

ANDERSON ZENKEN NAKAZATO

Desenvolvimento de máquina universal de ensaios mecânicos portátil de baixo custo para fins didáticos utilizando o conceito *open-source*.

Anderson Zenken Nakazato

Desenvolvimento de máquina universal de ensaios mecânicos portátil de baixo custo para fins didáticos utilizando o conceito *open-source*.

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Projetos e Materiais.

Orientador: Luis Rogerio de Oliveira Hein

Guaratinguetá - SP
2019

N163d Nakazato, Anderson Zenken
Desenvolvimento de máquina universal de ensaios mecânicos portátil de baixo custo para fins didáticos utilizando o conceito open-source / Anderson Zenken Nakazato – Guaratinguetá, 2019.
135 f : il.
Bibliografia: f. 84-85

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2019.
Orientador: Prof. Dr. Luis Rogerio de Oliveira Hein

1. Resistência de materiais. 2. Propriedades mecânicas. 3. Máquinas.
I. Título.

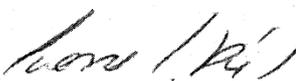
CDU 620.17(043)

ANDERSON ZENKEN NAKAZATO

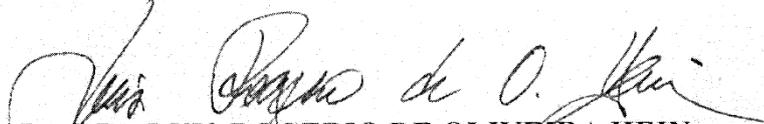
ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO: MESTRADO

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. Ivonete Ávila
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. LUIS ROGERIO DE OLIVEIRA HEIN
Orientador / UNESP-FEG


Prof. Dr. FERNANDO DE AZEVEDO SILVA
UNESP/FEG


Prof. Dr. FRANCISCO CRISTOVÃO LOURENÇO
DCTA/ITA

DADOS CURRICULARES

ANDERSON ZENKEN NAKAZATO

NASCIMENTO 08.07.1993 – Araraquara / SP

FILIAÇÃO Roberto Zenhei Nakazato
Elena Fumiko Orikassa Nakazato

2008/2010 Ensino Médio
Instituto Nossa Senhora do Carmo

2011/2016 Graduação em Engenharia Mecânica – Bacharel
Universidade Federal Fluminense - EEIMVR

Dedico este trabalho de modo especial, aos meus pais, que sempre me apoiaram e estiveram ao meu lado, me aconselhando e instruindo para que eu pudesse chegar até aqui.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me permitiu concluir mais essa etapa. Agradeço pela minha vida, pela minha família, meus amigos e por todos que conheci neste caminho e pelas oportunidades que me foram dadas,

aos meus pais Elena Fumiko Orikassa Nakazato e Roberto Zenhei Nakazato, que com dedicação e carinho sempre estiveram ao meu lado, me aconselhando e instruindo e educando para um bom caminho,

ao meu orientador, Prof. Dr. Luis Rogerio de Oliveira Hein que me acolheu como aluno, e sempre me incentivou e orientou me ajudando a crescer como pesquisador, mas também como pessoa,

aos meus amigos que tanto nas horas de estudo e trabalho quanto nos momentos de diversão sempre me ajudaram e trouxeram felicidade ao meu dia a dia,

aos funcionários e colegas do Departamento de Materiais e Tecnologias pelo apoio à pesquisa e o convívio profissional, em especial aos técnicos do Laboratório de Usinagem que me ensinaram e auxiliaram muito durante meu mestrado,

aos funcionários da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar,

à secretaria de Pós-graduação pelo trabalho que fazem de organização e instrução sobre os assuntos administrativos do programa.

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

à CAPES e ao CNPq pelo investimento em minha formação e financiamento do material e infraestrutura para o projeto.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior- Brasil (CAPES) - código de financiamento 001.

“Quanto mais aumenta nosso conhecimento,
mais evidente fica nossa ignorância”

John F. Kennedy

RESUMO

Neste trabalho é apresentado o projeto e construção de uma Máquina Universal de Ensaio Mecânicos portátil, didática, de baixo custo, fácil construção seguindo a filosofia *open-source* com o intuito de dar suporte ao ensino de Mecânica e Resistência dos Materiais. O equipamento foi projetado para ser construído com perfis modulares de alumínio e executado em uma oficina de ensino técnico em mecânica. A máquina é capaz de aplicar de forma segura um carregamento máximo de 10 kN tanto em tração quanto em compressão, se mover em velocidades que variam de 0,5 a 70 mm/min com uma resolução no deslocamento de 0,57 μm a um custo total de US\$ 1,000.00 incluindo material e fabricação. A máquina é controlada por uma placa Arduino[®] UNO, opera com acionamento eletromecânico, a aplicação de carga é feita por meio de fusos trapezoidais, a aquisição do deslocamento e velocidade da trave é feita por codificadores de quadratura e o controle de velocidade é feito por controle (Proporcional, Integral e Derivativo) PID e é capaz de realizar ensaios de tração, mas pode ser adaptada para outros ensaios como compressão, flexão e dobramento, entre outros.

PALAVRAS-CHAVE: *Open-source*. Ensaio mecânico. Baixo custo. Plataforma de desenvolvimento. Propriedades mecânicas. Arduino.

ABSTRACT

In this work is presented the design and construction of an easy to build low-cost portable Universal Testing Machine for educational purposes using the open-source philosophy. The intention of this project is to support the teaching in the subjects of Mechanics and Mechanics of Materials. The hardware was designed to be constructed with modular aluminum profiles and built in a conventional Mechanics Technical and Vocational Education and Training Laboratory. The machine can apply safely a maximum load of 10kN in both, traction and compression, move precisely in a range of speed from 0.5 to 70 mm/min with a resolution of 0,57 μm in a total cost of US\$ 1,000.00 including necessary material and fabrication. The machine is controlled by an Arduino[®] UNO board, operated with an electromechanical activation. The loading is applied by trapezoidal lead screws, the displacement and speed acquisition are done by quadrature encoder and the speed is controlled by Proportional, Integral and Derivative (PID) control, it is capable do perform tensile tests, but may be adapted to other tests like compression, flexure and bending, and others.

KEYWORDS: *Open-source*. Mechanical testing. Low-cost. Development platform. Mechanical properties. Arduino.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Representação de um corpo de prova durante um ensaio de tração.	21
Figura 2 - Esboço da curva obtida no ensaio de tração (curva tensão-deformação convencional).	22
Figura 3 - Representação de um corpo de prova durante um ensaio de compressão.	22
Figura 4 - Representação de um corpo de prova durante um ensaio de flexão.	23
Figura 5 - Fotografia da Máquina de Ensaio freeLoader. Uma freeLoader pode realizar dois ensaios simultâneos e custa menos de US\$4.000,00. Lápis na frente foi incluído para escala.	24
Figura 6 - Imagem renderizada em perspectiva da traseira da parte estrutural e mecânica da máquina.	29
Figura 7 - Diagrama de carregamento das traves durante um ensaio de tração.	30
Figura 8 - Seção transversal do perfil <i>C-Beam® Opnebuilds</i>	31
Figura 9 - Demonstração da associação de dois perfis <i>C-Beam</i> para construção das traves....	31
Figura 10 - Imagem da barra de aço que vai fixada às traves para aumentar a rigidez e possibilitar a fixação da célula de carga e das garras.	32
Figura 11 – Vista em perspectiva do perfil <i>V-Slot Openbuilds</i> 20 x 40 mm.....	33
Figura 12 - Bucha de bronze da trave superior.....	33
Figura 13 - Mancal de alumínio alojamento para o rolamento de rolos cônicos.....	34
Figura 14 – Diagrama de aplicação de força em tração e em compressão.....	35
Figura 15 - Coroa para corrente ASA 35-1 de 44 dentes.	36
Figura 16 - Mandril de 3/4" da marca Starfer utilizado para confecção das garras.	37
Figura 17 - Pinça do mandril a) sem modificações b) com dentes para fixação axial.	37
Figura 18 - Adaptador para unir célula de carga com mandril, de um lado uma rosca M16 e do outro uma rosca UNF 1/2".....	38
Figura 19 - Junta esférica para auto alinhamento do eixo do corpo de prova, composto por quatro partes, o parafuso com a cabeça abaulada (1), o copo (2) o adaptador para o mandril (3) e o pino (4).....	38
Figura 20 - Motor de vidro elétrico automotivo.	40
Figura 21 - Placa controladora de motor DC com CI ponte-H VNH2SP30-E.....	41
Figura 22 - Quadro da tabela verdade do CI em condições normais de operação.	41
Figura 23 - Placas de desenvolvimento a) Arduino UNO e b) Arduino NANO.	42
Figura 24 - Célula de carga de 10 kN no projeto para a medição das forças.	43

Figura 25 - Módulo de leitura da célula de carga baseado no CI ADC HX711.....	43
Figura 26 - Chave óptica utilizada para montar o codificador de quadratura para medida do deslocamento do eixo do motor.....	45
Figura 27 - Disco óptico com 90 divisões por volta utilizado no codificador.....	45
Figura 28 - Engrenagens helicoidais impressas para a confecção do amplificador de velocidade para o disco óptico do codificador.....	46
Figura 29 - Fotografia da impressora 3D utilizada para a impressão de algumas peças.....	46
Figura 30 - Suporte para chaves ópticas com 85° impresso em ABS.....	47
Figura 31 - Captura de tela do osciloscópio ligado aos dois canais do codificador óptico.....	47
Figura 32 - Circuito comparador Schmitt Trigger utilizado no tratamento dos sinais do codificador.....	48
Figura 33 - Captura de tela do osciloscópio ligado aos sinais das chaves ópticas do codificador após o tratamento.....	48
Figura 34 - Fonte chaveada utilizada para alimentação da máquina.....	49
Figura 35 - Sistema de controle utilizando um controlador digital. O controlador digital necessita que os sinais sejam convertidos de analógico para digital em sua entrada e posteriormente sua saída deve ser convertida de digital para analógica novamente.....	50
Figura 36 - Captura de tela do programa de controle da Máquina Universal de Ensaio Mecânicos.....	53
Figura 37 - Célula de carga fixada às garras para a realização da calibração.....	56
Figura 38 - Corpo de prova utilizado em teste para ajuste dos parâmetros do controle PID após o ensaio.....	57
Figura 39 – Dimensões do corpo de prova utilizado nos ensaios de validação.....	58
Figura 40 - Equipamento construído durante o desenvolvimento do projeto.....	59
Figura 41 - Motor aberto com engrenagem exposta.....	61
Figura 42 - Eixo do motor com enfoque nas ranhuras de acoplamento.....	61
Figura 43 – Fotografia do esticador de corrente.....	62
Figura 44 - Parafuso de fixação da junta esférica.....	63
Figura 45 - Copo da junta esférica.....	63
Figura 46 - Adaptado para mandril.....	63
Figura 47 - Curva de aplicação de tensão no canal A do módulo ADC.....	65
Figura 48 - Curva de leitura dos dados brutos do módulo ADC em resposta à aplicação de tensão.....	65

Figura 49 - Gráfico de correlação entre tensão aplicada e dados brutos lidos pelo módulo ADC.	66
Figura 50 - Gráfico de estabilidade da célula de carga sem a massa.	67
Figura 51 - Gráfico de estabilidade da célula de carga com a massa.	68
Figura 52 - Gráfico de Força por Tempo da máquina Shimadzu.	69
Figura 53 - Gráfico de Dados Brutos por Tempo do módulo ADC.	69
Figura 54 - Gráfico de calibração da célula de carga.	70
Figura 55 - Gráfico de carregamento e descarregamento da célula de carga.	72
Figura 56 - Resultado dos ensaios dos corpos de prova na máquina Shimadzu.	73
Figura 57 - Resultado dos ensaios dos corpos de prova na máquina projetada.	73
Figura 58 - Resultados sobrepostos dos ensaios de todos os corpos de prova.	74
Figura 59 - Macrografia da região da fratura do CP3.	75
Figura 60 - Macrografia da região da fratura do CP6.	75
Figura 61 - Gráfico de Deslocamento por Tempo do ensaio do CP3.	76
Figura 62 - Gráfico de Deslocamento por Tempo do ensaio do CP6.	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tabela comparativa entre máquinas de ensaio	25
Tabela 2 - Dados de ajuste de reta de correlação entre tensão e dados brutos lidos com o módulo ADC.....	66
Tabela 3 - Dados de ajuste de reta de correlação entre carga e dados brutos lidos com o módulo ADC.....	71
Tabela 4 - Dados dos corpos de prova utilizados para validação.....	72
Tabela 5 - Tabela comparativa entre máquinas de ensaio e a máquina projetada.....	78
Tabela 6 - Tabela de custos do projeto	79

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
Amp-Op	Amplificador operacional
CAD	<i>Computer Aided Design</i> (Desenho Assistido por Computador)
CI	Circuito Integrado
GUI	<i>Graphical User Interface</i> (Interface Gráfica de Usuário)
PID	Proporcional, Integral e Derivativo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA E JUSTIFICATIVA.....	18
1.2	OBJETIVOS	19
1.2.1	Objetivos gerais.....	19
1.2.2	Objetivos específicos	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1	ENSAIOS MECÂNICOS DOS MATERIAIS	20
2.1.1	Ensaio de tração.....	20
2.1.2	Ensaio de compressão.....	22
2.1.3	Ensaio de flexão/dobramento	23
2.2	MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAIOS MECÂNICOS	23
2.3	OUTROS PROJETOS ABERTOS DE MÁQUINAS DE ENSAIO.....	24
2.4	CONCEITO <i>OPEN-SOURCE</i>	26
3	PROPOSIÇÃO.....	28
4	MATERIAIS E MÉTODOS	29
4.1	PROJETO	29
4.1.1	Projeto estrutural e mecânico.....	29
4.1.1.1	Trave inferior e trave móvel	30
4.1.1.2	Traves laterais e superior	32
4.1.1.3	Rolamentos dos fusos	33
4.1.1.4	Fusos	34
4.1.1.5	Transmissão por correntes	35
4.1.1.6	Garras de fixação para ensaio de tração	36
4.1.2	Projeto elétrico e de controle	39
4.1.2.1	Motor	39
4.1.2.2	Circuito controlador de motor	40
4.1.2.3	Microcontrolador	42
4.1.2.4	Célula de carga	42
4.1.2.5	Módulo de leitura de célula de carga.....	43
4.1.2.6	Sistema de controle de velocidade.....	44
4.1.2.6.1	<i>Codificador</i>.....	44
4.1.2.7	Alimentação	49

4.1.2.7.1	<i>Algoritmo de controle: PID</i>	50
4.1.3	Interface com computador	51
4.1.3.1	Protocolo de Comunicação	51
4.1.3.2	Programa de aquisição de dados	52
4.1.3.2.1	<i>Interface Gráfica de Usuário (GUI)</i>	52
4.2	FABRICAÇÃO E MONTAGEM	53
4.3	CALIBRAÇÃO	54
4.3.1	Calibração do módulo Conversor Analógico/Digital	54
4.3.2	Calibração da célula de carga	55
4.3.2.1	Estabilidade da célula de carga	55
4.3.2.2	Calibração com o Arduino®	55
4.4	TESTES E VALIDAÇÃO	57
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
5.1	CONSTRUÇÃO	59
5.1.1	Furação das traves	60
5.1.2	Eixo do motor	60
5.1.3	Esticador de corrente	62
5.1.4	Junta esférica	62
5.1.5	Codificador	64
5.2	CALIBRAÇÃO	65
5.2.1	Calibração do módulo ADC	65
5.2.2	Calibração da célula de carga	67
5.2.2.1	Análise de estabilidade da célula de carga	67
5.2.2.2	Calibração com o Arduino®	68
5.3	TESTES E VALIDAÇÃO	72
5.4	CUSTOS	77
5.5	DIVULGAÇÃO	80
6	CONCLUSÕES	81
7	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	82
	REFERÊNCIAS	83
	ANEXO A - Ficha técnica do motor utilizado	85
	APÊNDICE A - Memorial de cálculo do projeto mecânico	86
	APÊNDICE B - Arquivo de impressão do disco óptico (fora de escala)	96
	APÊNDICE C - Imagem renderizada da máquina completa	97

APÊNDICE D - Desenhos de montagem e fabricação do equipamento.....98

1 INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA E JUSTIFICATIVA

Durante as últimas três ou quatro décadas a educação técnico-profissionalizante do Brasil pôde se beneficiar de equipamentos científicos, ferramentas e maquinários vindos do exterior. Mas que hoje esses equipamentos encontram-se sucateados ou obsoletos. Mesmo com o grande investimento no setor da educação e programas de incentivo à educação a compra de novos equipamentos é uma tarefa dispendiosa e burocrática, principalmente quando se trata de compras com verba pública e muitas vezes é impossibilitada por questões de prioridade.

Encontra-se então um impasse na renovação de equipamentos que possam dar suporte ao ensino prático nesses ramos técnico-profissionalizantes.

O aprendizado prático ou aplicado é também o que acaba por motivar e incentivar a continuação dos estudos e que é então parte responsável pela formação de potenciais pesquisadores que podem futuramente realizar descobertas tecnológicas e inovadoras nas diversas áreas do conhecimento.

Porém, como já aprovado pela lei nº 13.415/2017 (BRASIL, 2017), o sistema educacional brasileiro passa por uma reforma que afeta principalmente, mas não exclusivamente, o ensino médio, tal reforma se compromete a aumentar a carga horária do ensino médio e tecnicamente dá mais liberdade ao aluno para compor sua grade de disciplinas formativas, mas observando a realidade o governo não tem políticas suficientes de capacitar e equipar de forma igualitária todas as escolas para isso, e isso sequer é previsto na citada lei e nas demais leis a ela vinculadas.

Outra questão é que o ensino técnico-profissionalizante é apenas um de cinco ramos que as escolas poderão oferecer como opção para o aluno, mas sem a infraestrutura é bem provável que sejam raros os casos em que haverá tal oferta.

Diante desta necessidade, a proposta desse projeto foi de desenvolver um equipamento didático que auxilie no ensino de Mecânica e Resistência dos Materiais.

Uma Máquina Universal de Ensaio Mecânicos portátil e de baixo custo torna possível o contato com conceitos de comportamento mecânico dos materiais, podendo ser levada em uma sala de aula, facilitando o entendimento e a absorção do conteúdo.

Para que todo o conteúdo gerado com esse trabalho possa ser útil e efetivo ele deve ser de fácil acesso. Já existem várias formas de licenciamento aberto que trabalham com o conceito de *open-source*, um conceito que se originou em desenvolvimento de programas de computador e hoje se aplica em diversas formas, como projetos de peças e equipamentos, circuitos elétricos e eletrônicos, construções e até mesmo de edificações.

Este conceito se baseia em disponibilizar em aberto os recursos de projeto, tais como códigos fonte de programas, desenhos e detalhes de projeto de peças e equipamentos, diagramas elétricos e eletrônicos de componentes e circuitos, entre outros, para que possam gerar mais conhecimento, podendo ser melhorados ou servindo de base para novos projetos.

Essas formas de licenciamento promovem o desenvolvimento em comunidade o que pode vir a acelerar um projeto, reduzir erros e custos e ainda manter a propriedade intelectual de seus desenvolvedores.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivos gerais

Os objetivos gerais deste trabalho são de contribuir com o ensino técnico-profissionalizante projetando um equipamento adequado para qualquer espaço em um prédio escolar, aplicando o conceito *open-source* em um projeto de um instrumento leve e compacto, de construção simples e de fácil transporte, mas com características de desempenho e exatidão similares às de máquinas comerciais.

1.2.2 Objetivos específicos

Projetar e construir uma Máquina Universal de Ensaio Mecânico portátil, de baixo custo, para fins didáticos utilizando o conceito *open-source*.

Calibrar, testar e validar os resultados da máquina através de testes comparativos com máquinas comerciais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ENSAIOS MECÂNICOS DOS MATERIAIS

Como explica Garcia et al. (2000) ensaios mecânicos são importantes ferramentas para o estudo dos materiais. A partir deles é possível se obter informações sobre o comportamento desses materiais quando submetidos a carregamentos mecânicos.

Esses ensaios normalmente visam obter informações que podem ser utilizadas em modelos de comportamento dos materiais e dessa forma permitir prever seu funcionamento quando aplicado para a fabricação de um componente mecânico.

Para se obter as variadas respostas desse comportamento dos materiais quando submetidos a diferentes formas de carregamentos são realizados também diferentes tipos de ensaios, normalmente parecidos com as situações reais, mas em diferentes escalas e de formas mais generalizadas.

Alguns ensaios específicos também são realizados diretamente com os componentes mecânicos a serem estudados e para isso a máquina é preparada especialmente para eles, como por exemplo para medir a resistência de uma peça de geometria complexa submetida a um carregamento conhecido para um controle de qualidade.

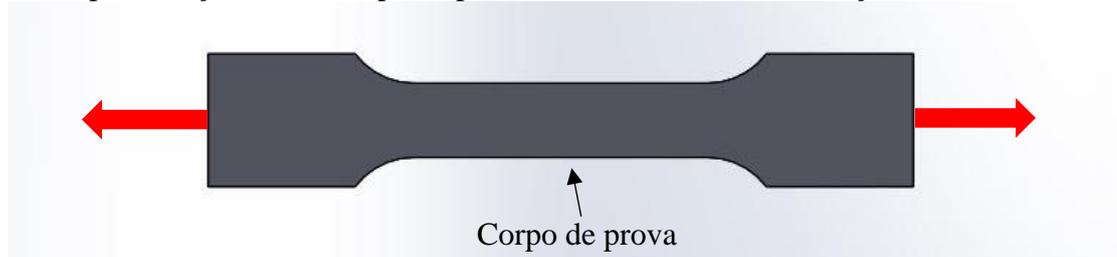
Dentre esses diversos tipos de ensaios muitos seguem normas com recomendações de preparação e execução. Essas normas possibilitam a repetibilidade desses ensaios e com isso a comparação dos resultados obtidos em diferentes laboratórios.

A seguir são apresentados alguns dos ensaios mais comuns.

2.1.1 Ensaio de tração

Em um ensaio de tração é aplicada uma carga uniaxial de tração na direção longitudinal de um corpo de prova como apresentado na Figura 1, este é deformado até um limite desejado ou até a ruptura.

Figura 1 - Representação de um corpo de prova durante um ensaio de tração.



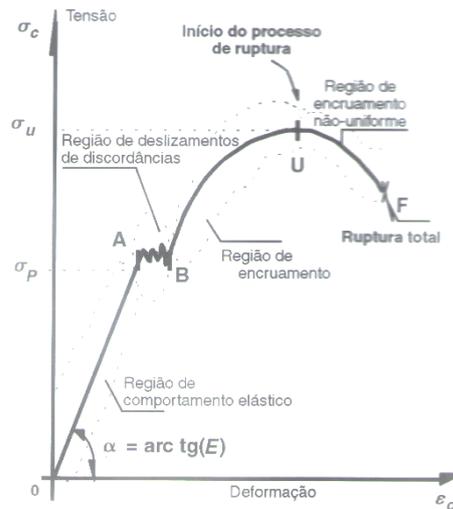
Fonte: Autoria própria.

O corpo de prova possui formatos alongados, podendo ter seções transversais chatas como é o caso de corpos de prova retirados de chapas, retangulares ou circulares, as dimensões e tolerâncias são definidas pelas normas de diversos institutos, a norma para ensaios de tração de materiais metálicos da ASTM é a E8/E8M (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2016).

A Figura 2 apresenta um esboço de uma curva tensão-deformação convencional obtida em um ensaio de tração genérico onde a carga é dividida pela área inicial média da região útil do corpo de prova e a tensão é o deslocamento é apresentado em termos de deformação em relação ao comprimento útil inicial.

Nela é possível observar pontos e regiões importantes como o módulo de elasticidade do material (E) representado pela tangente do ângulo de inclinação da região elástica linear no início do ensaio, o limite de resistência ao escoamento σ_p que se dá no ponto A, a partir de onde o corpo começa a se deformar plasticamente, σ_u que é a tensão máxima de resistência no ponto U e no ponto F o limite de resistência à ruptura.

Figura 2 - Esboço da curva obtida no ensaio de tração (curva tensão-deformação convencional).



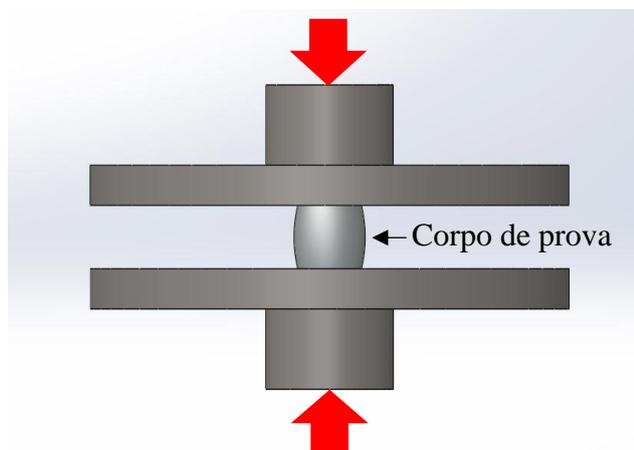
Fonte: Garcia et al. (2000)

2.1.2 Ensaio de compressão

De forma análoga ao ensaio de tração o ensaio de compressão consiste em um carregamento uniaxial de um corpo de prova, mas de natureza compressiva entre dois pratos como mostrado na Figura 3. Alguns materiais, quando carregados de forma compressiva apresentam características bem diferentes do comportamento em carregamentos trativos.

A norma para ensaios de compressão de materiais metálicos da ASTM é a E9 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2015).

Figura 3 - Representação de um corpo de prova durante um ensaio de compressão.

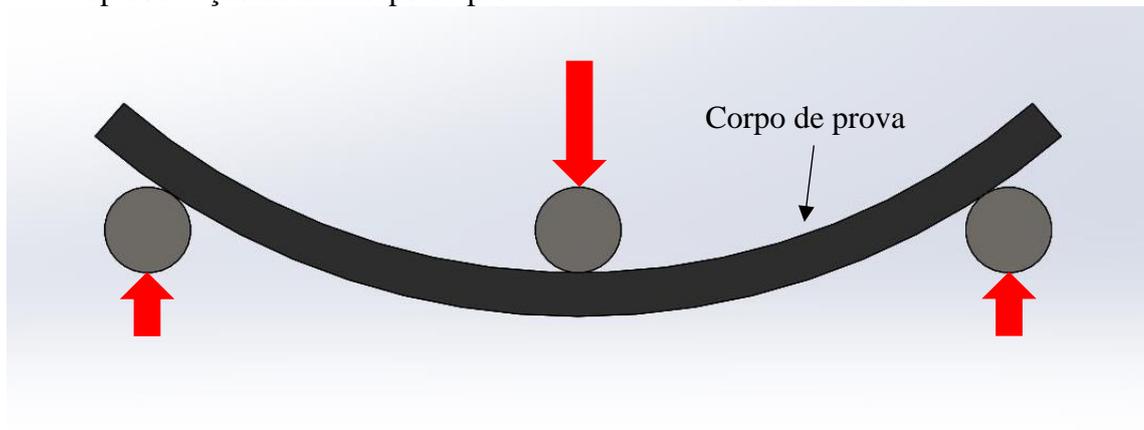


Fonte: Autoria própria

2.1.3 Ensaio de flexão/dobramento

Neste tipo de ensaio o corpo de prova apoiado sobre dois apoios é submetido a um carregamento transversal que gera uma deflexão no corpo de prova como apresentado na Figura 4, gerando cargas compressivas na região superior à linha neutra do corpo de prova e cargas trativas na região abaixo desta.

Figura 4 - Representação de um corpo de prova durante um ensaio de flexão.



Fonte: Autoria própria

Ensaio dentro do regime elástico são denominados ensaios de flexão e ensaios que vão até o regime plástico do material são denominados ensaios de dobramento.

As normas para ensaios de flexão para molas e de dobramento de materiais para ductibilidade da ASTM são respectivamente a E855 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2008) e E290 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2009).

2.2 MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAIOS MECÂNICOS

Existem no mercado em vários modelos e marcas, e suas principais especificações são tamanho e capacidade de carga.

Sua função é aplicar carregamentos tanto trativos quanto compressivos. Para isso ela normalmente possui uma trave fixa e uma trave móvel que se movimenta de forma controlada realizando medições precisas de força e posição.

O objetivo construtivo de uma máquina dessas é justamente estudar a resistência de materiais a diversos tipos de ensaios mecânicos. Para isso são desenvolvidos diversos módulos e garras que tornam possível a simulação de vários tipos de carregamentos e essa é a razão da denominação “Universal”.

2.3 OUTROS PROJETOS ABERTOS DE MÁQUINAS DE ENSAIO

Realizando algumas buscas foram encontrados outros projetos abertos tais como o de Amend e Lipson (2011) mostrado na Figura 5.

Figura 5 - Fotografia da Máquina de Ensaio freeLoader. Uma freeLoader pode realizar dois ensaios simultâneos e custa menos de US\$4.000,00. Lápis na frente foi incluído para escala.



Fonte: Adaptado de Amend e Lipson, (2011)

Como dito por Amend e Lipson (2011), o custo de material para a construção da máquina deles foi de US\$3.687,46, em torno de R\$14.000,00, quase quatro vezes o teto estipulado para este projeto, e dentro da realidade do Brasil, isso é um alto custo quando comparado a um salário mínimo de R\$998,00, em torno de US\$260,00 (jan/2019) .

De 2011 para os dias de hoje (2019) os preços de componentes eletrônicos e de plataformas de desenvolvimento tiveram grande redução.

A ideia de desenvolvimento aberto de equipamentos ainda era recente naquela época, muitos dos componentes utilizados por eles eram componentes caros e não muito presentes no dia a dia.

Atualmente existem muito mais recursos para se desenvolver sistemas de controle e aquisição de dados por custos bem menores.

A Tabela 1 apresenta dados comparativos entre diversas máquinas de ensaios mecânicos, a dos autores e outras sete máquinas comerciais.

Tabela 1 - Tabela comparativa entre máquinas de ensaio

Máquina	Preço (US\$)	Capacidade de Carga (kN)	Precisão do Carregamento (% do máx)	Dimensões AxLxP (cm)	Massa da máquina (kg)	Espaço de ensaio vertical (cm)	Resolução do posicionamento (mm)	Velocidade máxima (mm/min)	Velocidade mínima (mm/min)
freeLoader*	< 4.000	5,0	0,02	50 x 31 x 31	22	27	0,0005	30	2
Vendedor 1	~17.000	2,5	0,5	154 x 43 x 52	114	124	0,0006	2540	0,005
Vendedor 2	~18.000	22,2	0,1	152 x 89 x 51	não informado	70	0,001	51	0,5
Vendedor 3	~19.000	5,0	0,5	114 x 49 x 45	50	75	0,001	500	0,001
Vendedor 4	~19.000	5,0	0,5	126 x 56 x 37	50	73	0,001	1000	0,01
Vendedor 5	~22.000	2,5	não informado	114 x 55 x 46	46	75	0,001	1000	0,1
Vendedor 6	~25.000	5,0	0,5	136 x 38 x 50	51	112	não informado	1000	0,05
Vendedor 7	~26.000	5,0	não informado	114 x 49 x 45	50	75	0,001	500	0,001

Fonte: Traduzido e adaptado de Amend e Lipson (2011).

*Pode realizar dois ensaios simultâneos em uma máquina.

Outro trabalho mais recente como o de Cavalcante et al. (2017) apresenta uma máquina com um custo de US\$600,00, em torno de R\$2280,00, mas em seu projeto ela se limita a ensaios de tração, em especial de polímeros, a máquina foi projetada como parte de um trabalho de pesquisa sobre o estudo da resistência de peças fabricadas por impressão 3D por deposição de material fundido com uma carga máxima de 5 kN, mas suas limitações diminuem sua funcionalidade como máquina universal de ensaios mecânicos, pois limitam seu uso para outros tipos de ensaios e materiais.

2.4 CONCEITO *OPEN-SOURCE*

Com a ampliação da rede mundial de computadores ampliou-se também o número de pessoas conectadas por ela, e através dela tornou-se possível a comunicação e compartilhamento de dados quase instantaneamente com praticamente qualquer parte do mundo. Com isso surgiram também comunidades de desenvolvimento de programas de computadores onde códigos fonte dos programas eram compartilhados livremente podendo ser utilizados e melhorados por toda a comunidade.

Essa abertura dos códigos fonte foi denominada *open-source* posteriormente essa ideia, juntamente com a capacidade de transmissão de dados da internet, se expandiu para todos outros tipos de tecnologias e, para os casos de projeto de equipamentos, passou a ser chamado de *open-hardware*.

Segundo Mattos (2012) a ideia de projetar e construir permitindo que seus recursos e desenhos sejam de acesso livre e aberto para quem quiser consultá-los não é nova. Tais conceitos de livre troca de informações tecnológicas existem desde antes dos computadores se tornarem parte de nosso cotidiano, como era feito por exemplo com receitas culinárias.

Ainda segundo Mattos (2012) ao longo da história da pesquisa surgiram exemplos de projetos de desenvolvimento aberto como as pesquisas de Santos Dumont na invenção do avião que já o utilizava e como consequência as pesquisas europeias nessa área foram mais bem-sucedidas que nos Estados Unidos.

Stokstad (2011) cita em um outro exemplo um banco de dados ambientais para pesquisas em ecologia global, onde pesquisadores do mundo inteiro alimentam um banco de dados com dados ambientais de vários lugares e todos os pesquisadores que contribuem com o banco de dados têm acesso e autorização para utilizar os dados para suas pesquisas.

Um outro importante exemplo como apresenta Pearce (2012) é a cultura aberta presente no desenvolvimento da manufatura aditiva, uma área que se desenvolveu muito rápido e hoje é uma tecnologia acessível e que tem potencializado o desenvolvimento de novos projetos abertos como a fabricação de equipamentos de laboratório *open-source*.

Essa é uma das principais vantagens desse modelo de desenvolvimento e como diz Diez (2012) em seu trabalho, a Internet se transformou de um instrumento de estratégia militar da Guerra Fria a um agente de transformação dos últimos séculos, transformando a “Sociedade Industrial” na “Sociedade da Informação” e como ele já observava em 2012, o desenvolvimento passou a ser cada vez mais rápido.

Mas sempre existiu também o outro cenário, como Pearce (2013) critica haver muitas barreiras à pesquisas inovadoras na área de nanotecnologia por conta de problemas com propriedade intelectual onde patentes não são exploradas e servem apenas para impedir terceiros de seguirem com as pesquisas no ramo e ele também completa que se trabalhassem com o conceito *open-source* haveria um desenvolvimento ainda mais rápido nessa área tão promissora.

3 PROPOSIÇÃO

A máquina proposta foi uma máquina com limite de carga de 10 kN, que pudesse realizar ensaios com velocidade mínima de 1,0 mm/min com um teto de custo de R\$4000,00 (US\$1,000.00), sua montagem e fabricação deveriam ser simples e robusta e sua precisão ser próxima ou superior a de máquinas de ensaios mecânicos comerciais.

O limite de carga de 10 kN foi escolhido pois, como o objetivo do equipamento é que ele seja didático ele deve ser capaz de romper corpos de prova de materiais bem representativos para o ensino de propriedades dos materiais, como aço baixo carbono, alumínio, polímeros.

A carga para se romper um corpo de prova reduzido de 5 mm de diâmetro de Aço SAE 1020 é em torno de 8 kN, então a máquina teria em torno de 20% de capacidade de sobra.

A velocidade mínima de 1,0 mm/min é devida às normas de ensaios mecânicos de metais, que sugere essa velocidade. Algumas normas sugerem velocidades ainda menores, mas são normas de ensaios específicos, ainda assim é possível que a máquina consiga trabalhar a velocidades menores.

O teto de R\$4000,00 foi escolhido por se tratar de uma quantia não muito grande, mas que também não limita o projeto, dando certa margem de trabalho e opções.

A montagem e fabricação simples foi definida com o intuito de que projetos de execução sejam realizados por professores e alunos das instituições, ou qualquer outra pessoa que queira executá-la sem muitos recursos específicos, pois esses acabam por encarecer o projeto.

A robustez é importante pois uma das principais características que o equipamento deve ter é rigidez, que garante durabilidade e precisão das medidas.

E a necessidade de precisão próxima ou superior à das máquinas comerciais se deve à necessidade de utilização dos dados de ensaio para fins didáticos e possivelmente até para fins científicos após uma análise detalhada e calibração segundo as normas técnicas.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 PROJETO

4.1.1 Projeto estrutural e mecânico

Nesta subseção são explicitadas as considerações e detalhes que dizem respeito ao funcionamento mecânico do equipamento.

Todo o memorial de cálculo estrutural e mecânico e desenhos de montagem e fabricação se encontram nos APÊNDICES C e D.

Na Figura 6 está uma vista em perspectiva de toda a parte estrutural e mecânica da máquina.

Figura 6 - Imagem renderizada em perspectiva da traseira da parte estrutural e mecânica da máquina.



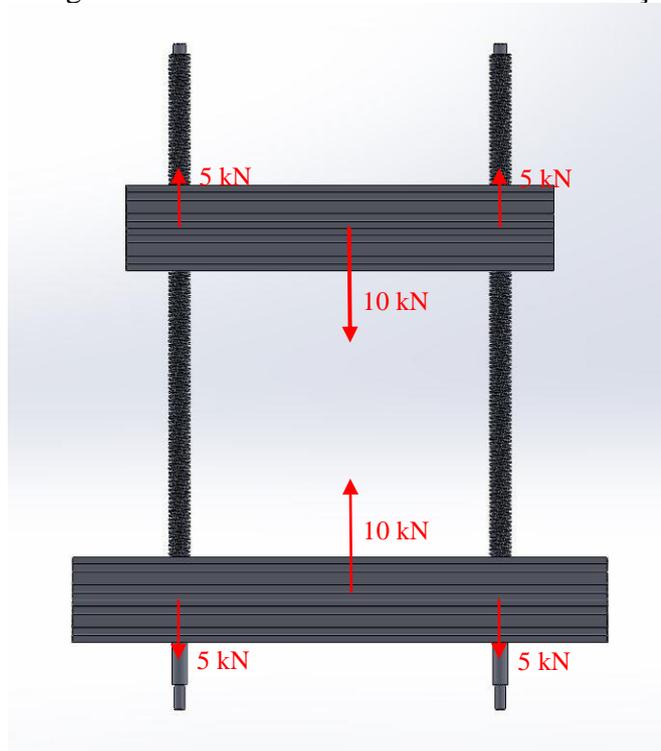
Fonte: Autoria própria.

4.1.1.1 Trave inferior e trave móvel

As traves inferior e móvel são as principais estruturas de fixação para as garras e suportes utilizados nos diversos ensaios e é através delas e dos fusos que são aplicados todos os carregamentos independentes do tipo de ensaio, portanto é desejável que essas estruturas possuam a maior rigidez possível minimizando erros por sua deflexão elástica.

A Figura 7 exemplifica um modo de carregamento das traves durante uma aplicação de esforço de tração, de onde é possível concluir que se trata de um carregamento de flexão de três pontos e tal modelo foi utilizado para cálculos de deflexão das traves.

