



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIAS MECÂNICAS

José Eduardo Guizzardi

**DESENVOLVIMENTO DO PROJETO MECÂNICO DO CARROSSEL DE FADIGA
PARA AVALIAÇÃO DE ESTRUTURAS DE PAVIMENTO RODOVIÁRIO -
CAMPUS UFSC/JOINVILLE**

Joinville - SC

2021

José Eduardo Guizzardi

**DESENVOLVIMENTO DO PROJETO MECÂNICO DO CARROSSEL DE FADIGA
PARA AVALIAÇÃO DE ESTRUTURAS DE PAVIMENTO RODOVIÁRIO -
CAMPUS UFSC/JOINVILLE**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas (Pós-ECM) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia e Ciências Mecânicas.

Orientador: Prof. Breno Salgado Barra, Dr. Eng.

Joinville - SC

2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Guizzardi, José Eduardo
DESENVOLVIMENTO DO PROJETO MECÂNICO DO CARROSSEL DE
FADIGA PARA AVALIAÇÃO DE ESTRUTURAS DE PAVIMENTO
RODOVIÁRIO - CAMPUS UFSC/JOINVILLE / José Eduardo
Guizzardi ; orientador, Breno Salgado Barra, 2021.
252 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Campus Joinville, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia e Ciências Mecânicas, Joinville, 2021.

Inclui referências.

1. Engenharia e Ciências Mecânicas. 2. carrossel de
fadiga. 3. projeto mecânico. 4. estrutura. 5. pavimento. I.
Barra, Breno Salgado. II. Universidade Federal de Santa
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências
Mecânicas. III. Título.

José Eduardo Guizzardi

**DESENVOLVIMENTO DO PROJETO MECÂNICO DO CARROSSEL DE FADIGA
PARA AVALIAÇÃO DE ESTRUTURAS DE PAVIMENTO RODOVIÁRIO -
CAMPUS UFSC/JOINVILLE**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Leto Momm, Dr. Eng.

Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Prof. Alexandre Mikowski, Dr. Fs.

Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Prof. Yader Alfonso Guerrero Pérez, Dr. Eng.

Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia e Ciências Mecânicas.

Prof. Rafael de Camargo Catapan, Dr. Eng.

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas

Prof. Breno Salgado Barra, Dr. Eng.

Orientador

Joinville, 2021.

Aos meus pais, Maria Aparecida e Bruno, por sempre me incentivarem e motivarem com as palavras certas.

A minha esposa Lúcia e a meus Filhos Laís e Davi, por terem cedido uma parte do tempo de pai e esposo, a fim de que eu pudesse desenvolver este trabalho, meu muito obrigado.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, pela linda família que me deu e pelas boas oportunidades que tive nesta vida.

Ao professor Dr. Alexandre Mikowski pelos ensinamentos e por sempre me incentivar durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores Dr. Leto Momm e Dr. Yader Alfonso Guerrero Pérez, por terem proposto valiosas colocações para esta pesquisa.

Ao aluno Altamiro Allebrandt Junior, meus agradecimentos por ajudar no desenvolvimento de alguns desenhos deste projeto.

Aos professores que estiveram comigo durante toda caminhada proporcionando cada vez mais o interesse pela pesquisa.

Aos meus colegas e amigos da UFSC por sempre perguntarem '*como está o andamento da dissertação?*' e me proporcionarem incentivo para terminar o trabalho com mérito.

Por fim, gostaria de fazer um agradecimento especial ao meu orientador Prof. Dr. Breno Salgado Barra, pelo grande incentivo desde o início, por sempre estar disposto a me ajudar e a me auxiliar, pela confiança depositada em mim para a realização deste projeto, meu muito obrigado.

RESUMO

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver o projeto mecânico do carrossel de fadiga da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Campus Joinville, capaz de realizar testes em verdadeira grandeza sob carregamento dinâmico; para verificação do desempenho mecânico de estruturas de pavimento, a fim de simular as condições mais próximas possíveis às solicitações aplicadas em campo durante a vida útil estabelecida em projeto, porém, em período reduzido. Para tanto, tomou-se como base para a definição do modelo a ser projetado, o carrossel de fadiga utilizado nas instalações da *Université Gustave Eiffel* (UGE), de Nantes/França, previamente denominado *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LCPC) e *Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux* (IFSTTAR). O modelo adotado, quando comparado aos equipamentos verificados nos principais centros de pesquisa na área de pavimentação do mundo para a mesma finalidade, apresentou geometria com melhor capacidade de trabalho integralmente controlado por automação, além de maior versatilidade na adaptação de diversas configurações de eixo e de suas respectivas cargas, possibilidade de aplicação de velocidades reais de tráfego e, de movimentos de varredura da seção transversal do pavimento pelos eixos solicitantes. Propõe-se nesta pesquisa, portanto, adaptações ao projeto concebido pelos franceses, com o intuito de adequar a sua aplicação ao contexto brasileiro, com destaque para a possibilidade de acoplamento de configurações reais de eixos de caminhões da frota nacional, permitindo assim maior proximidade às condições de distribuição de cargas cotidianamente aplicadas sobre as estruturas de pavimento. Os resultados obtidos com esta proposição de projeto contribuem à comunidade acadêmico-científico-tecnológica, no que diz respeito à concepção de um equipamento com configuração inédita na América Latina, que permita aferir com acurácia a relação campo/laboratório nas equações racionais de dimensionamento de estruturas de pavimento para o Brasil, bem como permitir testes prévios de desempenho às aplicações definitivas em campo, para subsidiar os projetistas em suas análises técnicas, a partir de monitoramentos em tempo real e sob carga dinâmica.

Palavras-chave: carrossel de fadiga, projeto mecânico, estrutura, pavimento.

ABSTRACT

The main aim of this research is to develop the mechanical design of the fatigue carousel from Federal University of Santa Catarina (UFSC), Campus Joinville, which is capable to carry out true-scale test under dynamic loading, in order to verify the mechanical behavior of pavement structures, aiming to simulate the closest loading application conditions observed in the field along the service life established in design procedures, however, in shorter period. Therefore, it was taken as base-model the fatigue carousel used in *Université Gustave Eiffel* (UGE) premises, from Nantes/France, formerly named as *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LCPC) e *Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux* (IFSTTAR). The model adopted, when compared to other existing facilities in the main paving research centers in the world for the same purpose, has presented geometric profile with better working capacity to be controlled entirely by automation systems, besides more versatility to be adapted to distinct axle loading configurations, traffic speed variations and wheel transverse sweep movements. So, they are proposed adjustments to the French model for fitting its application to the Brazilian context, highlighting the possibility of coupling real national axle loading configurations, thus allowing greater proximity to the load distribution conditions applied daily on the pavement structures. The results obtained with this design proposition contribute to scientific-academic-technologic community, with regards to conception of an equipment of unprecedented configuration in Latin America, able to accurately measure field/laboratory ratios to be inserted in rational pavement design equations for Brazil, as well as to feasible performance tests prior to definite field constructions, in order to subsidize designers in technical analyses, taking into account real-time monitoring and under dynamic loading application.

Palavras-chave: fatigue carousel, mechanical design, structure, pavement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	- Fluxograma da pesquisa	23
Figura 2.1	- Teddington Road Testing Machine	30
Figura 2.2	- Bureau of Public Roads test track	31
Figura 2.3	- Road Research Laboratory - Road Machine	32
Figura 2.4	- Detalhe do sistema servo-controlado do RRL	32
Figura 2.5	- WASHO road test	33
Figura 2.6	- Visão geral da forma geométrica e das seções teste da WASHO Road Test	34
Figura 2.7	- AASHO Road Test: (a) construção e (b) disposição geral do traçado	36
Figura 2.8	- Visão geral da disposição dos circuitos fechados (loops) da AASHO Road Test	37
Figura 2.9	- Desenho esquemático das seções teste da AASHO Road Test	38
Figura 2.10	- Visão geral das instalações da manège de fatigue do LCPC	43
Figura 2.11	- Eixo (a) simples de roda dupla (ESRD), (b) tandem duplo (ETD) e (c) tandem triplo (ETT)	43
Figura 2.12	- Braços mecânicos	44
Figura 2.13	- Torre central e respectivo módulo eletromecânico de acionamento	44
Figura 2.14	- Desacoplamento dos braços mecânicos da torre central	45
Figura 2.15	- Estrutura de concreto reforçado do anel C	46
Figura 2.16	- Procedimentos de instrumentação, auscultação e monitoramento	47
Figura 2.17	- Visão geral das instalações da pista experimental do CEDEX	49
Figura 2.18	- Módulo automatizado de acoplamento dos eixos solicitantes	49
Figura 2.19	- Desenho esquemático da disposição das seções teste	50
Figura 2.20	- Desenho esquemático da disposição das seções teste	51
Figura 2.21	- Pista experimental CAPTIF	54
Figura 2.22	- Sistema de tração hidráulico das rodas	54
Figura 2.23	- Módulo operacional SLAVE	55
Figura 2.24	- Desenho esquemático da CAPTIF e respectiva faixa trafegável na pista experimental	55
Figura 2.25	- Pista experimental do IPR	56
Figura 2.26	- Visão geral do HVS/Dynatest®	59

Figura 2.27	- Eixo solicitante do HVS/Dynatest®	60
Figura 2.28	- Equipamento FABAC: (a) visão geral e (b) princípio de funcionamento	62
Figura 2.29	- Avaliação de afundamentos nas trilhas de roda, aderência pneu pavimento e desgaste superficial de revestimentos urbanos com a utilização do equipamento FABAC	62
Figura 2.30	- Módulo linear de testes do LAPAV/UFRGS	63
Figura 2.31	- Chassi veicular	67
Figura 2.32	- Sistema de suspensão rígida	68
Figura 2.33	- Sistema de suspensão independente	68
Figura 2.34	- Sistema de suspensão semi-independente	69
Figura 2.35	- Sistema de suspensão rígida para eixos tandem	69
Figura 2.36	- Feixe de mola	70
Figura 2.37	- Mola pneumática	71
Figura 2.38	- Mola helicoidal	71
Figura 2.39	- Amortecedor hidráulico e seus componentes internos	73
Figura 3.1	- Opção 1 de área para implantação do projeto no condomínio industrial Perini Business Park	75
Figura 3.2	- Opção 2 de área para implantação do projeto na área da Curva do Arroz	76
Figura 3.3	- Dimensões gerais da pista de testes	78
Figura 3.4	- Desenho da estrutura em concreto armado da pista de testes	79
Figura 3.5	- Elementos mecânicos do carrossel de fadiga	81
Figura 3.6	- Região considerada para a determinação das áreas transversais à direção do movimento circular	86
Figura 3.7	- Visão geral da base e da torre central de acionamento	90
Figura 3.8	- Fluxograma de controle do carrossel de fadiga por sistema CLP	91
Figura 3.9	- Desenho esquemático do sistema de acionamento central	92
Figura 3.10	- Motorredutor do sistema de acionamento principal	92
Figura 3.11	- Elementos componentes do braço de teste	94
Figura 3.12	- Visão geral do braço de teste na composição do carrossel de fadiga	94
Figura 3.13	- Braço principal do carrossel de fadiga	95
Figura 3.14	- Braço secundário do carrossel de fadiga	96

