Inox	1 unid.	0,40kg	15	
Proj. L.Paulo		Denominação			
Des. L.Paulo	15/03/2022	01.04.02 - Chapa de aço			
Aprov. A.Buenos	19/06/2022				



Observações		 UFSM		Escala 1:2
Peso padrão 100x15mm		Tolerância não indicada (mm) 3-6 ±0,1 6-30 ±0,2 30-120 ±0,3 120-400 ±0,4 400-1000 ±0,8 1000-2000 ±1,2		
Material ASTM A36	Tratamento Pintado	Quantidade 5 unid.	Massa 10Kg	Página 16
Proj. L.Paulo		Denominação		
Des. L.Paulo	15/03/2022	01.05.00 - Peso padrão		
Aprov. A.Buenos	11/07/2022			