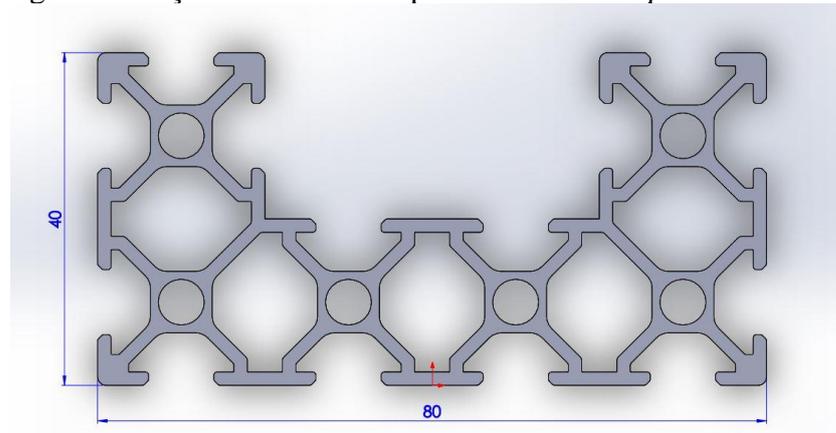
Figura 7 - Diagrama de carregamento das traves durante um ensaio de tração.



Fonte: Autoria própria.

Como principal componente de resistência para confecção das traves foi escolhido o perfil de alumínio de padrão *C-Beam® Openbuilds*. Tais perfis são fabricados em liga de alumínio 6063-T5, e seu padrão de seção transversal, apresentado na Figura 8, lhe garante um alto momento de inércia por massa, seus rasgos e furos facilitam também a fixação de parafusos e a montagem do equipamento.

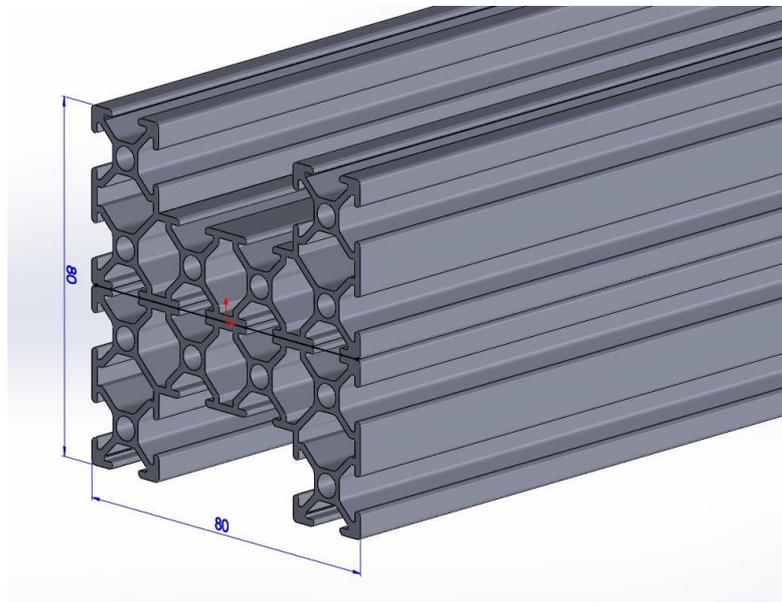
Figura 8 - Seção transversal do perfil *C-Beam® Opnebuilds*.



Fonte: Autoria própria.

O momento de inércia utilizado nos cálculos foi obtido com o software de CAD *SolidWorks*, o valor de momento de inércia no eixo X para um único perfil se apresentou insuficiente para suportar o carregamento de 10 kN proposto para a máquina, portanto optou-se por utilizar dois perfis desse mesmo modelo associados como mostra a Figura 9, para ambas as travessas.

Figura 9 - Demonstração da associação de dois perfis *C-Beam* para construção das travessas.

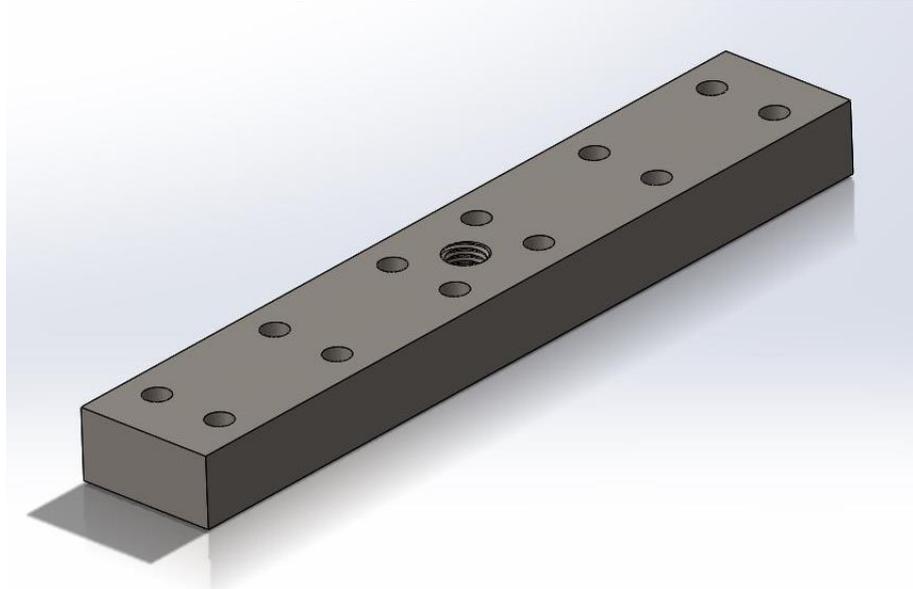


Fonte: Autoria própria.

O momento de inércia obtido com essa associação de dois perfis foi de 629696 mm^4 gerando uma tensão máxima de 47,64 MPa no ponto mais crítico do carregamento, resultando em um fator de segurança de 2,20 e conseqüentemente uma deflexão máxima de 0,1295 mm para cada travessa.

A fim de possibilitar uma fácil fixação das garras e suportes para ensaios foi projetada uma barra em aço A36 apresentada na Figura 10 fixada nas traves através de 12 parafusos passantes através dos dois perfis que além de fixar a barra na trave, garante também a união entre os dois perfis.

Figura 10 - Imagem da barra de aço que vai fixada às traves para aumentar a rigidez e possibilitar a fixação da célula de carga e das garras.



Fonte: Autoria própria.

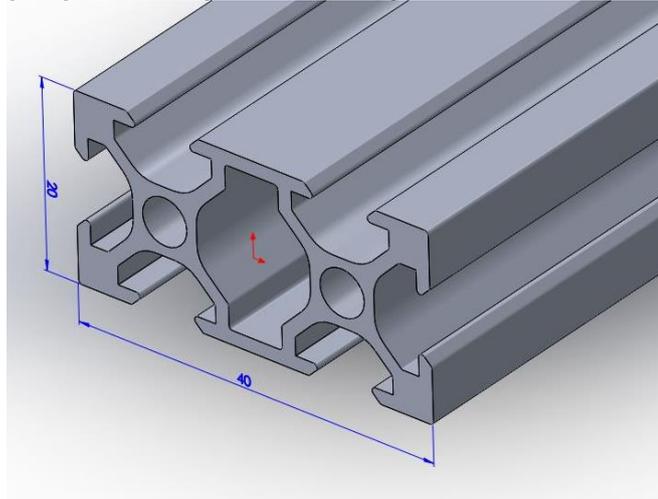
Essa barra além de possibilitar a fixação das garras e suportes através de um furo central com uma rosca interna padrão M16, garante também um aumento da rigidez das traves diminuindo sua deflexão.

4.1.1.2 Traves laterais e superior

As traves laterais e superior não possuem responsabilidade estrutural nos carregamentos, elas têm apenas função de alinhamento dos fusos, fixação das alças, das proteções e de módulos adicionais para os ensaios, como extensômetros, suportes para câmeras, entre outros.

Por não necessitarem possuir tanta resistência mecânica optou-se por utilizar perfis *V-Slot Openbuilds* de 20 x 40 mm como os mostrados na Figura 11.

Figura 11 – Vista em perspectiva do perfil *V-Slot Openbuilds* 20 x 40 mm.



Fonte: Autoria própria.

Na trave superior foram fixadas duas buchas fabricadas em bronze liga TM-23 mostradas na Figura 12, importantes para garantir o alinhamento dos fusos pelas suas extremidades superiores e ainda permitir a rotação.

Figura 12 - Bucha de bronze da trave superior.



Fonte: Autoria própria.

4.1.1.3 Rolamentos dos fusos

Para suportar os esforços radiais e axiais nos fusos foram escolhidos rolamentos de rolos cônicos e segundo o catálogo consultado (NACHI, 2007) o menor rolamento deste tipo existente era o de 15 mm de diâmetro interno, modelo H-E30202, portanto este deveria ser o menor diâmetro interno do fuso que de acordo com cálculos preliminares seria suficiente para suportar estaticamente mais que o dobro da carga máxima especificada da máquina.

Foram necessários dois rolamentos por fuso, trabalhando um contra o outro fixados com uma pré-carga aplicada na ponta inferior do fuso por uma porca e uma contraporca.

A fixação deles foi feita por mancais usinados em alumínio como mostra a Figura 13.

Figura 13 - Mancal de alumínio alojamento para o rolamento de rolos cônicos.



Fonte: Autoria própria.

4.1.1.4 Fusos

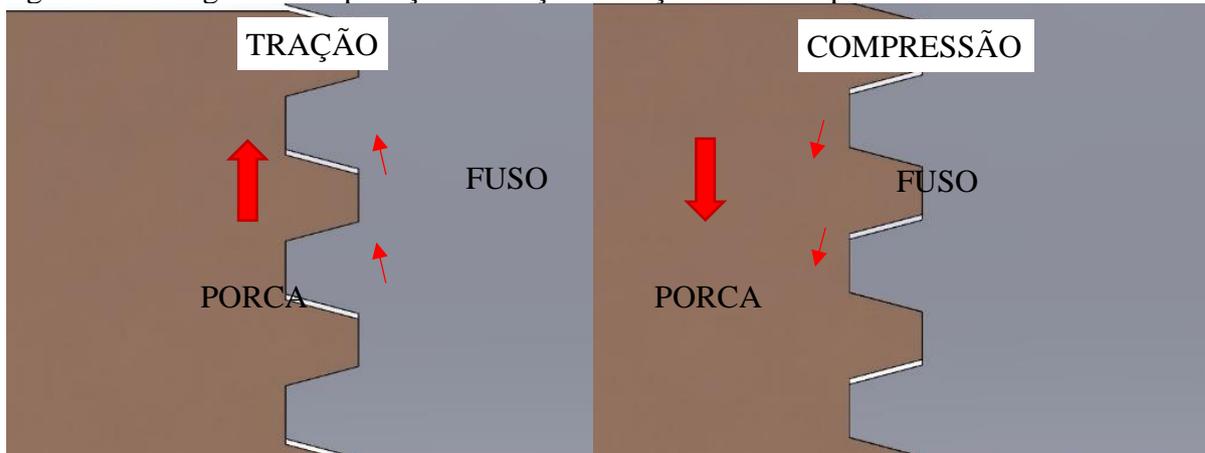
Os fusos ou parafusos de potência são os elementos de máquina responsáveis pelo movimento linear de subida e descida da trave móvel em relação à trave inferior e este movimento é o que gera os carregamentos de tração e compressão utilizados nos ensaios.

O modelo de parafuso de potência selecionado foi o fuso de rosca trapezoidal de padrão métrico, por suportar grandes cargas em relação ao seu custo quando comparado com fusos de esferas.

O fuso especificado inicialmente foi o padrão TR20x4 de uma entrada, com diâmetro externo de 20 mm e passo de 4 mm por conta do rolamento, pois por especificação o diâmetro interno deveria ser de 15 mm e o encosto deveria ter no mínimo 19,5 mm e este fuso é o menor fuso que atende a esses requisitos.

Em cálculos de parafusos de potência convencionais normalmente se trabalha com elevação de cargas, tendo um torque para subida e um outro menor na descida, mas nesse caso como o carregamento de 10 kN será aplicado em ambas as direções como mostra a Figura 14, os dois torques serão bem próximos, podendo ser considerados iguais.

Figura 14 – Diagrama de aplicação de força em tração e em compressão



Fonte: Autoria própria.

Para cálculo da fadiga foi necessário calcular o torque requerido no fuso para a aplicação da carga. Esse cálculo foi feito considerando os apoios do fuso em rolamentos, a porca ou castanha sendo de bronze e o sistema lubrificado com óleo, o lubrificante real utilizado foi graxa azul a base de sabão de lítio que causa um pequeno aumento no torque, mas é mais recomendado em casos de baixa velocidade e altas cargas.

Sendo assim, o torque requerido em cada fuso para a aplicação de uma carga total de 5 kN é de 11,53 N.m, realizando os cálculos de resistência a fadiga o coeficiente de segurança para vida infinita foi de 4,19, o que acarreta que a probabilidade de ele falhar por fadiga é pequena.

4.1.1.5 Transmissão por correntes

A transmissão do eixo do motor para os fusos foi feita por engrenagens e corrente, esse sistema foi escolhido pois possui grande resistência mecânica, produz pouco ruído quando bem lubrificado, alinhado e trabalhando em baixas velocidades, garante sincronia entre os eixos e não exigem altos níveis de precisão.

O padrão de corrente utilizado foi o padrão de correntes industriais ANSI-ASA-35/1 que possui uma carga de ruptura em torno de 7850 N.

Foram acopladas aos fusos coroas de 44 dentes, como a mostrada na Figura 15, já o pinhão acoplado ao eixo do motor foi um pinhão de 9 dentes, resultando em uma relação de transmissão de 1:4,889.

Figura 15 - Coroa para corrente ASA 35-1 de 44 dentes.



Fonte: Autoria própria.

Segundo o torque necessário nos fusos para aplicação da carga, a força máxima na parte mais crítica da corrente chegará a apenas 345,42 N.

Para que ocorra a transferência de potência das engrenagens para os fusos foram utilizadas chavetas que segundo norma ABNT NBR 6375/PB-122 devem ter 5 mm de largura para eixos de 15 mm de diâmetro.

A princípio foram feitos os cálculos para chavetas de 15 mm de comprimento resultando em um coeficiente de segurança de 4,44 o que caracteriza um superdimensionamento então este comprimento foi reduzido para 10 mm resultando em um novo coeficiente de segurança de 2,96.

4.1.1.6 Garras de fixação para ensaio de tração

A princípio foram desenvolvidas apenas garras para ensaios de tração de corpos de prova cilíndricos de tamanho reduzido.

As garras foram baseadas em mandris de furadeira de 3/4" como o mostrado na Figura 16.

Figura 16 - Mandril de 3/4" da marca Starfer utilizado para confecção das garras.



Fonte: Autoria própria.

Como o mandril é construído para transmitir principalmente torque às brocas ele não têm mecanismos de fixação axial, mas para a utilização neste projeto como garra de tração a principal fixação que ele deve ter é axial. Portanto para que ele tenha tal funcionalidade foram feitos pequenos dentes em suas pinças utilizando uma microrretífica equipada com um disco diamantado.

Na Figura 17.a) é possível ver a pinça sem as modificações e na Figura 17.b) o padrão dos dentes feitos nas pinças.

Figura 17 - Pinça do mandril a) sem modificações b) com dentes para fixação axial.



Fonte: Autoria própria.

Como pode-se observar no padrão dos dentes, tomou-se o cuidado de manter a mesma angulação em todos os dentes. Outro cuidado tomado foi o de não modificar as dimensões externas da pinça para manter a característica de auto centralização da garra e consequentemente do corpo de prova quando preso a ela.

Para fixar o mandril à célula de carga foi feito um adaptador como o da Figura 18.

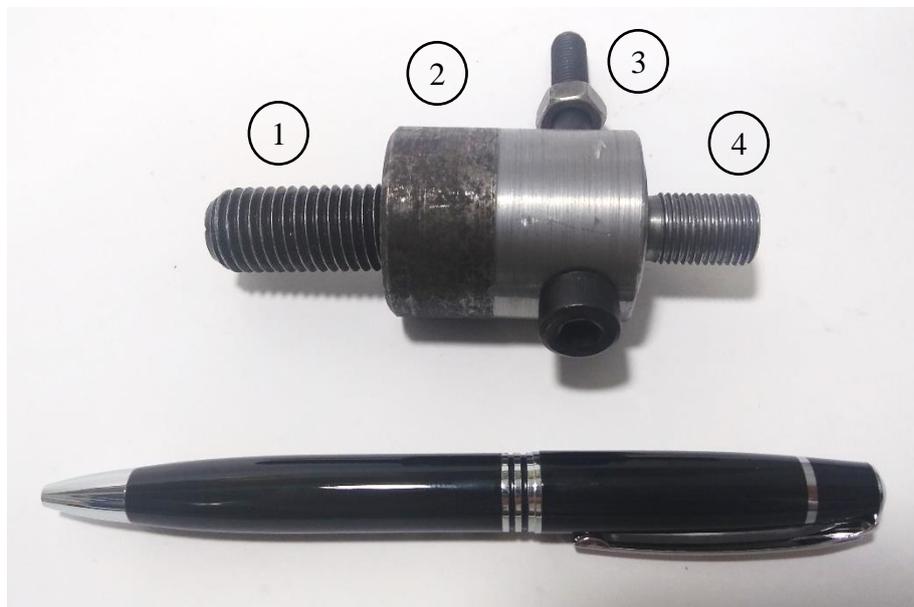
Figura 18 - Adaptador para unir célula de carga com mandril, de um lado uma rosca M16 e do outro uma rosca UNF 1/2".



Fonte: Autoria própria.

Para fixar o outro mandril na trave móvel foi feita uma junta esférica como a Figura 19, necessária para garantir o auto alinhamento das garras e o corpo de prova durante o ensaio.

Figura 19 - Junta esférica para auto alinhamento do eixo do corpo de prova, composto por quatro partes, o parafuso com a cabeça abaulada (1), o copo (2) o adaptador para o mandril (3) e o pino (4).



Fonte: Autoria própria

4.1.2 Projeto elétrico e de controle

4.1.2.1 Motor

Existem vários tipos de motores elétricos, que podem ser classificados pelo tipo de alimentação, características construtivas e métodos de acionamento.

Neste trabalho optou-se por utilizar um motor de corrente contínua por possuir um menor custo quando comparado com motores de corrente alternada, motores de passo e servo-motores de mesma faixa de potência e torque. Outro fator importante que pode ser citado é o circuito de controle necessário para controlá-lo, que por não ser de grande complexidade pode ser construído com um custo menor quando comparado com circuitos controladores de outros tipos de motores, pode até mesmo ser construído a partir de componentes eletrônicos.

A definição do motor depende de vários fatores, tais como torque e velocidade, tensão e corrente de operação que são diretamente ligados à potência que ele pode desempenhar.

Como já citado, o sistema de transmissão possui uma relação de transmissão de 1:4,889, como o torque necessário para a rotação de cada fuso é de 11,53 N.m a força no pinhão para aplicar o carregamento máximo é de 345,54 N resultando em um torque no eixo do motor de 4,81 N.m.

Como a potência necessária é calculada pelo produto da velocidade angular pelo torque, a potência necessária para o equipamento é pequena, quando o torque necessário é alto (situação de um ensaio), as velocidades são baixas e quando as velocidades são altas (situação de movimentação da trave para preparação do ensaio) o torque necessário é baixo.

Pesquisando por motores elétricos foi encontrado um motor de vidro elétrico automotivo (Figura 20), analisando sua ficha de especificações (ANEXO A) foi possível encontrar suas curvas de performance e a partir delas concluir que suas especificações atendiam aos requisitos do projeto, onde para um torque de 4,81 N.m a corrente máxima requerida por ele é de aproximadamente 8,5 A.

Figura 20 - Motor de vidro elétrico automotivo.



Fonte: A autoria própria.

4.1.2.2 Circuito controlador de motor

Como o motor selecionado foi um motor de corrente contínua, O circuito ponte-H foi escolhido para controle de direção e velocidade, que permite o controle da polaridade e da tensão nos terminais do motor utilizando apenas alimentação e o circuito de potência chaveado por um microcontrolador

Foram analisadas as possibilidades de utilização de controladores construídos com confecção das placas de circuito impresso e componentes eletrônicos, mas seguindo o objetivo de tornar o projeto de mais fácil construção mantendo um baixo custo, por se tratar de uma técnica bem difundida e já utilizada há bastante tempo, foi escolhida como controladora de motor uma placa comercial baseada no circuito integrado VNH2SP30-E da marca STMicroelectronics mostrado na Figura 21.

Figura 21 - Placa controladora de motor DC com CI ponte-H VN2SP30-E



Fonte: Autoria própria.

Na ficha de dados o fabricante especifica suas limitações de 16 V de tensão de trabalho, e 30 A de corrente em trabalho contínuo, mas por limitações construtivas da placa comercial esse limite deve ser diminuído para 14 A contínuos se houver um dissipador acoplado ao circuito integrado (CI).

O controlador possui dois pinos de controle de direção, um pino PWM para controle de velocidade, um pino *EN* (*enable*) para passar o controlador para um modo de baixa energia, um pino *CS* (*current sense*) que pode ser utilizado para medir a corrente que passa para o motor um pino terra e um pino de tensão de alimentação do circuito lógico de 5 V.

A Figura 22 apresenta a tabela verdade para os modos de operação do circuito e como o microcontrolador pode controlá-lo.

Figura 22 - Quadro da tabela verdade do CI em condições normais de operação.

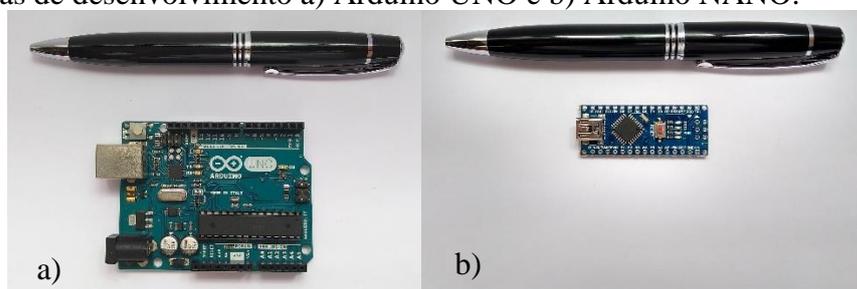
IN_A	IN_B	$DIAG_A/EN_A$	$DIAG_B/EN_B$	OUT_A	OUT_B	CS	Modo de operação
1	1	1	1	H	H	Alta imped.	Freio para Vcc
	L				$I_{SENSE} = I_{OUT}/K$	Sentido horário (CW)	
0	L			H		Sentido anti-horário (CCW)	
				L	Alta imped.	Freio para GND	

Fonte: Traduzido de STMicroelectronics, (2013).

4.1.2.3 Microcontrolador

O microcontrolador selecionado foi o Arduino[®], ele é uma plataforma de desenvolvimento e prototipagem que possui muitas versões de placas, no caso a selecionada para esse projeto foi a mais popular, Arduino UNO (Figura 23.a) que traz certa facilidade para conexões de prototipagem e teste. Após a consolidação dos circuitos, o projeto será provavelmente migrado para o Arduino NANO, que como pode ser visto na Figura 23.b) possui um tamanho bem reduzido, mas mantendo praticamente todas as características do UNO.

Figura 23 - Placas de desenvolvimento a) Arduino UNO e b) Arduino NANO.



Fonte: Autoria própria.

Ele trabalha com uma tensão de operação de 5 V e é recomendada uma tensão de alimentação entre 7 e 12 V, possui 14 pinos digitais que serão utilizados para controle da direção do motor, fazer a leitura do codificador que mede deslocamento do motor e a comunicação com a placa de leitura da célula de carga, 6 destes pinos têm a função de Pulse Width Modulation (PWM) que será utilizada para controlar a velocidade do motor.

Possui arquitetura de 8 bits, 32 kB de memória de programa, 2 kB de memória RAM, 1 kB de memória EEPROM e uma frequência de temporizador de 16 MHz para o processador.

4.1.2.4 Célula de carga

A célula de carga foi definida pelo limite de carga para o projeto de 10 kN. Foi utilizada uma célula de carga comercial da marca Guang Ce do tipo “S” por conta da facilidade de ser encontrada no mercado e pelo menor custo quando comparado com a fabricação própria de uma célula de carga.

A célula de carga mostrada na Figura 24 possui um nível de precisão C2 (2000 divisões do fundo de escala), portanto uma resolução em de 5 N, mas o projeto permitirá a troca de célula de carga, permitindo a utilização de células de cargas mais precisas conforme necessidade.

Figura 24 - Célula de carga de 10 kN no projeto para a medição das forças.



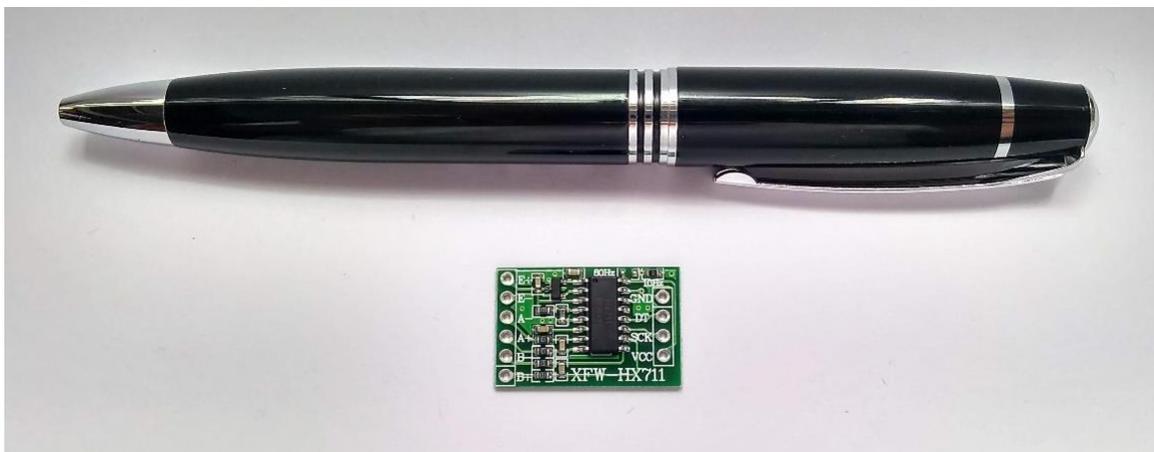
Fonte: Autoria própria.

4.1.2.5 Módulo de leitura de célula de carga

Acoplado ao Arduino® será utilizada um módulo de Conversão Analógico/Digital que basicamente recebe um sinal analógico de entrada e transforma em um valor digital de saída como o qual o microcontrolador consegue lidar.

O módulo escolhido é o da Figura 25 se baseia no Circuito Integrado (CI) HX711, muito utilizado para realizar medições de células de carga, da mesma forma que será utilizado neste trabalho.

Figura 25 - Módulo de leitura da célula de carga baseado no CI ADC HX711.



Fonte: Autoria própria.

Possui capacidade de leitura de valores de 24 bits, ou seja, 16777217 níveis de resolução, 3 níveis de sensibilidade com ganhos selecionáveis de 128, 64 e 32 e duas taxas de aquisição, 10 e 80 Hz, neste projeto o ganho utilizado será de 128, o que resulta em uma faixa de trabalho de -20 a +20 mV e uma frequência de amostragem de 10 Hz.

4.1.2.6 Sistema de controle de velocidade

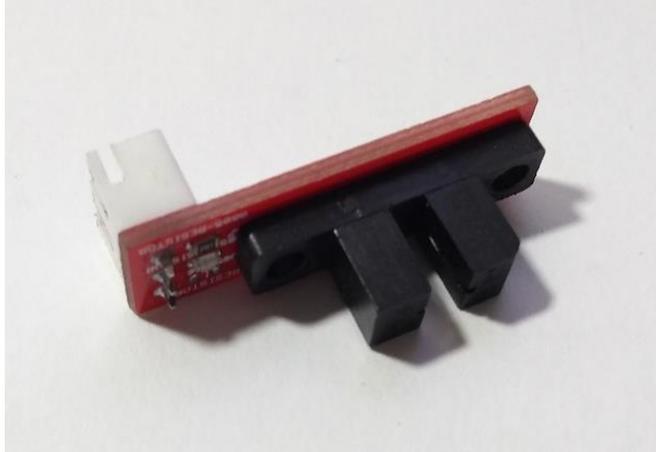
A velocidade de carregamento influencia na resposta do material que está sendo ensaiado e as velocidades mínimas de ensaio são normatizadas, outro fator importante é que para montagem e desmontagem da máquina e dos corpos de prova são utilizadas altas velocidades, o que garante agilidade na operação e conforto ao operador. Portanto é imprescindível que o controle de velocidade de uma máquina universal de ensaios mecânicos seja preciso e funcione para uma faixa bem dilatada de velocidades e para tal será utilizado um codificador acoplado ao eixo do motor.

4.1.2.6.1 Codificador

A principal função do codificador é medir o deslocamento angular de um eixo, no caso específico desta máquina ele foi acoplado ao eixo do motor que trabalha engrenado com os fusos e conseqüentemente medindo-se o deslocamento angular dos fusos é possível calcular o deslocamento linear da trave.

Para o projeto foi construído um codificador óptico de quadratura montado com chaves ópticas como a da Figura 26 o disco óptico foi confeccionado utilizando transparência e impressão a laser por toner. Para melhorar a interrupção da luz foi aplicado à impressão enegrecedor laser 1030 da empresa Eurostar Produtos Gráficos E Com. Visual Ltda. e foram montadas no suporte duas impressões iguais colocadas uma contra a outra de forma sincronizada. O modelo de impressão do disco pode ser encontrado no APÊNDICE A.

Figura 26 - Chave óptica utilizada para montar o codificador de quadratura para medida do deslocamento do eixo do motor.



Fonte: Autoria própria.

O disco utilizado, como o da Figura 27 tem 45 traços pretos, o que resultou numa resolução de 180 pontos por volta do disco e a partir de alguns testes chegou-se à conclusão de que as faixas pretas deveriam ter aproximadamente o dobro da largura das faixas transparentes.

Figura 27 - Disco óptico com 90 divisões por volta utilizado no codificador.



Fonte: Autoria própria.

Com essa quantidade de pontos por volta a resolução seria muito baixa quando estivesse trabalhando com uma velocidade de 0,5 mm/min, o que comprometeria a precisão e estabilidade no controle da velocidade, portanto foi confeccionada uma caixa de ampliação de razão 8:1 utilizando engrenagens impressas em polímero ABS produzidas por impressão 3D como as da Figura 28, para aumentar a frequência de pulsos.

Figura 28 - Engrenagens helicoidais impressas para a confecção do ampliador de velocidade para o disco óptico do codificador.



Fonte: Autoria própria.

A impressão foi realizada na impressora 3D da marca PP3DP modelo UP! Mini do Departamento de Materiais e Tecnologia apresentada na Figura 29.

Figura 29 - Fotografia da impressora 3D utilizada para a impressão de algumas peças.

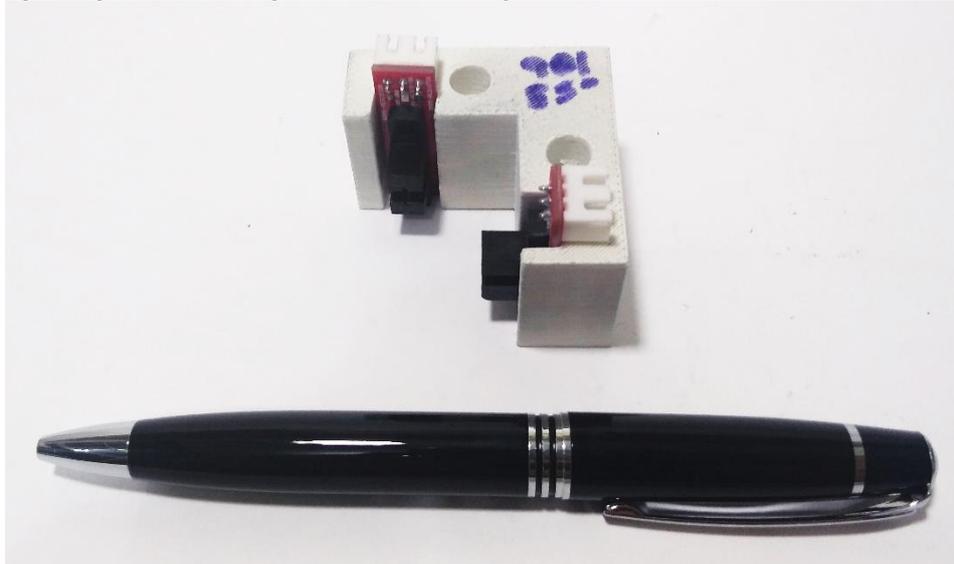


Fonte: Autoria própria.

Um ponto importante para um codificador de quadratura é que deve haver uma defasagem de 90° do sinal de um canal para o outro pois é isso que permite ao microcontrolador medir tanto o deslocamento angular do eixo como também a sentido para a qual ele está girando.

Para garantir essa defasagem foi projetado um suporte para as chaves ópticas mostrado na Figura 30. Também impresso em ABS posiciona as chaves apontando para o centro do disco e com uma angulação de 85° entre elas.

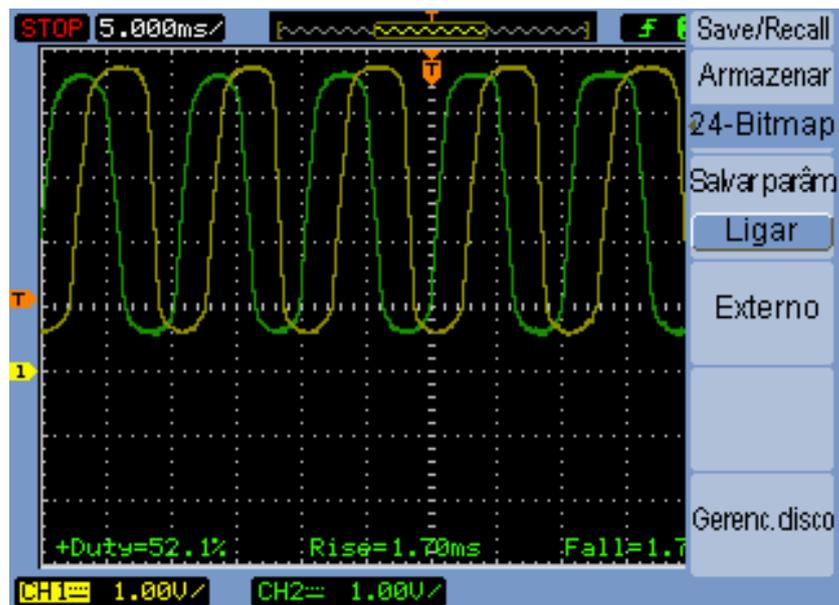
Figura 30 - Suporte para chaves ópticas com 85° impresso em ABS.



Fonte: Autoria própria.

Por se tratarem de chaves ópticas o sinal que sai das chaves para o microcontrolador é um sinal analógico com picos e vales como se pode observar na Figura 31. Para funcionar devidamente o sinal deve ter o formato de ondas quadradas com a menor inclinação possível na transição do estado alto para o baixo, portanto foi necessário realizar um tratamento no sinal entre as chaves ópticas e o microcontrolador.

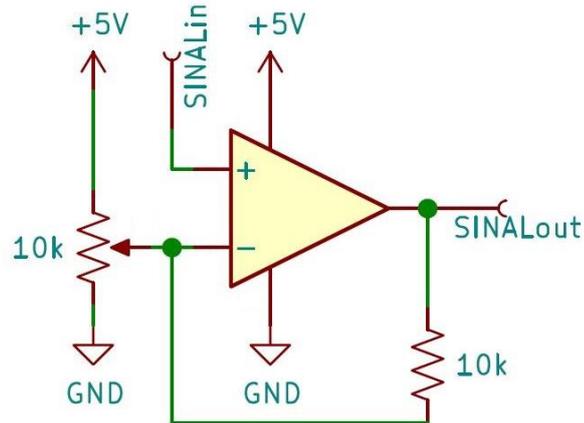
Figura 31 - Captura de tela do osciloscópio ligado aos dois canais do codificador óptico.



Fonte: Autoria própria.

Para a realização do tratamento do sinal foi utilizado, para cada canal, um circuito comparador composto por um amplificador operacional (Amp-Op) e um potenciômetro para ajuste da tensão de referência. A Figura 32 mostra o diagrama do circuito eletrônico comparador utilizado.

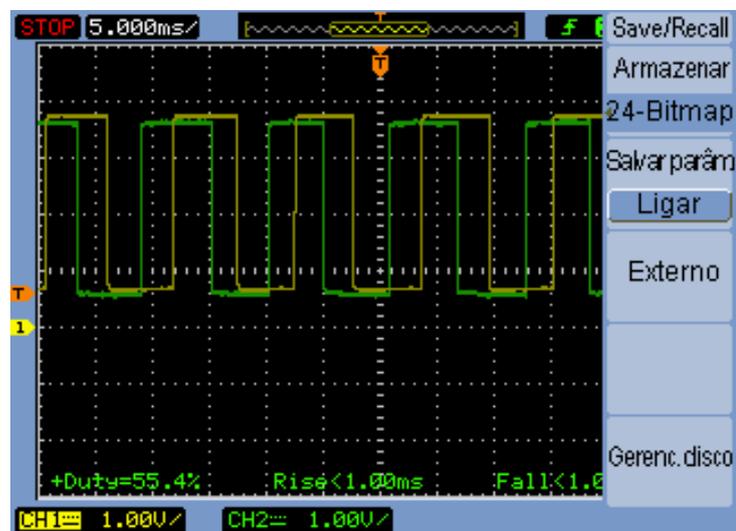
Figura 32 - Circuito comparador Schmitt Trigger utilizado no tratamento dos sinais do codificador.



Fonte: Autoria própria.

O ajuste da tensão de referência é importante pois permite o ajuste dos sinais que devem ser ondas quadradas com metade do tempo no estado alto (faixa transparente no sensor óptico) e metade do tempo no estado baixo (faixa preta no sensor óptico), o que representa deslocamentos angulares de igual grandeza, como se pode observar na Figura 33.

Figura 33 - Captura de tela do osciloscópio ligado aos sinais das chaves ópticas do codificador após o tratamento.



Fonte: Autoria própria.

O componente utilizado foi o circuito integrado LM358P que encapsula os dois amplificadores operacionais necessários para o tratamento e proporcionam um tempo de transição menor que 10 μ s, permitindo que o sinal oscile a uma frequência de até 50 kHz

4.1.2.7 Alimentação

Para seleção da alimentação os principais fatores são tensão e corrente requeridas.

A partir dos principais componentes que consumirão energia, tais como microcontrolador, motor e placa controladora de motor é possível dimensionar uma fonte para o sistema.

Como a placa microcontroladora suporta uma tensão de alimentação de 12 V e a tensão máxima de alimentação do motor também é 12 V, essa foi a tensão escolhida para a fonte.

Já para a seleção da corrente da fonte foi tomada como base a corrente que passa pelo motor quando este exerce um torque de 3 N.m, uma corrente de 7,5 A, mais que suficiente para aplicar o carregamento máximo de 10 kN durante um ensaio.

Portanto a fonte selecionada foi uma fonte chaveada da marca SPL, modelo S-120-12 como a da Figura 34 que suporta até 10 A contínuos, com alguns recursos como proteção térmica, contra sobrecarga e curto-circuito.

Figura 34 - Fonte chaveada utilizada para alimentação da máquina.