Figura 3.15	- Placas de contrapeso e respectivo sistema de travamento	97
Figura 3.16	- Sistemas de regulagem do trem de apoio	98
Figura 3.17	- Sistemas de ajustes vertical e cambagem	99
Figura 3.18	- Sistemas de alinhamento de trajetória das rodas	100
Figura 3.19	- Visão geral do apoio intermediário do braço de teste	100
Figura 3.20	- Vistas frontal e lateral do módulo de acoplamento do trem de eixos	102
Figura 3.21	- Sistemas de guias e olhal de travamento do módulo de acoplamento	103
Figura 3.22	- Sistema de acionamento do módulo de acoplamento	104
Figura 3.23	- Motorreductor de acionamento do módulo de acoplamento	104
Figura 3.24	- Desenho esquemático da estrutura do módulo de acoplamento	106
Figura 3.25	- Estrutura do módulo de acoplamento com a cobertura aerodinâmica	106
Figura 3.26	- Detalhe do flange de ligação e das buchas excêntricas de alinhamento do trem de eixos	108
Figura 3.27	- Desenho esquemático do trem de eixos	109
Figura 3.28	- Projeto do circuito pneumático	110
Figura 3.29	- Distribuição das forças em N no braço de teste. À esquerda do braço tem-se a fixação na torre central de acionamento e à direita tem-se a fixação no módulo de acoplamento	111
Figura 3.30	- Suspensão de eixos rígidos em tandem duplo	113
Figura 3.31	- Geometria dos eixos em tandem triplo e tandem duplo alinhados a trajetória circular do carrossel e o ângulo entre eixos	115
Figura 3.32	- Deslocamento do conjunto eixo e mola, com geometria simplificada, considerando o comprimento da mola de 1150,0 mm e a distância entre molas de 950,0 mm, para um giro de 4,1° em relação ao chassi	116
Figura 3.33	- Solução desenvolvida para alinhamento dos eixos em tandem no carrossel de fadiga	117
Figura 3.34	- Suspensão de eixos rígidos em tandem triplo	118
Figura 3.35	- Vista em planta do eixo à esquerda com 0° e à direita com 4,1° em relação ao chassi	118
Figura 3.36	- Base adaptadora para fixação de chassi com eixos simples, duplo ou triplo	119

Figura 3.37 - Braço do carrossel de fadiga com eixos simples de roda dupla (a), tandem duplo (b) e triplo (c)

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	- Carga por eixo nas diferentes pistas e faixas de teste	39
Tabela 3.1	- Coeficiente relativo ao tipo de superfície do pavimento	84
Tabela 3.2	- Combinações possíveis e respectivas perdas	88
Tabela 3.3	- Especificações do motorreductor do sistema de acionamento central - modelo RF167DRE315L4/TF	93
Tabela 3.4	- Especificações do conjunto motorreductor de acionamento do módulo de acoplamento - modelo R87DRN100L4	105
Tabela 3.5	- Combinações possíveis e respectivas perdas, incluindo a força peso do braço de teste	112

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHO	American Association of State Highway Officials
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AF	Área de falla (área de trincamento)
AISI	American Iron and Steel Institute
ALF	Accelerated Loading Facility
ALT	Accelerated Loading Test
APT	Accelerated Pavement Test
CAPTIF	Canterbury Accelerated Pavement Testing Indoor Facility
CBR	Califórnia Bearing Ratio
CEDEX	Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas
CET	Centro de Estudios del Transporte
COPPE	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da UFRJ
CPTu	Piezo Cone Penetration Test
CLP	Controlador Lógico Programável
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte
DRCR	Direction des Routes et de la Circulation Routière
ESRD	Eixo Simples de Roda Dupla
ETD	Eixo Tandem Duplo
ETT	Eixo Tandem Triplo
FABAC	Fatigue du Béton Armé Continu
FWD	Falling Weight Deflectometer
GF	Gravidad de la Falla (tipo/gravidade de trincamento)
HVS	Heavy Vehicle Simulator
IFSTTAR	Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux
IPR	Instituto de Pesquisas Rodoviárias
ISC	Índice de Suporte Califórnia
LAPAV	Laboratório de Pavimentação
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
LPC	Laboratoire des Ponts et Chaussées
LF	Longitud de la Falla (comprimento de trinca)

NZTA	New Zealand Transport Agency
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PLC	Programmable Logic Control
PRC	Profundidad de la Roderá al Centro (afundamento na trilha de roda no centro da área de carregamento)
PRM	Profundidad de la Roderá Máxima (afundamento na trilha de roda máximo)
PSI	Present Serviceability Index
PSR	Present Serviceability Rating
RRL	Road Research Laboratory
SAE	Society of Automotive Engineers
SETRA	Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes
SLAVE	Simulated Loading and Vehicle Emulator
TDR	Time Domain Reflectometry
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UGE	Université Gustave Eiffel
USACE	United States Army Corps of Engineers
VMD	Volume Médio Diário
WASHO	Western Association of State Highway Officials
3C	Caminhões 'trucados' compostos de um eixo simples de roda simples no cavalo mecânico e um eixo tandem duplo na carroceria
2S1	Caminhões/carretas semi-reboque compostos de um eixo simples de roda simples e um eixo simples de roda dupla no cavalo mecânico e um eixo simples de roda dupla na carroceria
3S2	Caminhões/carretas semi-reboque compostos de um eixo simples de roda simples e um eixo tandem duplo no cavalo mecânico e dois eixos simples de roda dupla ou um eixo tandem duplo na carroceria

SUMÁRIO

1	-	INTRODUÇÃO	19
1.1	-	OBJETIVOS DA PESQUISA	21
1.1.1	-	Objetivo Geral	21
1.1.2	-	Objetivos Específicos	21
1.2	-	PROCEDIMENTOS PARA ALCANÇAR OS OBJETIVOS	22
1.3	-	DELIMITAÇÕES DO ESPAÇO DA PESQUISA	23
1.4	-	JUSTIFICATIVA: RELEVÂNCIA DO TEMA	24
1.5	-	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	27
2	-	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	28
2.1	-	CONSIDERAÇÕES GERAIS	28
2.2	-	PISTAS EXPERIMENTAIS	29
2.2.1	-	Teddington Road Testing Machine	29
2.2.2	-	Bureau of Public Roads test track	30
2.2.3	-	Road Research Laboratory – Road Machine	31
2.2.4	-	WASHO Road Test	33
2.2.5	-	AASHO Road Test	36
2.2.6	-	Pista Experimental do LCPC – Manège de Fatigue	40
2.2.7	-	Pista Experimental do CEDEX	48
2.2.8	-	Pista Experimental CAPTIF	53
2.2.9	-	Pista Experimental do IPR	56
2.3	-	MÓDULOS LINEARES DE TESTES	58
2.3.1	-	Heavy Vehicle Simulator – HVS	58
2.3.2	-	FABAC – LCPC	61
2.3.3	-	LPAV/UFRGS	63
2.4	-	CONSIDERAÇÕES SOBRE A ESCOLHA DO MODELO PARA PROJETO	64
2.5	-	SUSPENSÕES VEICULARES	67
2.5.1	-	Molas	70
2.5.2	-	Amortecedores	72

3	-	PROJETO DO CARROSSEL DE FADIGA	74
3.1	-	CONSIDERAÇÕES GERAIS	74
3.2	-	LOCALIZAÇÃO	75
3.3	-	CARACTERÍSTICAS GERAIS DA PISTA DE TESTES	77
3.4	-	CARACTERÍSTICAS GERAIS DO CARROSSEL DE FADIGA	80
3.4.1	-	Base e Torre Central de Acionamento	82
3.4.1.1	-	Prerrogativas técnicas	82
3.4.1.2	-	Forças atuantes	83
3.4.1.3	-	Definição das configurações dos carregamentos solicitantes e da potência instalada	87
3.4.1.4	-	Concepção mecânica	89
3.4.2	-	Braço de Teste	93
3.4.2.1	-	Prerrogativas técnicas	94
3.4.2.2	-	Concepção mecânica	95
3.4.3	-	Trem de Apoio	97
3.4.3.1	-	Prerrogativas técnicas	97
3.4.3.2	-	Concepção mecânica	99
3.4.4	-	Módulo de Acoplamento	101
3.4.4.1	-	Prerrogativas técnicas	101
3.4.4.2	-	Concepção mecânica	101
3.4.5	-	Trem de Eixos	107
3.4.5.1	-	Prerrogativas técnicas	107
3.4.5.2	-	Concepção mecânica	107
3.4.5.3	-	Considerações sobre o cálculo de potência instalada no acionamento central	110
3.4.6	-	Sistema de Acoplamento de Eixos Inteiros	112
3.4.6.1	-	Prerrogativas técnicas	112
3.4.6.2	-	Concepção mecânica	113
4	-	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	121
		REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	124
		ANEXOS	133
		ANEXO I - BASE E TORRE CENTRAL DE ACIONAMENTO	134
		ANEXO II - BRAÇO PRINCIPAL	179

ANEXO III - BRAÇO SECUNDÁRIO	187
ANEXO IV - TREM DE APOIO	192
ANEXO V - MÓDULO DE ACOPLAMENTO E TREM DE EIXOS	205
ANEXO VI - SISTEMA DE ACOPLAMENTO DE EIXOS INTEIROS	235

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O modal rodoviário é preponderante no Brasil, correspondendo à cerca de 65% do transporte de mercadorias, bens e serviços, e aproximadamente 85% dos passageiros. A malha viária federal brasileira dispõe atualmente de uma extensão total de 75.553,1 km, sendo 65.527,8 km pavimentados (86,28%). Entretanto, quando são analisados os números que englobam também as esferas estadual e municipal, o cenário adquire uma configuração desfavorável, pois dos 1.720.700 km existentes, apenas 12,41% (213.452,8 km) se encontram pavimentados e, deste pequeno percentual, mais da metade (54,59%) possuem as condições dos pavimentos avaliadas como regular a péssimo (MINFRA, 2020).

De acordo com o Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO) do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2020), o custo médio por quilômetro da construção de uma estrutura de pavimento considerada convencional, isto é, sem a contabilização de obras de arte, uso de insumos apenas levando em conta os beneficiamentos industriais corriqueiros de produção, e os custos unitários dos serviços executivos usuais, perfaz o montante de aproximadamente R\$ 1,5 milhão, valor que pode sofrer alterações de até 80% dependendo do aporte tecnológico das matrizes de insumos utilizados na composição dos materiais, sobretudo do ligante betuminoso.

Os indicadores apresentados indicam que há muito a ser feito para garantir o atendimento adequado às necessidades de crescimento econômico do país, bem como no sentido de se atentar para o zelo que deve haver com o erário público nos investimentos em infraestrutura.

No contexto do dimensionamento das estruturas de pavimento, o objetivo principal é assegurar que resistam a um determinado número de ciclos de carregamento, conforme o estudo de tráfego da via em que será aplicado, durante o período de serviço estabelecido. Entretanto, apenas a realização de testes laboratoriais de desempenho mecânico e funcional, não é suficiente para suprir o projetista sobre as reais condições de solicitação que ocorrem nas situações práticas de campo (INGLE e BHOSALE, 2019; GHADIMI et al., 2013; JONES et al., 2012).