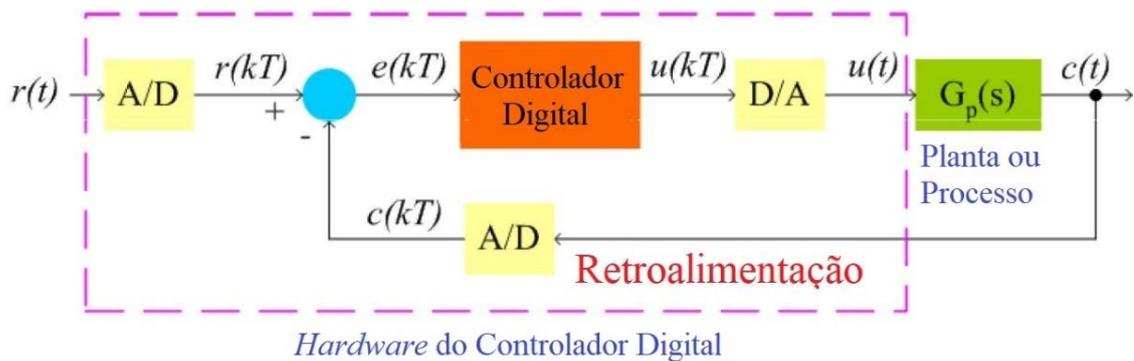
Fonte: Autoria própria.

4.1.2.7.1 Algoritmo de controle: PID

Para que o controle do motor tivesse a precisão desejada o algoritmo de controle escolhido foi o controle Proporcional, Integral e Derivativo (PID).

O controle PID é um método de controle de malha fechada, ou seja, que possui retroalimentação que consiste em um sistema que possui uma planta ou um processo com ao menos uma variável a ser controlada. Ao final do processo, na saída da planta essa variável é medida e com esse valor medido calcula-se o erro que é a diferença entre o valor medido e o desejado e a partir desse erro calcula-se uma atuação necessária para a minimização deste erro. O diagrama para esse algoritmo está ilustrado na Figura 35.

Figura 35 - Sistema de controle utilizando um controlador digital. O controlador digital necessita que os sinais sejam convertidos de analógico para digital em sua entrada e posteriormente sua saída deve ser convertida de digital para analógica novamente.



Fonte: Traduzido de Lucena (2018)¹.

No controle PID essa atuação é calculada proporcionalmente ao erro, à integral do erro e ao diferencial do erro.

Mas por se tratar de um sistema microcontrolado que funciona de forma digital esta planta analógica deve ser discretizada no tempo.

Utilizando a teoria de controle discreto é possível então discretizar esse sistema de controle, mas por se tratar de um sistema que utiliza a integral do erro no tempo existem algumas opções, pois existem diferentes regras de integração numérica.

A regra escolhida para esse projeto foi a regra de integração trapezoidal ou regra dos trapézios, pois é uma regra simples que não requer muita capacidade de processamento do microcontrolador, gera um erro menor em relação ao sinal analógico real e conseqüentemente um controle mais eficiente.

¹LUCENA, S. E. **Digital control systems** - notas de aula da disciplina de Controle Discreto, 2018.

A princípio a ideia do projeto era de realizar o controle da velocidade durante o ensaio, mas como posteriormente seria necessário também um controle preciso da posição da trave, tanto para posicionamento, quanto para os diversos tipos de ensaios possíveis, optou-se por realizar o controle utilizando diretamente a posição.

Ou seja, o parâmetro de entrada para a movimentação da trave da máquina é sempre a posição desejada, o controle se encarrega de fazer com que o motor se movimente o mais rápido possível, de forma precisa e sem que haja oscilação, para a posição desejada.

Isso funciona tanto estaticamente quanto dinamicamente. Exemplificando, quando se deseja subir ou baixar a trave apenas para posicionamento, será dada a posição final desejada para o microcontrolador, mas quando se quiser realizar um ensaio onde a trave deve se movimentar com velocidade constante, será recalculado a cada ciclo do controlador uma nova posição desejada em função do tempo.

Teste preliminares em outro motor de menor escala realizados juntamente com um projeto PIBIC Junior do aluno João Vitor Marchi Pedro de Azevedo Silva confirmaram a possibilidade de utilização da técnica.

4.1.3 Interface com computador

O equipamento trabalha com comunicação direta com o computador, no qual é executado um aplicativo responsável pelo controle e aquisição de dados de ensaio.

4.1.3.1 Protocolo de Comunicação

Como o sistema se baseia na plataforma Arduino o protocolo de comunicação escolhido foi a comunicação serial por meio de uma porta USB, por meio dela foi feita toda comunicação entre computador e microcontrolador.

Uma das vantagens de se utilizar a porta USB é que ela está disponível em qualquer notebook, o que garante a portabilidade do sistema, se fosse utilizada uma porta serial ou paralela provavelmente seria necessária a conexão com um computador de mesa.

O computador é responsável por enviar qualquer comando ao equipamento como parâmetros de ensaio, início, parada, ao mesmo tempo que recebe todos os dados brutos como temperatura, umidade, tempo, força e deslocamento do motor, posteriormente também será implementada possibilidade de utilização de extensômetro.

Na realidade as placas Arduino[®] possuem um CI que faz a conversão do protocolo USB para o serial e vice-versa, o que permite a comunicação direta do computador com o microcontrolador via USB.

A taxa de dados (*baud rate*) utilizada nesta máquina para comunicação serial foi de 9600 bps.

4.1.3.2 Programa de aquisição de dados

O programa para aquisição dos dados foi desenvolvido pelo aluno de graduação André Hideo Onoda Monteiro em seu trabalho de conclusão de curso em conjunto e sob orientação do autor com o título “Desenvolvimento de Software para Ensaios Mecânicos para fins didáticos utilizando o conceito *open-source*” (MONTEIRO, 2017).

O programa foi desenvolvido totalmente voltado para este projeto aplicando os mesmos conceitos de código aberto e utilização didática, mas com uma arquitetura modular, o que permitirá futuras modificações, atualizações e implementação de novas funções. Ele foi escrito todo em linguagem Java, uma linguagem aberta, muito difundida e multiplataformas utilizando Ambientes de Desenvolvimento Integrados também abertos.

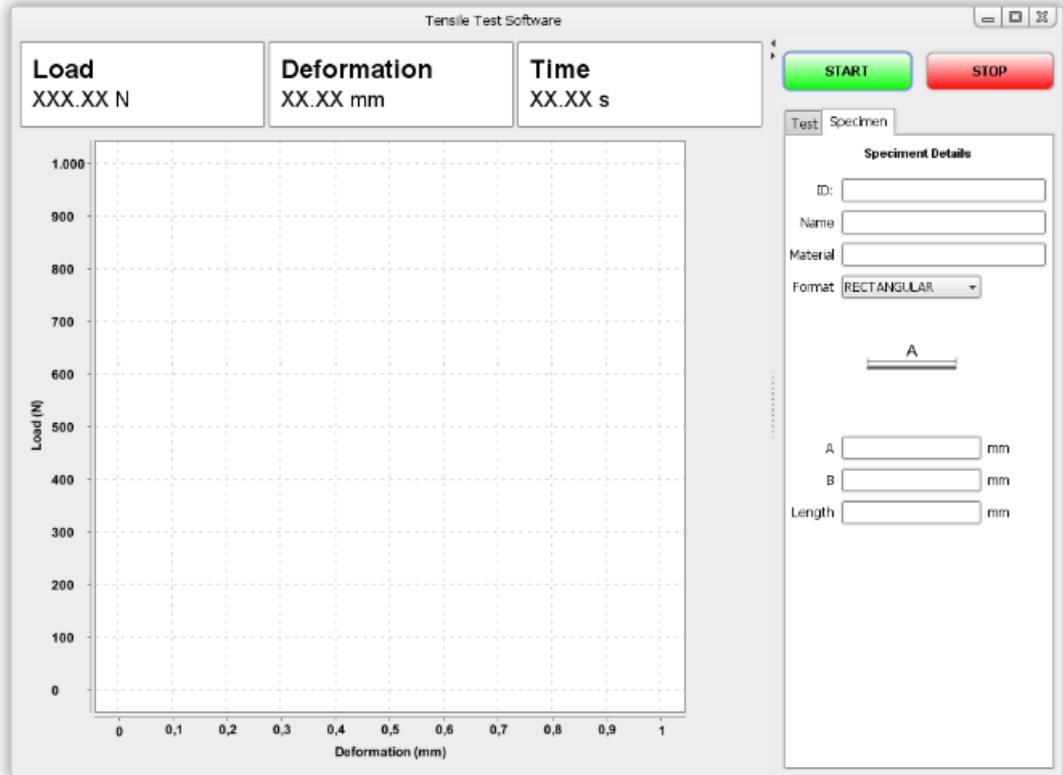
4.1.3.2.1 Interface Gráfica de Usuário (GUI)

A Interface do programa foi feita pensando em ser limpa e intuitiva para contribuir com a sua função didática.

Nela o operador terá controle sobre a máquina, poderá configurar o tipo de ensaio, entrar com parâmetros de corpo de prova e de ensaio, ela apresentará o gráfico em tempo real de tensão-deformação de acordo com o tipo de ensaio, indicará a tensão máxima alcançada durante o ensaio e calculará os parâmetros de resistência do material.

A Figura 36 apresenta uma captura de tela do programa na qual é possível notar alguns dos pontos citados anteriormente.

Figura 36 - Captura de tela do programa de controle da Máquina Universal de Ensaios Mecânicos



Fonte: Monteiro (2017).

4.2 FABRICAÇÃO E MONTAGEM

Todos os equipamentos utilizados foram do Departamento de Materiais e Tecnologia da UNESP – Guaratinguetá.

A fabricação e montagem das peças da máquina foram feitas utilizando equipamentos e ferramentas comumente encontrados em oficinas mecânicas e laboratórios de cursos técnicos em mecânica tais como torno mecânico, fresadora e furadeira com mesa coordenada, serra de fita, esmeril, limas, serra manual, entre outros.

Alguns equipamentos específicos foram utilizados em algumas ocasiões especiais tais como máquina de eletroerosão a fio e por penetração, central de usinagem de Comando Numérico Computadorizado (CNC), e retífica, mas é importante destacar que esses recursos não são imprescindíveis para a construção da máquina, foram aproveitados no projeto por estarem à disposição no Departamento.

Na construção da máquina alguns cuidados devem ser tomados, principalmente para que os furos fiquem concêntricos, garantindo alinhamento à máquina depois de montada. Este alinhamento é importante tanto para garantir homogeneidade no carregamento quanto longevidade e bom funcionamento de todos seus componentes, tais como fusos e porcas, rolamentos, buchas, engrenagens e correntes.

4.3 CALIBRAÇÃO

As calibrações foram feitas para mensurar e garantir a precisão e exatidão das medidas realizadas pelo Arduino e pelos módulos acoplados a ele.

Como a calibração absoluta dos equipamentos deve ser realizada por empresas certificadas e necessita de equipamentos específicos, neste trabalho foram realizadas calibrações utilizando equipamentos que possuem uma precisão maior que a do equipamento a ser calibrado e apenas feita uma transferência de calibração, para que pudesse ser realizada a comparação dos resultados.

4.3.1 Calibração do módulo Conversor Analógico/Digital

Como dito anteriormente o módulo conversor ADC utilizado tem uma resolução de 24 bits em uma faixa de -20 mV a 20 mV ou seja, 16777216 níveis para um intervalo de 40 mV, resultando em aproximadamente 419430 níveis/mV.

Considerando que a célula de carga tem uma resposta aproximada de 2 mV na saída para cada 1 V na entrada quando alimentada por uma tensão de 5 V e aplicada uma carga de 10 kN o sinal de resposta da célula seria de 10 mV, o equivalente a um valor de 4194300.

A fim de aferir esta resposta do módulo ADC foi realizada uma calibração aplicando uma tensão conhecida de 0 a 10 mV em degraus de 1 mV na entrada do módulo com 1 minuto de espera em cada nível para caso fosse necessária alguma estabilização do sistema enquanto esse realizava a aquisição dos dados.

Para esta calibração foi utilizado um calibrador da marca EDC modelo E100RC e um multímetro da marca Keysight 34460A a uma temperatura de 24 ± 2 °C.

4.3.2 Calibração da célula de carga

A calibração da célula de carga foi feita em duas etapas, primeiramente foi feito um teste de estabilidade com uma massa e posteriormente a calibração com o sistema de aquisição utilizando o Arduino®.

4.3.2.1 Estabilidade da célula de carga

Primeiro a célula de carga sem carga a uma temperatura de 24 ± 2 °C foi alimentada com uma tensão de excitação de $5,00003\pm 3$ ppm V, aferida por um multímetro Keithley 2000, fornecida por um calibrador da marca Fluke modelo 515A, alimentado por baterias para redução de ruído, e sua saída foi monitorada com um sistema de captura de dados utilizando um multímetro da marca Keysight modelo 34460A durante uma hora.

Em seguida foi colocada uma massa de $8,6\pm 0,1$ kg medida em uma balança Plenna Wind com 1 % de exatidão mantida também durante uma hora.

4.3.2.2 Calibração com o Arduino®

A calibração com o sistema de aquisição utilizando o Arduino® foi feita a uma temperatura de 25 ± 2 °C utilizando a máquina da marca Shimadzu modelo AG-X 50 kN do Departamento de Materiais e Tecnologia da UNESP – Guaratinguetá equipada com uma célula de carga de 50 kN.

A célula a ser calibrada foi fixada nas garras da máquina por parafusos M16 com as cabeças cortadas, rosqueados em suas extremidades como mostra a Figura 37.

Figura 37 - Célula de carga fixada às garras para a realização da calibração.



Fonte: Autoria própria.

Com a célula de carga fixada e ligada ao sistema de aquisição com o Arduino® a calibração foi feita aplicando cargas em degraus de 100 N nos intervalos de 0 a 1 kN e de 9 a 10 kN e em degraus de 1 kN entre 1 e 9 kN. Essa diferença no tamanho dos degraus foi utilizada para capturar possíveis não linearidades que pudessem ocorrer nas extremidades da escala de resposta da célula de carga que está sendo calibrada.

A aplicação da carga foi realizada a uma taxa de 200 N/min, a máquina era pausada manualmente em cada degrau e era dado um tempo de três minutos para acomodação do carregamento.

Posteriormente com os dados coletados pela máquina comercial e pelo sistema de aquisição foi calculada ajustada uma curva de correlação entre valores brutos medidos pelo módulo ADC e os valores de carga medidos pela máquina comercial, por isso pode-se considerar uma transferência de calibração.

4.4 TESTES E VALIDAÇÃO

Para testar a máquina construída foram realizados alguns testes preliminares para ajuste dos parâmetros do controle PID, nesses testes foram ensaiados corpos de prova de Alumínio comercial de tamanho reduzido com diâmetro da seção reduzida em torno de 5 mm, comprimento útil de 25 mm e diâmetro de pega de 9 mm, mostrados na Figura 38.

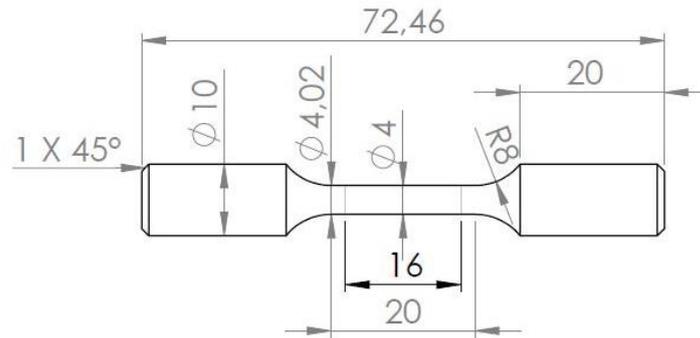
Figura 38 - Corpo de prova utilizado em teste para ajuste dos parâmetros do controle PID após o ensaio.



Fonte: Autoria própria.

Após esses ajustes, para validar os resultados da máquina, foram confeccionados outros seis corpos de prova do mesmo material mas suas dimensões foram modificadas seguindo a norma ASTM E8/E8M – 16a (ASTM, 2016), o diâmetro da seção transversal reduzida foi modificado para 4 mm, o comprimento útil do corpo de prova foi reduzido para 16 mm, para que não houvesse escorregamento foi decidido mudar o diâmetro da região da pega da garra de 9 para 10 mm, pois 9 mm é o menor diâmetro que a garra da máquina comercial pode segurar. Como sugere a norma pode haver um decaimento de 1% das extremidades para o centro do corpo de prova para garantir que seu rompimento ocorra no centro da região útil de ensaio. A Figura 39 apresenta as dimensões do corpo de prova segundo norma ASTM E8/E8M (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2016).

Figura 39 – Dimensões do corpo de prova utilizado nos ensaios de validação.



Fonte: Autoria própria.

Os ensaios para validação com a máquina Shimadzu foram realizados a uma temperatura de 24 ± 2 °C a velocidade de ensaio foi de 1 mm/min com a mesma célula de carga de 50 kN utilizada para a transferência de calibração e foi utilizada a garra para cargas de até 50 kN.

Para garantir a comparabilidade dos dados os ensaios na máquina projetada foram realizados com a mesma velocidade de 1 mm/min, com célula de carga que anteriormente foi calibrada a uma temperatura de 22 ± 2 °C.

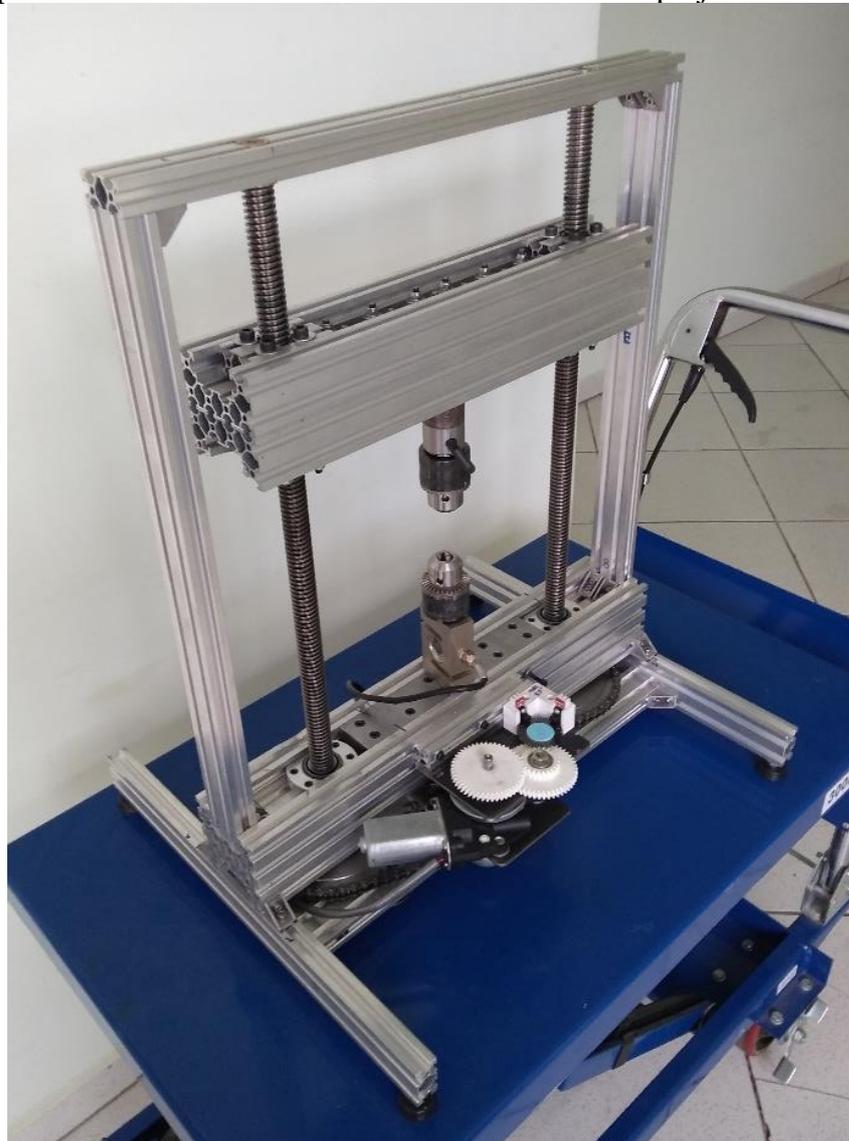
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como o trabalho se trata de projeto e construção da máquina tanto os dados de calibração, testes e validação são resultados, como também os detalhes de fabricação e montagem das peças.

5.1 CONSTRUÇÃO

Na Figura 40 é possível observar o resultado da construção e montagem da máquina.

Figura 40 - Equipamento construído durante o desenvolvimento do projeto.



Fonte: Autoria própria.

5.1.1 Furação das traves

Os fusos e porcas são componentes muito sensíveis a desalinhamentos, portanto devem estar o mais alinhados possível, seu desalinhamento pode causar aumento excessivo no atrito, aumento no desgaste, ou até travamento dos fusos podendo ter consequências ainda mais graves.

Para garantir esse alinhamento, os furos nas traves pelas quais eles passam devem estar alinhados, para conseguir esse alinhamento todos os furos das traves foram feitos em uma furadeira com mesa coordenada.

Tomou-se o cuidado de posicionar os furos sempre em relação ao mesmo ponto referencial da mesa, o canto posterior esquerdo.

Os furos da trave inferior foram feitos com um diâmetro cerca de 2 mm maiores que o eixo, pois o eixo passante seria posicionado com a fixação dos mancais.

Já os furos da trave móvel foram feitos com o diâmetro cerca de 1 mm menores que o diâmetro da porca e posteriormente o diâmetro das porcas foi ajustado a eles para que não houvessem folgas pois, as porcas transmitem toda a carga à trave por contato direto.

Os furos da trave superior foram ajustados com alargadores para que as buchas encaixassem com ajuste aderente forçado leve auxiliando no alinhamento do fuso na montagem final.

O resultado de um bom alinhamento foi um sistema com movimentação livre de atritos excessivos nos fusos e que não gera sobrecarga no motor.

5.1.2 Eixo do motor

O motor de vidro elétrico escolhido vem com uma engrenagem de fábrica que não seria útil para a construção da máquina, portanto optou-se por removê-la e adaptar o eixo diretamente em seu lugar, mas uma das dificuldades foi acoplar o novo eixo à engrenagem do motor que, como se pode ver na Figura 41, possui um padrão relativamente complexo para se replicar em um eixo.

Figura 41 - Motor aberto com engrenagem exposta.



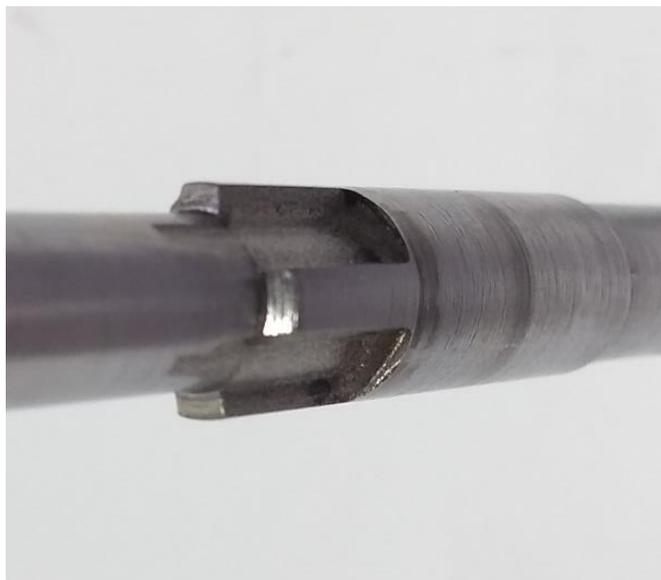
Fonte: Autoria própria.

Como este é era o principal elemento de transmissão de potência do motor para o resto da máquina era importante que seu acoplamento com a engrenagem não tivesse folga, pois isso poderia gerar desgaste tanto no eixo como na engrenagem.

A solução encontrada para resolver tal problema foi utilizar a máquina de eletroerosão por penetração para fabricar as ranhuras no eixo.

O eletrodo de cobre foi conformado para que tivesse exatamente o perfil da ranhura e então foi feita a erosão no eixo para que ficasse como na Figura 42 e dessa forma o eixo encaixou na engrenagem com um ajuste próximo ao presente na engrenagem original.

Figura 42 - Eixo do motor com enfoque nas ranhuras de acoplamento.



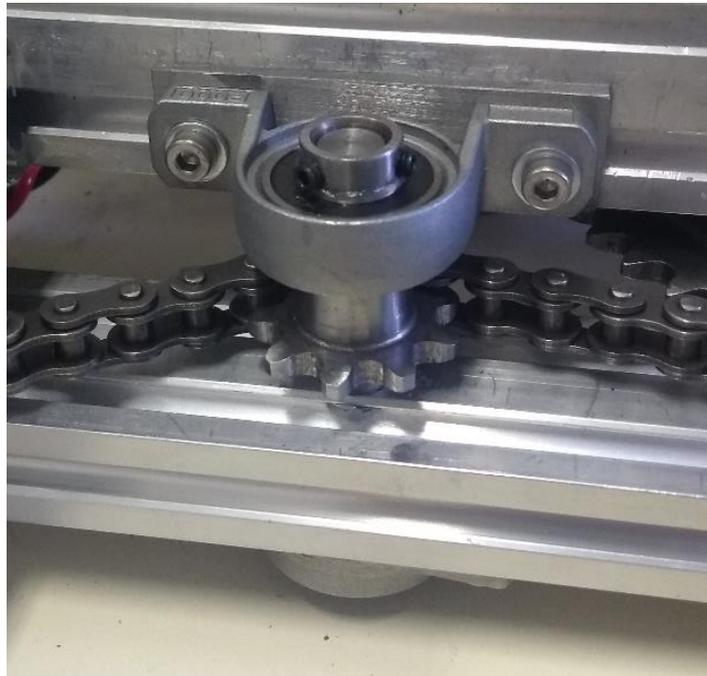
Fonte: Autoria própria.

5.1.3 Esticador de corrente

Como a corrente é composta por segmentos seu comprimento deve ser sempre múltiplo do passo ou de dois passos dependendo da emenda que será utilizada para fechar a corrente.

Um dos problemas que podem ocorrer é que dependendo da posição das engrenagens a corrente pode acabar ficando frouxa, gerando ruído, desgaste prematuro ou até mesmo se soltando da engrenagem. A corrente também pode se afrouxar com o uso e para resolver este problema foi feito um esticador de corrente como pode-se observar na Figura 43.

Figura 43 – Fotografia do esticador de corrente



Fonte: Autoria própria.

5.1.4 Junta esférica

A junta esférica serve principalmente para manter o alinhamento do corpo de prova durante o ensaio, garantindo um esforço exclusivamente axial.

Para facilitar a fabricação utilizou-se um parafuso M16 que vai rosqueado na trave móvel. A parte inferior de sua cabeça foi usinada para se obter uma geometria abaulada como pode-se observar na Figura 44.

Figura 44 - Parafuso de fixação da junta esférica.



Fonte: Autoria própria.

Para completar a junta foram feitos o copo da Figura 45, que é a outra parte da junta que propicia o movimento, e o adaptador para mandril da Figura 46 que se encaixa com o copo e são fixados entre si por um pino.

Figura 45 - Copo da junta esférica.



Fonte: Autoria própria.

Figura 46 - Adaptado para mandril.



Fonte: Autoria própria.

Este sistema de copo com adaptador foi escolhido pois, com o mesmo parafuso e copo, é possível adaptar vários tipos de garra ou outros suportes para tração usinando apenas o adaptador.

O conjunto apresenta certa folga e o contato do parafuso com o copo não tem um movimento suave, uma das possíveis razões é que todo o conjunto foi usinado em um torno manual, até mesmo a região abaulada e essa pode não ter ficado com um raio de curvatura ou acabamento ideais para a necessidade.

A consequência disso observada durante os testes é que no início do ensaio a junta se acomoda de uma maneira não muito estável e após algum carregamento ocorre um escorregamento para uma posição mais estável, o que ocasiona uma descontinuidade no início do ensaio.

5.1.5 Codificador

Para a fabricação do codificador optou-se por utilizar a impressão 3D por se tratarem de peças complexas para fabricação por usinagem e por não exigirem alta resistência mecânica para realizarem suas funções.

A impressão 3D não possui apenas vantagens, ela pode trazer consigo alguns problemas como empenamento, imprecisão dimensional, acabamento superficial rugoso, mas em contrapartida ela permite prototipagem rápida de peças complexas com um menor custo quando comparado com outros processos de fabricação em pequena escala, dependendo dos ajustes feitos na impressora pode-se minimizar esse empenamento e melhorar o acabamento.

Este processo permitiu que as engrenagens do sistema de ampliação de velocidade do codificador fossem projetadas helicoidais, o que minimiza ruído e folgas na transmissão.

Apesar de alguma imprecisão dimensional, no caso para a impressora utilizada em torno de 0,1 mm nas dimensões nas direções externas à peça, a sua precisão em relação a concentricidade e posicionamento coordenado é muito boa, garantindo um bom encaixe e posicionamento dos elementos na chapa base do codificador.

Os outros contatos não apresentam desgaste evidente, sendo necessário o uso mais prolongado para se poder avaliar tal resistência.

Com o sistema de ampliação de velocidade o sistema passou a ter uma resolução de 1760 passos/mm, ou seja, cada passo do codificador equivale a 0,568 μm , valor importante para a realização das conversões de dados do codificador para deslocamento da trave.

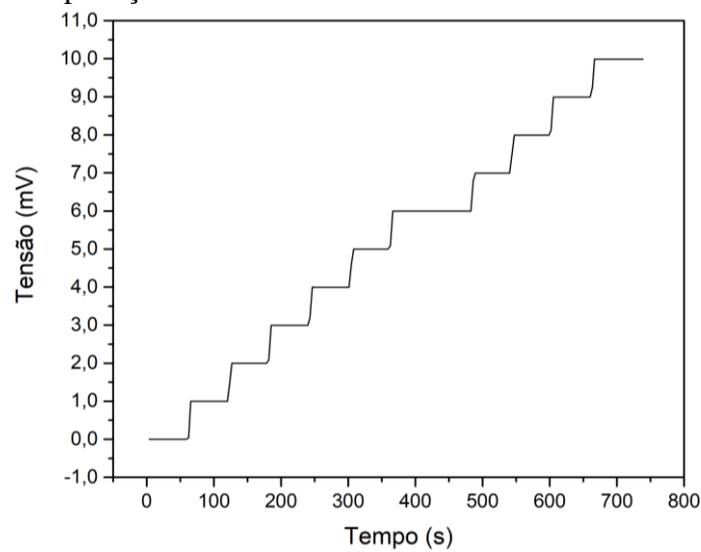
5.2 CALIBRAÇÃO

5.2.1 Calibração do módulo ADC

Na calibração do módulo ADC foram obtidos os dados de tensão aplicada no canal A do módulo ADC e os dados brutos de leitura realizados por ele e capturados com o Arduino®.

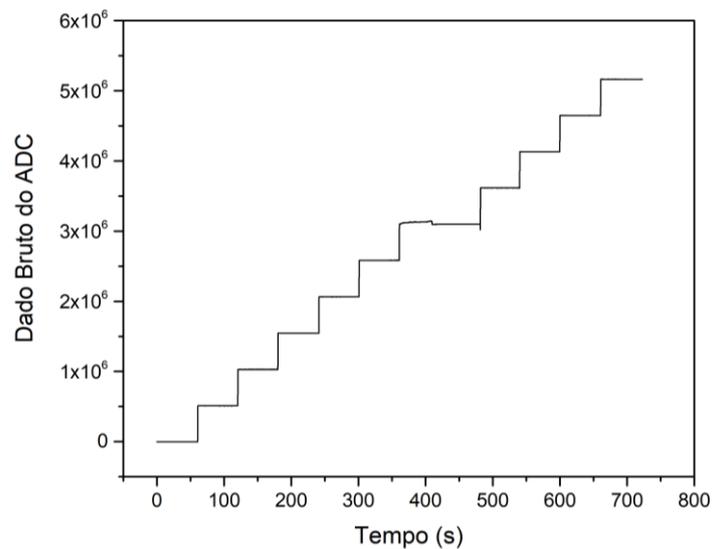
As Figuras Figura 47 e Figura 48 mostram a curva de tensão aplicada e os valores brutos lidos pelo módulo ADC respectivamente.

Figura 47 - Curva de aplicação de tensão no canal A do módulo ADC.



Fonte: Autoria própria.

Figura 48 - Curva de leitura dos dados brutos do módulo ADC em resposta à aplicação de tensão.



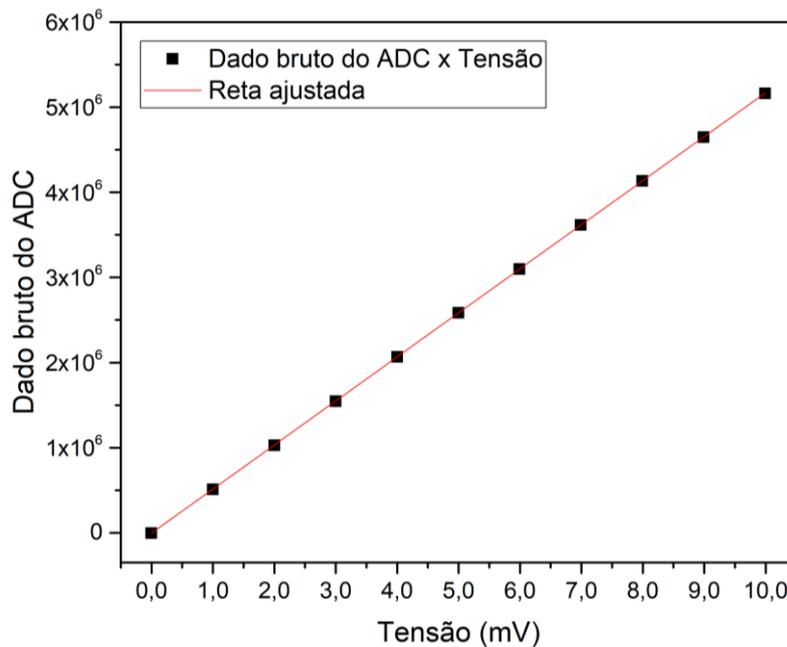
Fonte: Autoria própria.

É possível observar na Figura 48 no intervalo entre 360 e 400 segundos uma região não linear, possivelmente um ruído gerado por alguma interferência não conhecida. Por conta disso foi esperado até que a tensão se estabilizasse para a cronometragem do início do patamar.

Para analisar a correlação da medida realizada pelo módulo ADC e a entrada foi levantada uma curva de correlação onde os pontos da curva foram obtidos realizando uma média dos últimos 11 pontos de cada patamar para curva de tensão e dos últimos 51 pontos de cada patamar para a curva de dados brutos.

A Figura 49 apresenta a curva de correlação com uma curva de ajuste linear e a Tabela 2 apresenta os parâmetros calculados da reta ajustada.

Figura 49 - Gráfico de correlação entre tensão aplicada e dados brutos lidos pelo módulo ADC.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 2 - Dados de ajuste de reta de correlação entre tensão e dados brutos lidos com o módulo ADC.

Equação	$y = a + b*x$
Traçado	Dado bruto do ADC
Peso	Instrumental
Interseção	-4614,18±957,60
Inclinação	517550,0± 190,0
Soma Residual dos Quadrados	229,008
r de Pearson	1,0000
R-Quadrado (COD)	1,0000
R-Quadrado Ajustado	1,0000

Fonte: Autoria própria.

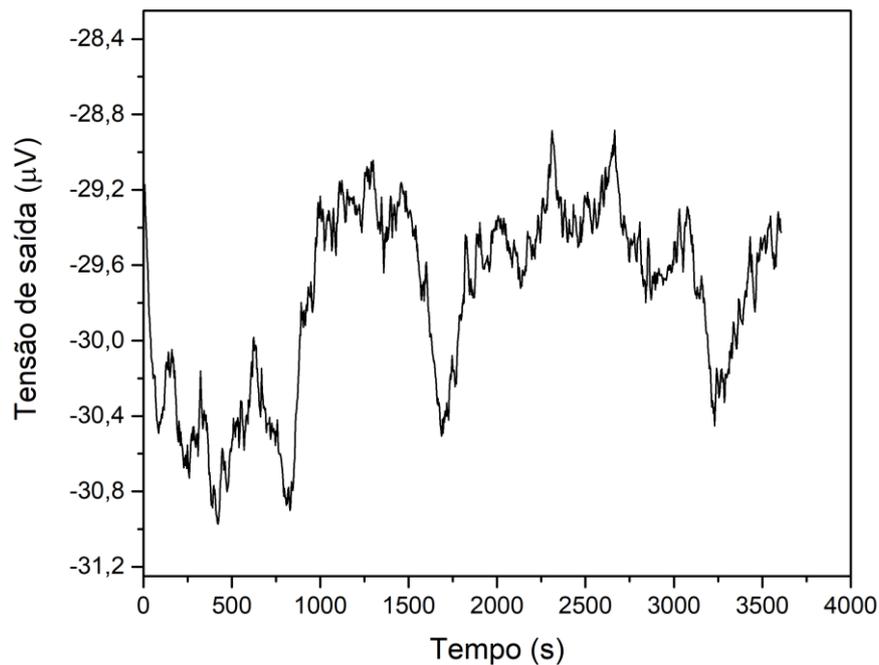
Analisando os coeficientes da curva ajustada a interseção ocorre em -4614, em torno de 0,055% do alcance de medidas do ADC e o R-Quadrado, ou Coeficiente de Determinação do ajuste é 1,0000, o que indica um bom ajuste, conseqüentemente é possível constatar que a resposta do módulo é estritamente linear em função da tensão de entrada dentro do intervalo de utilização da célula de carga com sensibilidade de 2 mV/V.

5.2.2 Calibração da célula de carga

5.2.2.1 Análise de estabilidade da célula de carga

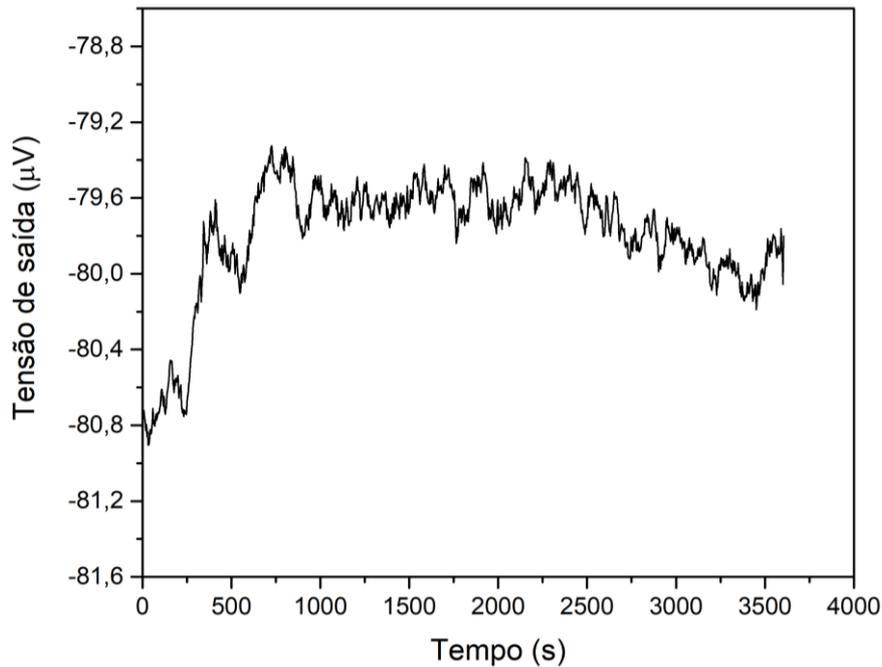
Após os procedimentos de leitura da célula de carga livre e sob a massa, por uma hora em cada situação foram obtidos os seguintes gráficos das Figura 50 e Figura 51.

Figura 50 - Gráfico de estabilidade da célula de carga sem a massa.



Fonte: Autoria própria.

Figura 51 - Gráfico de estabilidade da célula de carga com a massa.



Fonte: Autoria própria.

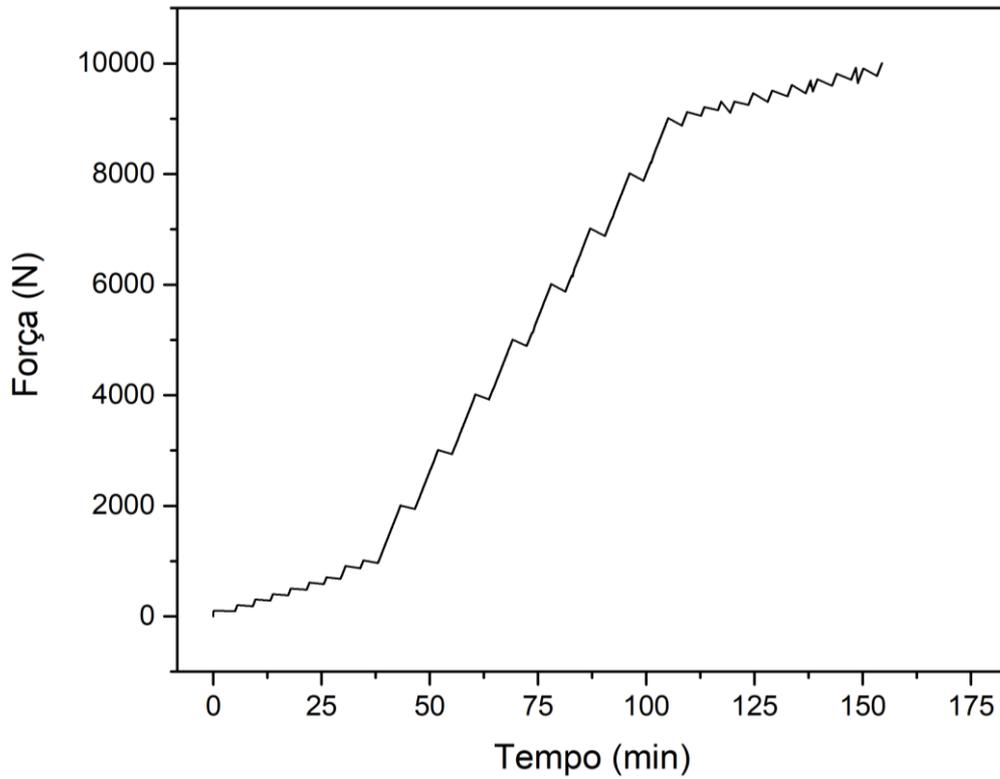
Apesar de uma aparente grande instabilidade do sinal apresentada nos gráficos, os desvios padrões dos dados da célula de carga foram de $0,493 \mu\text{V}$ sem carregamento e de $0,314 \mu\text{V}$ com o carregamento, o que representa uma variação de 49,3 e 31,4 ppm em relação ao fundo de escala da célula, ou seja, menos de 0,5 N em um fundo de escala de 10 kN durante uma hora de análise, valor este bastante pequeno quando comparado com as especificações de erro da célula de carga fornecidos pelo fabricante.

5.2.2.2 Calibração com o Arduino®

Esta foi a última parte na qual foi feita a transferência de calibração da célula de 50kN da máquina Shimadzu para a célula de carga do projeto.

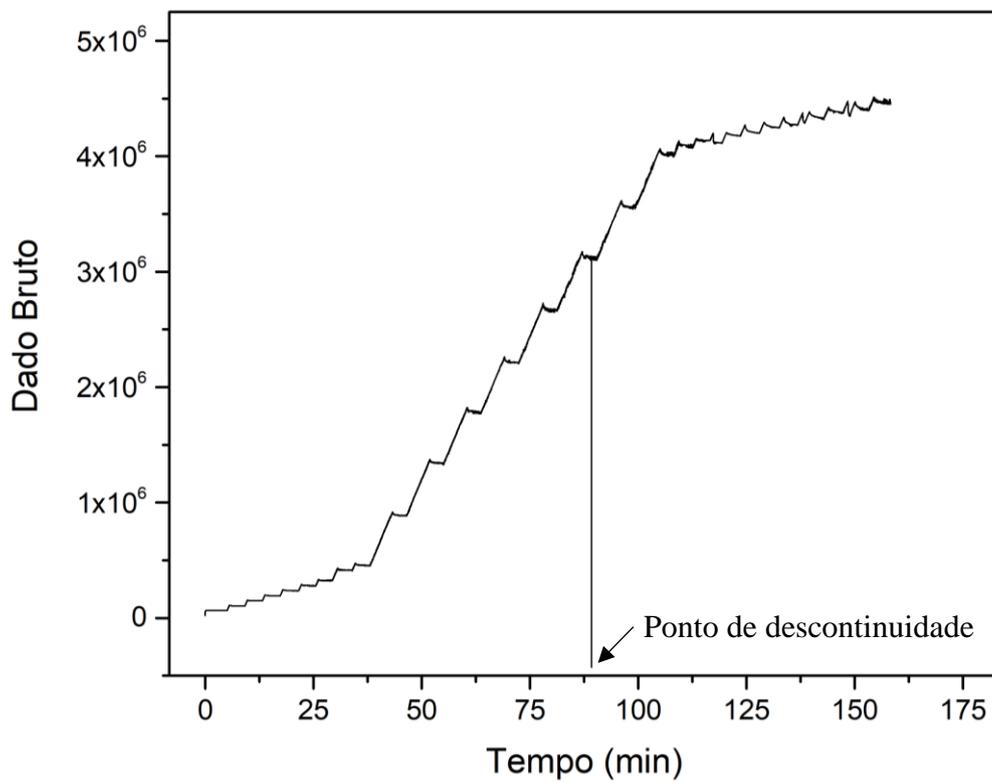
Os dados foram obtidos através da aquisição simultânea dos dados da Shimadzu e da célula a ser calibrada. As Figura 52 e Figura 53 apresentam os gráficos de força e dados brutos por tempo.

Figura 52 - Gráfico de Força por Tempo da máquina Shimadzu.



Fonte: Autoria própria.

Figura 53 - Gráfico de Dados Brutos por Tempo do módulo ADC.



Fonte: Autoria própria.

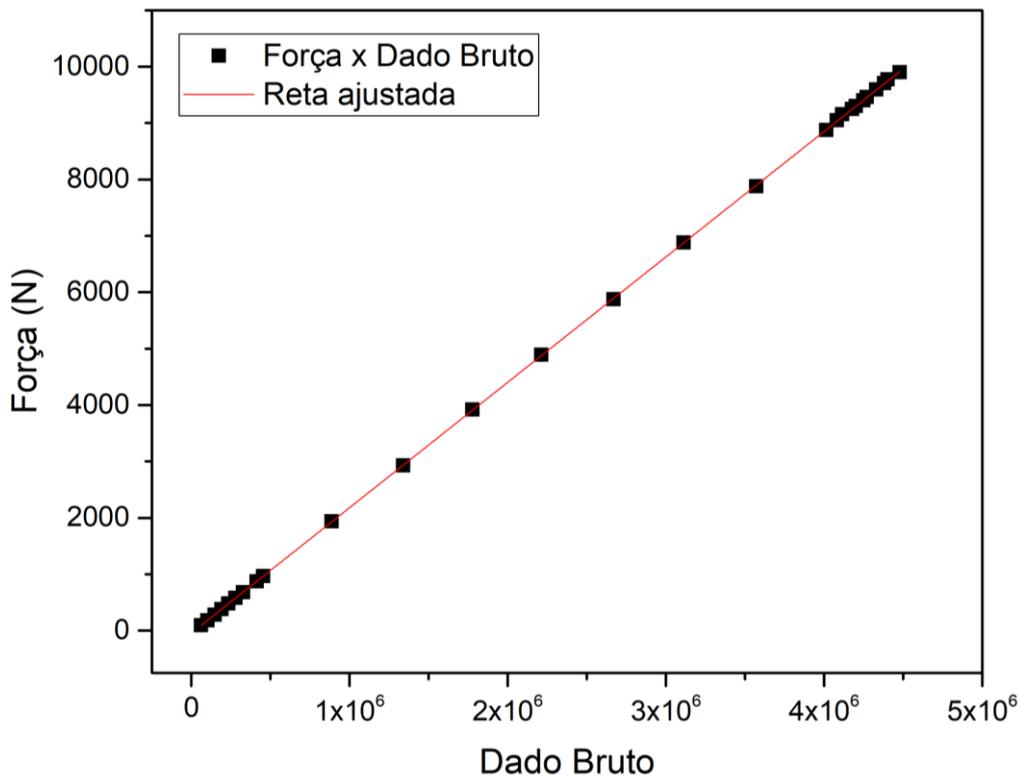
A máquina Shimadzu não continua a aquisição de dados durante o período em que o ensaio está pausado, isso impossibilitou a utilização de uma média de pontos de cada degrau para utilizar na curva de calibração, portanto para tal fim foi anotado manualmente o valor da carga indicado pela máquina ao final de cada período de acomodação.

Esse detalhe se apresenta graficamente como uma reta ligando cada pico de pausa com cada vale de reinício do deslocamento da trave, diferente do gráfico de dados brutos que apresenta aquisição todo o tempo, o que possibilitou fazer a média dos últimos 51 pontos de cada patamar para utilizar no ajuste da curva de calibração.

É possível observar no gráfico de dados brutos da Figura 53 que houve uma descontinuidade durante a aquisição de dados, analisando a planilha de dados concluiu-se que se tratava de um único ponto e que, portanto, foi removido para fins de cálculo, mas sua causa deverá ser investigada em uma revisão, pois este ruído poderia atrapalhar no controle da máquina ou no processamento automatizado dos dados.

A partir dos dados obtidos foi possível realizar o levantamento da curva de correlação dos dois dados, de carga em função do dado bruto lido pelo módulo ADC e a partir da dispersão de pontos foi ajustada uma reta como pode-se observar na Figura 54.

Figura 54 - Gráfico de calibração da célula de carga.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 3 - Dados de ajuste de reta de correlação entre carga e dados brutos lidos com o módulo ADC.

Equação	$y = a + b \cdot x$
Traçado	Força
Peso	Instrumental
Interseção	$-43,2959 \pm 0,4431$
Inclinação	$0,00222 \pm 0,00000$
Soma Residual dos Quadrados	3631,04
R de Pearson	0,99999
R-Quadrado (COD)	0,99999
R-Quadrado Ajustado	0,99999

Fonte: Autoria própria.

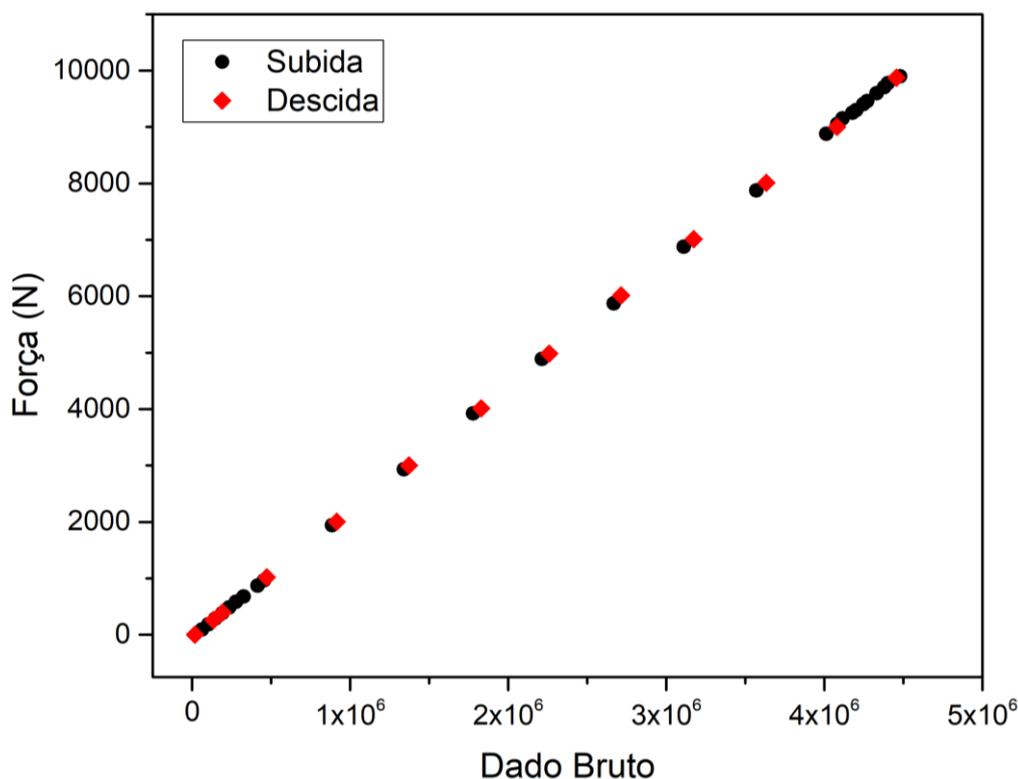
O Coeficiente de Determinação da reta ajustada foi de 0,99999, um valor que indica uma correlação muito boa entre as variáveis.

Com a curva de calibração ajustada, os coeficientes puderam então ser utilizados na equação linear para realizar a conversão dos valores brutos medidos pelo módulo conversor ADC em um valor de força correspondente em Newton [N].

Além do levantamento dos pontos no carregamento da célula foram registrados também os pontos no descarregamento, pois com esses pontos é possível analisar se há alguma histerese na célula de carga ou no sistema de aquisição.

Analisando o gráfico apresentado na Figura 55 é possível notar que os pontos mantêm o alinhamento, garantindo a mesma proporcionalidade durante os dois processos, de carregamento de descarregamento, o que contribui para a repetibilidade do sistema e quando comparados ao dados de regressão linear dos dois momentos, temos um coeficiente angular de 0,00222 um coeficiente linear de $-36,1583 \pm 0,6336$ e um R-Quadrado de 0,99999 para a descida, ou seja, mesmos coeficientes angulares e uma diferença de 7 N entre os coeficientes lineares, o que representa uma histerese praticamente nula.

Figura 55 - Gráfico de carregamento e descarregamento da célula de carga.



Fonte: Autoria própria.

5.3 TESTES E VALIDAÇÃO

Com a célula de carga calibrada e os dados da curva de calibração foi possível então realizar os ensaios de teste e validação do projeto.

Como descrito foram realizados alguns ensaios para ajuste dos ganhos do controlador PID, pois seu comportamento é diferente quando sem carga e quando carregado.

Foram fabricados 6 corpos de prova para os ensaios de validação, a Tabela 4 contém suas identificações e dimensões.

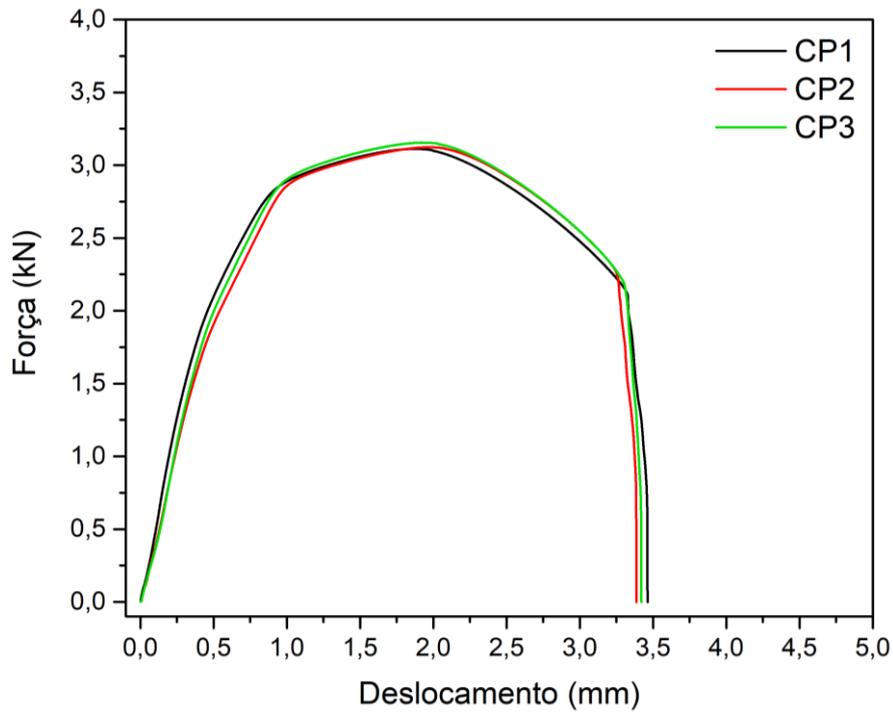
Tabela 4 - Dados dos corpos de prova utilizados para validação.

Identificação do CP	Máquina utilizada	Diâmetro da seção reduzida (mm)	Comprimento útil (mm)
CP1	Shimadzu	4,01	16,00
CP2	Shimadzu	3,99	16,00
CP3	Shimadzu	4,00	16,00
CP4	Projetada	3,98	16,00
CP5	Projetada	4,00	16,00
CP6	Projetada	3,98	16,00

Fonte: Autoria própria.

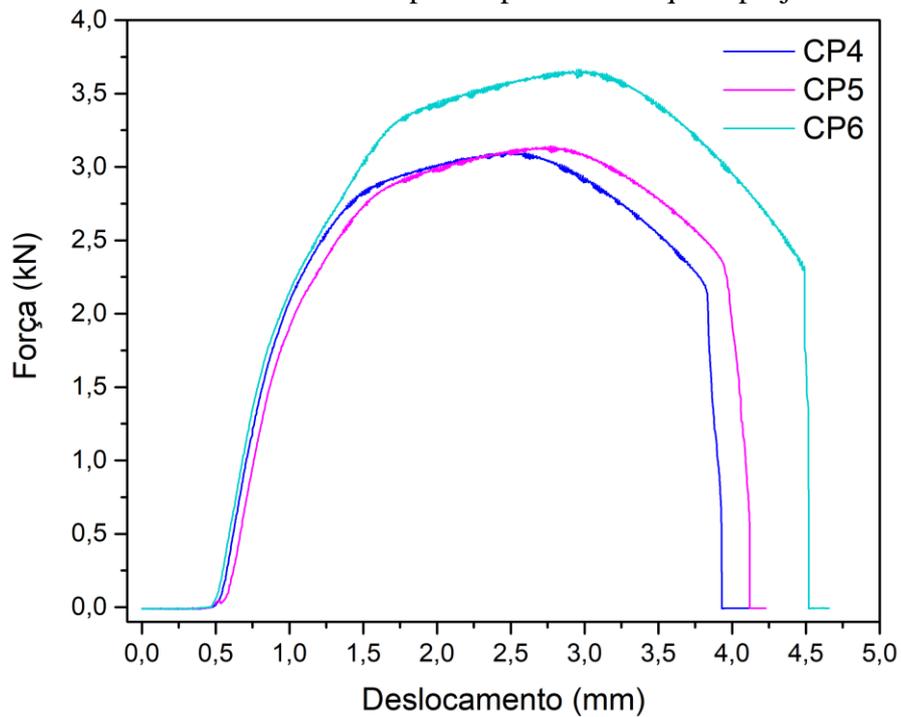
A partir dos ensaios foram obtidas as curvas de Carga x Deslocamento para cada corpo de prova presentes nas Figura 56 e Figura 57.

Figura 56 - Resultado dos ensaios dos corpos de prova na máquina Shimadzu.



Fonte: Autoria própria.

Figura 57 - Resultado dos ensaios dos corpos de prova na máquina projetada.



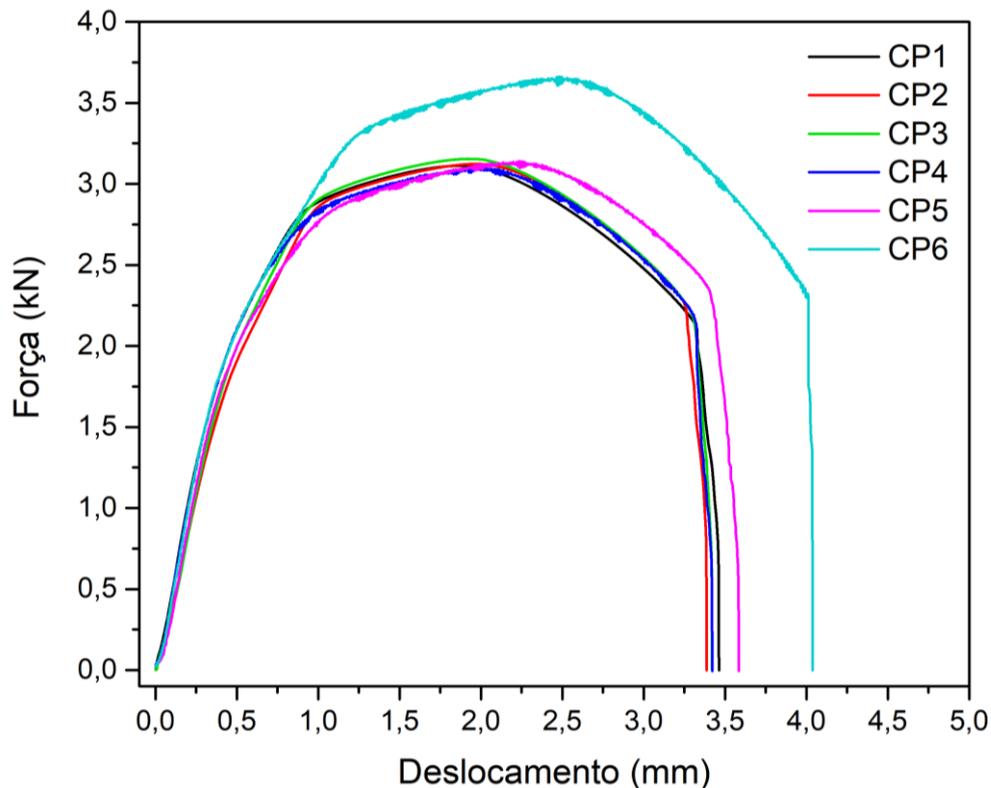
Fonte: Autoria própria.

Analisando os resultados dos ensaios realizados na máquina Shimadzu foi possível observar que as curvas praticamente se sobrepõem de um corpo de prova para o outro, indicando uma boa repetibilidade, já os resultados dos ensaios realizados na máquina projetada possuem um perfil bem semelhante, mas tanto os valores de alongamento quanto de carga máxima variam de um corpo de prova para outro.

É possível notar também que o sinal de carga por deslocamento gerado pela máquina construída possui um ruído bem evidente a partir do valor em torno de 2250 N, a possível causa é um controle inconstante da velocidade do motor que pode ser notado durante o ensaio e que provavelmente pode ser resolvido com uma melhor sintonia do controle PID.

Corrigindo o deslocamento do início do carregamento e sobrepondo todas as curvas obtém-se o gráfico da Figura 58.

Figura 58 - Resultados sobrepostos dos ensaios de todos os corpos de prova.



Fonte: Autoria própria.

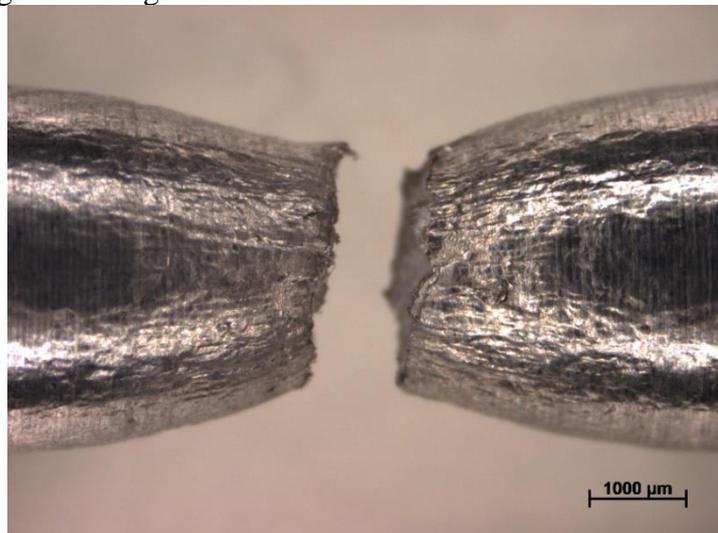
Nele é possível comparar os resultados dos ensaios nas duas máquinas, a curva do CP4 coincide com as curvas dos ensaios realizados na Shimadzu, mas a curva do CP5 apresenta um desvio tendo um alongamento maior que o dos outros corpos de prova e o CP6 teve tanto um alongamento quanto uma carga máxima maiores.

A carga máxima do CP6 foi aproximadamente 15,8% maior que a carga do CP3, considerando que o diâmetro do CP6 é menor que o diâmetro do CP3, esse resultado é inconsistente.

A inconsistência desse valor indicou algum problema com o material, ou um problema com o equipamento.

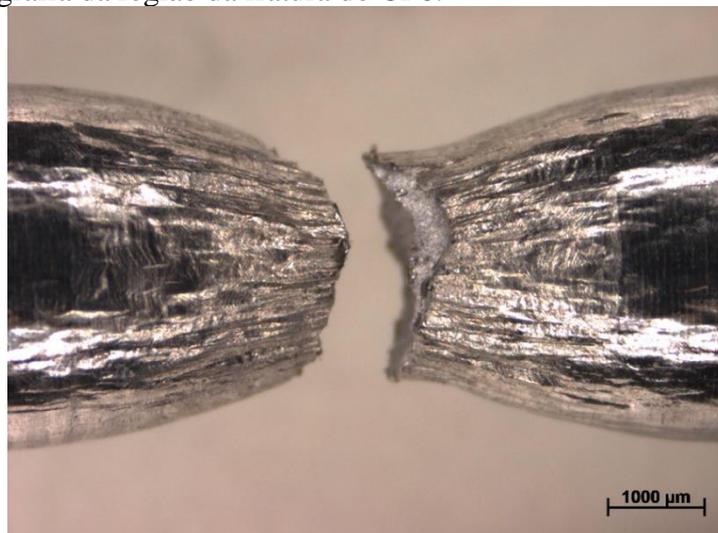
Para estudar a primeira hipótese foram feitas macrografias das regiões próximas à fratura dos corpos de prova CP3 e CP6 com um estereomicroscópio, com CP3 representando o material em comum com os outros corpos de prova e CP6 representando o material com resultado discrepante e foram obtidas respectivamente as Figura 59 e Figura 60.

Figura 59 - Macrografia da região da fratura do CP3.



Fonte: Autoria própria.

Figura 60 - Macrografia da região da fratura do CP6.



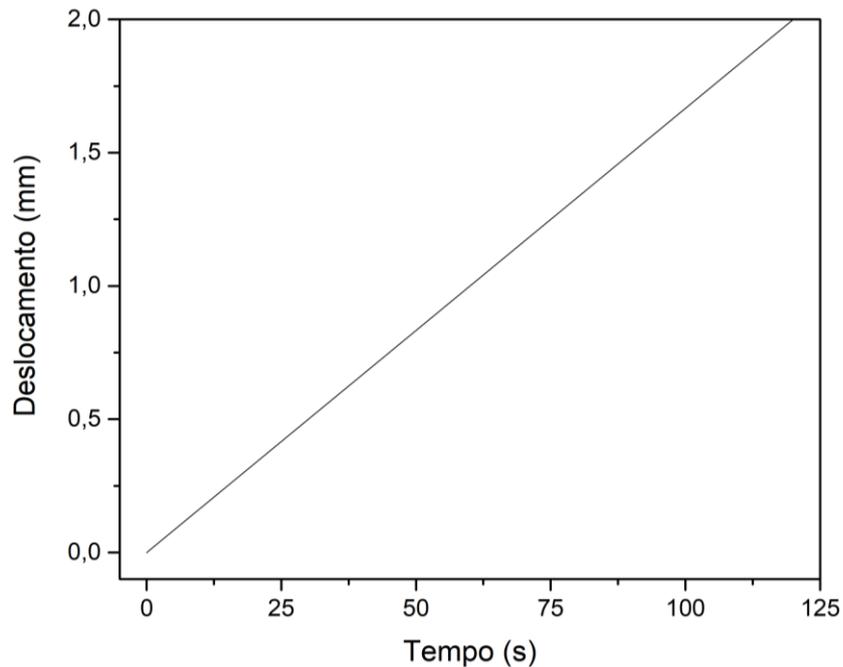
Fonte: Autoria própria.

Macroscopicamente foi possível observar diferenças na deformação plástica na região de estrição dos corpos de prova, reforçando a hipótese do problema com o material, podendo ele ser diferente, possuir alguma descontinuidade ou ter sofrido alguma modificação durante a fabricação do corpo de prova.

A outra hipótese foi um problema com a máquina, de não possuir repetibilidade, ou não homogeneidade no carregamento, o que poderia ter gerado um comportamento diferente do material.

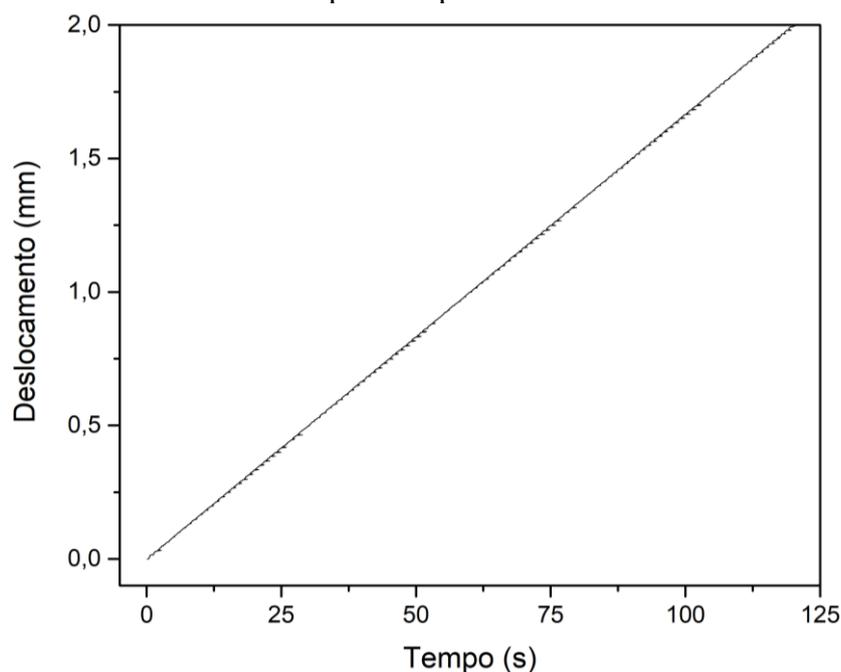
Para estudar a segunda hipótese foram levantadas as curvas de Deslocamento versus Tempo, também dos ensaios referentes ao CP3 e CP6 e foram obtidos os gráficos das Figura 61 e Figura 62 respectivamente.

Figura 61 - Gráfico de Deslocamento por Tempo do ensaio do CP3.



Fonte: Autoria própria.

Figura 62 - Gráfico de Deslocamento por Tempo do ensaio do CP6.



Fonte: Autoria própria.

O gráfico de Deslocamento versus Tempo da máquina Shimadzu (CP3) indica que o seu sistema de controle é bastante estável, mantendo a velocidade constante durante todo o ensaio.

Já o gráfico da máquina projetada (CP6) apresenta um serrilhado padronizado, analisando os dados da planilha foi possível observar que havia um erro no código de programa da máquina projetada que gerava um erro no registro de tempo durante o ensaio, mas este problema não tem influência e foi facilmente corrigido.

Analisando as inclinações dos dois gráficos pode-se afirmar que em ambos a velocidade de 1 mm/min foi mantida, o que indica que essa provavelmente não foi a causa da discrepância dos resultados confirmando a hipótese de ser um material diferente.

5.4 CUSTOS

O projeto possuía um teto de R\$ 4.000,00, aproximadamente US\$ 1.000,00, que se comparado com outros equipamentos comerciais da mesma categoria, chega a custar menos de um décimo do preço das mais baratas.

Este teto foi respeitado incluindo o custo das garras, célula de carga, material e fabricação de peças.

Tabela 5 - Tabela comparativa entre máquinas de ensaio e a máquina projetada.

Máquina	Preço (US\$)	Capacidade de Carga (kN)	Precisão do Carregamento (% do máx)	Dimensões A x L x P (cm)	Massa da máquina (kg)	Espaço de ensaio vertical (cm)	Resolução do posicionamento (mm)	Velocidade máxima (mm/min)	Velocidade mínima (mm/min)
Projetada	~1.000	10,0	0,05	75 x 50 x 38	< 20	15	0,00057	70	0,5
freeLoader*	< 4.000	5,0	0,02	50 x 31 x 31	22	27	0,0005	30	2
Vendedor 1	~17.000	2,5	0,5	154 x 43 x 52	114	124	0,0006	2540	0,005
Vendedor 2	~18.000	22,2	0,1	152 x 89 x 51	não informado	70	0,001	51	0,5
Vendedor 3	~19.000	5,0	0,5	114 x 49 x 45	50	75	0,001	500	0,001
Vendedor 4	~19.000	5,0	0,5	126 x 56 x 37	50	73	0,001	1000	0,01
Vendedor 5	~22.000	2,5	não informado	114 x 55 x 46	46	75	0,001	1000	0,1
Vendedor 6	~25.000	5,0	0,5	136 x 38 x 50	51	112	não informado	1000	0,05
Vendedor 7	~26.000	5,0	não informado	114 x 49 x 45	50	75	0,001	500	0,001

Fonte: Traduzido e adaptado de Amend e Lipson (2011).

*Pode realizar dois ensaios simultâneos em uma máquina.

A Tabela 6 apresenta detalhadamente todos os custos do projeto, lembrando que tudo foi comprado no mercado formal e com comprovação fiscal, o que garante a possibilidade de reprodução dos custos e comprovação de gastos para fins de prestação de contas.

Os serviços de usinagem foram realizados pelos técnicos e pelo autor, mas os valores foram baseados no custo de R\$ 80,00/h.

Tabela 6 - Tabela de custos do projeto

Descrição	Preço unitário* (US\$)	Custo de fabricação unitário (US\$)	Quantidade	Subtotal (US\$)
Projeto mecânico				
Perfil de alumínio C-beam 1000 mm	26.05	10.53	2	73.16
Perfil de alumínio 20x40mm 1000 mm	10.53	10.53	4	84.21
Perfil de alumínio 20x20mm 1000 mm	7.89	0.00	1	7.89
Cantoneiras para perfil de alumínio	0.79	0.00	16	12.63
Fuso TR20x4 de 650 mm	21.05	34.21	2	110.53
Castanhas de bronze	34.21	0.00	2	68.42
Rolamento H-E30202	5.00	0.00	4	20.00
Mancais para rolamento	5.26	10.53	4	63.16
Pinhão corrente ASA 35-1 9 dentes	5.79	0.00	2	11.58
Coroa corrente ASA 35-1 44 dentes	28.42	10.53	2	77.89
Corrente ASA 35-1 1 m	9.21	0.00	2	18.42
Mancais de rolamento 10 mm KP000	5.68	0.00	3	17.05
Mancal de rolamento 10 mm KFL000	6.31	0.00	1	6.31
Chapa de aço 1020 1/8" x 130 x 90 mm	2.63	5.26	2	15.79
Chapa de aço 1020 1/8" x 130 x 20 mm	0.53	1.32	3	5.53
Bucha de bronze TM-23	5.26	5.26	2	21.05
Junta rotular de Aço 1020 1 1/2" x 100 mm	3.95	10.53	1	14.47
Barra de aço A36 1" x 250 x 40 mm	8.29	7.89	2	32.37
Eixo de aço 1045	1.32	10.53	2	23.68
Mandril 5/8" Starfer	11.58	5.26	2	33.68
Parafusos, porcas e arruelas	67.50	0.00	1	67.50
Kit de peças impressas em ABS	0.00	7.89	1	7.89
Pés com rosca	0.39	0.00	4	1.58
Projeto eletroeletrônico				
Motor de vidro elétrico	9.21	0.00	1	9.21
Placa de controle de motor	7.63	0.00	1	7.63
Fonte 12V 10A	9.21	0.00	1	9.21
Arduino UNO	10.00	0.00	1	10.00
Placa de leitura de célula de carga HX711	3.95	0.00	1	3.95
Célula de carga 1000 kg	152.37	0.00	1	152.37
Amplificador operacional LM358P	0.26	0.00	1	0.26
Trimpot vedado vertical 10k Ohm 3296W	0.53	0.00	2	1.05
Chave óptica para codificador	2.11	0.00	2	4.21
Chave liga/desliga 12V 20A	5.26	0.00	1	5.26
TOTAL	712.44	285.53		997.97

*Valores levantados entre 03/2018 e 02/2019 (valores em Reais convertidos para Dólares com uma taxa de conversão de R\$3,80 = US\$1.00).

Fonte: Autoria própria.

5.5 DIVULGAÇÃO

O projeto será divulgado por meios digitais, protegido pela licença *Creative Commons* com a atribuição-CompartilhaIgual CC BY-SA que permite a reprodução, derivação e até o uso comercial do projeto desde que garantam a propriedade intelectual do autor e que as novas criações sejam licenciadas pelos mesmos termos.

Serão disponibilizados todos seus desenhos, detalhes construtivos, circuitos eletrônicos, códigos de programação, será redigido também um manual de instruções de uso e segurança.

6 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos é possível concluir que o projeto cumpriu com seus objetivos de projetar e construir uma Máquina Universal de Ensaio Mecânico com um custo reduzido e para fins didáticos. Os procedimentos de transferência de calibração foram realizados com sucesso e a célula de carga tem um comportamento estritamente linear e histerese muito pequena.

Comparando os resultados dos ensaios realizados com a máquina projetada e a máquina comercial, é possível concluir que a máquina tem capacidade de gerar dados úteis para fins didáticos e, provavelmente, para uso em pesquisa, mas a utilização científica do equipamento fica condicionada à realização de outros procedimentos de verificação de força, aquisição de dados, alinhamento e precisão segundo as normas E4, E1856, E1012 e E691 respectivamente.

7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros ficam os seguintes temas:

- Verificações de acordo com as normas ASTM para estudar a viabilidade de utilização científica da máquina;
- Estudo e modelagem dinâmica da máquina para ajuste dos parâmetros de controle;
- Projeto e desenvolvimento de garras e módulos para diversos ensaios com o equipamento;
- Estudo de implantação de projetos de execução em escolas e colégios de ensino técnico-profissionalizante.

REFERÊNCIAS

AMEND, J. R. J.; LIPSON, H. FreeLoader: an open source universal testing machine for high-throughput experimentation. In: INTERNATIONAL DESIGN ENGINEERING TECHNICAL CONFERENCES AND COMPUTERS AND INFORMATION IN ENGINEERING CONFERENCE (IDETC/CIE), 2011, Washington. **Proceedings** [...]. Washington: ASME, 2011. Disponível em: http://creativemachines.cornell.edu/sites/default/files/DETC2011_Amend.pdf. Acesso em: 10 jun. 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E855-08**: standard test methods for bend testing of metallic flat materials for spring applications involving static loading. West Conshohocken, 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E290-09**: standard test methods for bend testing of material for ductility. West Conshohocken, 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E9 – 09**: standard test methods of compression testing of metallic materials at room temperature. West Conshohocken, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E8/E8M – 16a**: standard test methods for tension testing of metallic materials. West Conshohocken, 2016.