Desta forma, no âmbito das metodologias racionais, há a necessidade de se estabelecer uma relação próxima entre o modelo matemático utilizado nas equações constitutivas do método de dimensionamento e as condições reais de solicitação em campo, as quais compreendem um conjunto de variáveis aleatórias existentes no ambiente, como a variação de temperatura, umidade, precipitação pluvial, frequência de solicitação, intensidade e posicionamento das cargas

aplicadas. Esta relação é denominada campo/laboratório, e afeta de forma decisiva o desempenho dos pavimentos, sobretudo betuminosos, que são regidos pelo comportamento viscoelástico linear das misturas asfálticas sob o domínio dinâmico de sollicitação, fatores que também devem ser considerados nos cálculos (CHABOT et al, 2010; GUIDE TECHNIQUE, 1994).

Dado o exposto, verifica-se que testes realizados em verdadeira grandeza, a partir do monitoramento instrumentado das seções dos pavimentos, são fundamentais para simular a resposta estrutural real relacionada às leis de comportamento mecânico dos materiais (UNGUREANU et al., 2020; QIAN et al., 2019; OTTO et al., 2017; TIAN et al., 2017; JI et al., 2013; SELVARAJ, 2012).

Partindo desta premissa, as pistas de testes e módulos lineares de teste têm sido desenvolvidos e utilizados com o objetivo de aferir o desempenho mecânico e funcional de estruturas de pavimento, em tempo reduzido, de forma que os resultados obtidos possam ser comparados aos modelos de previsão de desempenho aportados nas equações constitutivas das metodologias de cálculo (FLADVAD e ERLINGSSON, 2021; HUANG et al., 2017; WEST et al., 2017; JI et al., 2016; XU e MOHAMMAD, 2011).

Diversos protótipos foram concebidos e construídos desde o início do século passado, envolvendo variadas configurações geométricas e sistemas de comando, desde os não autônomos até os completamente automatizados, auxiliando na elaboração de pesquisas e metodologias de dimensionamento de pavimentos no transcurso do tempo (LAY et al., 2021; HORNYCH et al., 2008; ROMERO et al., 1992; HRB, 1962).

A contribuição desta pesquisa envolve a área de materiais e projeto mecânico, a partir da proposição do desenvolvimento de um equipamento em verdadeira grandeza, capaz de simular as condições reais de tráfego em estruturas de pavimento nas instalações da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Campus de Joinville, cumprindo parte da missão para implantação de um centro de excelência em pavimentação no país.

A escolha do modelo baseado no carrossel de fadiga francês da *Université Gustave Eiffel* (UGE), de Nantes, França, previamente denominado *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LCPC) e *Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux* (IFSTTAR), foi realizada a partir de um levantamento histórico sobre pistas de testes e módulos lineares de teste utilizados no mundo, combinando características como: melhor capacidade de trabalho integralmente controlado por automação, maior versatilidade na adaptação de diversas configurações de eixo e de suas respectivas cargas, possibilidade de aplicação de velocidades reais de tráfego e, de movimentos de varredura da seção transversal do pavimento pelos eixos sollicitantes.

1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver o projeto mecânico de um carrossel de fadiga capaz de simular condições reais de solicitação pelo tráfego, em escala de verdadeira grandeza, para análise mecânica e funcional de estruturas de pavimento, a ser construído nas instalações da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Campus de Joinville.

1.1.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos têm-se:

- Realizar um levantamento sobre as características físicas, mecânicas e técnicas de alguns tipos de pistas e módulos lineares de teste em âmbito mundial, para fins de avaliação mecânica e funcional de estruturas de pavimento, abordando as principais características, vantagens e desvantagens;
- Apresentar os argumentos técnicos que conduziram à escolha do carrossel de fadiga como modelo de base para o projeto proposto, a partir das informações técnicas mencionadas no contexto do item anterior;
- Elaborar o projeto mecânico detalhado de um carrossel de fadiga, compreendendo a apresentação de seus principais componentes, prerrogativas técnicas, bem como a especificação dos materiais a serem utilizados na construção;
- Propor um modelo que permita o controle dos acionamentos de forma totalmente automatizada, acoplando eixos inteiros com sistema de suspensão, compatíveis com a frota de veículos de carga fabricada pela indústria brasileira, como o eixo simples de roda dupla (ESRD), tandem duplo (ETD) e triplo (ETT), mas também adaptável a qualquer configuração da indústria mundial, para simulação das condições reais de solicitação das estruturas de pavimento, possibilitando obter relações campo/laboratório acuradas e confiáveis para abastecimento das equações constitutivas, no contexto da elaboração de uma metodologia de cunho racional para o Brasil.

1.2 PROCEDIMENTOS PARA ALCANÇAR OS OBJETIVOS

A execução deste trabalho iniciará com o levantamento histórico de alguns tipos de pistas de testes e módulos lineares de teste utilizados no mundo, a fim de possibilitar o entendimento das diversas configurações geométricas e operacionais disponíveis.

Cabe esclarecer que a reunião destas informações não esgota o assunto, pois existem muitas instalações e equipamentos em escala global desta natureza, o que tornaria a revisão bibliográfica extensa, repetitiva e cansativa aos leitores. Portanto, o material apresentado nesta pesquisa foi selecionado com base na representatividade das instalações abordadas, em relação a diversas outras soluções de projeto que dispõem dos mesmos princípios conceptivos e de utilização. Porém, respeitando as particularidades de cada uma.

A partir das informações obtidas durante a construção do referencial bibliográfico, foi possível a formação de fundamentação para a escolha do modelo de base do projeto desenvolvido. Neste contexto, foi escolhido o modelo do carrossel de fadiga utilizado na *Université Gustave Eiffel (UGE)*, de Nantes, França, o qual será descrito de forma detalhada no capítulo seguinte.

Ato contínuo foi procedido o estudo da dinâmica do modelo selecionado, com intuito de dimensionar a potência necessária para o acionamento do sistema motriz principal, para então definir as especificações dos elementos de máquinas envolvidos no projeto, como os braços de teste, sistemas de apoio estrutural, pneumáticos e elétricos correlatos, além dos dispositivos de acoplamento dos eixos solicitantes e respectivos conjuntos de suspensão.

A concepção mecânica dos braços foi baseada nas condições e características do máximo esforço gerado sobre o equipamento. No caso do projeto do sistema de acoplamento dos conjuntos de eixos solicitantes com suspensão real de veículos, foi realizado para que seja possível a adaptação de configurações de eixos da frota de transportes de carga fabricados na indústria brasileira, mas não restrito a estes, sendo possível adaptar qualquer configuração de eixo utilizada no mundo.

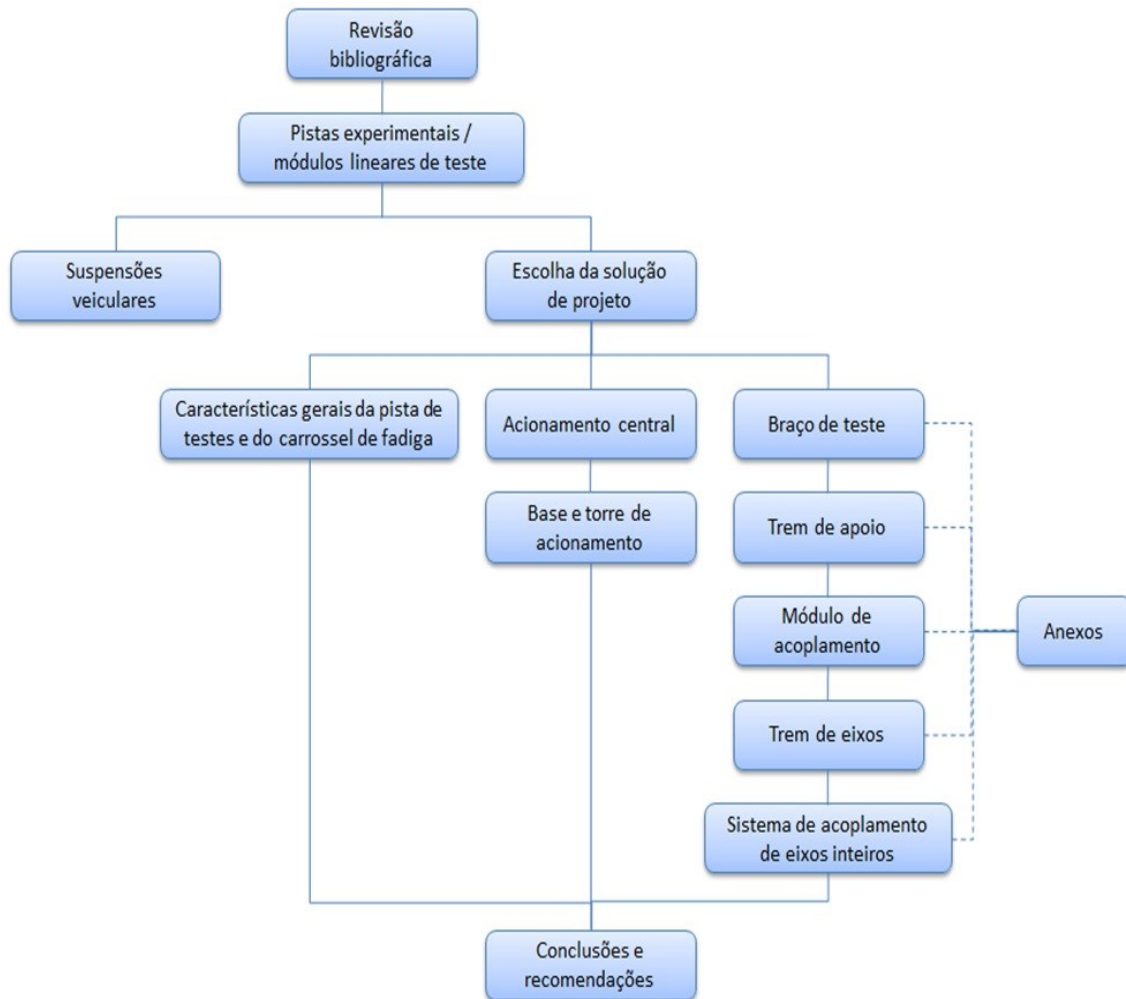
O ambiente computacional utilizado no desenvolvimento do projeto foi a ferramenta de cálculo SolidWorks®, que permite tanto a elaboração dos desenhos com as devidas especificações mecânicas necessárias, bem como a simulação do efeito dinâmico de movimentação do carrossel em condições reais de teste.

As apresentações dos elementos mecânicos e sistemas correlatos de acionamento são realizados no corpo do trabalho de forma abrangente, iniciando com a visão geral do carrossel

de fadiga tomado como modelo de projeto, seguido da descrição dos princípios de funcionamento, prerrogativas técnicas, e ilustração geral dos desenhos desenvolvidos em cada caso solução. Maiores detalhes a respeito das ilustrações e informações técnicas são disponibilizados em forma de Anexos.

A Figura 1.1 ilustra o fluxograma estabelecido para a execução da pesquisa.

Figura 1.1 - Fluxograma da pesquisa.



Fonte: Autor.

1.3 DELIMITAÇÕES DO ESPAÇO DA PESQUISA

O desenvolvimento deste trabalho foi limitado ao ambiente computacional, não sendo objeto de sua execução a realização de testes laboratoriais e de campo, bem como a construção de protótipos ou similares, mesmo em escala reduzida, devido às restrições de tempo e de orçamento necessários para o aporte destas providências. Assim, o projeto proposto é baseado

tanto nas informações técnicas obtidas durante o levantamento das características mecânicas, físicas e técnicas na abordagem bibliográfica, quanto pelo fornecimento de especificações técnicas obtidas em cooperação científica com o corpo técnico responsável pelo carrossel de fadiga da *Université Gustave Eiffel* (UGE).