BRASIL. **Lei n. 13.415**, de 16 de fevereiro de 2017: conversão da Medida Provisória nº 746 de 2016. Brasília, 2017. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2015-2018/2017/Lei/L13415.htm>. Acesso em: 19 fev. 2019

CAVALCANTE, A.; PEPE, I.; OLIVEIRA, N.; LIMA, M.; ALFONZO, J. A. Low cost tensile testing machine for FDM parts mechanical behavior characterization. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING, 24., 2017, Curitiba. **Proceedings** [...] Curitiba: ABCM, 2017. Disponível em: <<http://abcm.org.br/anais-de-eventos/COB17/1957>>. Acesso em: 19 jun. 2017.

DIEZ, T. Personal fabrication: fab labs as platforms for citizen-based innovation, from microcontrollers to cities. **Nexus Network Journal**, v. 14, n. 3, p. 457–468, 2012.

DONGGUAN KWC MACHINERY CO. **Auto window lifter motor**. Disponível em: <<http://www.kwc-motor.com/En/ProductView.asp?ID=46>>. Acesso em: 20 ago. 2018.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaios dos materiais**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2000. 247 p.

MATTOS, B. S. Open source philosophy and the dawn of aviation. **Journal of Aerospace Technology and Management**, São José dos Campos, v. 4, n. 3, p. 355–379, 2012.

MONTEIRO, A. H. O. **Desenvolvimento de software para ensaios mecânicos para fins didáticos utilizando o conceito open-source**. 2017. 35 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia dos Materiais) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2017.

NACHI. **Rolamentos de rolos cônicos.** Disponível em: <<http://nachi.com.br/catalogos/Rolamentos-de-Rolos-Conicos.pdf>>. Acesso em: 25 jan. 2018.

PEARCE, J. M. Building research equipment with free, open-source hardware. **Science**, v. 337, n. 6100, p. 1303–1304, 2012. Disponível em: <[citeulike-article-id:11241059%5Cnhttp://dx.doi.org/10.1126/science.1226328](http://dx.doi.org/10.1126/science.1226328)>. Acesso em: 10 jun. 2017.

PEARCE, J. M. Open-source nanotechnology: solutions to a modern intellectual property tragedy. **Nano Today**, v. 8, n. 4, p. 339–341, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.nantod.2013.04.001>>. Acesso em: 10 jun. 2017.

STMICROELECTRONICS. **VNH2SP30-E Automotive fully integrated H-bridge motor driver datasheet,** 2013. Disponível em: <<https://www.st.com/resource/en/datasheet/cd00043711.pdf>>. Acesso em: 11 fev. 2019.

STOKSTAD, E. Open-source ecology takes root across the world. **Science**, v. 334, n. 6054, p. 308–309, 2011. Disponível em: <<https://science.sciencemag.org/content/334/6054/308>> Acesso em: 10 jun. 2017

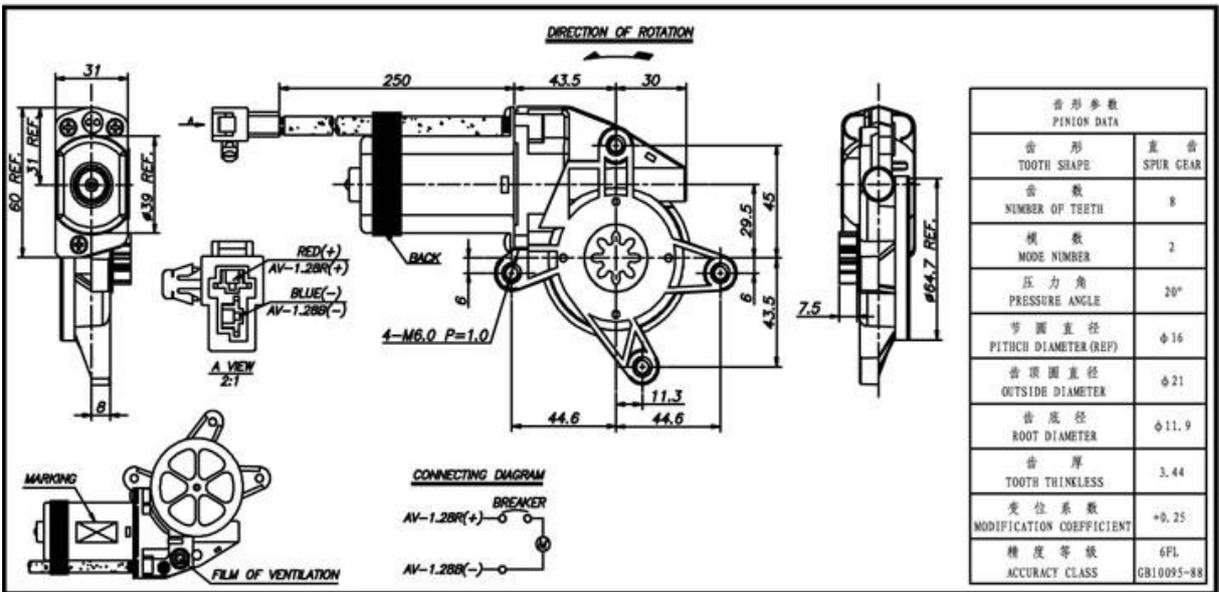
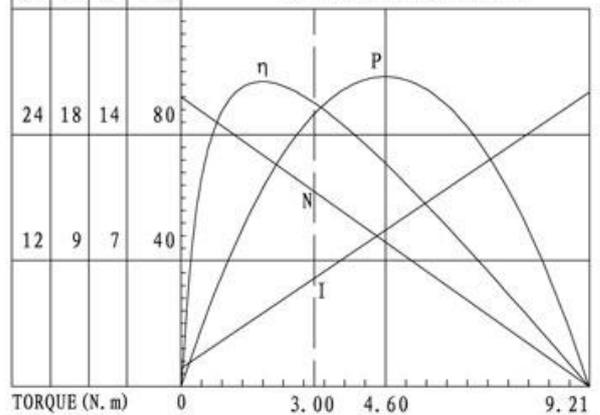
ANEXO A – Ficha técnica do motor utilizado



578-VER/VEL 电机性能参数(12VDC)
Motor Performance Parameters(12VDC)

1. 空载电流(No_Load Current): 2A Max.
2. 空载转速(No_Load Speed): 95±15 RPM
3. 负载力矩(On Load): 3 N.m
4. 负载电流(Current At 3 N.m Laod): 7.5A Max.
5. 负载转速(Speed At 3 N.m Laod): 70±15 RPM
6. 堵转电流(Stall Current): 25A Max.
7. 堵转力矩(Stall Torque): $8.82^{+2.45}_{-1.96}$ N.m
8. 噪音(Motor Noise: When Measured From 15 cm Away): 65 dB(A) Max.
9. 耐久测试(Durability Test At 3 N.m Load): $\geq 30,000$ cycles

VE 性能曲线图
VE PERFORMANCE CURVE



Fonte: Dongguan kwc machinery co. (2018).

APÊNDICE A – Memorial de cálculo do projeto mecânico¹.

(continua)

1. CÁLCULO DE DEFLEXÃO DA TRAVE

Material: Alumínio 6063 (Perfil *C-Beam Openbuilds*)

Módulo de elasticidade: 69 GPa

Momento de inércia da associação dos perfis de alumínio: 629696 mm⁴

$$\delta_{m\acute{a}x} = \frac{Fl^3}{48EI}$$

Onde:

 $\delta_{m\acute{a}x}$ = Deflexão máxima F = Carga máxima l = Vão entre apoios E = Módulo de elasticidade I = Momento de inércia da viga

$$\delta_{m\acute{a}x} = \frac{10kN \cdot 0,3m^3}{48 \cdot 69GPa \cdot 629696mm^4} = 0,1295 \text{ mm}$$

2. CÁLCULO DE RESISTÊNCIA DO FUSO

Material: Aço SAE 1045

Modulo de elasticidade (E): 200 GPaLimite de escoamento (σ_e): 310 MPaLimite de resistência a tração (σ_r): 560 Mpa

2.1. CARGA AXIAL ESTÁTICA

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \therefore \quad A = \frac{F}{\sigma}$$

Onde:

 σ = Tensão F = Força A = Área da seção transversal

$$A = \frac{\pi d^2}{4} \quad \therefore \quad d = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}$$

Substituindo:

$$d_{m\acute{i}n} = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{m\acute{a}x}}{\pi \cdot \sigma_e}}$$

$$d_{m\acute{i}n} = \sqrt{\frac{4 \cdot 4,5kN}{\pi \cdot 310MPa}} = 4,53 \text{ mm}$$

¹NORTON, R. L. **Projeto de máquinas**: uma abordagem integrada. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 1030 p.

APÊNDICE A – Memorial de cálculo do projeto mecânico.

(continuação)

2.2. FLAMBAGEM

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{l^2}$$

Onde:

P_{cr} = Carga crítica para flambagem

E = Módulo de elasticidade

I = Menor momento de inércia da seção transversal

l = Comprimento

$$I = \frac{\pi d^4}{64}$$

Substituindo:

$$P_{cr} = \frac{\pi^3 E d^4}{64 l^2} \quad \therefore \quad d = \sqrt[4]{\frac{64 \cdot P_{cr} \cdot l^2}{\pi^3 \cdot E}}$$

$$d_{\min} = \sqrt[4]{\frac{64 P_{\max} l^2}{\pi^3 E}}$$

$$d_{\min} = \sqrt[4]{\frac{64 \cdot 5kN \cdot 0,5^2}{\pi \cdot 200GPa}} = 10,66 \text{ mm}$$

3. CÁLCULO DA TRANSMISSÃO

3.1. TORQUE NO PARAFUSO DE POTÊNCIA OU FUSO

Parafuso utilizado: Trapezoidal TR20x4

Material: Aço SAE 1045

Carga por parafuso (P): 5kN

Diâmetro efetivo do parafuso (d_p): 18 mm

Diâmetro efetivo do encosto (d_c): 25 mm

Ângulo do perfil da rosca (α): 15°

Avanço da rosca (L): 4 mm

Fator de atrito entre o parafuso de aço e porca de bronze (μ): 0,15

Fator de atrito equivalente para encosto com rolamento (μ_c): 0,02

Neste caso específico o torque de subida é aproximadamente o torque de descida considerando que a máquina está sendo projetada para aplicar a mesma carga de tração e compressão e o peso da trave e das garras pode ser desconsiderado quando comparado à carga aplicada.

APÊNDICE A – Memorial de cálculo do projeto mecânico.

(continuação)

$$T_{total} = T_s + T_c$$

Onde:

 T_{total} = Torque total de subida T_s = Torque de subida do parafuso T_c = Torque de encosto

$$T_s = \frac{Pd_p(\pi\mu d_p + L \cos \alpha)}{2(\pi d_p \cos \alpha - \mu L)}$$

Onde:

 P = Carga de elevação d_p = Diâmetro efetivo do parafuso μ = Fator de atrito do parafuso com a porca L = Avanço da rosca α = Ângulo do perfil da rosca

$$T_c = \frac{\mu_c P d_c}{2}$$

Onde:

 μ_c = Fator de atrito de encosto

Substituindo:

$$T_{total} = \frac{Pd_p(\pi\mu d_p + L \cos \alpha)}{2(\pi d_p \cos \alpha - \mu L)} + \frac{\mu_c P d_c}{2}$$

$$T_{total} = \frac{5kN \cdot 0,018(\pi \cdot 0,15 \cdot 0,018 + 0,004 \cdot \cos 15^\circ)}{2 \cdot (\pi \cdot 0,018 \cdot \cos 15^\circ - 0,15 \cdot 0,004)} + \frac{0,025kN \cdot 0,025}{2} = 11,53 N \cdot m$$

3.2. EFICIÊNCIA DO PARAFUSO

$$\lambda = \tan^{-1} \left(\frac{L}{\pi d_p} \right)$$

Onde:

 λ = Ângulo de avanço da rosca

$$\lambda = \tan^{-1} \left(\frac{0,004}{\pi \cdot 0,018} \right) = 4,0461^\circ$$

Portanto a eficiência é dada por:

$$e = \frac{1 - \mu \tan \lambda}{1 + \mu \cot \lambda}$$

Onde:

 e = Eficiência do parafuso de potência

$$e = \frac{1 - 0,15 \cdot \tan 4,0461}{1 + 0,15 \cot 4,0461} = 0,3170 = 31,70\%$$

APÊNDICE A – Memorial de cálculo do projeto mecânico.

(continuação)

3.3. POTÊNCIA DO MOTOR

$$e = \frac{P_c}{P_m} \quad \therefore \quad P_m = \frac{P_c}{e}$$

Onde:

e = Eficiência da transmissão

P_c = Potência consumida ou de saída

P_m = Potência do motor

A potência de saída foi calculada para uma velocidade maior que as comumente utilizadas na grande maioria dos ensaios mecânicos.

Carga aplicada (F): 10 kN

Velocidade de movimentação da trave (v): 10 mm/min = $1,667 \times 10^{-3}$ m/s

$$P_c = F \cdot v$$

Onde:

F = Força aplicada

v = Velocidade de movimentação da trave

$$P_c = 10 \text{ kN} \cdot 0,1667 \times 10^{-3} \text{ m/s} = 1,667 \text{ W}$$

Substituindo:

$$P_m = \frac{1,667 \text{ W}}{31,70\%} = 5,51 \text{ W}$$

3.4. TORQUE NO MOTOR

Raio efetivo do pinhão (r_p): 13,92 mm

Raio efetivo das coroas (r_c): 66,76 mm

Para o cálculo do torque no deve-se considerar que ele vai girar as duas coroas simultaneamente, portanto:

$$F_p = 2F_c$$

Onde:

F_p = Força tangencial no pinhão

F_c = Força tangencial em cada uma das coroas

$$F_c = \frac{T_{total}}{r_c}$$

Onde:

T_{total} = Torque total em cada coroa

r_c = Raio efetivo de cada coroa

APÊNDICE A – Memorial de cálculo do projeto mecânico.

(continuação)

$$F_p = \frac{T_p}{r_p} \quad \therefore \quad T_p = F_p r_p$$

Onde:

T_p = Torque no pinhão ou torque no motor

r_p = Raio efetivo do pinhão

Substituindo:

$$T_p = \frac{2T_{total}r_p}{r_c}$$

$$T_p = \frac{2.11,53N.m. 13,92mm}{66,76mm} = 4,81 N.m$$

3.5. RESOLUÇÃO DO CODIFICADOR

Avanço da rosca (L): 4 mm

Relação de transmissão do sistema de corrente: 4,889:1

Relação de transmissão do amplificador de velocidade: 8:1

Como há uma ampliação de velocidade da coroa para o motor com uma relação de 4,889:1 e uma ampliação de velocidade do motor para o codificador de 8:1 a relação final da coroa para o codificador é de 39,112:1.

O avanço do parafuso acoplado à coroa é de 4 mm, portanto cada volta do disco do codificador implica em um deslocamento de 0,102270 mm, como o disco do codificador possui uma resolução de 180 passos por volta, a resolução de cada passo é de aproximadamente 0,568 μ m.

4. CÁLCULO DE CHAVETAS DOS FUSOS

Material: Aço SAE 1020

Tensão de escoamento não corrigido ($S'_{e_{1020}}$): ≈ 207 MPa

Limite de ruptura ($S_{ut_{1020}}$): ≈ 379 MPa

Coefficiente de segurança à fadiga das chavetas dos parafusos:

Torque alternado no parafuso (T_a): 11,53 N.m

Torque médio no parafuso (T_m): Nulo

Raio do eixo na seção com chaveta (r): 7,5 mm

Comprimento da chaveta (l_c): 10 mm

Largura da chaveta (b_c) (padronizado): 5 mm

Altura da chaveta (h_c) (padronizado): 5 mm

APÊNDICE A – Memorial de cálculo do projeto mecânico.

(continuação)

$$N_{fc} = \frac{1}{\frac{\sigma'_a}{S_{e_{1020}}} + \frac{\sigma'_m}{S_{ut_{1020}}}}$$

Onde:

N_{fc} = Coeficiente de resistência em fadiga da chaveta

σ'_a = Tensão alternada equivalente de von Mises

σ'_m = Tensão média equivalente de von Mises

$S_{e_{1020}}$ = Resistência à fadiga corrigida do material

$S_{ut_{1020}}$ = Limite de ruptura do material

Cálculo de S_e :

$$S_{e_{1020}} = C_{carreg} C_{tamanho} C_{sup} C_{temp} C_{conf} S'_{e_{1020}}$$

Onde:

C_{carreg} = Fator de carregamento

$C_{tamanho}$ = Fator de tamanho

C_{superf} = Fator de acabamento superficial

C_{temp} = Coeficiente de temperatura

C_{conf} = Coeficiente de confiabilidade

Para o eixo em estudo:

$C_{carreg} = 1$ (apenas cisalhamento)

$C_{tamanho} = 1$ (chaveta de 5 mm x 10 mm)

$C_{superf} = 0,9350$ (usinado)

$C_{temp} = 1$ (temperatura ambiente)

$C_{conf} = 0,814$ (confiabilidade de 99%)

$$S_e = 1.1.0,9350.1.0,814.207MPa = 157,54 MPa$$

Cálculo de σ'_a :

Pela tensão equivalente de von Mises:

$$\sigma'_a = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2}$$

$$F_a = \frac{T_a}{r}$$

Onde:

F_a = Força alternada na seção da chaveta

$$A_c = b \cdot l_c$$

Onde:

A_c = Área de seção transversal da chaveta submetida ao cisalhamento

$$\tau_c = \frac{F_a}{A_c}$$

Onde:

τ_c = Tensão cisalhante na chaveta

APÊNDICE A – Memorial de cálculo do projeto mecânico.

(continuação)

Substituindo F_a e A_c :

$$\tau_a = \frac{T_a}{r \cdot b \cdot l_c}$$

$$\tau_a = \frac{11530 N \cdot mm}{7,5 mm \cdot 5 mm \cdot 10 mm} = 30,75 MPa$$

Substituindo τ_a em σ'_a :

$$\sigma'_a = \sqrt{3 \cdot (30,75 MPa)^2} = 53,26 MPa$$

Substituindo S_e e σ'_a em N_{fc} :

$$N_{fc} = \frac{1}{\frac{53,26 MPa}{157,54 MPa} + 0} = 2,96$$

5. CÁLCULO DE RESISTÊNCIA EM FADIGA DOS PARAFUSOS

Material: Aço SAE 1045

Resistência à fadiga não corrigido ($S'_{e_{1045}}$): ≈ 300 Mpa

Limite de ruptura ($S_{ut_{1045}}$): ≈ 580 Mpa

Diâmetro do eixo (d_e): 15 mm

Distância do ponto de apoio do eixo ao plano de aplicação da carga (d_f): 15,38 mm

Para os cálculos foi considerada a pior situação onde o eixo é tracionado ao mesmo tempo que sofre uma torção e uma flexão rotativa por conta da aplicação da carga através das coroas.

Para o cálculo do coeficiente de segurança na fadiga:

$$\frac{1}{N_{fe}} = \frac{\sigma'_a}{S_{e_{1045}}} + \frac{\sigma'_m}{S_{ut_{1045}}} \quad \therefore \quad N_{fe} = \frac{1}{\frac{\sigma'_a}{S_{e_{1045}}} + \frac{\sigma'_m}{S_{ut_{1045}}}}$$

Onde:

N_{fe} = Coeficiente de resistência em fadiga do eixo

σ'_a = Tensão alternada equivalente de von Mises

σ'_m = Tensão média equivalente de von Mises

$S_{e_{1045}}$ = Resistência à fadiga corrigida do material

$S_{ut_{1045}}$ = Limite de ruptura do material

Para isso é necessário calcular σ'_a , σ'_m e $S_{e_{1045}}$.

APÊNDICE A – Memorial de cálculo do projeto mecânico.

(continuação)

Cálculo de S_e :

$$S_{e_{1045}} = C_{carreg} C_{tamanho} C_{sup} C_{temp} C_{conf} S'_{e_{1045}}$$

Onde:

C_{carreg} = Fator de carregamento para flexão superficial

$C_{tamanho}$ = Fator de tamanho

C_{superf} = Fator de acabamento superficial

C_{temp} = Coeficiente de temperatura

C_{conf} = Coeficiente de confiabilidade

Para o eixo em estudo:

$C_{carreg} = 0,70$ (há força normal)

$C_{tamanho} = 0,9143$ (eixo de 15 mm)

$C_{superf} = 0,92$ (retificado)

$C_{temp} = 1$ (temperatura ambiente)

$C_{conf} = 0,814$ (confiabilidade de 99%)

Portanto:

$$S_{e_{1045}} = 0,70 \cdot 0,9143 \cdot 0,92 \cdot 1 \cdot 0,814 \cdot 300 \text{MPa} = 143,79 \text{MPa}$$

Cálculo de σ'_a :

$$\sigma'_a = \sqrt{\sigma_{x_a}^2 + \sigma_{y_a}^2 - \sigma_{x_a} \sigma_{y_a} + 3\tau_{x_y_a}^2}$$

Onde:

σ_{x_a} = Tensão axial alternada gerada pela flexão rotativa

$\sigma_{y_a} = 0$

$\tau_{x_y_a} = 0$

Cálculo de σ_{x_a} :

$$\sigma_{x_a} = \frac{M_f \cdot c}{I_e}$$

Onde:

M_f = Momento fletor gerado no eixo do parafuso pela força da corrente

c = Distância da linha neutra ao ponto de análise

I_e = Momento de inércia do eixo

Cálculo de M_f :

$$M_f = F_T \cdot d_f$$

Onde:

F_T = Força de reação do eixo do parafuso

d_f = Distância do ponto de apoio do eixo ao plano de aplicação da carga

Para se calcular o momento é importante observar que a força total é composta pela força necessária para girar as duas coroas e a reação para transmissão da rotação para a outra coroa e é aproximadamente o triplo da força necessária para gerar o torque em uma coroa.

APÊNDICE A – Memorial de cálculo do projeto mecânico.

(continuação)

$$F_T = 3 \cdot \frac{T_{total}}{r_c}$$

Substituindo:

$$M_f = \frac{3T_{total}d_f}{r_c}$$

$$M_f = \frac{3.11,53N \cdot m. 15,38mm}{66,76mm} = 7,97 N \cdot m$$

Cálculo de c :

$$c = \frac{d_e}{2}$$

$$c = \frac{15mm}{2} = 7,5 mm$$

Cálculo de I_e :

$$I_e = \frac{\pi d_e^4}{64}$$

$$I_e = \frac{\pi \cdot (15mm)^4}{64} = 2485,05 mm^4$$

Substituindo os valores na equação de σ_{x_a} :

$$\sigma_{x_a} = \frac{7970N \cdot mm. 7,5mm}{2485,05mm^4} = 24,05 MPa$$

$$\sigma'_a = \sqrt{\sigma_{x_a}^2} = 24,05 MPa$$

Cálculo de σ'_m :

$$\sigma'_m = \sqrt{\sigma_{x_m}^2 + \sigma_{y_m}^2 - \sigma_{x_m}\sigma_{y_m} + 3\tau_{x_y_m}^2}$$

Onde:

σ_{x_m} = Tensão axial média gerada pela carga no parafuso

$\sigma_{y_m} = 0$

$\tau_{x_y_m}$ = Tensão cisalhante média gerada pelo torque no parafuso

Cálculo de σ_{x_m} :

$$\sigma_{x_m} = \sigma_{m_{axial}} = \frac{F}{A}$$

Onde:

F = Força axial no eixo do parafuso

A = Área de seção transversal do fuso

APÊNDICE A – Memorial de cálculo do projeto mecânico.

(conclusão)

$$\sigma_{x_m} = \frac{5kN}{176,71mm^2} = 28,29 MPa$$

Cálculo de τ_{xy_m} :

$$\tau_{xy_m} = \frac{T_{total} \cdot c}{J_e}$$

Onde:

J_e = Momento polar de inércia do eixo

c = Distância do eixo de rotação ao ponto de análise

Cálculo de J_e :

$$J_e = \frac{\pi d_e^4}{32}$$

$$J_e = \frac{\pi(15mm)^4}{32} = 4970,1 mm^4$$

Substituindo os valores de T_{total} , c e J_e :

$$\tau_{xy_m} = \frac{11530N \cdot mm \cdot 7,5mm}{4970,1mm^4} = 17,40 MPa$$

Substituindo os valores de σ_{x_m} e τ_{xy_m} em σ'_m :

$$\sigma'_m = \sqrt{28,29MPa + 0 - 0 + 3 \cdot 17,40MPa} = 41,34 MPa$$

Substituindo σ'_a , σ'_m , $S_{e_{1045}}$ e $S_{ut_{1045}}$ em N_{f_e} :

$$N_{f_e} = \frac{1}{\frac{24,05MPa}{143,79MPa} + \frac{41,34MPa}{580MPa}} = 4,19$$

APÊNDICE B – Arquivo de impressão do disco óptico (fora de escala).

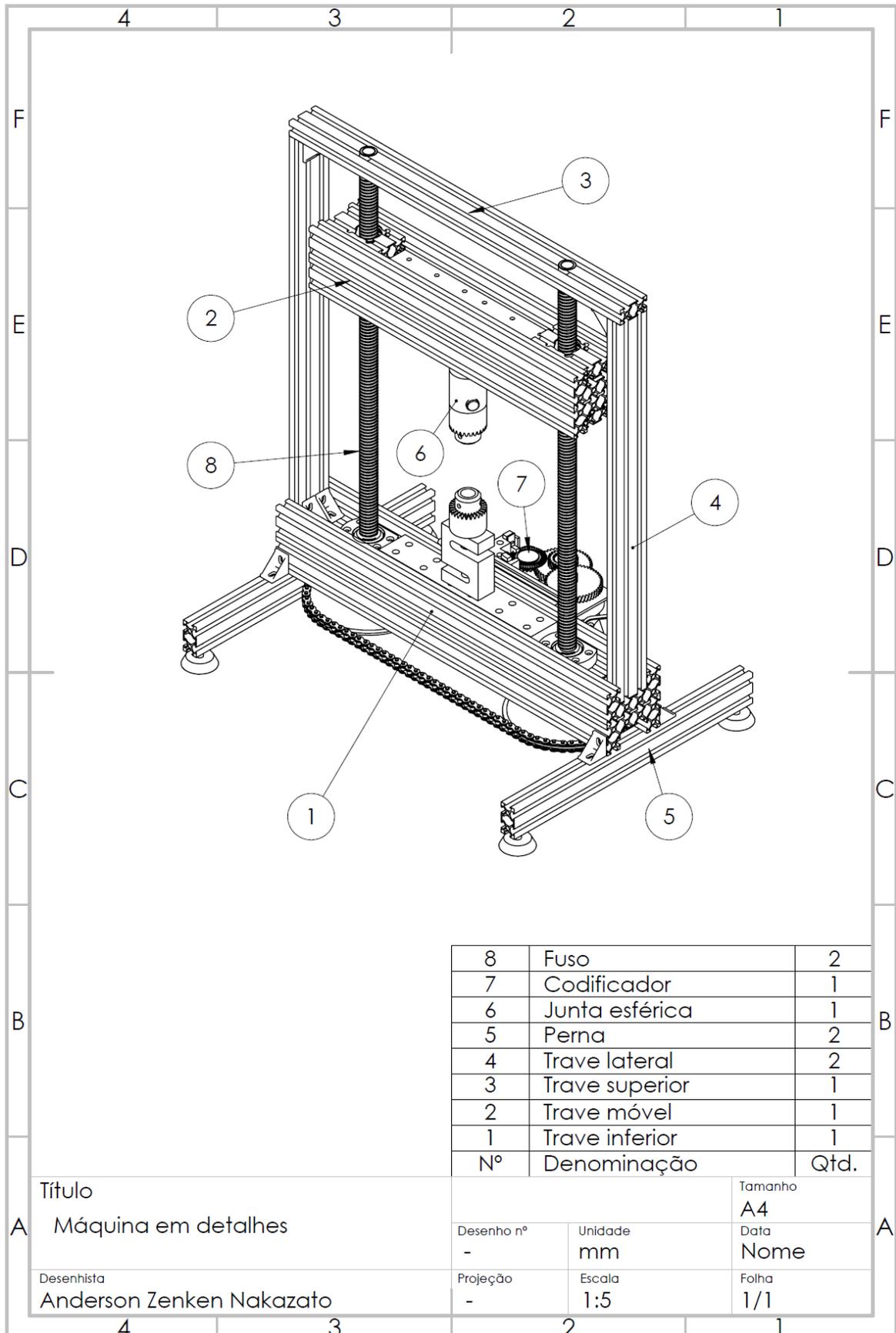
4	3	2	1	
F			F	
E			E	
D			D	
C			C	
B			B	
SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:		ACABAMENTO:	REBARBAR E QUEBRAR ARESTAS AGUDAS	NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO REVISÃO
DESEN.	NOME	ASSINATURA	DATA	TÍTULO:
VERIF.				
APROV.				
MANUF.				
QUALID.				
MATERIAL:			DES. N°	A4
PESO:			ESCALA: 1:1	FOLHA 1 DE 1
4	3	2	1	

APÊNDICE C - Imagem renderizada da máquina completa.



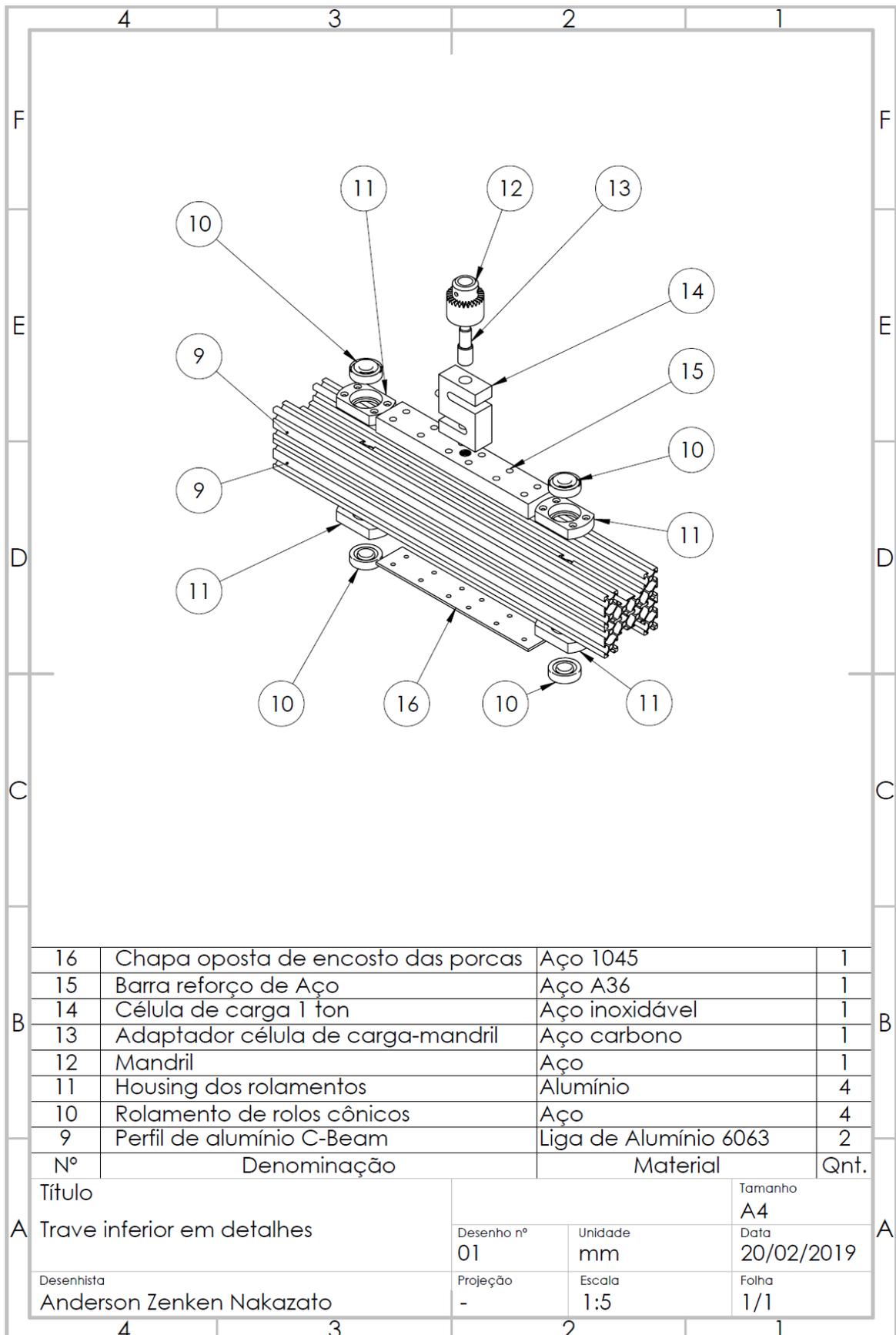
APÊNDICE D – Desenhos de montagem e fabricação do equipamento.

(continua)



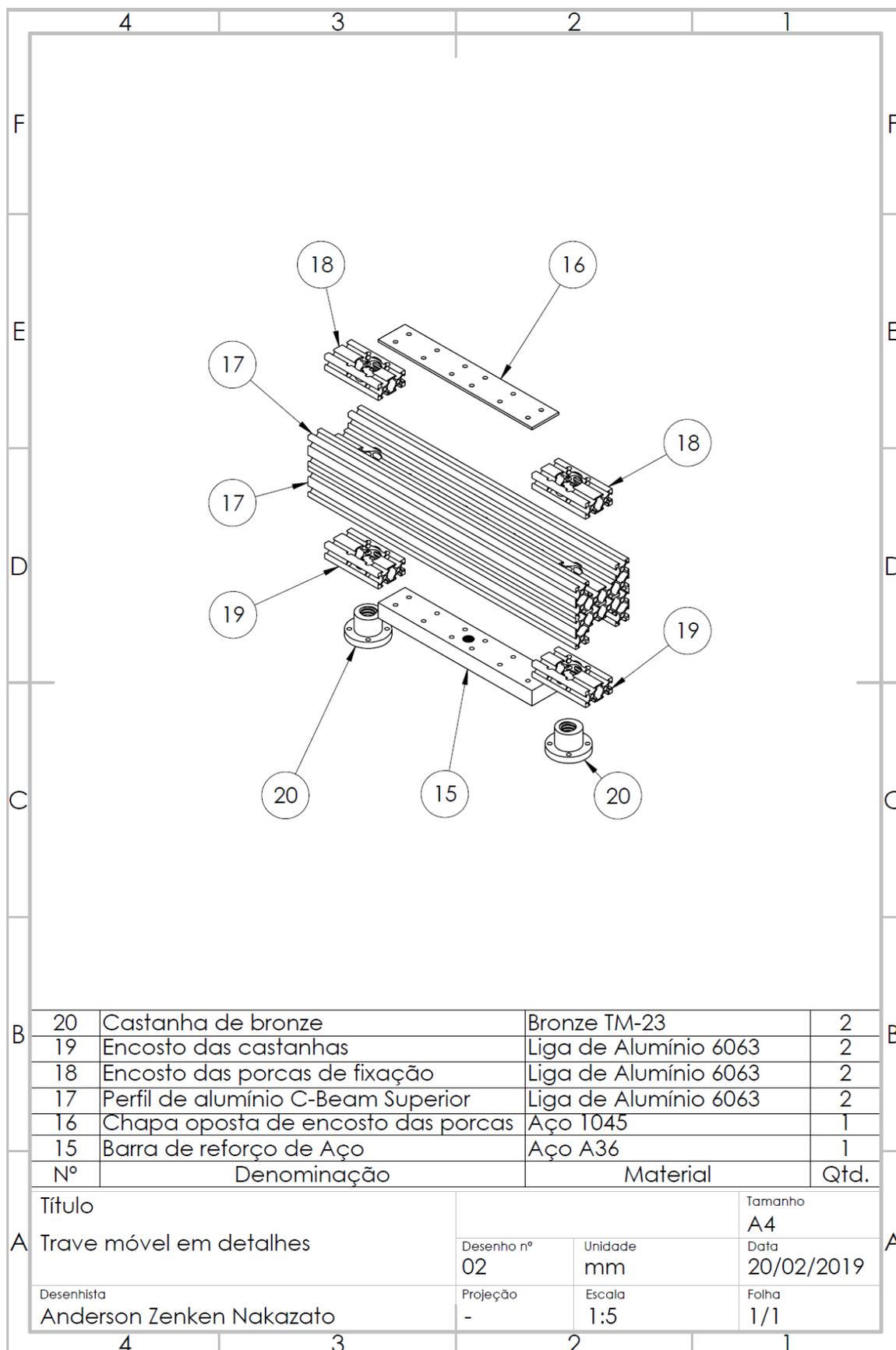
APÊNDICE D – Desenhos de montagem e fabricação do equipamento.

(continuação)



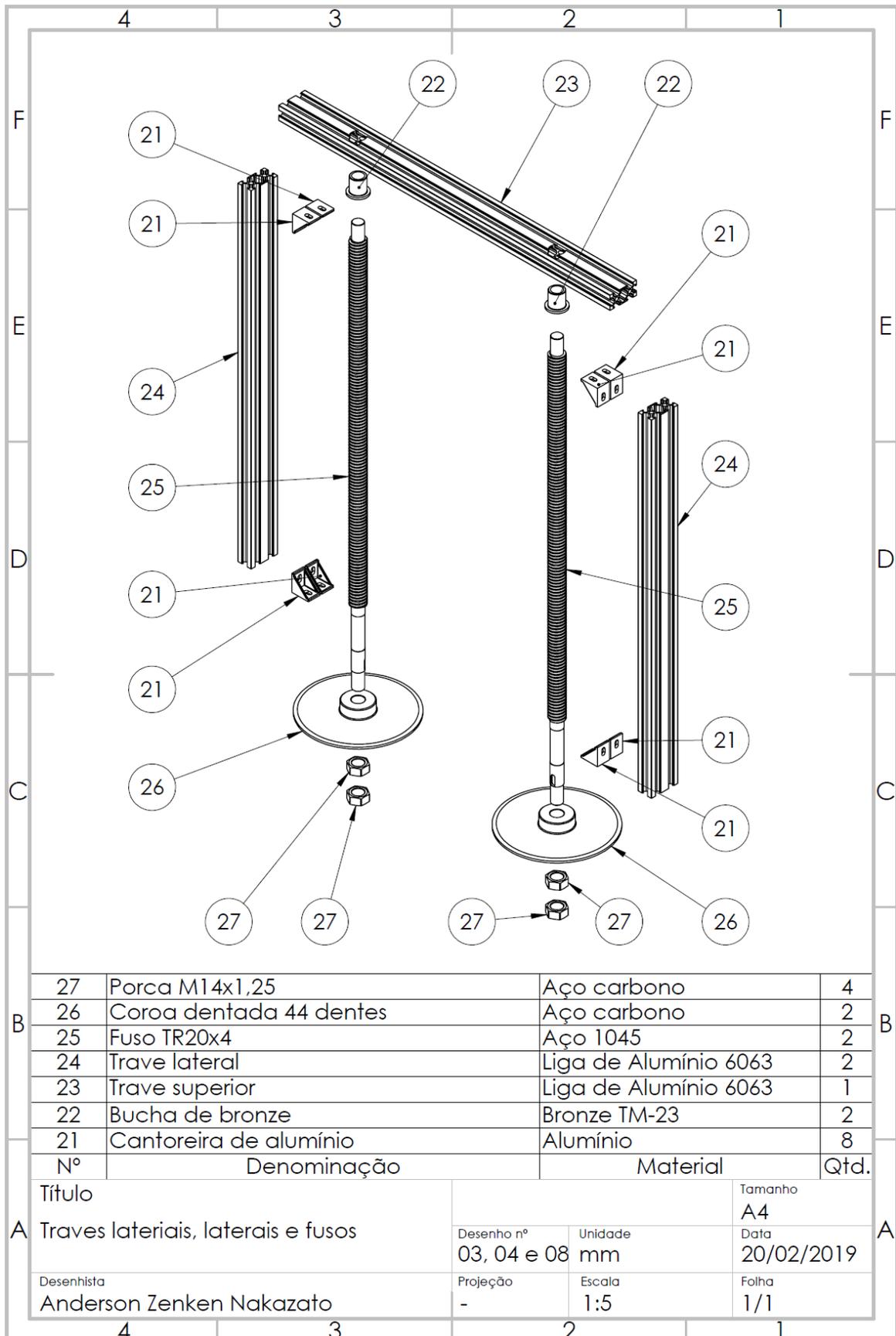
APÊNDICE D – Desenhos de montagem e fabricação do equipamento.