O projeto proposto neste trabalho é destinado à concepção mecânica dos elementos constituintes do carrossel de fadiga. Logo, não abrange os projetos estrutural dos componentes, hidráulico para simulação da variação de nível d'água nas estruturas de pavimento, bem como elétrico que compreenda o cabeamento necessário à instrumentação do anel da pista de testes.

Ainda, foram consideradas para análise apenas instalações destinadas exclusivamente aos testes em verdadeira grandeza para fins de avaliação de estruturas de pavimento rodoviário, não tendo sido abrangidas soluções voltadas a outros propósitos existentes no mercado, como das indústrias automobilísticas, aeronáutica e de pneus, por exemplo.

1.4 JUSTIFICATIVA: RELEVÂNCIA DO TEMA

O adequado entendimento e modelização dos fenômenos mecânicos e físicos que ocorrem nas estruturas de pavimento relacionados à ação do tráfego e do intemperismo, com destaque para fadiga, deformação permanente, desagregação do conjunto granular-ligante e envelhecimento do revestimento, depende da observação direta e da instrumentação do real comportamento dos materiais (KOBISCH, 2000).

Para tanto, a aferição do desempenho dos pavimentos nestas condições deve ser procedida a partir de bancos de dados provenientes do monitoramento de solicitações realizadas em verdadeira grandeza e em ambiente aberto, podendo ser utilizadas seções teste em rodovias e vias urbanas, pistas experimentais e módulos lineares de testes. Os dados mencionados permitem a derivação de leis de comportamento dos materiais relativas à evolução dos esforços e fenômenos envolvidos, dependendo do tipo de estrutura, tráfego e sucessivas operações de manutenção em cada caso (BRILLET et al., 2006).

Entretanto, é necessário complementar esta abordagem estatística com informações correspondentes ao comportamento mecânico das matrizes envolvidas no projeto, de forma acurada, compreendendo a identificação e configuração das cargas aplicadas e instrumentação da resposta das estruturas de pavimento. Neste contexto, tem-se que a espera por informações oriundas de condições reais do tráfego é considerada muito extensa, devido normalmente à longa vida de serviço considerada nos projetos, que em alguns casos pode chegar até 30 anos (CHABOT et al. 2008).

Logo, este cenário desencadeia o consequente interesse pela proposição de testes em condições aceleradas de carregamento, os quais permitem o desenvolvimento e a observação de mecanismos de deterioração de pavimentos em escala real, porém, em um período muito mais curto se comparado à resposta fornecida pela rede viária convencional. Além disso, estas instalações possibilitam maior controle das condições de teste, a partir da instrumentação das estruturas de pavimento, fornecendo dados mais acurados, representativos e confiáveis (BALAY e AUNIS, 1998).

O resultado destes testes em verdadeira grandeza abastece o projetista não apenas com dados sobre a resposta das estruturas dos pavimentos, mas com a descrição dos fenômenos físicos e mecânicos capazes de serem interpretados e construtores dos modelos de previsão de desempenho dos materiais, produzindo as equações constitutivas das metodologias de dimensionamento, notadamente as de cunho racional.

Com a compreensão sobre a maneira como evoluem os fenômenos físicos e mecânicos na prática, os testes laboratoriais podem ser desenvolvidos a partir destas observações, a fim de que busquem a reprodução mais próxima possível das condições reais verificadas em campo. Assim, quando isto se comprova cientificamente, tem-se que a metodologia desenvolvida atingiu uma estreita relação campo/laboratório, ou seja, que o seu contexto analítico de abordagem é capaz de simular com forte confiabilidade o que ocorre na prática (PEREZ et al., 2007).

O método de cálculo para dimensionamento de pavimentos asfálticos praticado atualmente no Brasil (DNIT, 2006) é baseado no método do *United States Army Corps of Engineers* (USACE), que é de cunho empírico e concebido em condições já cientificamente ultrapassadas em relação à realidade atual dos próprios Estados Unidos da América.

Visa basicamente à análise da resistência dos materiais a partir do Índice de Suporte Califórnia (ISC), em que a determinação das espessuras das camadas é procedida sem qualquer critério racional físico e matemático, considerando ábacos, tabelas e inequações obsoletas e sem qualquer relação campo/laboratório. Ainda, a determinação do número de passagens do eixo padrão (N) dá-se pelo princípio da equivalência de eixos, que ignora a superposição dos efeitos das cargas nas camadas estruturais do pavimento, o que leva a um natural subdimensionamento das estruturas projetadas.

Neste contexto, verificando a necessidade de atualização deste método de dimensionamento e a demanda cada vez maior do volume de tráfego e das cargas por eixo nas rodovias brasileiras, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), em cooperação com a COPPE/UFRJ, elaborou a proposta de um novo Método de Dimensionamento Nacional de pavimentos, denominado MeDiNa (DNIT/IPR, 2020).

Entretanto, do material já disponibilizado ao conhecimento da comunidade científica nacional, verifica-se alguns pontos críticos descritos a seguir:

- Não considera condições específicas fundamentais como o comportamento viscoelástico dos materiais betuminosos;
- Não comporta solicitação por carregamento dinâmico das estruturas de pavimento;
- Não compreende o dano real das configurações de eixo sobre os materiais;
- Não considera a influência da frequência e da temperatura na resposta viscoelástica das misturas asfálticas;
- Persevera na manutenção do conceito de equivalência de eixo para a determinação do número de eixos padrão durante o período de projeto;
- Utiliza unicamente a elasticidade linear como modelo de comportamento para a análise de todos os materiais, não permitindo análises mais profundas dos sinais de deformação em flexão alternada na estrutura do pavimento, tomando em conta os efeitos dos fenômenos de relaxação e fluência dos materiais betuminosos;
- Preconiza como princípio básico o critério de admissibilidade de até 30% de área trincada do pavimento, contrariando a premissa técnica básica de que pavimentos devem ser dimensionados para não trincar, além de abrir precedente para justificativas quanto a falhas de procedimentos executivos em serviços prestados;
- Considera a possibilidade de se dimensionar uma estrutura de pavimento em que as camadas não possuem aderência em suas interfaces, contrariando os princípios básicos de monoliticidade das estruturas, de aderência por adesão e de entrosagem dos materiais, de distribuição adequada das tensões às camadas subjacentes, e acarretando suscetibilidade extrema das camadas betuminosas aos esforços cisalhantes e tangenciais do tráfego, gerando fadiga precoce no pavimento.

O projeto proposto neste trabalho possui caráter de vanguarda científica na América Latina, pois é pioneiro na configuração proposta, sobretudo pela possibilidade de adaptação de eixos reais da frota de veículos de carga circulante no Brasil, mas também de qualquer outra configuração mundial. Porém, há que se tomar cuidado na escolha do modelo de teste acelerado que se pretende desenvolver ou utilizar, pois nem todas as configurações disponíveis no mercado ou passíveis de reprodução do projeto, compreendem as características adequadas para a realização da tomada de dados. Este aspecto será melhor abordado no capítulo 2.

Esta iniciativa permitirá a análise mecânica e funcional de estruturas de pavimento, de forma a contribuir para o desenvolvimento das equações constitutivas no processo de elaboração de uma metodologia racional de dimensionamento para o país, compreendendo o monitoramento em tempo real das seções de teste por instrumentação, possibilitando a determinação de relações campo/laboratório acuradas e com supedâneo nas propriedades e modelos de comportamento dos materiais.

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está organizado nos seguintes capítulos:

Capítulo 1: Introdução do tema ao leitor, deixando-o integrado à proposição da pesquisa e às etapas previstas para a sua execução.

Capítulo 2: Apresentação das características de algumas pistas experimentais e módulos lineares de teste utilizados no mundo, a partir de um levantamento histórico produzido no contexto de revisão bibliográfica, indicando ao final as motivações técnicas para a escolha do modelo proposto.

Capítulo 3: Desenvolvimento do projeto mecânico do carrossel de fadiga, identificando cada elemento e os sistemas de acionamento correlatos, abordando aspectos ilustrativos, princípios de funcionamento, prerrogativas e especificações técnicas.

Capítulo 4: Discorre sobre as conclusões oriundas do trabalho realizado e propõe recomendações para a continuidade do estudo em trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

As pistas experimentais começaram a ser construídas no início do século passado, entre os anos 1910 e 1920, com o objetivo de realizar ensaios experimentais em verdadeira grandeza sobre estruturas de pavimento para melhorar a qualidade das estradas. A partir destes estudos, verificou-se a possibilidade de observar a resposta em tempo e escala reais quando da solicitação por ciclos dinâmicos de aplicação de carregamento dos veículos.

Entretanto, os primeiros protótipos não dispunham de sofisticada solução tecnológica, até mesmo pela época em que foram projetados, dependendo da ação humana contínua, até mesmo para a condução dos veículos durante os testes em alguns casos, bem como de avaliações empíricas baseadas em observações diretas do corpo técnico envolvido sobre o estado das estruturas dos pavimentos após um dado número estabelecido de passagens do tráfego. Tais fatores tornavam as rotinas de trabalho desgastantes e com pouca acurácia científica a respeito do comportamento mecânico dos materiais.

A partir da década dos anos 30, iniciaram as primeiras experiências com sistemas servo-controlados, diminuindo a dependência da atuação humana, principalmente na condução de veículos de teste, acarretando em maior controle das velocidades, cargas por eixo e ciclos de carregamento aplicados, além da diminuição dos tempos de teste.

Porém, se as condições de trafegabilidade estavam se encaminhando para o domínio técnico-tecnológico, o mesmo ainda não podia ser assegurado sobre o monitoramento das estruturas de pavimento. As campanhas de instrumentação ainda eram muito incipientes e as metodologias de dimensionamento não compreendiam em seus escopos a determinação da relação campo/laboratório.

Esta limitação começou a ser dirimida ao final da década dos anos 70 e início dos anos 80, principalmente quando o princípio conceutivo da metodologia francesa de dimensionamento de estruturas de pavimento estabeleceu que o cálculo das deformações admissíveis dos materiais deveria ser procedido levando em conta a relação campo/laboratório, isto é, utilizando equações constitutivas que abrangessem a aferição da proximidade dos resultados obtidos nos testes laboratoriais face à resposta das estruturas dos pavimentos monitorados em testes de verdadeira grandeza.

Variações de equipamentos para testes em campo, mas também adaptáveis a instalações fechadas começaram a ser desenvolvidas em larga escala a partir de meados dos anos 80, e ganharam impulso nos anos 90, com o intuito de facilitar o transporte para qualquer seção experimental, dando origem aos denominados nesta pesquisa de módulos lineares de teste.

Dado o exposto, neste capítulo é apresentado um estudo histórico das principais pistas e módulos lineares de teste utilizados no mundo, abordando as características físicas e técnicas de cada logradouro ou equipamento, com o intuito de se construir o estado-da-arte em relação ao tema, a partir do conhecimento das soluções de engenharia aplicadas ao longo do tempo, permitindo obter informações necessárias para a tomada de decisão quanto à escolha do modelo adotado em projeto para esta pesquisa.

Também é realizada uma breve abordagem sobre os sistemas mais utilizados de suspensão veicular.

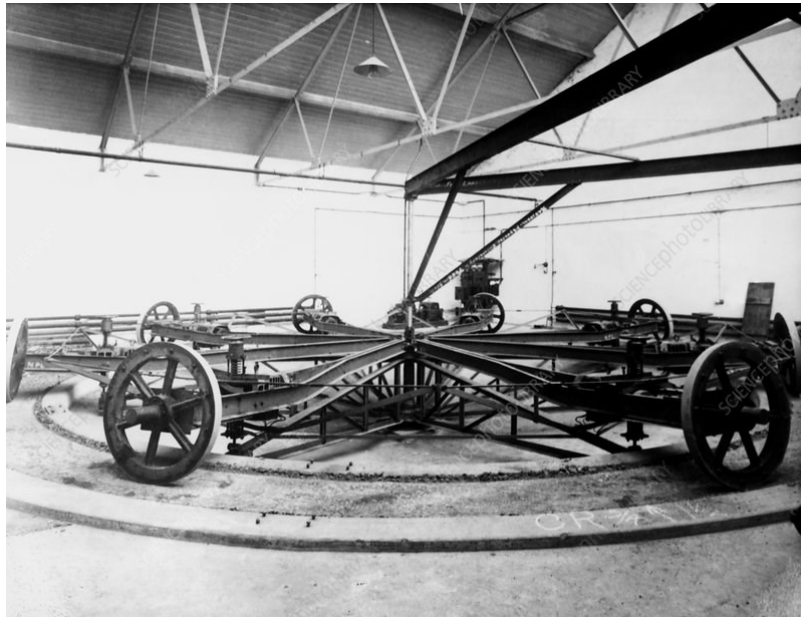
2.2 PISTAS EXPERIMENTAIS

Nos tópicos seguintes serão apresentadas algumas pistas experimentais, também denominadas pistas de testes, em que as características físicas e técnicas são representativas do estado-da-arte que se dispõe atualmente em escala global, em razão da impraticabilidade de se abordar todas as instalações deste tipo existentes no mundo.

2.2.1 Teddington Road Testing Machine

Entre 1911 e 1912, na cidade de Teddington, em Londres, foi construída a Teddington Road Testing Machine (Figura 2.1), a qual consistia de um conjunto de rodas com carregamento ajustável, em formato de carrossel, a fim de simular a requerida configuração dos veículos usuais do momento (MERIGHI et al., 2002).

Figura 2.1 - Teddington Road Testing Machine.



Fonte: Pimentel (2007).

A operação do equipamento era realizada em ambiente fechado com temperatura controlada. A carga máxima passível de aplicação era de 2.800 lbs (1.270 kg), com a possibilidade de desempenhar uma frequência de até 80.000 giros em um período de 24 horas (PIMENTEL, 2007).

O principal objetivo deste equipamento à época era determinar especificações para a estabilidade, isto é, a resistência à ruptura das misturas betuminosas. Entretanto, apresenta limitações para os padrões científicos e tecnológicos atuais, destacando o baixo limite máximo de carregamento e velocidade, capacidade de avaliação de uma seção teste por vez, ausência de instrumentação na estrutura do pavimento, configuração de eixos fixa. Ainda assim, o formato de carrossel foi inspirador para outros projetos que viriam a ser desenvolvidos no futuro.

2.2.2 Bureau of Public Roads test track

Em 1925, a necessidade de aprofundar testes com maior proximidade às condições de solicitação em campo, acarretou na construção da pista experimental do Bureau of Public Transportation, nos Estados Unidos (NARA, 1995).

O traçado da pista foi projetado em formato circular, bem como a configuração dos elementos geométricos das vias trafegáveis àquele momento foi reproduzida. A disposição das instalações se deu em ambiente aberto e a aplicação de carregamento realizada

diretamente por veículos operantes da frota circulante. Ainda, devido à maior circunferência do círculo construído, em relação à Teddington Road Testing Machine, foi possível testar diversas seções de estruturas de pavimento simultaneamente (Figura 2.2).

Figura 2.2 - Bureau of Public Roads test track.



Fonte: NARA (1995).

A vantagem deste tipo de solução é que permite a avaliação do desempenho mecânico de pavimentos em condições reais de influências intempéricas, sem a necessidade de controle ou simulação destas variáveis em ambiente fechado. Além disso, a aplicação de carregamento por veículos provenientes da frota circulante confere caráter mais preciso do dano causado aos pavimentos, em solicitação dinâmica.

Em contrapartida, a necessidade de condução dos veículos de teste por operadores humanos, torna o procedimento cansativo e dependente de uma equipe disponível para executar a tarefa em regime de revezamento, aumentando o custo e comprometendo a eficiência operacional das campanhas experimentais, sobretudo as de longa duração.

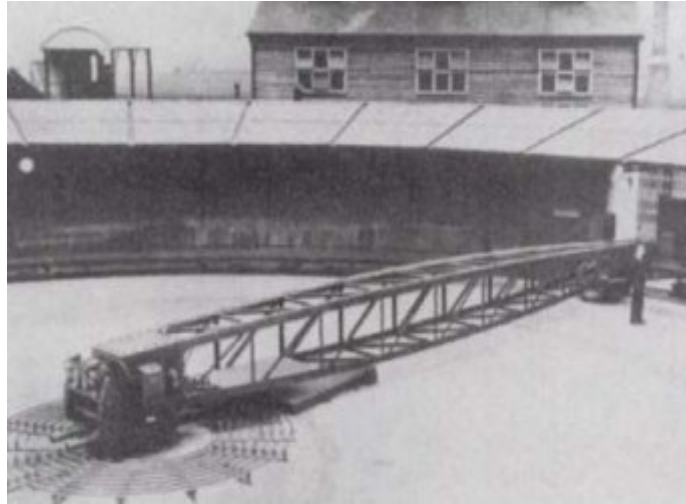
2.2.3 Road Research Laboratory – Road Machine

Na marcha das soluções tecnológicas para o desenvolvimento dos testes em verdadeira grandeza sobre estruturas de pavimento, tem-se que o Road Research Laboratory (RRL), do Reino Unido, construiu sua pista experimental em 1933 (CRONEY e CRONEY, 1998).

Seguindo a tendência do Bureau of Public Roads, o formato circular do traçado da pista, a previsão de diversas seções teste, e a solicitação por eixo de veículo comercial foram também adotados.

Todavia, o caráter inovador deste projeto foi a utilização de um sistema elétrico de propulsão para movimentação automatizada da estrutura de teste, acoplado a um braço mecânico treliçado (Figura 2.3).

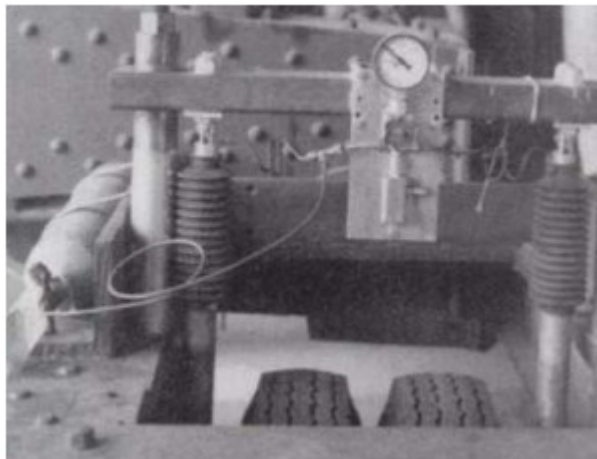
Figura 2.3 - Road Research Laboratory - Road Machine.



Fonte: CRONEY e CRONEY (1998).

Pouco tempo depois, com o intuito de se permitir maior variação de cargas aplicadas sobre os pavimentos durante os testes, o projeto original foi modificado com a inserção de um eixo simples de roda dupla servo-controlado, permitindo variar hidraulicamente a pressão de carregamento sobre as rodas, e consequentemente, as cargas por eixo (Figura 2.4).

Figura 2.4 - Detalhe do sistema servo-controlado do RRL.



Fonte: CRONEY e CRONEY (1998).

2.2.4 WASHO Road Test

De acordo com o Highway Research Board (HRB, 1954), em março de 1950, durante o Encontro do Comitê Executivo da Western Association of State Highway Officials (WASHO), em Salt Lake City, nos Estados Unidos, foi tratado sobre o desejo de se conduzir um teste em verdadeira grandeza sobre pavimentos de concreto asfáltico com o controle das condições do tráfego de caminhões.

Ato contínuo, em dezembro de 1950, a iniciativa foi considerada em sua relação com o programa de testes rodoviários da American Association of State Highway Officials (AASHO), que estava em discussão na reunião do Comitê de Padrões AASHO na cidade de Miami, Flórida.

Os proponentes pioneiros desta campanha experimental incluíram o Western Interstate Committee on Highway Policy Problems, pertencente ao National Council of State Governments, bem como o Western Highway Institute. Assim, em junho de 1951, a WASHO decidiu oficialmente que o projeto deveria ser realizado em Encontro institucional promovido em San Francisco, Califórnia.

O local escolhido para a implantação da pista experimental foi em um terreno ao sul da cidade de Malad, em Idaho, próximo à fronteira com o Estado de Utah (Figura 2.5). Além disso, foi decidido que após a finalização dos testes, que abrangeu os anos de 1952 a 1954, o traçado seria incorporado ao projeto de uma nova rodovia.

Figura 2.5 - WASHO road test.

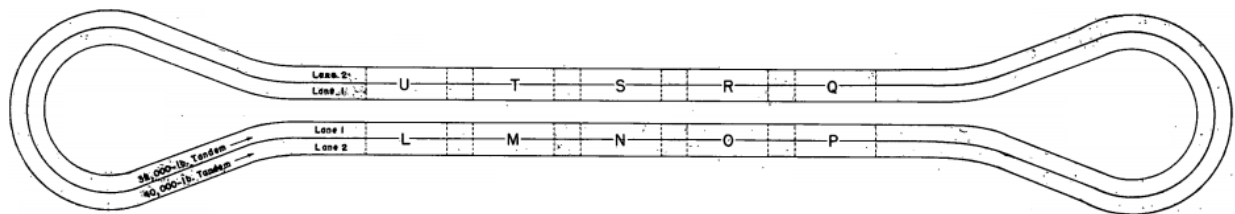


Fonte: HRB (1954).

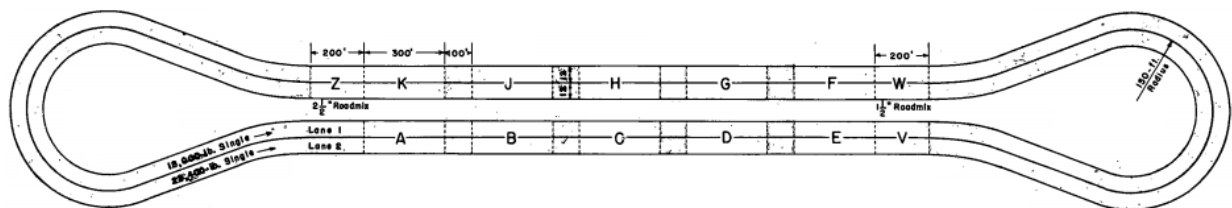
Duas pistas denominadas *loop* norte e *loop* sul foram construídas em faixa dupla, cada uma com 3,65 m de largura e 1,80 m de acostamento. A declividade transversal foi determinada na proporção de 6:1. Dez seções teste foram projetadas em cada pista, dispostas em tangentes paralelas, perfazendo um total de 5 seções em cada trecho, intercalados por concordâncias nas extremidades com 45 m de raio (Figura 2.6). A velocidade considerada para trafegabilidade foi de 40 km/h. Amostras de solo provenientes de diversos Estados foram fornecidas para a construção, a fim de testar a maior variabilidade possível de ocorrências naquela região.