(continuação)



APÊNDICE D – Desenhos de montagem e fabricação do equipamento.

(continuação)



APÊNDICE D – Desenhos de montagem e fabricação do equipamento.

(continuação)

34	Mancal de rolamento KFL000	Aço e liga de zinco	1
33	Trave do eixo do motor	Liga de alumínio 6063	1
32	Pés com rosca 5/16"	Aço e borracha	4
31	Eixo do esticador de corrente	Aço 1045	1
30	Pinhão de ASA-35 9 dentes	Aço	1
29	Mancal de rolamento KP000	Aço e liga de zinco	2
28	Trave da perna	Liga de alumínio 6063	2
21	Cantoneira de alumínio	Alumínio	12
Nº	Denominação	Material	Qtd.
Título		Tamanho	
A Pernas e trave do eixo do motor		A4	
Desenhista		Projecção	Data
Anderson Zenken Nakazato		-	20/02/2019
		Unidade	Folha
		mm	1/1
		Escala	
		1:5	

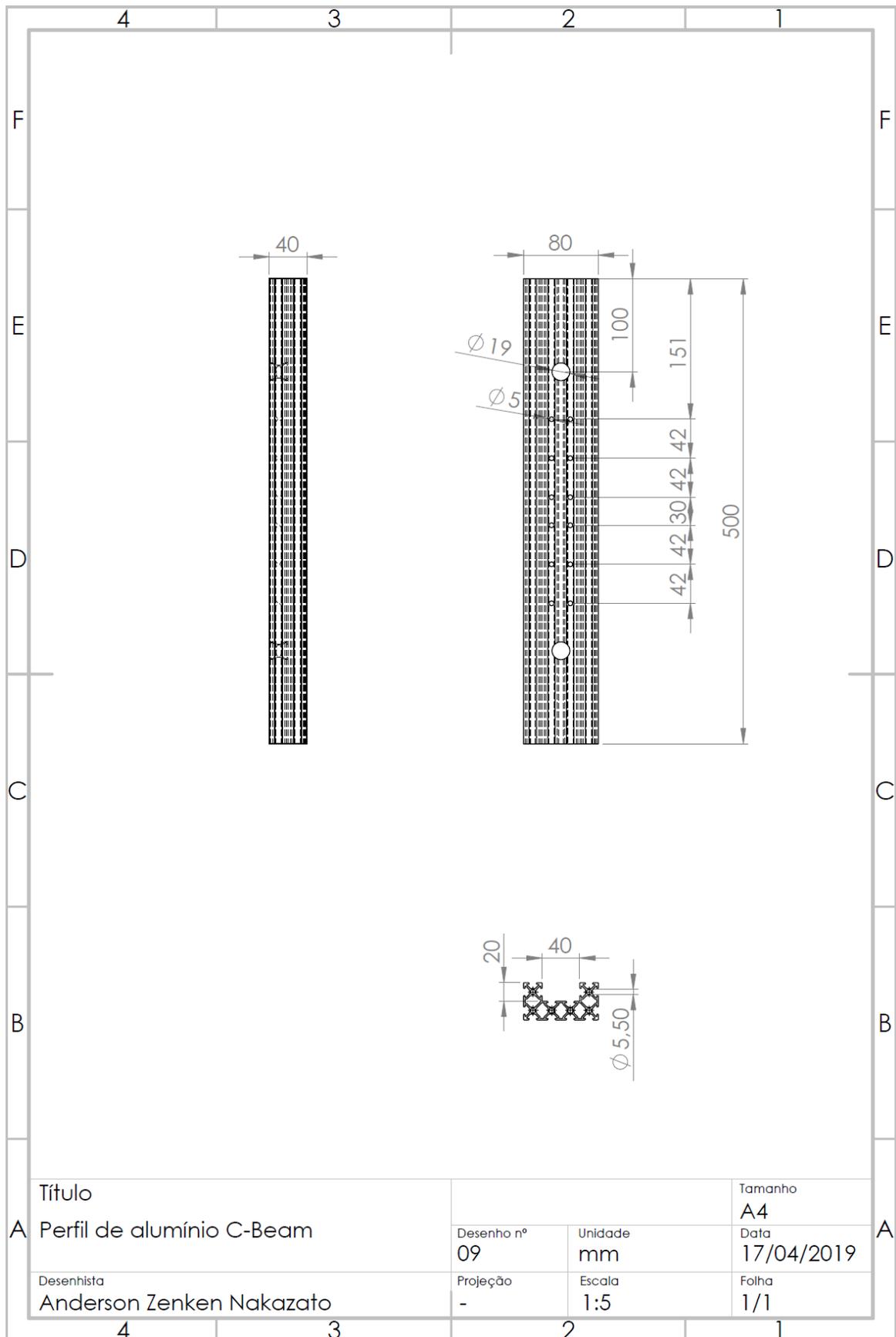
APÊNDICE D – Desenhos de montagem e fabricação do equipamento.

(continuação)

50	Perfil suporte para o encoder	Liga de alumínio 6063	1
49	Chapa calço	Aço 1045	1
48	Chapa do encoder	Aço 1045	1
47	Perfil suporte do motor	Liga de alumínio 6063	1
46	Eixo do motor	Aço 1045	1
45	Chapa do motor	Aço 1045	1
44	Motor 12V	-	1
43	Engrenagem do encoder 12 dentes	ABS	1
42	Engrenagem intermediária 24/48 dentes	ABS	1
41	Rolamento 608zz	Aço	2
40	Engrenagem helicoidal 48 dentes	ABS	1
39	Disco óptico	-	1
38	Tampa do disco óptico	ABS	1
37	Base do disco óptico	ABS	1
36	Chave óptica	-	2
35	Suporte das chaves ópticas	ABS	1
30	Pinhão de ASA-35 9 dentes	Aço	1
29	Mancal de rolamento KP000	Aço e liga de zinco	1
Nº	Denominação	Material	Qtd.
Título		Tamanho	
A Montagem do encoder		A4	
Desenho nº		Unidade	Data
07		mm	20/02/2019
Desenhista		Projeção	Folha
Anderson Zenken Nakazato		-	1/1
Escala		1:5	

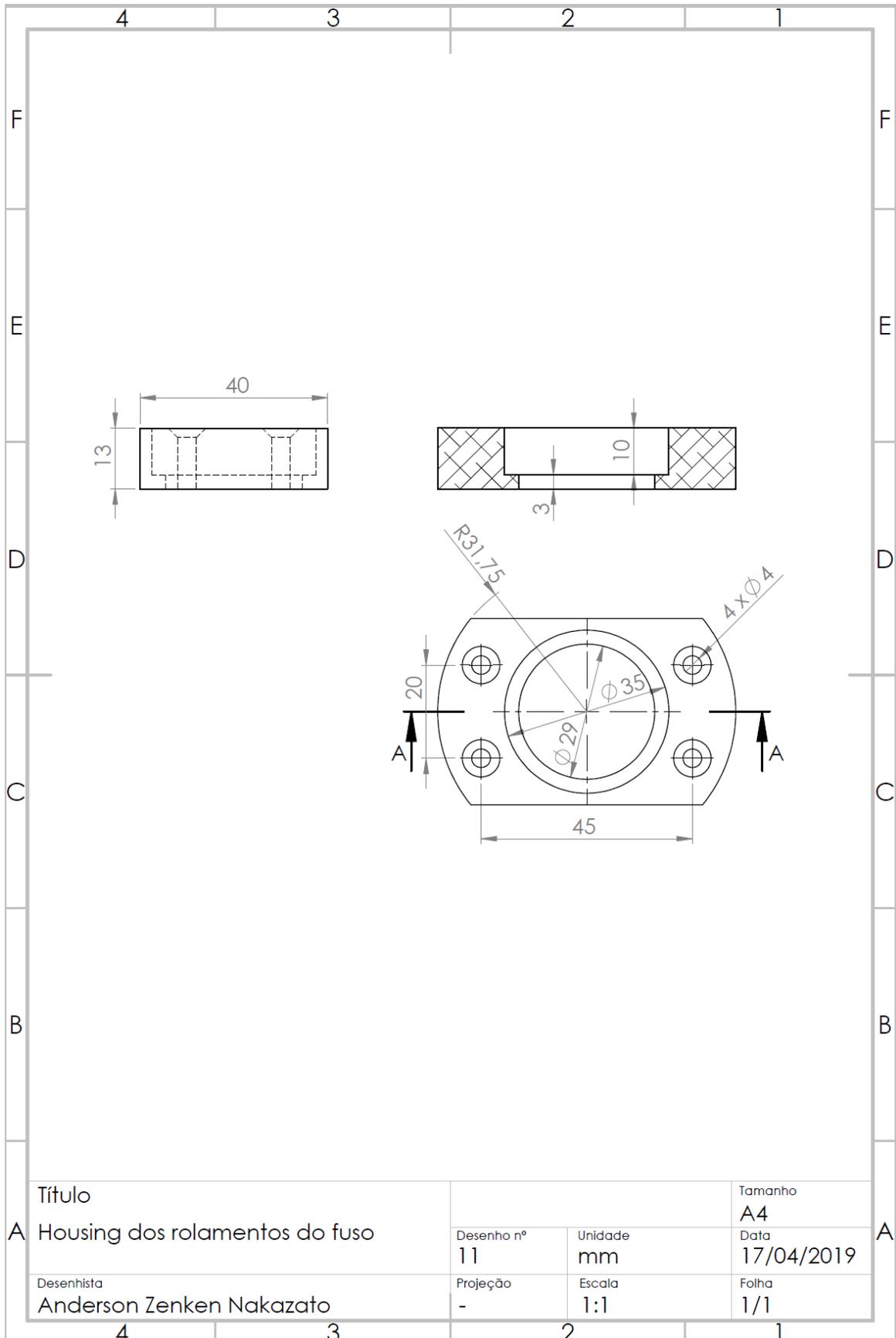
APÊNDICE D – Desenhos de montagem e fabricação do equipamento.

(continuação)



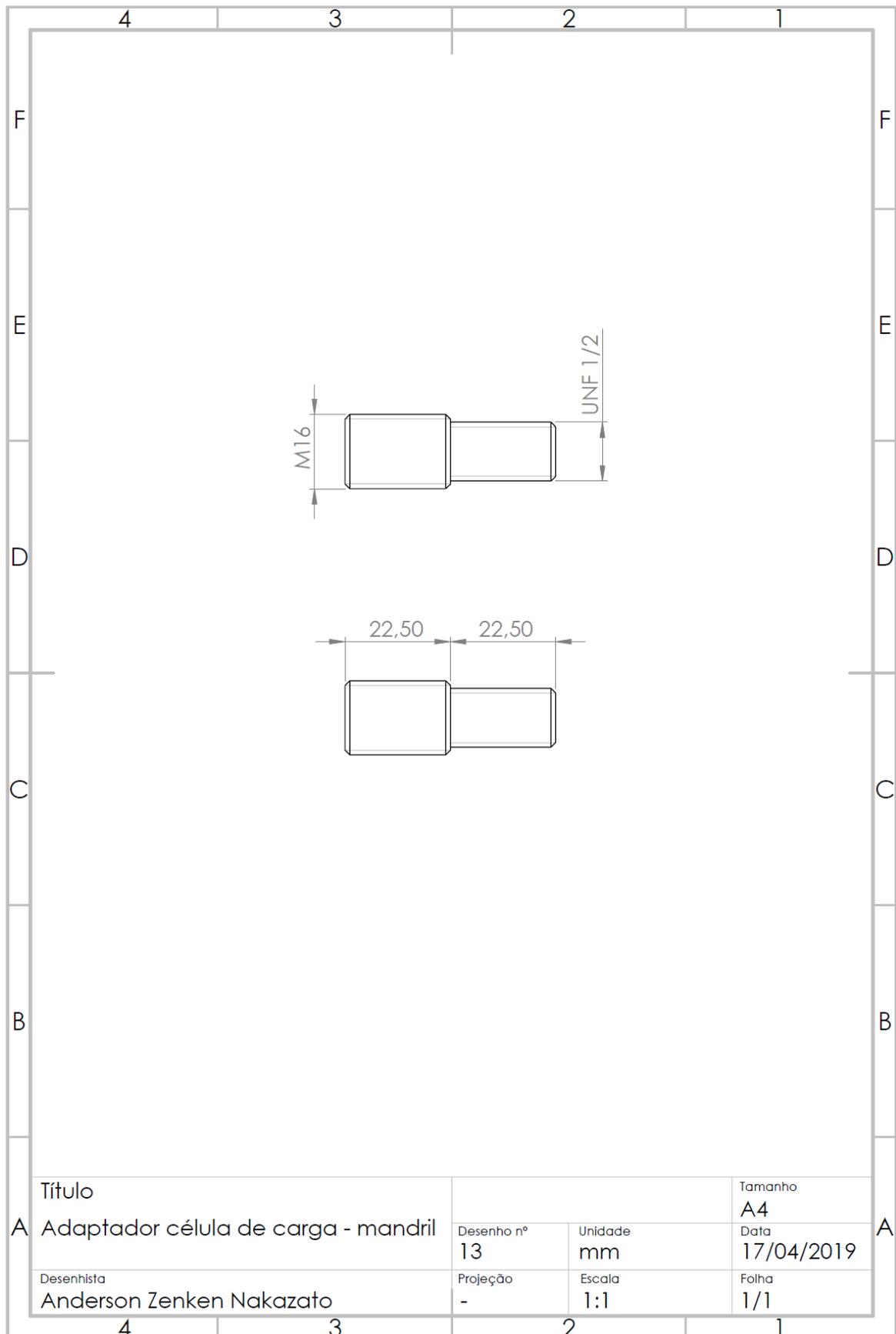
APÊNDICE D – Desenhos de montagem e fabricação do equipamento.

(continuação)



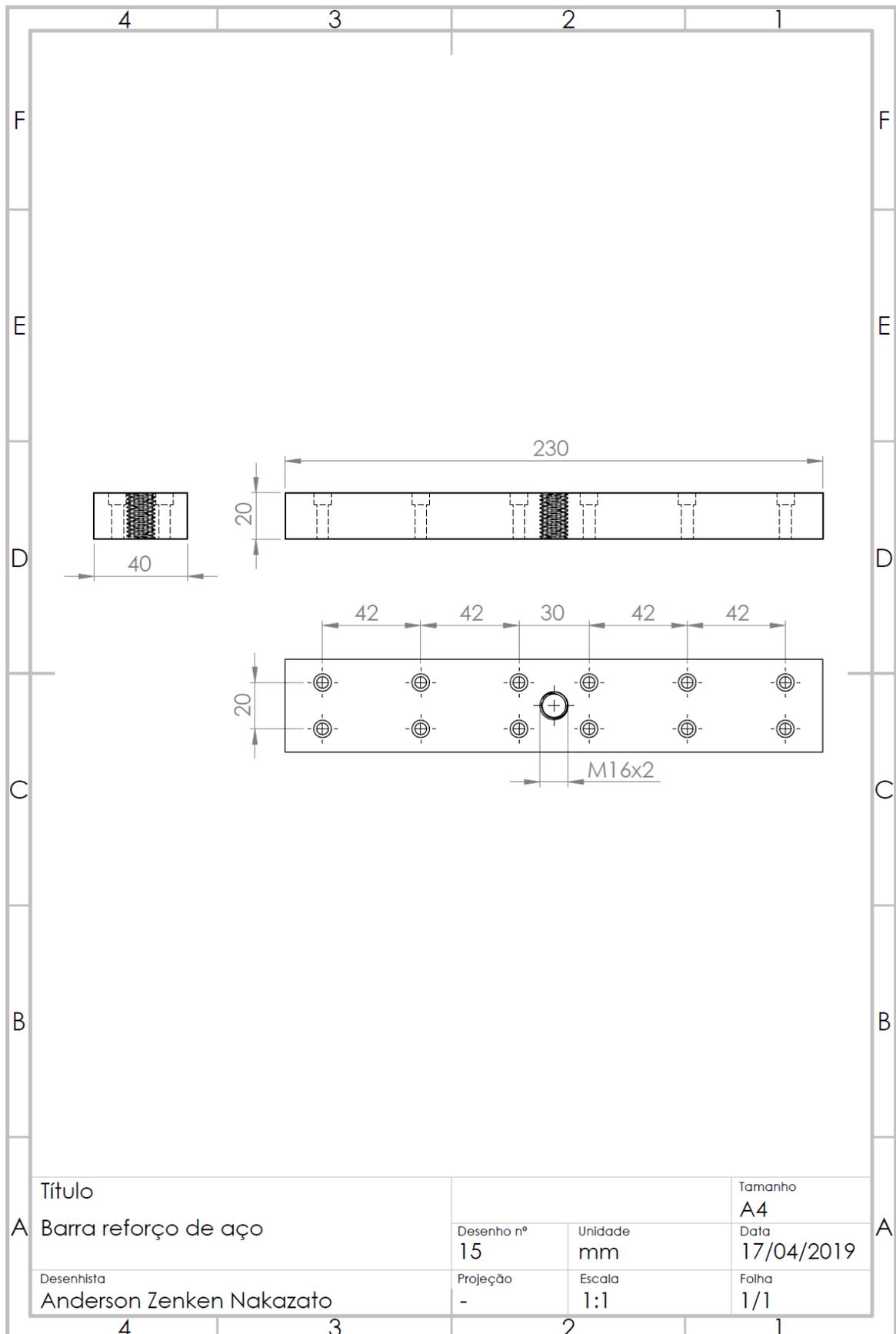
APÊNDICE D – Desenhos de montagem e fabricação do equipamento.

(continuação)



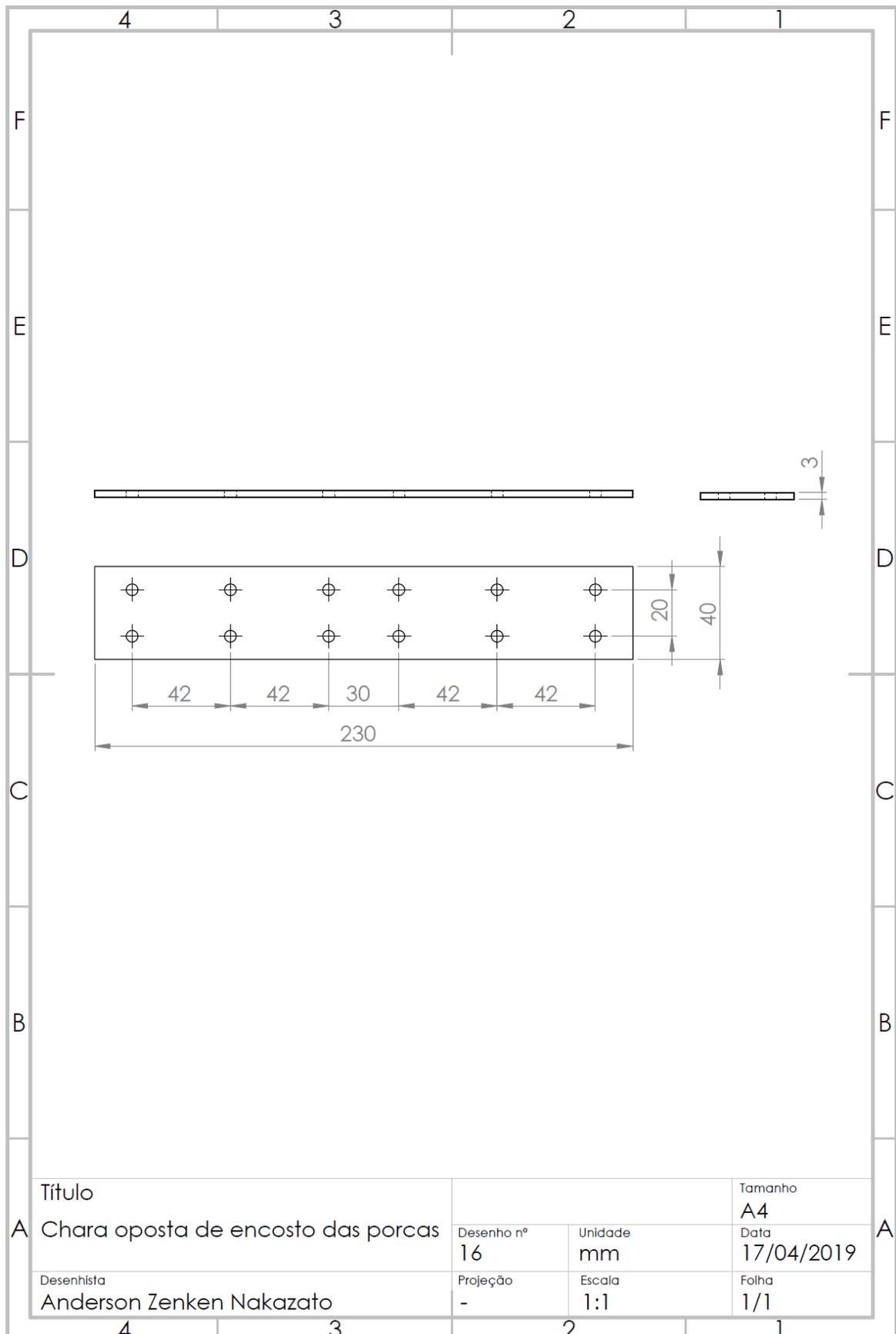
APÊNDICE D – Desenhos de montagem e fabricação do equipamento.

(continuação)



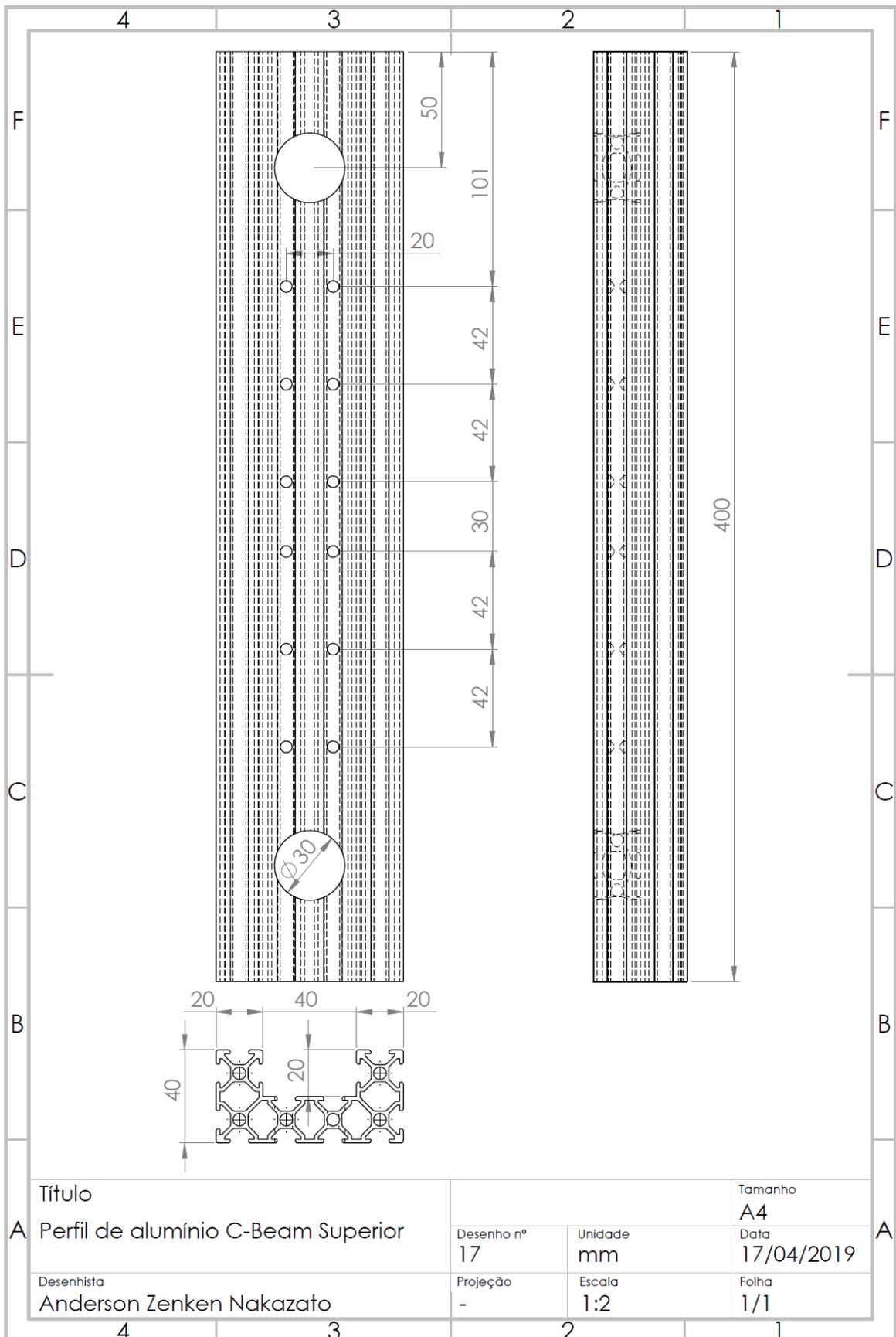
APÊNDICE D – Desenhos de montagem e fabricação do equipamento.

(continuação)



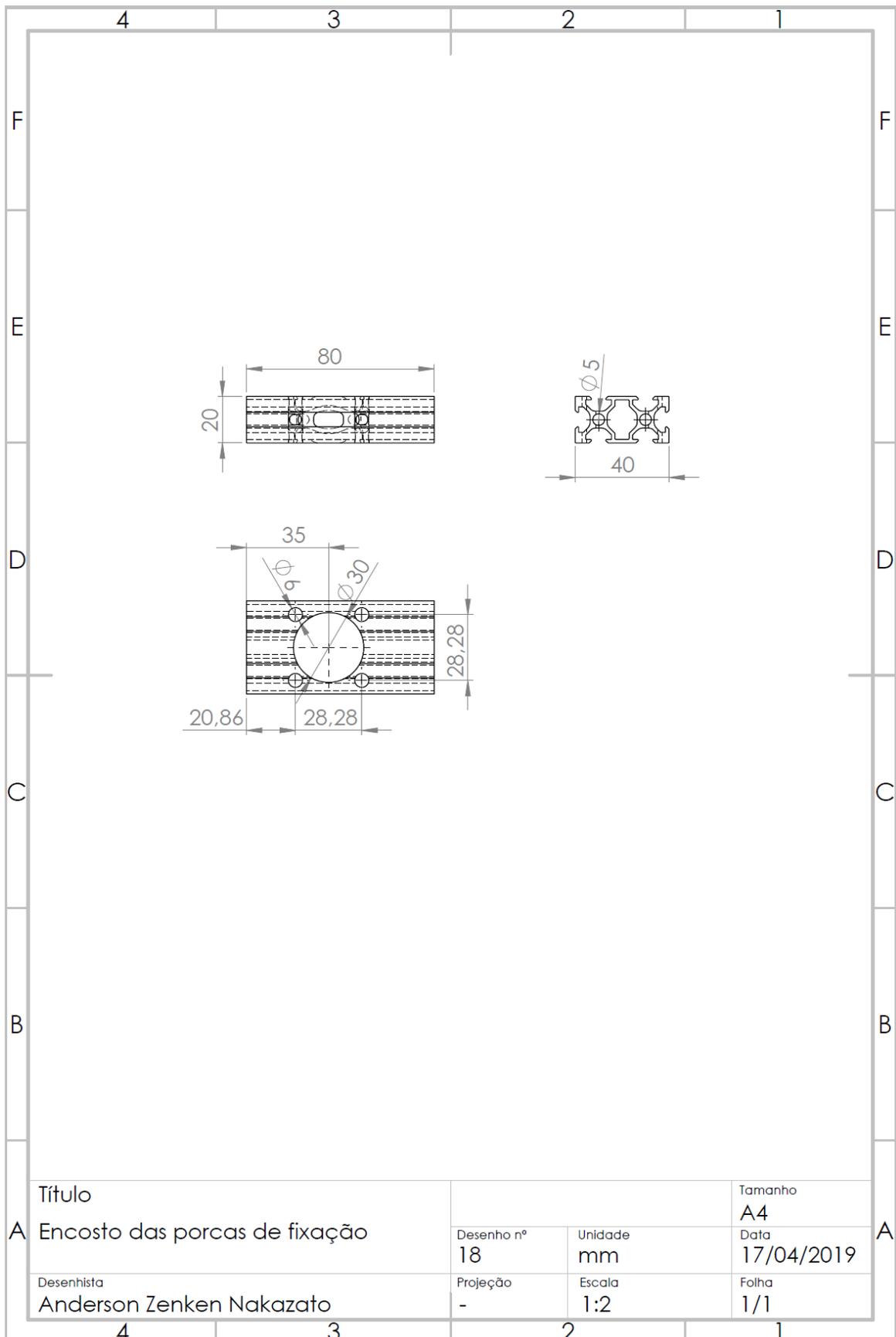
APÊNDICE D – Desenhos de montagem e fabricação do equipamento.

(continuação)



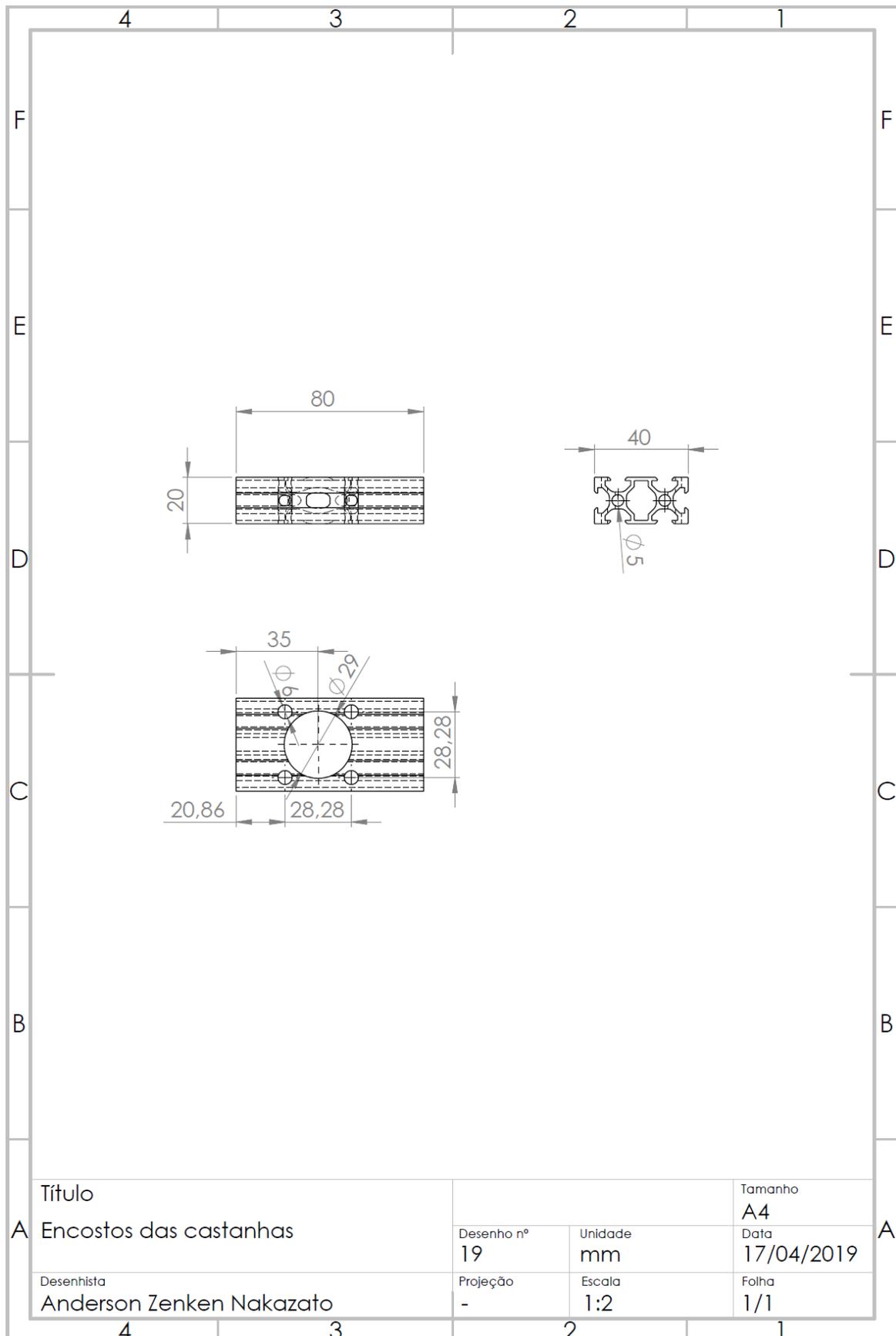
APÊNDICE D – Desenhos de montagem e fabricação do equipamento.

(continuação)



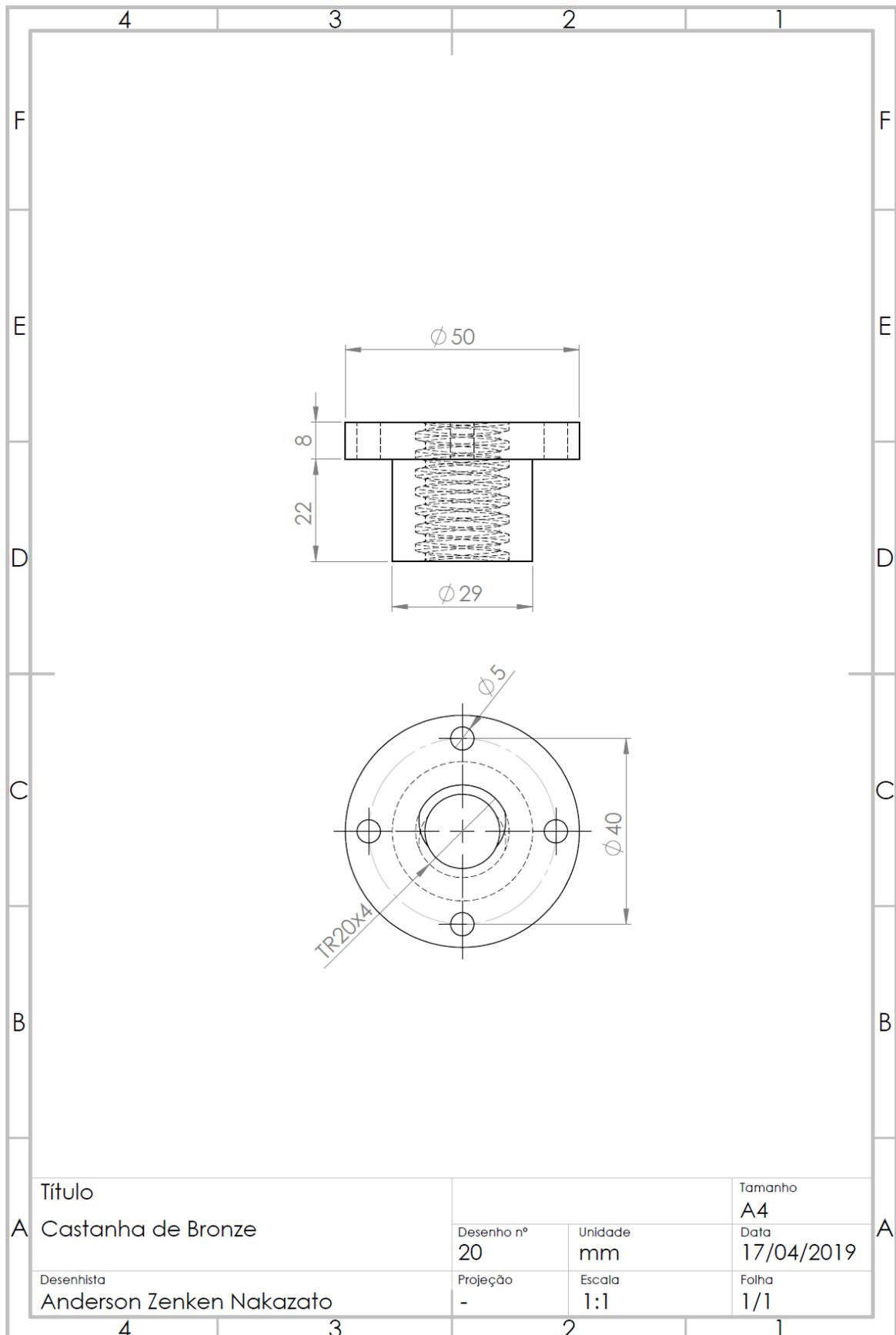
APÊNDICE D – Desenhos de montagem e fabricação do equipamento.