Figura 2.6 - Visão geral da forma geométrica e das seções teste da WASHO Road Test:

(a) *loop* norte e (b) *loop* sul.



(a)



(b)

Fonte: Adaptado de HRB (1954).

Na disposição em faixa dupla da pista de rolamento, o *loop* norte foi programado para receber eixos tandem duplo com 10 t na faixa externa e 8,2 t na faixa interna, enquanto as faixas externa e interna do *loop* sul foram destinadas à passagem de eixos tandem duplo com 18 t e 14 t, respectivamente. Para projetar as espessuras dos pavimentos, foi considerado o volume médio diário (VMD) de 4.000 veículos, destes sendo 1.000 comerciais e 400 com caminhões de três eixos (3C) ou mais pesados, como 2S1 e 3S2, por exemplo.

As estruturas de pavimento foram concebidas para cada pista com as seguintes configurações:

- Loop Norte (tangente superior) e Loop Sul (tangente inferior):
5,0 cm de revestimento em concreto asfáltico;
10,0 cm de camada de base;
0,0 cm a 40,0 cm de camada de sub-base.
- Loop Norte (tangente inferior) e Loop Sul (tangente superior):
10,0 cm de revê revestimento em concreto asfáltico;
25,0 cm de camada de base;
0,0 cm a 40,0 cm de camada de sub-base.

A curiosidade acerca desta pista experimental é que durante os meses de inverno necessitava ser interditada, devido o rigor do clima congelar completamente as estruturas de pavimento, atingindo inclusive a camada de sub-base.

Outro fator historicamente importante é que nestas instalações foi instituído o *Present Serviceability Ratio* (PSR), também conhecido como Índice de Serventia dos pavimentos. Consistia inicialmente em estabelecer empiricamente, a partir de observação direta dos defeitos sobre a superfície do pavimento por uma equipe de técnicos e engenheiros, a condição classificatória do seu estado físico após a aplicação de uma rodada de ciclos de solicitação.

Compreendia uma escala (*rating*) denominada *Present Serviceability Rating* (PSR) de 0 (muito ruim), 1 (ruim), 2 (regular), 3 (bom), 4 e 5 (muito bom), em relação ao padrão de qualidade. Poucos anos depois, entre 1956 a 1961, durante a campanha experimental na pista experimental da *American Association of State Highway Officials* (AASHO), foi desenvolvida uma equação para determinar o PSI e compará-lo à escala PSR. O assunto será melhor detalhado no tópico 2.2.5.

Ainda, testes com viga Benkelmann e aferição de resistência ao cisalhamento na interface das camadas também foram procedidos nesta campanha experimental.

Da mesma forma, o parâmetro *California Bearing Ratio* (CBR) ou Índice de Suporte Califórnia (ISC) foi estudado por BURMISTER (1958) na WASHO Road Test, a fim de avaliar a eficácia do modelo de sistemas multicamadas na compreensão prática dos esforços atuantes nas estruturas dos pavimentos, desenvolvido por ele mesmo (BURMISTER, 1943).

Em que pese ter ocorrido avanços para a época nos procedimentos laboratoriais e de campo, no que diz respeito ao controle tecnológico dos projetos de pavimento, bem como ao entendimento da resposta dos materiais aos esforços mecânicos aplicados, tem-se que o forte

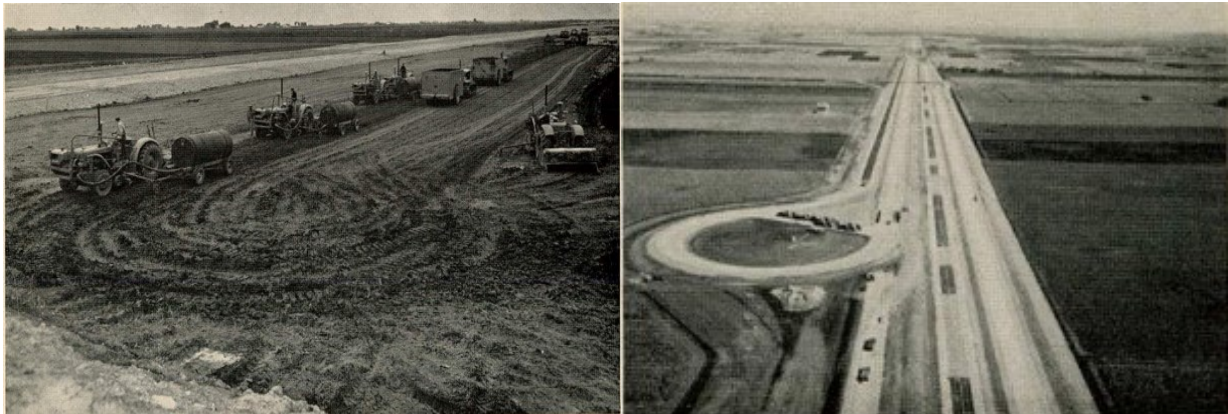
empirismo ainda aplicado nos procedimentos de análise não permitia a formulação de uma metodologia capaz de descrever com precisão o comportamento mecânico das estruturas de pavimento submetidas ao carregamento dinâmico.

Ademais, a praticidade operacional dos testes ainda era muito prejudicada, pelo mesmo motivo relatado no tópico 2.2.2, ou seja, em razão da dependência humana na condução dos veículos de testes, em que no caso da WASHO Road Test chegava a extenuantes revezamentos em três turnos consecutivos, ocorrendo testes até mesmo durante a madrugada, algo impraticável nos dias atuais.

2.2.5 AASHO Road Test

Motivada pelos resultados de experiências prévias com testes em verdadeira grandeza para estruturas de pavimento, com destaque para a Road Test One – MD, em Maryland (HRB, 1951) e WASHO Road Test, em Idaho (HRB, 1954), descrita no tópico 2.2.4, tem-se que entre agosto de 1956 a setembro de 1958, a então *American Association of State Highway Officials* (AASHO), atualmente *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) construiu pistas de testes em Ottawa, Illinois (HRB, 1961) (Figura 2.7).

Figura 2.7 - AASHO Road Test: (a) construção e (b) disposição geral do traçado.



Fonte: HRB (1961).

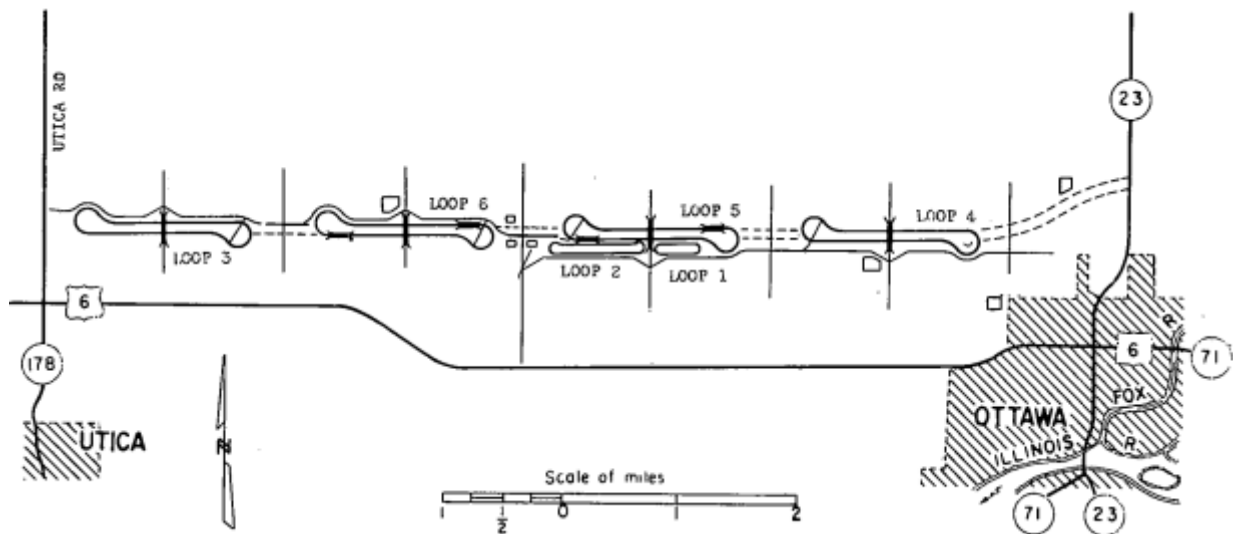
Entre os aprimoramentos que podem ser destacados, em relação às experiências mencionadas, principalmente à da WASHO, podem ser citados: maior número de pistas construídas; maior diversidade da frota de veículos utilizada na realização dos testes; desenvolvimento da formulação do índice de qualidade denominado *Present Serviceability Index* (PSI); instrumentação para controle de temperatura e umidade em pontos superficiais da estrutura

do pavimento; revestimentos construídos na mesma pista experimental tanto em concreto asfáltico como em concreto de cimento Portland, compreendendo soluções armadas e protendidas, até mesmo pequenas pontes reforçadas com longarinas em perfil 'I'; e, levantamento perfilométrico da condição superficial de ondulação do pavimento.

Além disso, como resultado desta campanha experimental foi desenvolvido o *Interim Guide for the Design of Flexible Pavement Structures* (AASHO, 1961), estabelecendo uma metodologia de cálculo para estruturas de pavimento de concreto asfáltico.

Foram construídas 6 pistas de teste em circuito fechado (*loops*) com faixa dupla e tangentes paralelas, possuindo geometria de traçado semelhante às pistas da WASHO (Figura 2.8), sendo que 5 delas foram testadas com diferentes tipos de caminhões cargas solicitantes e uma para testar apenas o efeitos intempéricos, como a ação do sol, chuva e neve (*loop 1*). Os trechos em tangente dos circuitos (*loops*) tinham as seguintes dimensões aproximadas: 600 m (*loop 1*), 1300 m (*loop 2*) e 2000 m (*loops 3 a 6*). As concordâncias posicionadas nas extremidades das tangentes dos *loops 3 a 6* dispunham de raios com 60 m, enquanto o *loop 2* possuía um raio de 12,8 m.

Figura 2.8 - Visão geral da disposição dos circuitos fechados (*loops*) da AASHO Road Test.

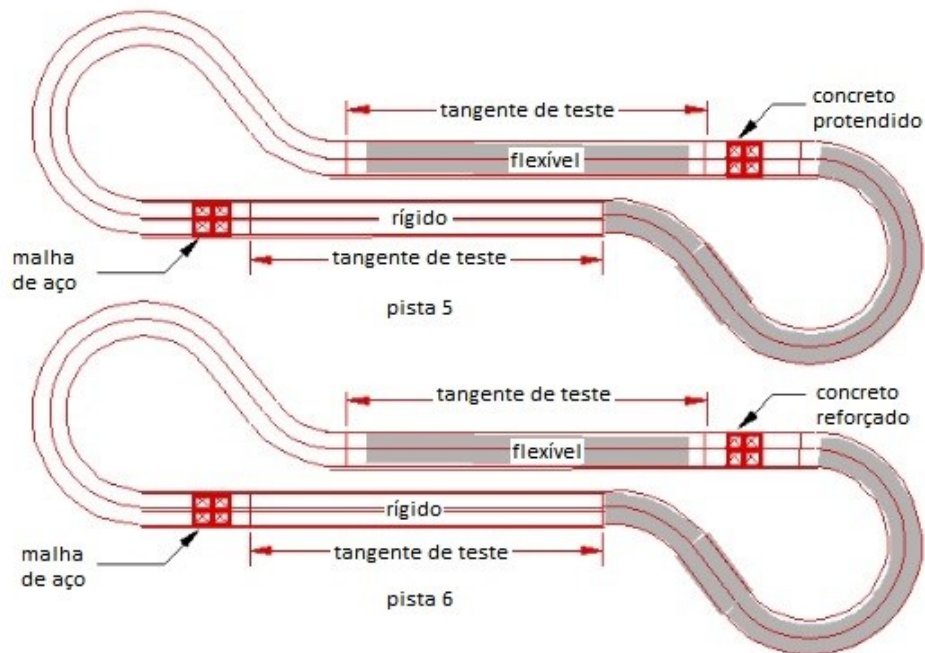


Fonte: Adaptado de HRB (1961).

As tangentes norte e concordâncias a leste foram revestidas com concreto asfáltico, enquanto as tangentes sul e concordâncias a oeste com concreto de cimento Portland. O comprimento mínimo de cada seção teste era de 30 m (*loops 2 a 6*) e 3 m (*loop 1*) (Figura 2.9), a largura total da pista de rolamento era de 7,30 m, subdividida em duas faixas com 3,65 m. Em razão do grande número de seções teste construídas, mais de 150 durante toda a

campanha experimental, não será descrita a especificação das espessuras e os tipos de materiais utilizados em cada caso, podendo ser consultados os detalhes acerca dos procedimentos construtivos diretamente em HRB (1961).








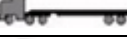
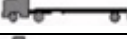
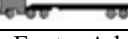
Figura 2.9 - Desenho esquemático das seções teste da AASHO Road Test.



Fonte: Adaptado de HRB (1961).

No que diz respeito à frota de veículos utilizada durante os testes, tem-se que foi contabilizado o uso de 186 unidades no total, sendo 70 veículos durante 14 meses e 126 por 11 meses. Assim como na experiência da WASHO Road Test, cada faixa de tráfego foi programada para receber uma determinada configuração de carga por eixo, em que a compilação destas informações por circuito (*loop*) se encontra na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Carga por eixo nas diferentes pistas e faixas de teste.

Pista/Circuito (Loop)	Faixa de Tráfego	Configuração de Eixo	Eixo Dianteiro (t)	Demais Eixos (t)	Peso Bruto Total (t)
2	1 (interna)		0,9	0,9	1,8
	2 (externa)		0,9	2,7	3,6
3	1 (interna)		1,8	5,4	12,6
	2 (externa)		2,7	5,4	24,3
4	1 (interna)		2,7	8,2	19,1
	2 (externa)		4,1	7,2	32,9
5	1 (interna)		2,7	10,2	23,1
	2 (externa)		4,1	9,1	40,5
6	1 (interna)		4,1	13,6	31,3
	2 (externa)		5,4	10,9	49

Fonte: Adaptado de HRB (1961).

Conforme mencionado no tópico 2.2.4, o indicador de qualidade denominado *Present Serviceability Index* (PSI) passou a ser determinado a partir de formulação desenvolvida durante os procedimentos experimentais na AASHO Road Test (Equação 2.1), tomando em conta dados medidos diretamente em campo com relação à área trincada e ao afundamento na trilha de roda das estruturas de pavimento. Isto possibilitou relacionar o valor calculado do PSI com a escala de classificação do PSR estabelecida ainda na experiência já abordada da WASHO Road Test.

$$PSI = 5,03 - 1,91 \log (1 + \overline{SV}) - 1,38\overline{RD}^2 - 0,01\sqrt{C + P} \quad (2.1)$$

onde:

- PSI : Present Serviceability Index ou Índice Atual de Serventia;
- \overline{RD} : Afundamento na trilha de roda medido em polegadas (2,54 cm), considerando um espaçamento de 4 polegadas (10,16 cm) entre cada trilha de roda, tomando em conta a média aritmética de ambas as trilhas de roda analisadas;
- \overline{SV} : Variância da declividade do afundamento na trilha de roda ($\times 10^6$), considerando a média aritmética de ambas trilhas de roda analisadas;
- C : Área trincada do pavimento (m^2), compreendendo trincas classe 2 ou 3, ou ainda qualquer outro trincamento que esteja conduzindo a superfície da camada betuminosa de rolamento à ruptura, considerando medidas realizadas em uma área total de 93,0 m^2 ;
- P : Área com intervenção por serviços de remendos a cada 93,0 m^2 .

A partir das informações compiladas neste tópico, é possível concluir que a AASHO Road Test demonstrou avanços na quantidade e qualidade de dados técnicos obtidos antes, durante e após a construção das pistas de testes, em comparação com a experiência da WASHO. Todavia, a necessidade de condutores humanos para trafegabilidade da frota sobre as estruturas de pavimento, ainda persistia como um obstáculo à praticabilidade e replicação de estudos em verdadeira grandeza nestas condições de configuração de traçados geométricos.

Além disso, trechos experimentais construídos em locais afastados de instalações institucionais, isto é, em trechos rodoviários ou em terrenos localizados em ambientes ermos, conduz a maiores dificuldades de logística para acompanhamento a qualquer tempo dos testes, ainda que nos dias atuais muito se possa fazer com o uso de tecnologia via remota.

Esta condição foi evidenciada na campanha experimental da AASHO, onde os turnos de revezamento dos condutores veiculares somente foram possíveis, pois houve a cooperação do Ministério da Defesa para a cessão de soldados do *United States Army Transportation Corps Road Test Support Activity*, que designou um destacamento de sua guarnição para fixar acampamento no local de testes durante todo o período em que foram executados.

Ainda, caso as pistas de testes construídas nestas condições não sejam aproveitadas em futuros traçados de rodovias ou anexadas à estrutura de órgãos competentes com a mudança de suas instalações físicas para o local de testes, tendem a ser abandonadas após o período estipulado para a campanha experimental, apontando para uma falta de planejamento na gestão dos expressivos recursos financeiros despendidos. No caso da experiência da AASHO, os trechos em tangente do projeto foram aproveitados como parte do traçado da Interstate Highway 80, a partir de um acordo estabelecido com o Estado de Illinois e ajuda do governo federal nas tratativas.

2.2.6 Pista Experimental do LCPC – Manège de Fatigue

Entre os anos de 1962 e 1963, a França enfrentou um inverno extremamente excepcional, que resultou no colapso de 80% da malha viária, representando mais de 100.000 km. Até aquela ocasião era utilizada uma metodologia nacional, porém, com forte adaptação baseada nos princípios estabelecidos pela *American Association of State Highway Officials* (AASHO), para dimensionamento de estruturas de pavimento. Entretanto, a partir do caos instalado no país, foi decidido pelo governo que uma política para o desenvolvimento da própria metodologia deveria ser implantada (BOULET e GRAMSAMMER, 1983).

O objetivo principal traçado para esta iniciativa era conceber uma nova metodologia racional para o dimensionamento de pavimentos, considerando o desempenho mecânico das estruturas, mas também para a formulação de novos materiais.

A primeira publicação foi realizada em conjunto pelo *Sérvise d'Études Techniques des Routes et Autoroutes* (SETRA), *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LCPC) e *Direction des Routes et de la Circulation Routière* (DRCR), em maio de 1971 (DRCR/SETRA/LCPC, 1971). Uma versão revista e ampliada foi lançada poucos anos depois (DRCR/SETRA/LCPC, 1977).

É importante destacar que as pesquisas desenvolvidas por Huet (1963) e Sayegh (1965) foram decisivas como base para a definição do escopo científico das publicações citadas, pois já se dispunha destacadamente de resultados que atestavam cientificamente:

- A geração de sinal em flexão alternada durante a passagem do carregamento dinâmico sobre os materiais betuminosos, a partir de instrumentações realizadas diretamente sobre estruturas de pavimento no campo;
- A maior eficiência de geometrias trapezoidais na avaliação do desempenho mecânico de materiais solicitados à flexão alternada;
- O desenvolvimento teórico e prático do comportamento reológico e mecânico de misturas asfálticas, isto é, o módulo complexo e a fadiga, bem como do modelo reológico constituído para a sua avaliação.

Na versão da metodologia publicada em 1977 foi estabelecido que o cálculo das deformações admissíveis dos materiais deveriam compreender uma estreita relação entre os ensaios executados em laboratório e a resposta das estruturas de pavimento monitoradas em campo, instituindo os coeficientes de risco (k_r), minoração da heterogeneidade quanto à capacidade de suporte das plataformas de fundação (k_s) e de ajuste do modelo matemático utilizado na metodologia de cálculo com a resposta dos pavimentos em condições reais (k_c).

Até então, as informações para a constituição de um banco de dados necessário aos estudos estatísticos realizados para a determinação destes coeficientes provinham de campanhas experimentais realizadas em seções teste de rodovias. Todavia, isto significava um esforço logístico que envolvia dispêndios financeiros muito expressivos, pois a resposta em longo prazo no campo exigia extensos períodos de avaliação, inviabilizando em muitos casos o controle total das condições de teste e o orçamento destas iniciativas.

Diante deste cenário, o governo francês destinou as instalações do LCPC em Nantes – posteriormente denominado *Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux* (IFSTTAR), e atualmente *Université Gustave Eiffel* (UGE) –, para a construção de um equipamento capaz de simular as condições reais de solicitação de estruturas de pavimento, a fim desenvolver pesquisas científicas com maior rigor e controle tecnológico, em ambiente adjacente às instalações administrativas do Órgão, reduzindo custos logísticos, e que pudesse dar resultados em tempo reduzido quanto ao desempenho mecânico dos materiais aplicados nas estruturas de pavimentos.

Assim, em 1978 iniciou a construção do carrossel de fadiga do então LCPC, denominado *manège de fatigue*, em que a sua inauguração oficial se deu em 1985. Possui capacidade de simular a trafegabilidade sobre estruturas de pavimento a uma velocidade variável, podendo atingir com segurança até 100 km/h, porém, normalmente aplicada em 80 km/h, o que possibilita a realização de até 2700 ciclos/hora, correspondente à passagem de $5,0 \times 10^5$ a $2,0 \times 10^6$ ciclos de carregamento por caminhões em apenas um mês, reduzindo em 20 anos o que ocorreria em rodovias submetidas a um tráfego médio. Por estas razões, possui o melhor desempenho entre as pistas experimentais do mundo atualmente (IFSTTAR, 2013).

As instalações dispõem de três anéis com 40,0 m de diâmetro, pistas de rolamento com 6,0 m de largura e 120,0 m de circunferência, sala de controle dos sistemas de acionamento e monitoramento dos dados fornecidos por instrumentação, além de escritórios para a equipe técnica integralmente dedicada às atividades deste equipamento (Figura 2.10). A disposição do traçado permite a subdivisão em até 4 seções teste com 30 m de comprimento, em que todas possuem declividade transversal de 2,0% para o lado interno da pista.