(continuação)



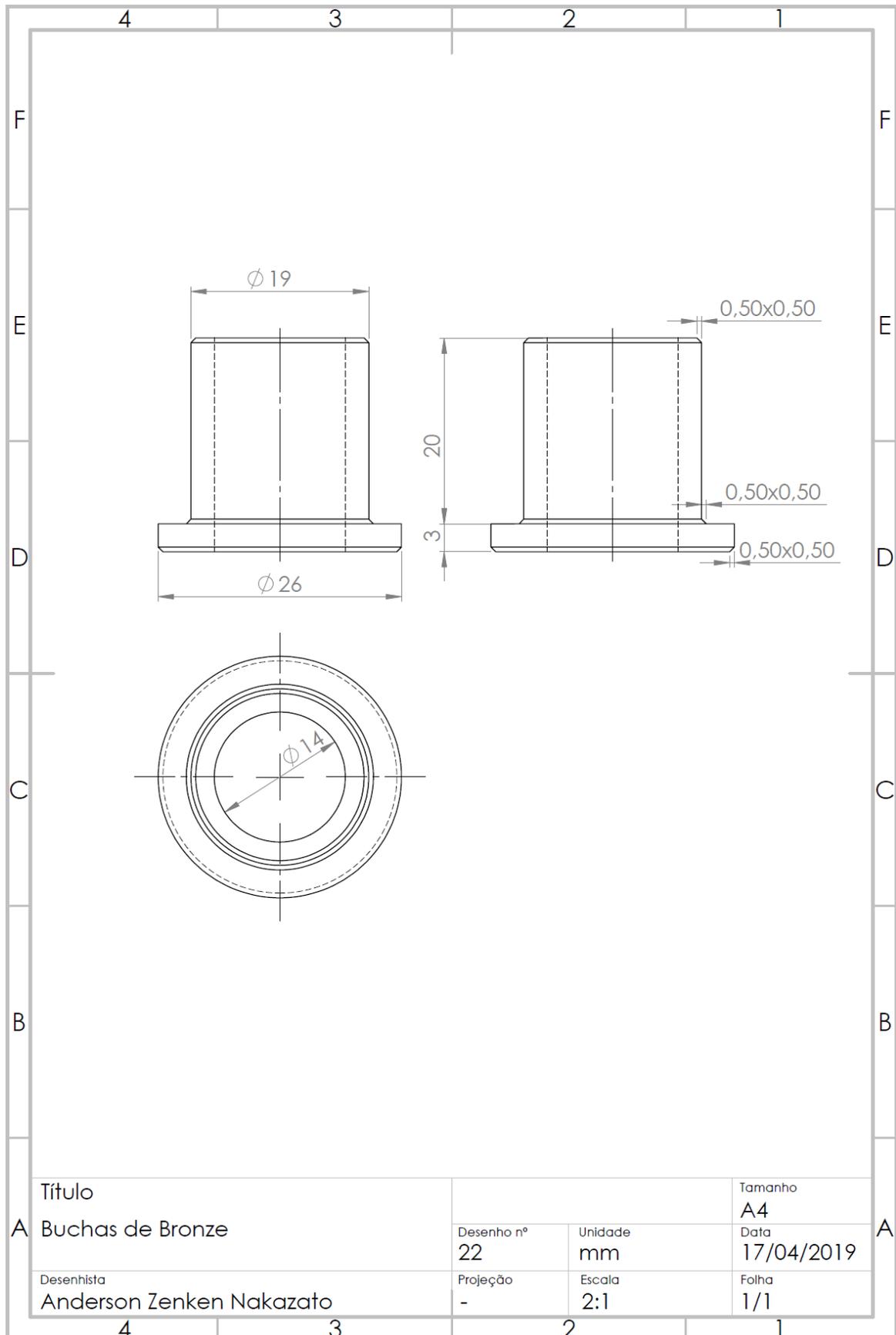
APÊNDICE D – Desenhos de montagem e fabricação do equipamento.

(continuação)



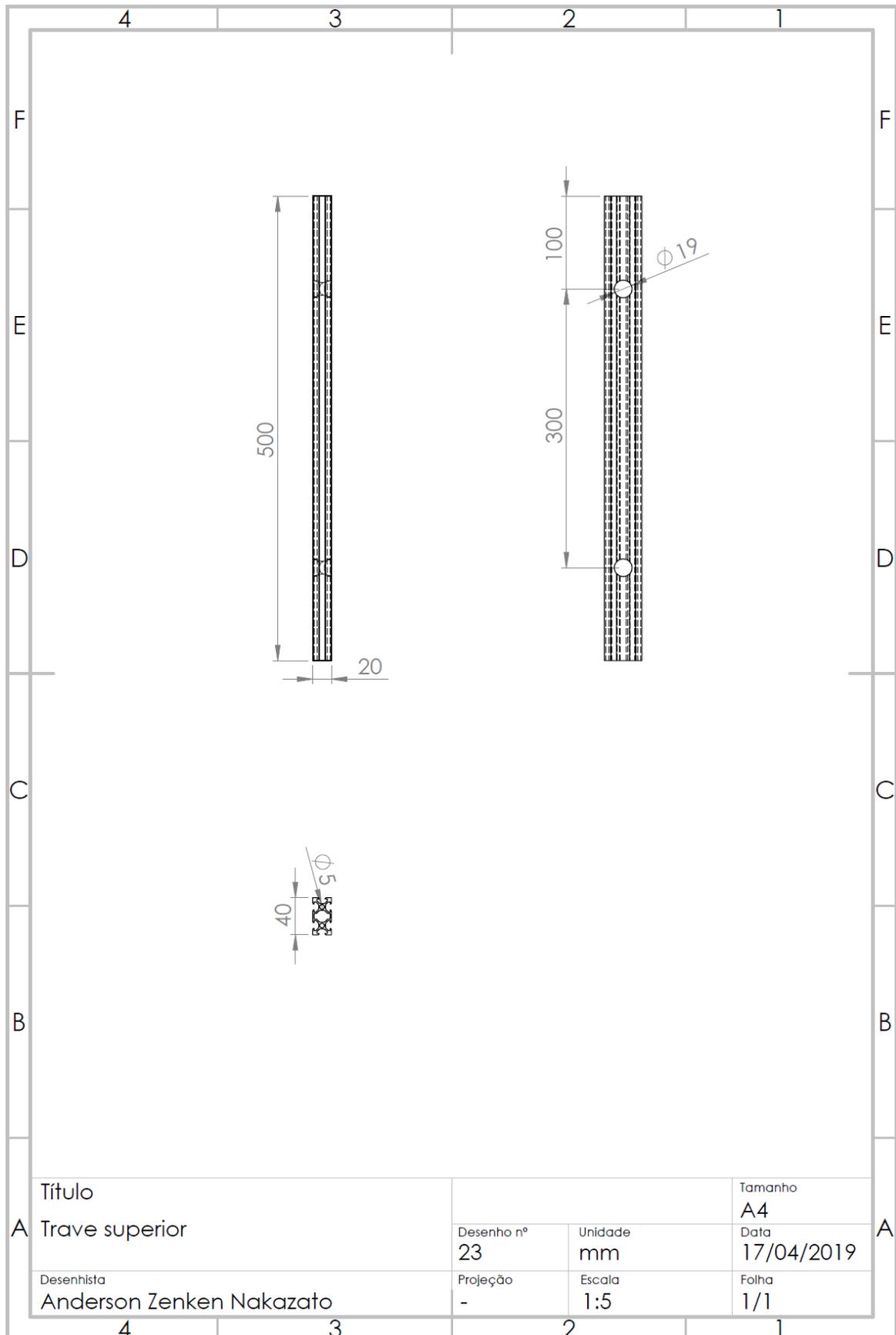
APÊNDICE D – Desenhos de montagem e fabricação do equipamento.

(continuação)



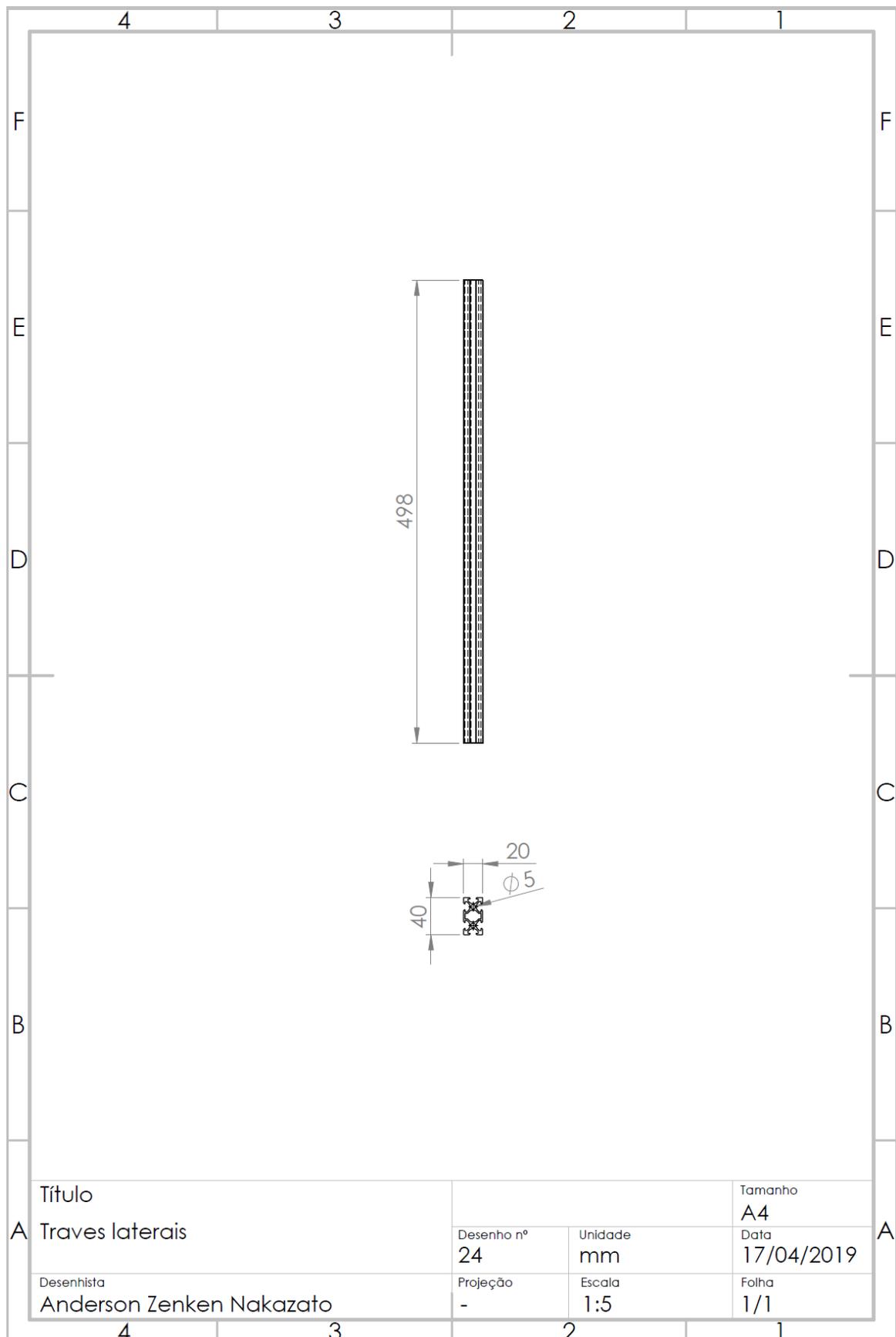
APÊNDICE D – Desenhos de montagem e fabricação do equipamento.

(continuação)



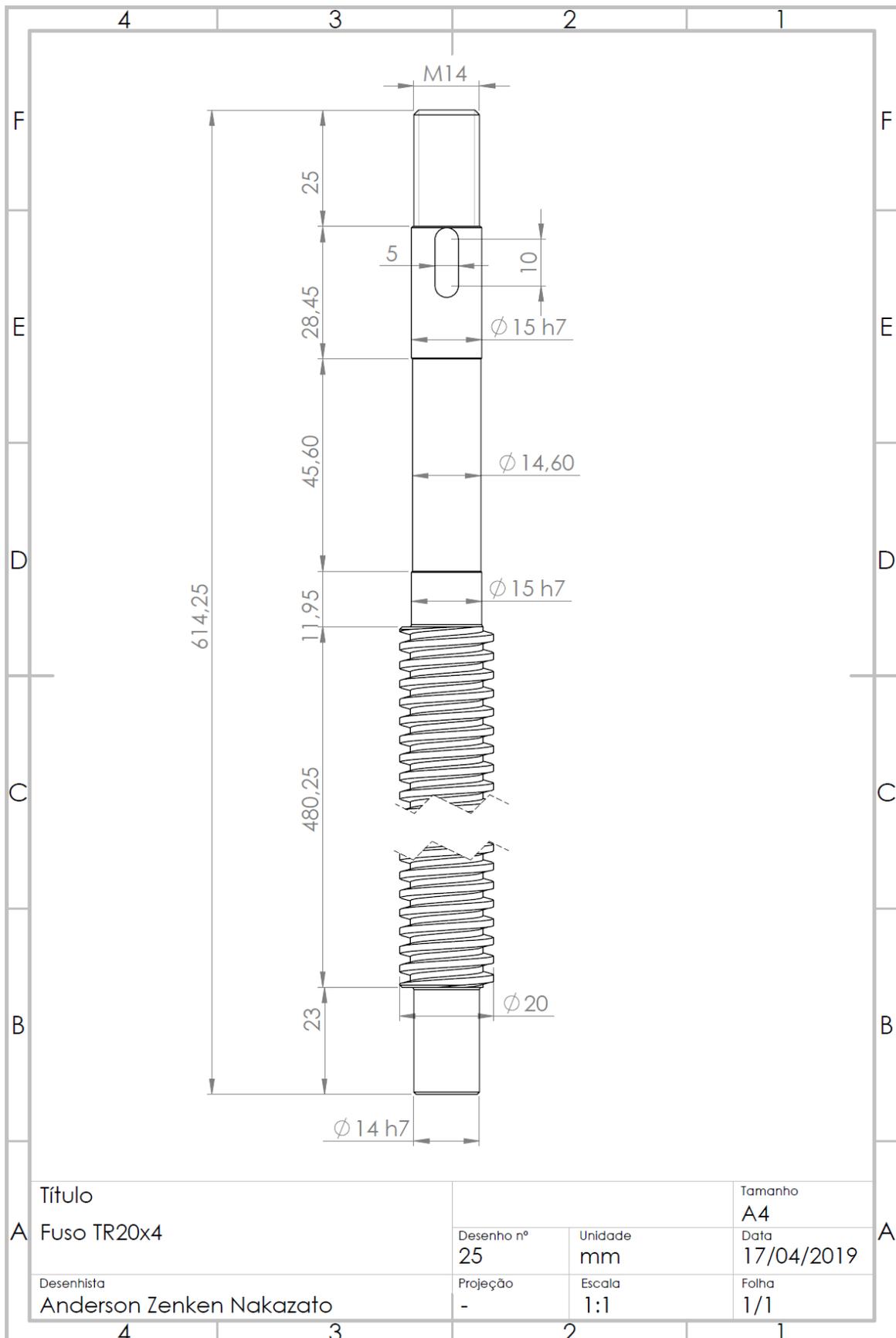
APÊNDICE D – Desenhos de montagem e fabricação do equipamento.

(continuação)



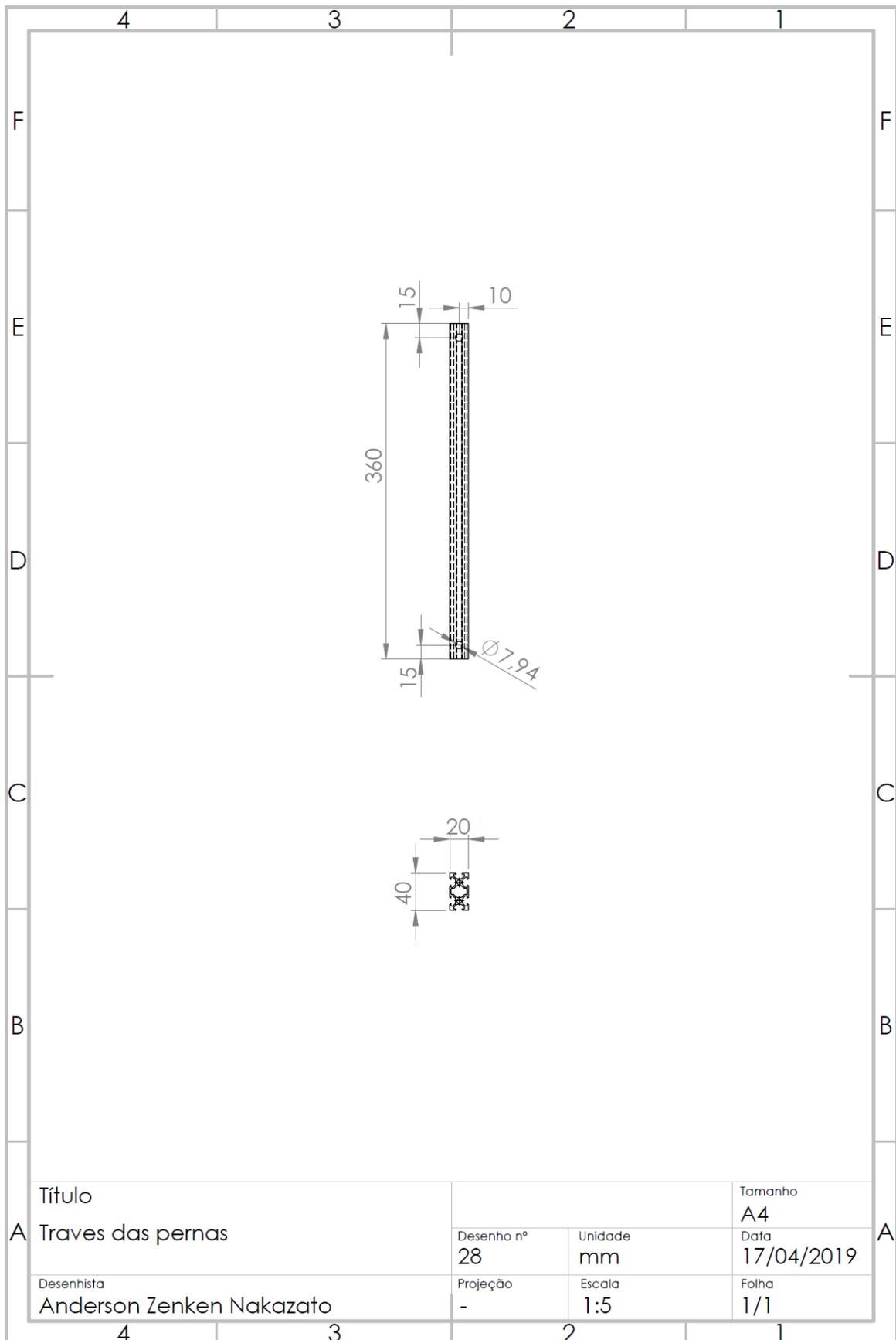
APÊNDICE D – Desenhos de montagem e fabricação do equipamento.

(continuação)



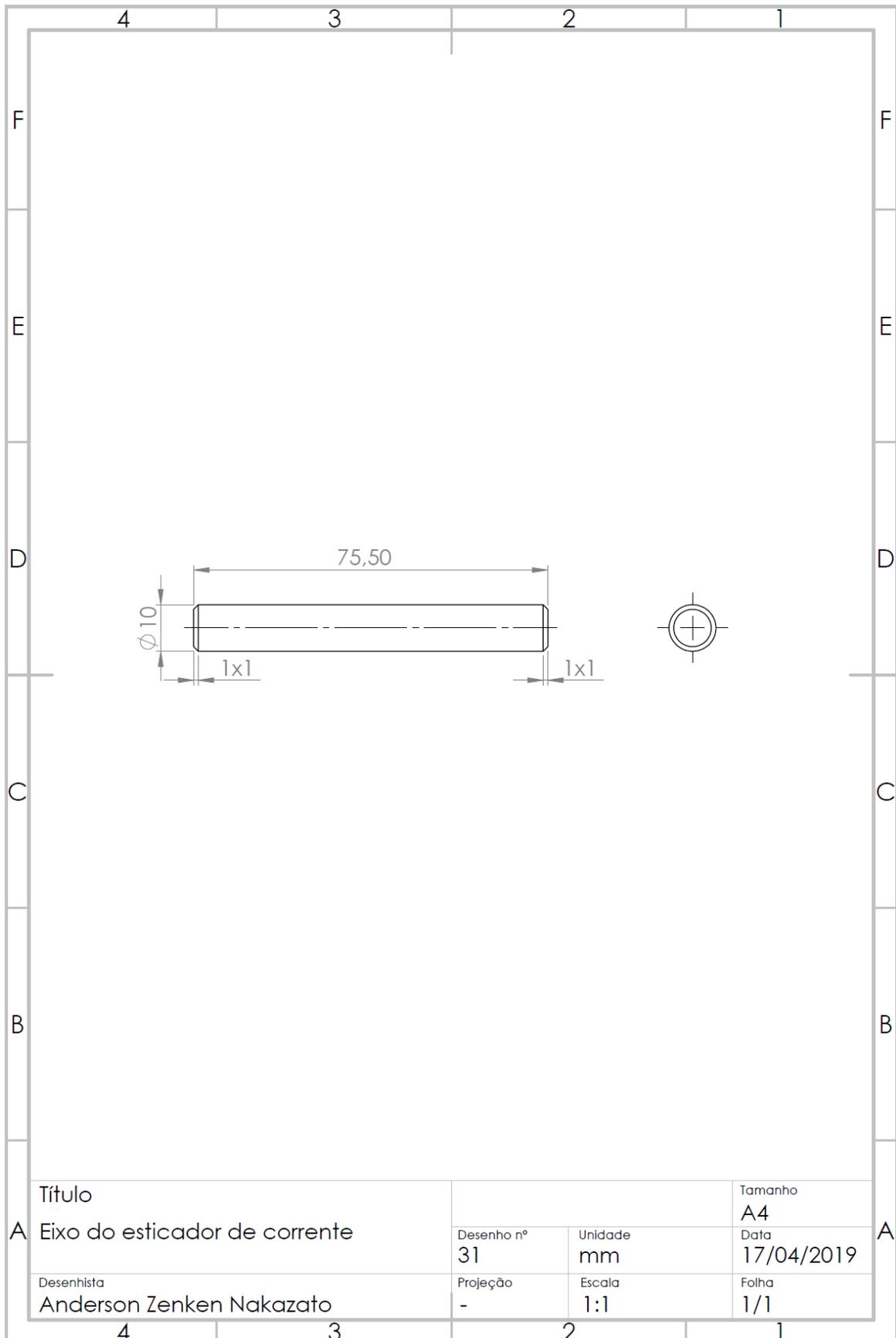
APÊNDICE D – Desenhos de montagem e fabricação do equipamento.

(continuação)



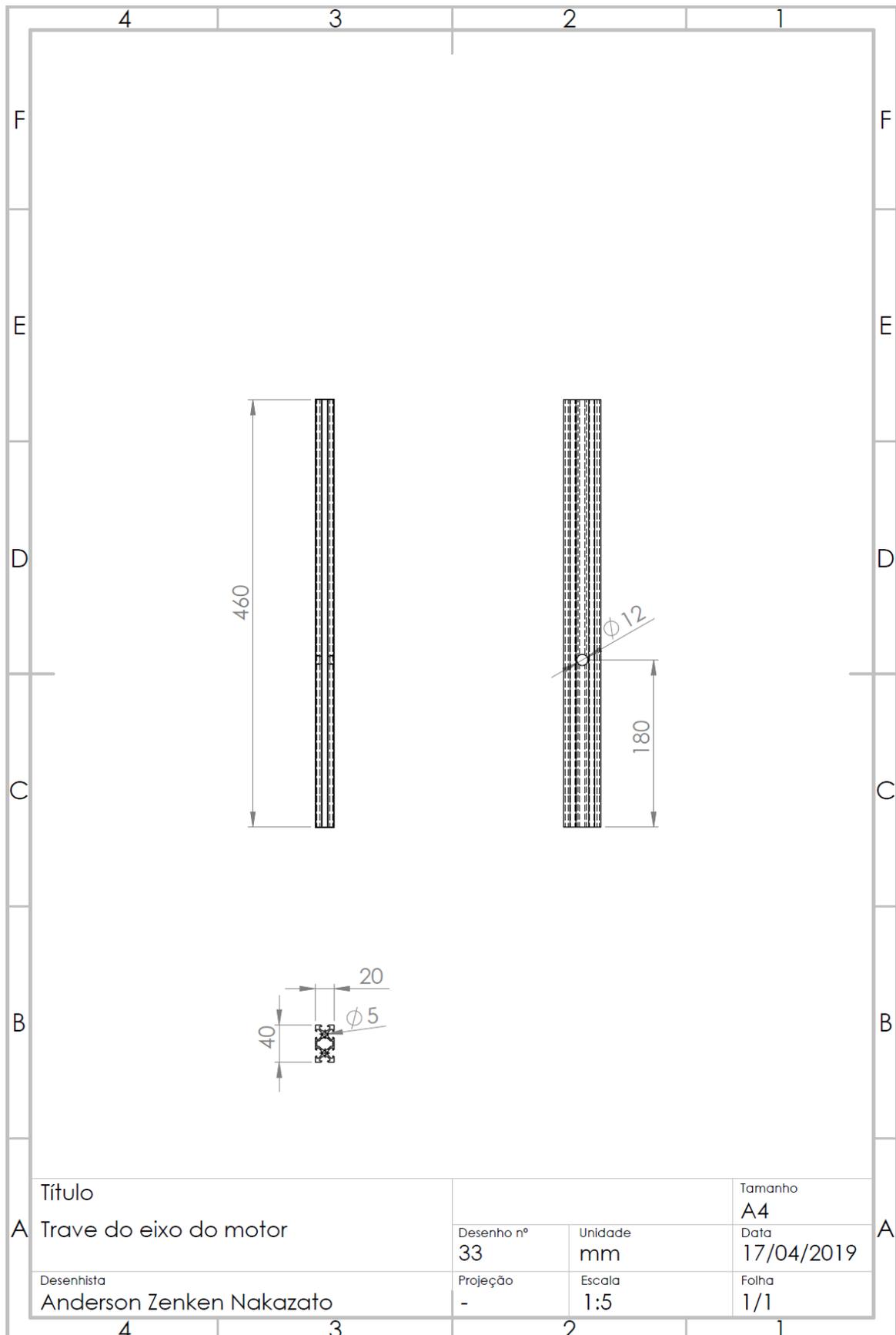
APÊNDICE D – Desenhos de montagem e fabricação do equipamento.

(continuação)



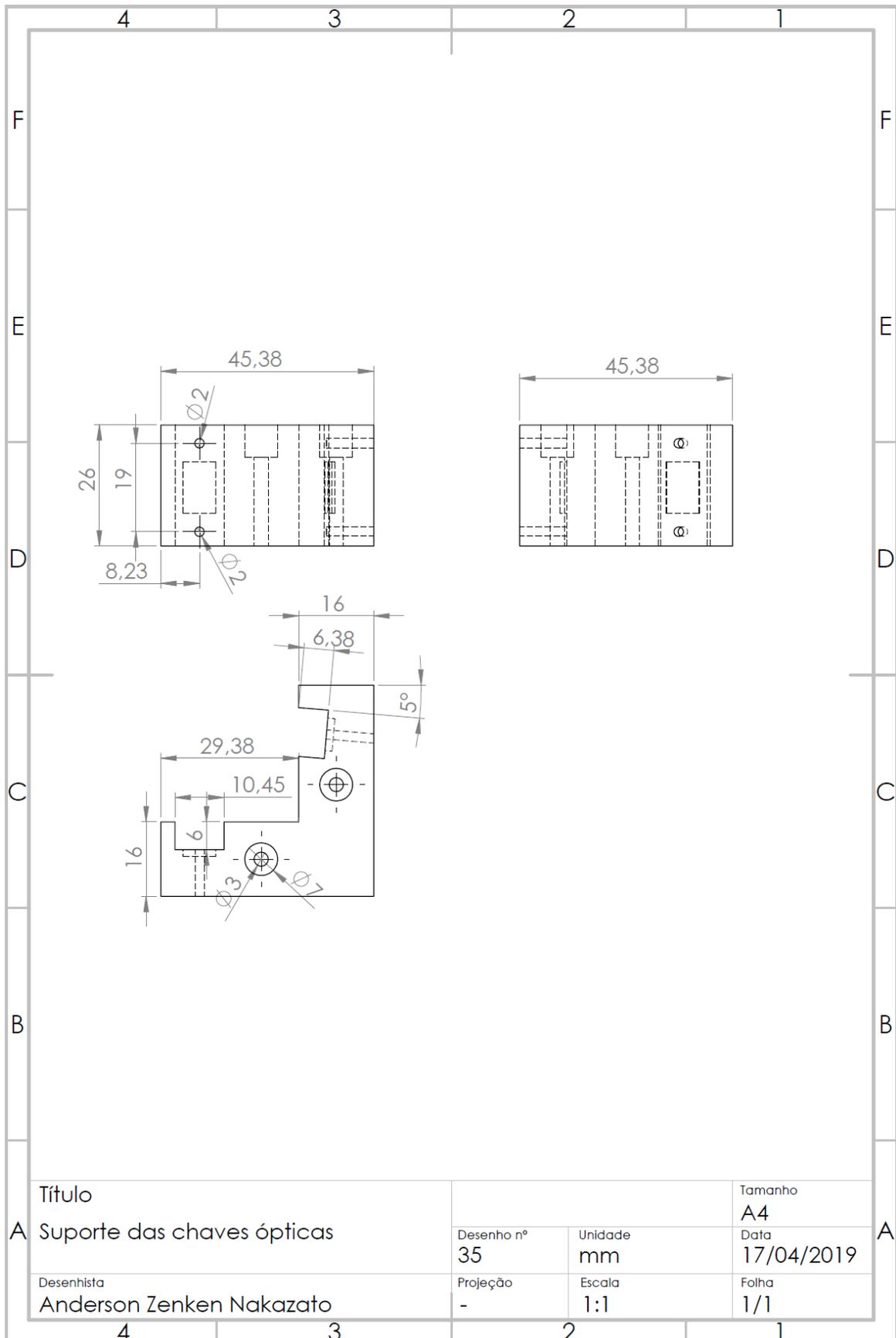
APÊNDICE D – Desenhos de montagem e fabricação do equipamento.

(continuação)



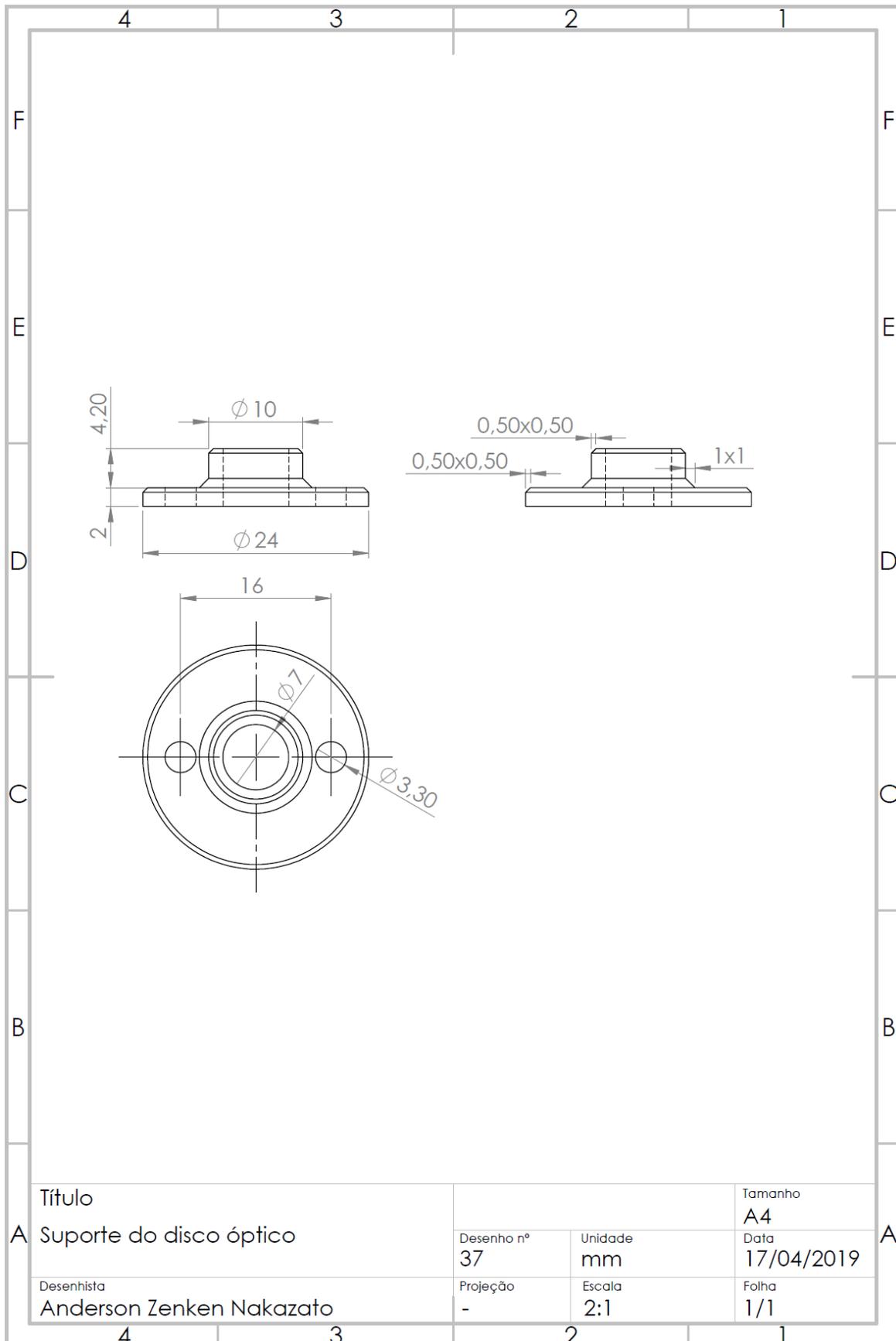
APÊNDICE D – Desenhos de montagem e fabricação do equipamento.

(continuação)



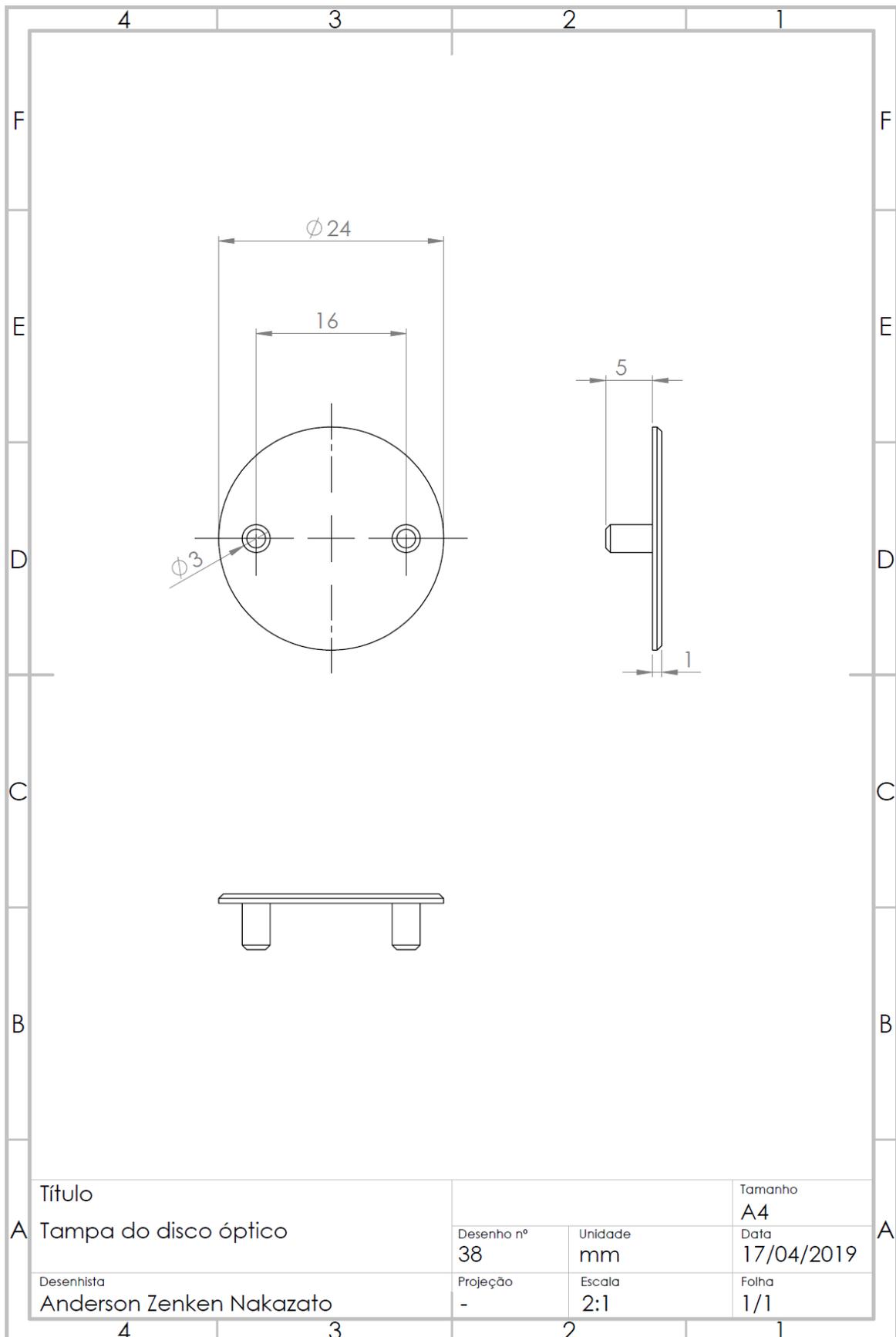
APÊNDICE D – Desenhos de montagem e fabricação do equipamento.

(continuação)



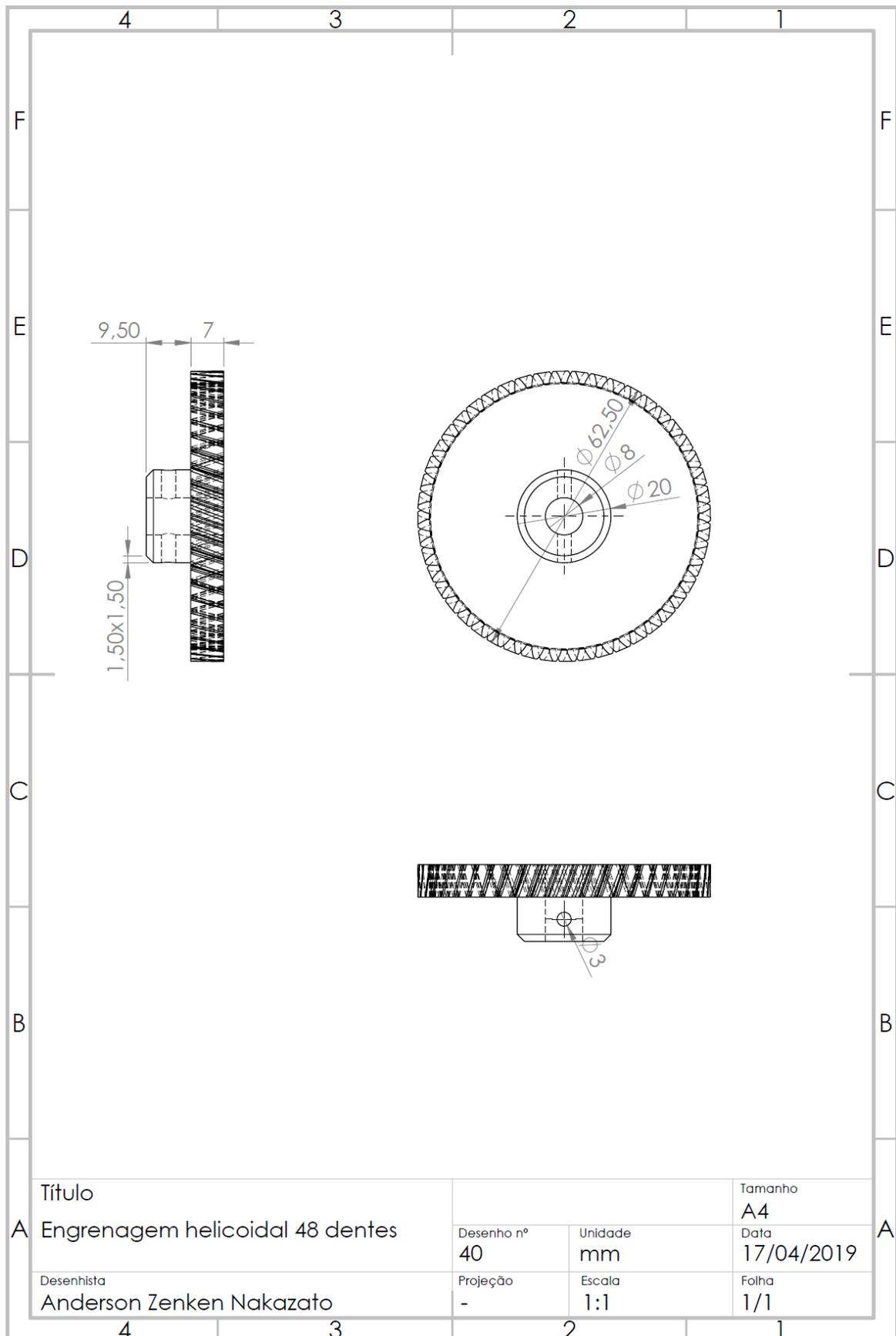
APÊNDICE D – Desenhos de montagem e fabricação do equipamento.

(continuação)



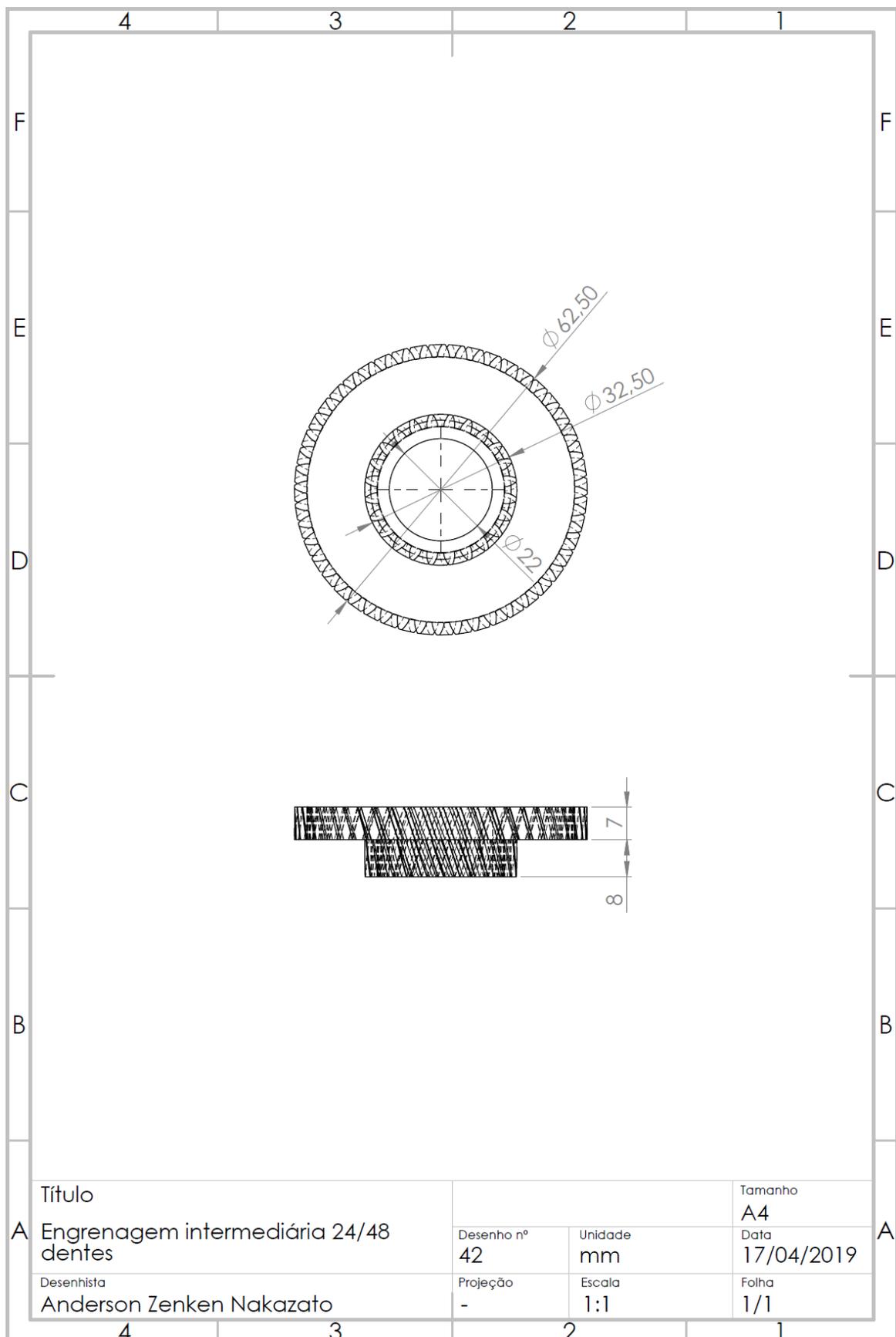
APÊNDICE D – Desenhos de montagem e fabricação do equipamento.

(continuação)



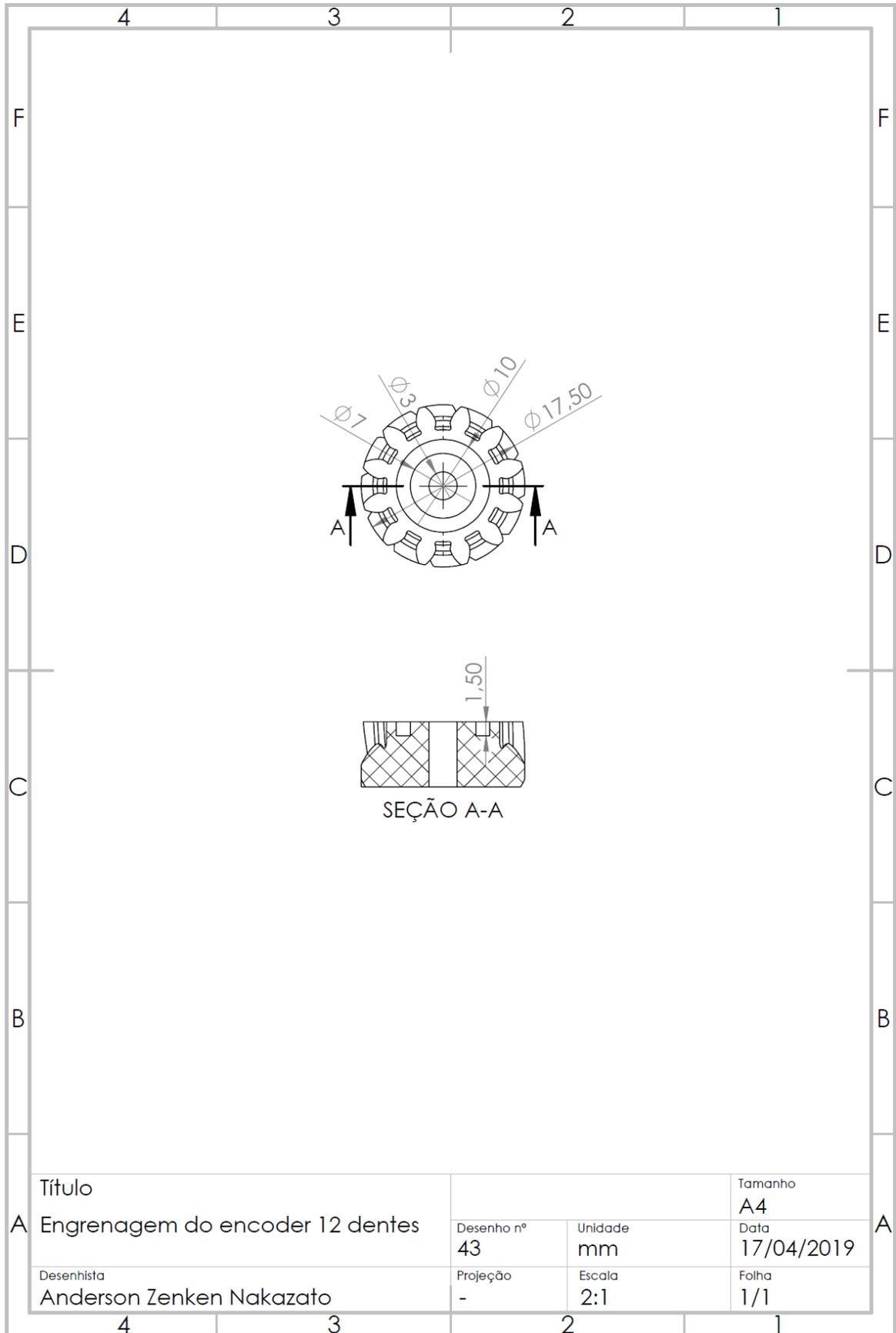
APÊNDICE D – Desenhos de montagem e fabricação do equipamento.

(continuação)



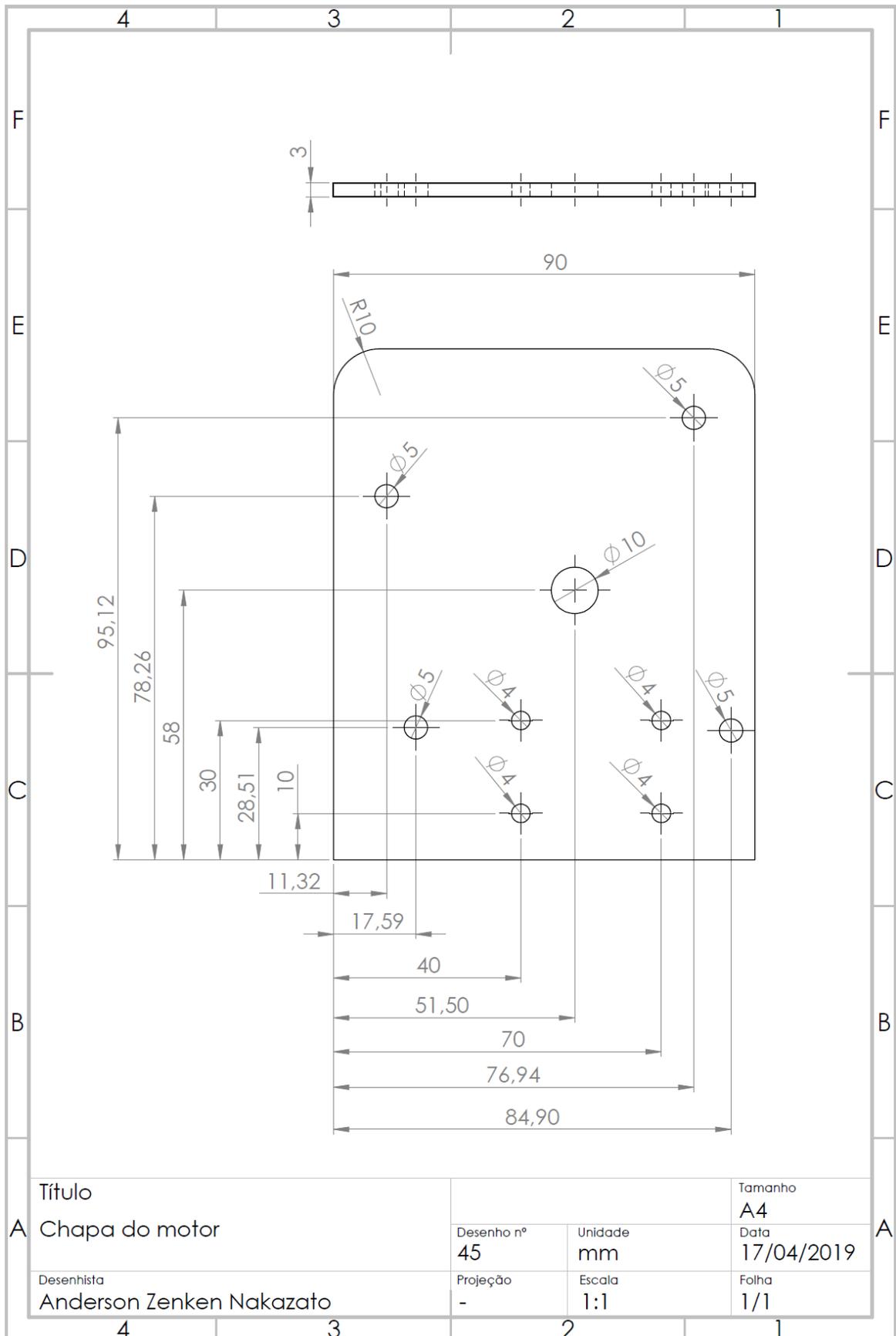
APÊNDICE D – Desenhos de montagem e fabricação do equipamento.

(continuação)



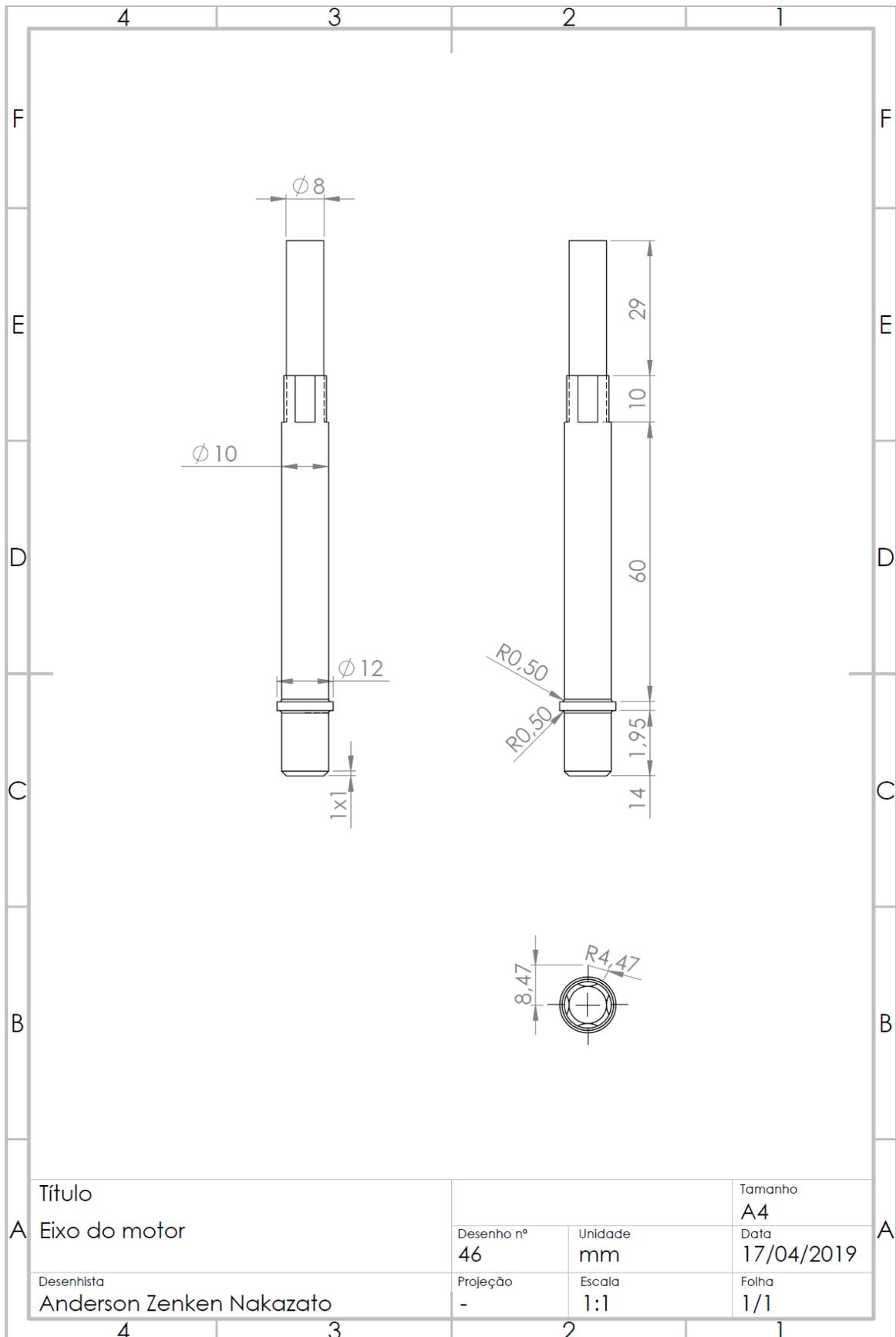
APÊNDICE D – Desenhos de montagem e fabricação do equipamento.

(continuação)



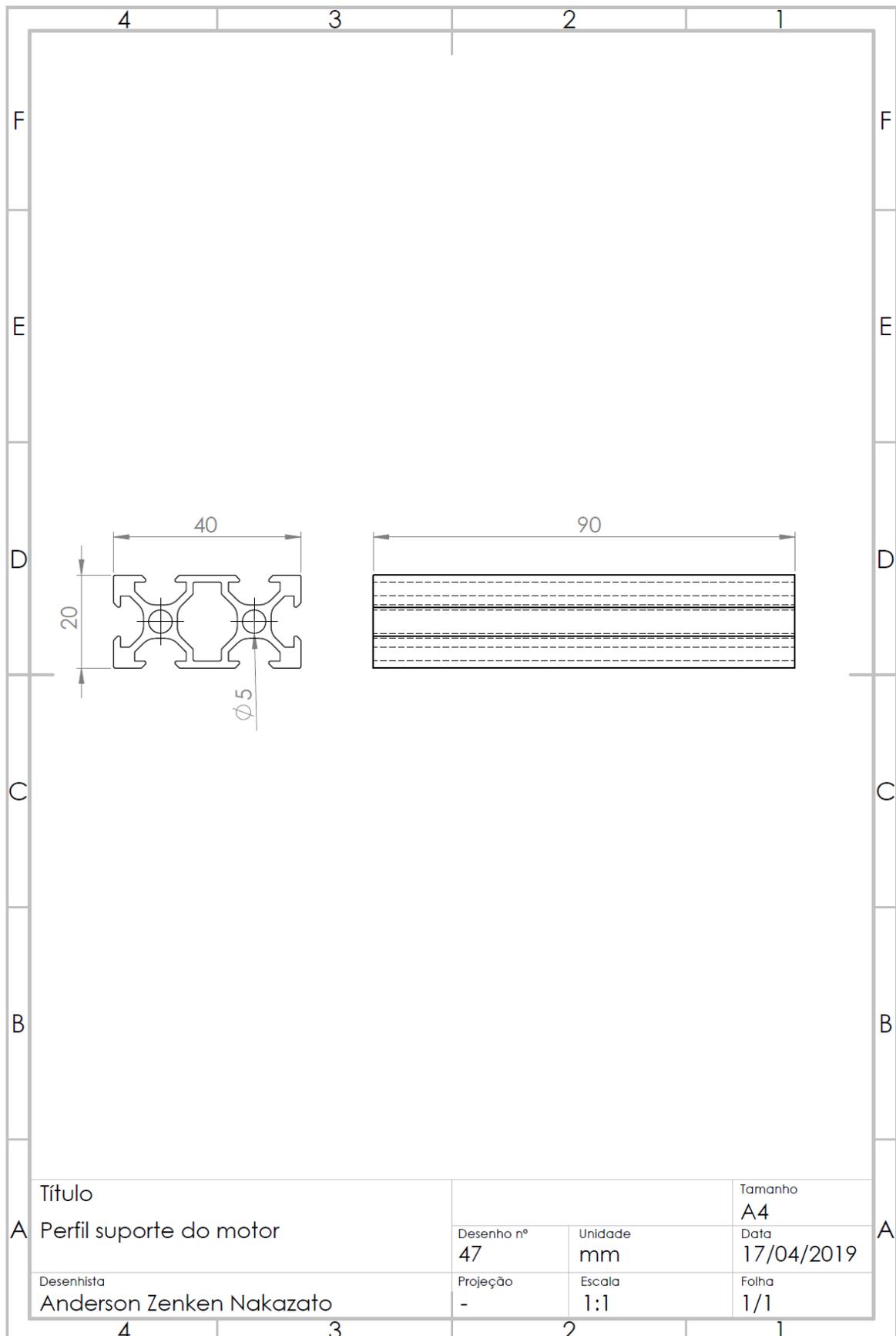
APÊNDICE D – Desenhos de montagem e fabricação do equipamento.

(continuação)



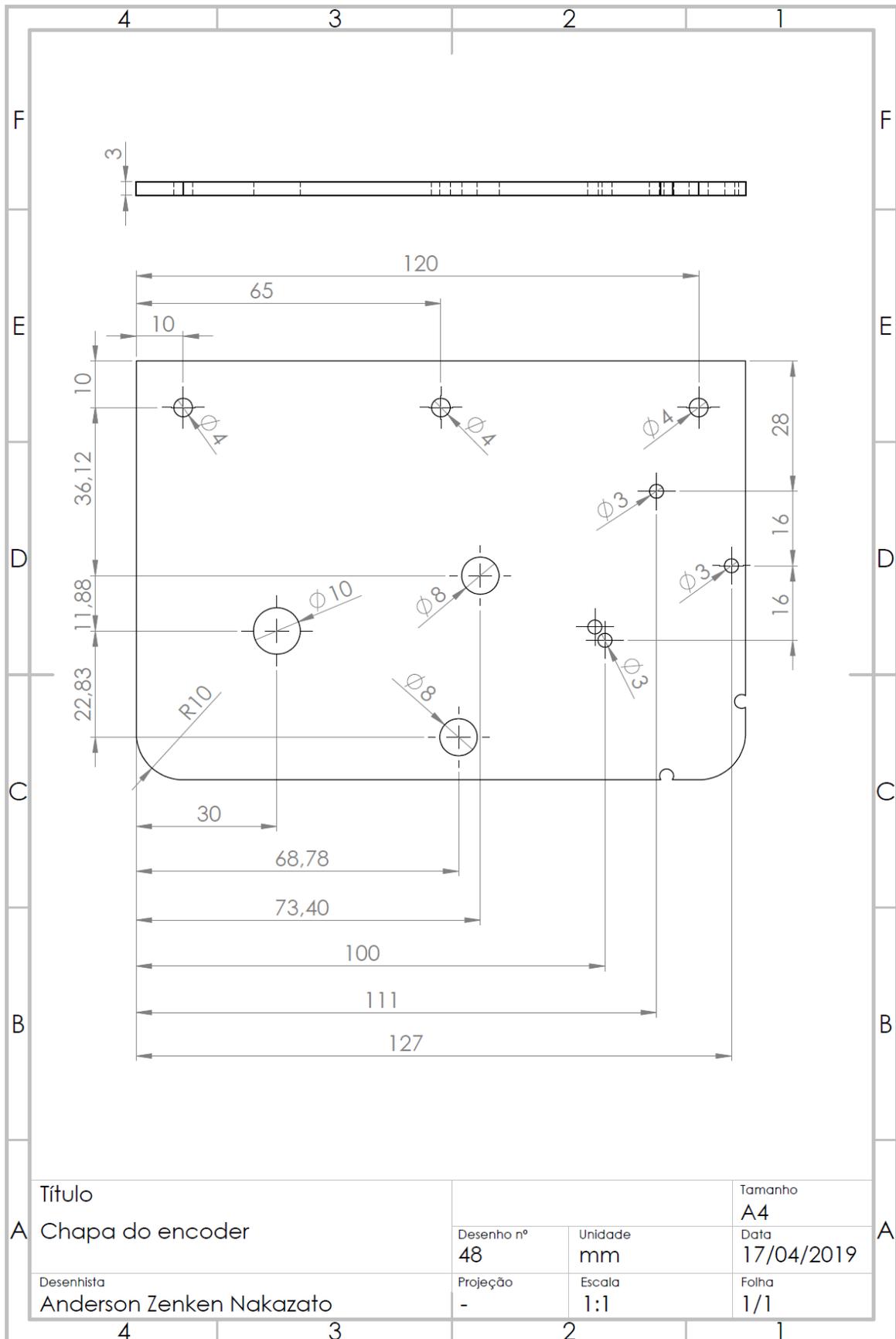
APÊNDICE D – Desenhos de montagem e fabricação do equipamento.

(continuação)



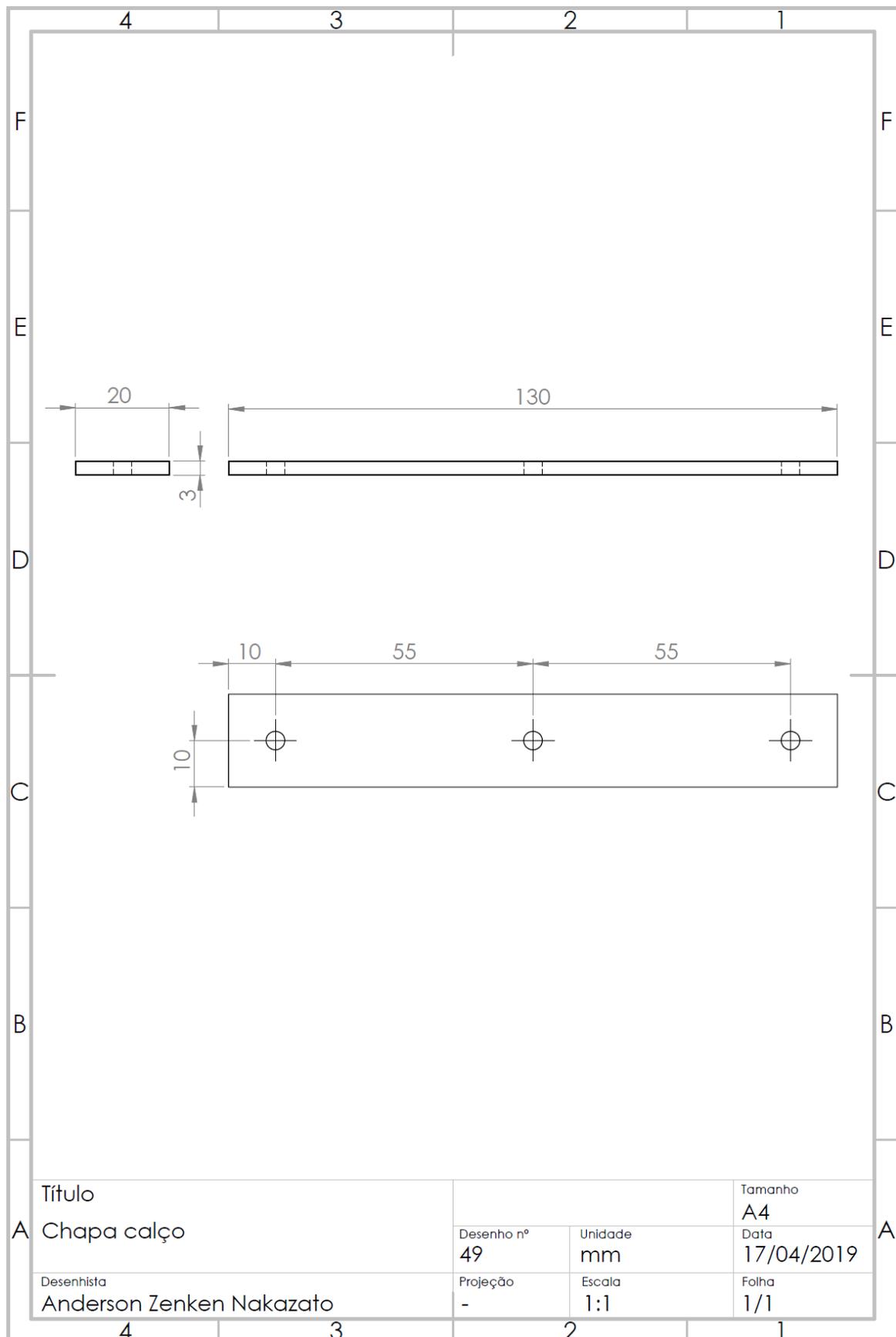
APÊNDICE D – Desenhos de montagem e fabricação do equipamento.

(continuação)



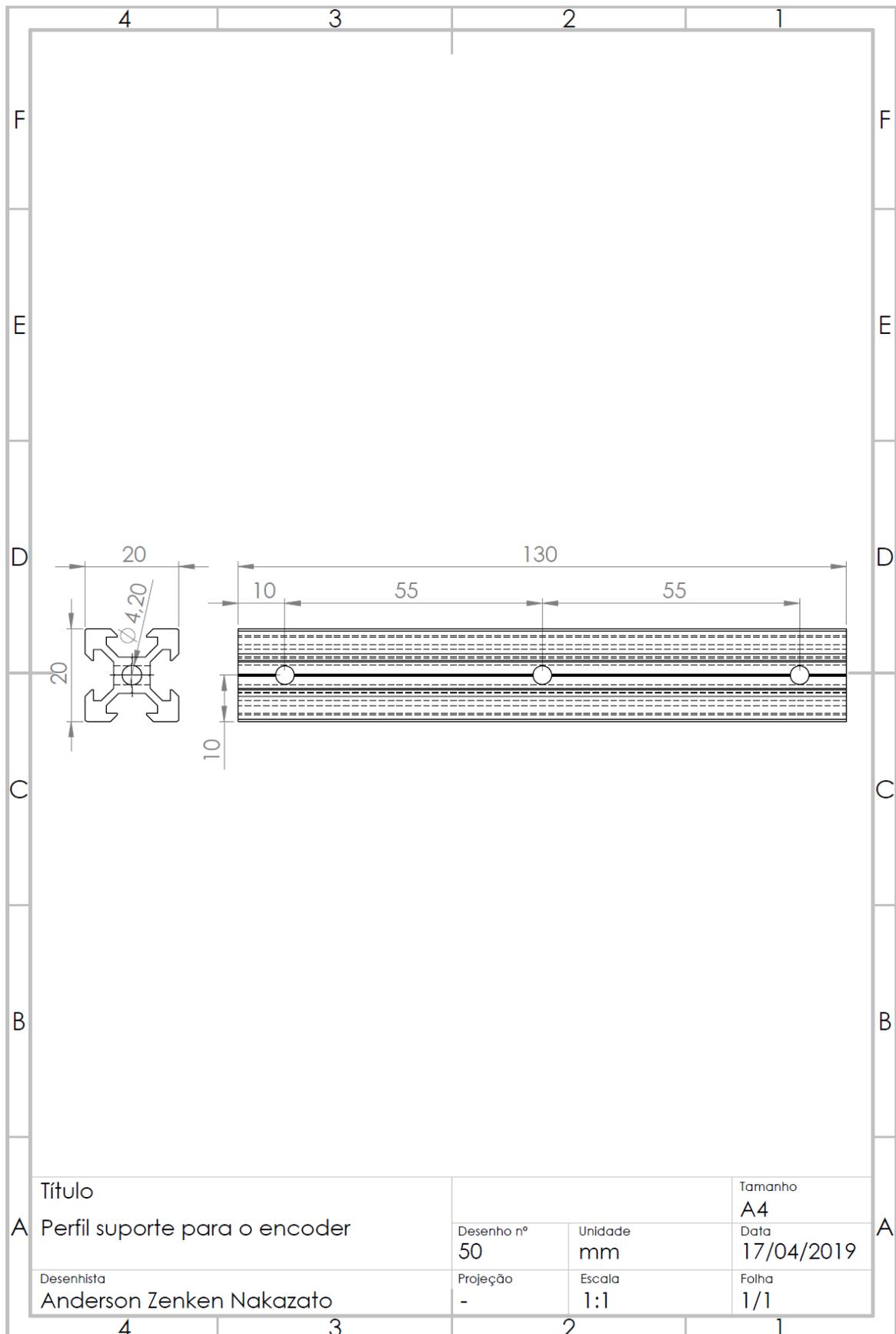
APÊNDICE D – Desenhos de montagem e fabricação do equipamento.

(continuação)



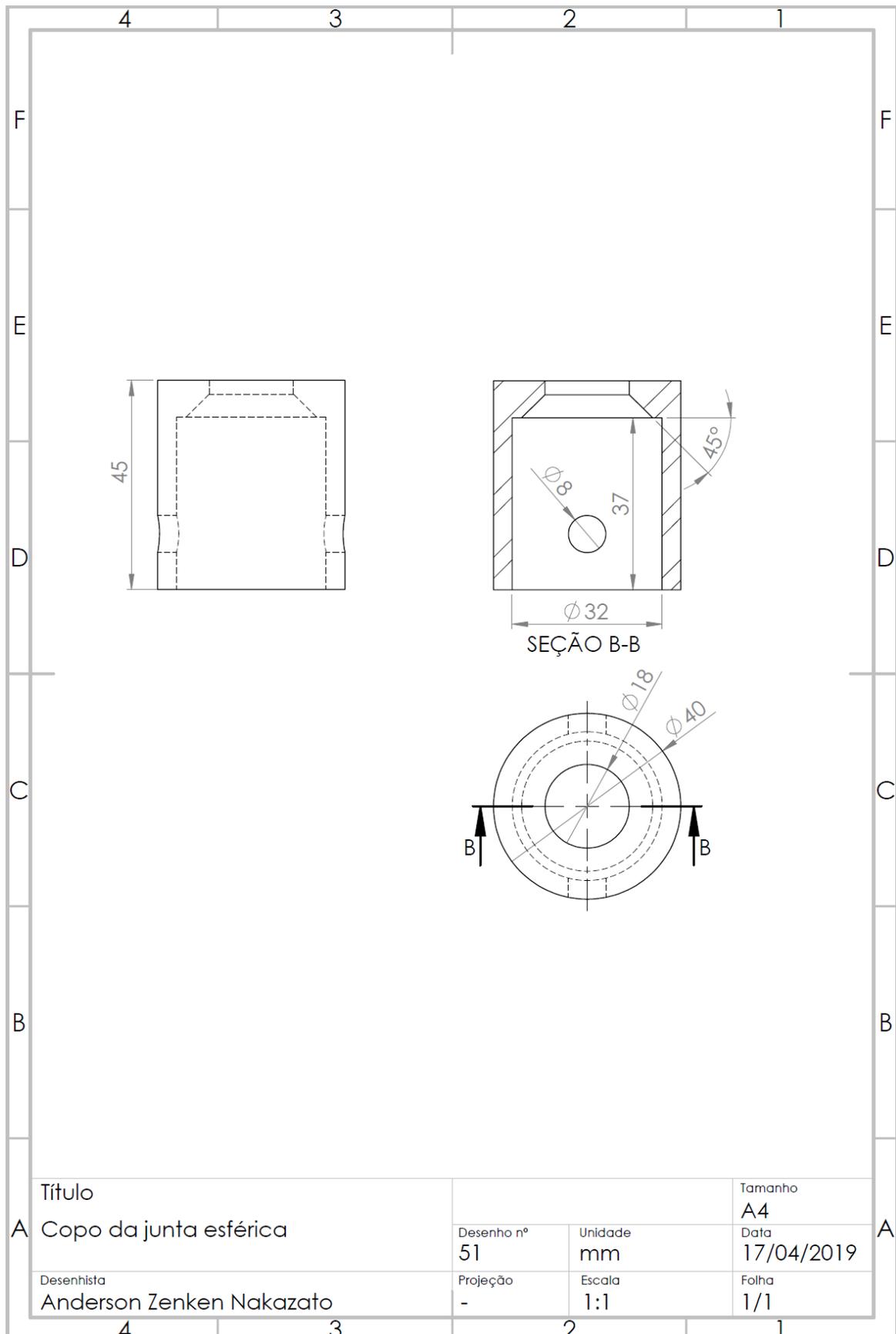
APÊNDICE D – Desenhos de montagem e fabricação do equipamento.

(continuação)



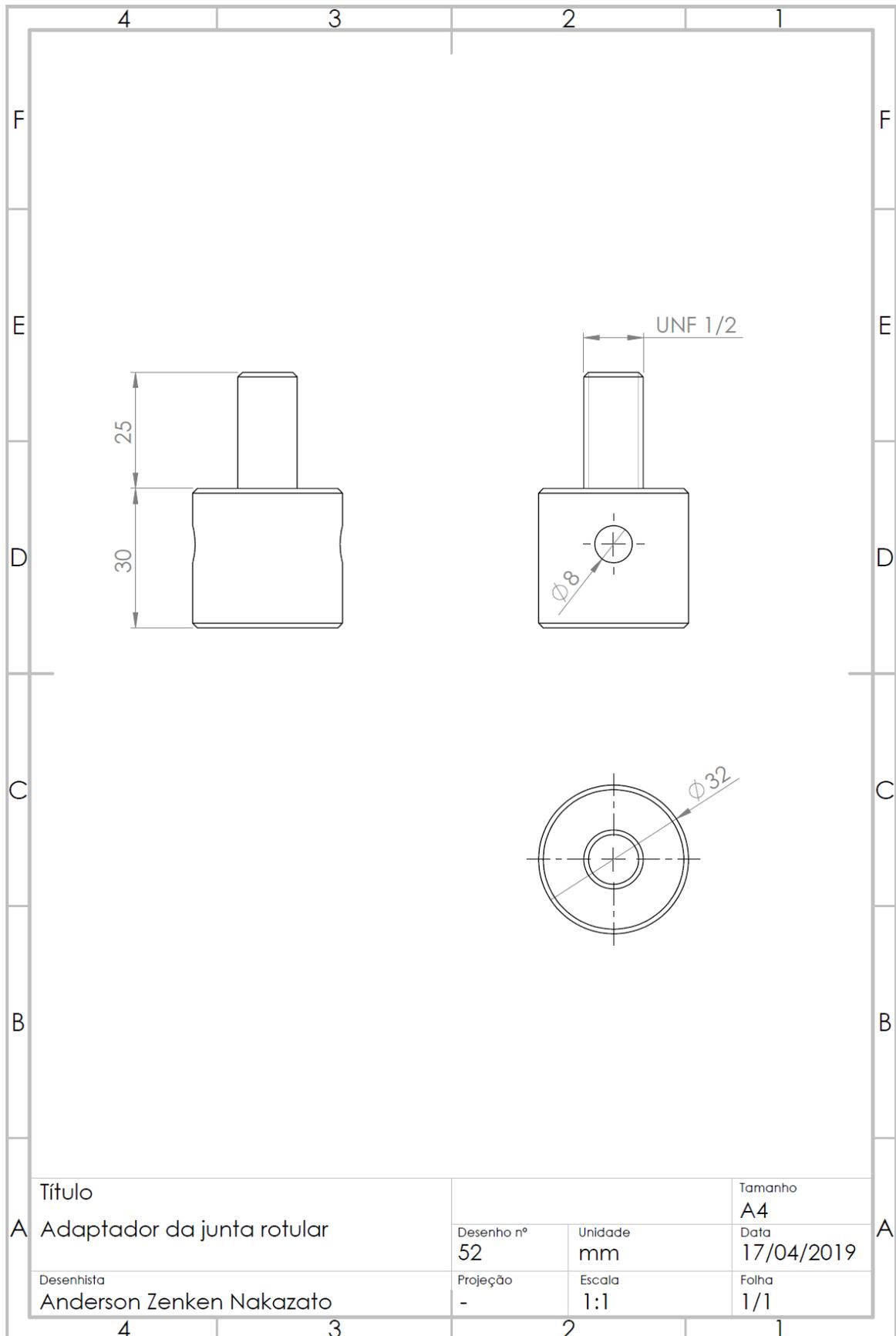
APÊNDICE D – Desenhos de montagem e fabricação do equipamento.

(continuação)



APÊNDICE D – Desenhos de montagem e fabricação do equipamento.

(continuação)



APÊNDICE D – Desenhos de montagem e fabricação do equipamento.

(conclusão)