Figura 2.10 - Visão geral das instalações da *manège de fatigue* do LCPC.



- 1 - Anel A
- 2 - Anel B
- 3 - Anel C
- 4 - Sala de controle
- 5 - Escritório técnico

Fonte: IFSTAR (2013).

A aplicação das cargas solicitantes sobre as estruturas dos pavimentos é realizada por eixos com diferentes configurações, acoplados à extremidade de 4 braços mecânicos. As cargas podem ser ajustadas desde 4,5 t para uma roda simples até 13,0 t em cada eixo simples de rodas duplas (ESRD), tomado como o eixo-padrão da metodologia francesa de dimensionamento, que também podem compor conjuntos de eixos tandem duplos (ETD) e triplos (ETT) (Figura 2.11).

Figura 2.11 - Eixo (a) simples de roda dupla (ESRD), (b) tandem duplo (ETD) e (c) tandem triplo (ETT).



Fonte: IFSTAR (2013).

Os braços mecânicos mencionados constituem vigas de aço soldadas e acopladas a uma torre central em uma extremidade e apoiadas sobre os eixos solicitantes em outra. Completam o sistema de apoios os eixos-guia intermediários, com o intuito de estabilizar os braços mecânicos à passagem sobre desníveis existentes na superfície dos pavimentos (Figura 2.12). Em função de estarem dispostos em 4 unidades, torna possível simular simultaneamente a passagem de

carregamentos aplicados pelas diferentes configurações de eixos ilustradas na Figura 2.11, além de reduzir o tempo de aplicação de ciclos, conforme abordado anteriormente.

Figura 2.12 - Braços mecânicos.



Fonte: IFSTTAR (2013).

A torre central possui um eixo giratório, o qual é acionado por um módulo eletromecânico, em que a velocidade de percurso também é controlada (Figura 2.13). A carga aplicada sobre os eixos, bem como a pressão de insuflagem dos pneus são controlados por sistema pneumático, enquanto a varredura da seção transversal da pista é realizada por um atuador hidráulico que regula o deslocamento dos pistões posicionados nos braços, podendo atingir até 1,20 m de alcance, variando o raio de 15,0 m a 20,0 m, o que permite a solicitação multieixos do pavimento em posições distintas de forma simultânea.

Figura 2.13 - Torre central e respectivo módulo eletromecânico de acionamento.



Fonte: Autor.

Em razão de serem elementos mecânicos acoplados à torre central, tem-se que os braços mecânicos possuem a versatilidade de serem transportados para os demais anéis de teste, quando termina a campanha experimental naquele que estava em uso (Figura 2.14). Assim, enquanto está ocorrendo estudos em um dos anéis, podem ser realizadas as obras de construção das estruturas dos pavimentos nos outros.

Figura 2.14 - Desacoplamento dos braços mecânicos da torre central.



Fonte: Autor.

Os anéis A e B têm as estruturas de pavimento construídas diretamente sobre o terreno natural de fundação, devidamente regularizado, enquanto o anel C é disposto em uma estrutura de concreto reforçado, denominada *cuvelage*, com 10,4 m de largura, 110,0 m de circunferência e 3,0 m de profundidade (Figura 2.15). Sua principal função é isolar a estrutura do pavimento do solo natural ao seu redor, permitindo manter homogêneas as condições de suporte e de confinamento dos materiais, viabilizando a comparação de resultados entre as seções teste no referido anel, além de possibilitar o controle das condições de contorno para o desenvolvimento de modelos computacionais destinados à simulação do comportamento mecânico dos materiais.

Figura 2.15 - Estrutura de concreto reforçado do anel C.



Fonte: IFSTTAR (2013).

Ainda, o anel C possui um sistema hidráulico com controle de vazão de água, capaz de simular distintos graus de saturação dos materiais, que são medidos em tempo real por sensores de umidade posicionados no interior das estruturas das seções teste.

Um sistema de pórticos com lâmpadas halógenas para aquecimento das seções teste é disponível, a fim de regular a temperatura superficial das estruturas do pavimento, podendo atingir até 65 °C. O objetivo principal nestes casos é o desenvolvimento de pesquisas relacionadas à resistência à deformação das camadas de rolamento.

Durante a construção das estruturas de pavimento, ocorrem diversas instrumentações das seções teste com sensores de deformação, pressão, umidade e deflexão, sendo que também são realizadas medições com viga Benkelmann ou *Falling Weight Deflectometer* (FWD). Durante o período de serviço dos pavimentos também são realizadas diversas incursões de auscultação e verificação das condições estruturais e funcionais, como ensaios de mancha de areia, drenabilidade, aderência entre as interfaces, entre outros. A Figura 2.16 ilustra alguns destes procedimentos.

Figura 2.16 - Procedimentos de instrumentação, auscultação e monitoramento.



Fonte: Autor.

Esta instrumentação permite a verificação em tempo real das amplitudes de deformação (solos e materiais betuminosos) e de tensão (concretos de cimento Portland e derivados) dos materiais, a fim de monitorar o decréscimo de rigidez ocasionado pelo fenômeno da fadiga, em relação ao número de ciclos aplicados, bem como a magnitude das deformações permanentes sobre as plataformas de fundação.

Estas verificações são comparadas com os testes procedidos em âmbito laboratorial, permitindo a aferição da relação campo/laboratório, a qual atualmente é de 0,9 a 1,3 na metodologia francesa (MANUEL LPC, 2007), isto é, com forte proximidade. Inclusive, é a única metodologia atualmente no mundo que tem publicada e comprovada cientificamente esta relação. E procede em sua avaliação de forma contínua.

Como resultado de décadas de testes realizados, a França dispõe de uma metodologia tanto de formulação de materiais (MANUEL LPC, 2007) quanto de dimensionamento de pavimentos (GUIDE TECHNIQUE, 1994) com forte cunho racional, em que relaciona diretamente as propriedades dos materiais testados em laboratório ao seu comportamento no campo, em ensaios de verdadeira grandeza, a partir da *manège de fatigue*, garantindo a vida de serviço das estruturas de pavimento durante o período de projeto estimado.

2.2.7 Pista Experimental do CEDEX

Em 1957 foi criado na Espanha o *Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas* (CEDEX), como organismo autônomo, a partir do Decreto de 23 de agosto do mesmo ano. Está jurisdicionado ao Ministério de Fomento e funcionalmente aos Ministérios de Fomento e Agricultura, Alimentação e Meio Ambiente. Em sua estrutura organizacional, dispõe de um *Centro de Estudios del Transporte* (CET) onde em 1987 foram construídas as instalações de uma pista experimental para testar estruturas de pavimento para rodovias em escala real. Os primeiros testes iniciaram em 1988 (ROMERO et al., 1992).

A pista experimental possui um formato oval, em circuito fechado, dispondo de duas seções paralelas em tangente com 75,0 m cada, concordadas por trechos curvilíneos com raios de 25,0 m nas extremidades (Figura 2.17). O comprimento total percorrido em cada ciclo de solicitação é de 304,0 m (CEDEX/CET, 2021).

Figura 2.17 - Visão geral das instalações da pista experimental do CEDEX.



Fonte: CEDEX/CET (2021).

Trilhos localizados no perímetro interno das pistas servem como guia para dois módulos automatizados que acoplam semi-eixos simples de roda dupla (ESRD) (Figura 2.18). Estes aplicam carga sobre a estrutura do pavimento por gravidade, que pode ser regulada entre 5,5 t e 7,5 t. Porém, é normalmente fixada em 6,5 t nos testes realizados, pois equivale à carga máxima de 13,0 t permitida na Espanha para um ESRD completo.

Figura 2.18 - Módulo automatizado de acoplamento dos eixos solicitantes.



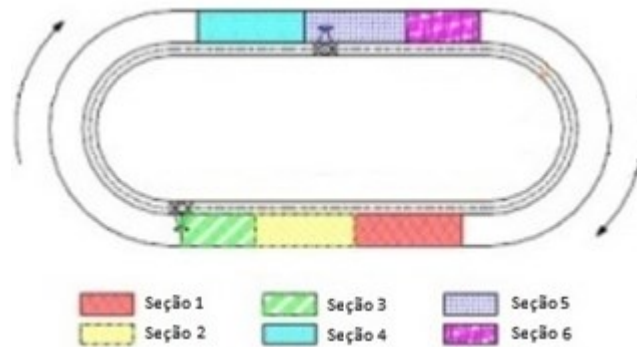
Fonte: CEDEX/CET (2021).

O eixo de teste também pode ser adaptado para pneus extralargos. O sistema de suspensão é pneumático, com capacidade de pressão de insuflagem de 8,5 kg/cm². Tanto o sistema de suspensão quanto as rodas de teste são provenientes das mesmas soluções

utilizadas no transporte em estradas na Espanha. A velocidade de circulação normalmente utilizada é de 40 km/h, mas pode atingir até 60 km/h. Ainda, a barra de fixação do eixo solicitante permite a realização de varreduras laterais em sete posições distintas, controladas por um atuador hidráulico, variando a amplitude máxima entre 1,0 m e 1,3 m de largura.

O traçado conta com 6 seções teste, sendo 3 em cada tangente (Figura 2.19). A frequência de carregamento normalmente utilizada possibilita atingir 400 ciclos/hora/seção. Os segmentos de curvas não são utilizados para fins de testes estruturais dos pavimentos, porém, são atribuídos a outros estudos, como a verificação de materiais e aspectos funcionais relacionados à superfície, como tratamentos superficiais, pinturas, desgastes, arrancamentos, etc.

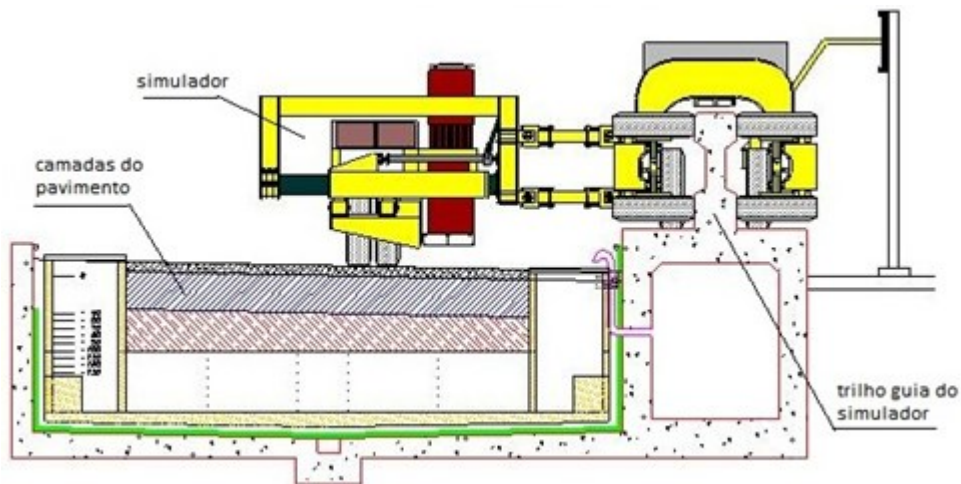
Figura 2.19 - Desenho esquemático da disposição das seções teste.



Fonte: Adaptado de ROMERO et al. (1992).

Enquanto as estruturas de pavimento dos segmentos em concordância são construídas sobre o terreno natural de fundação, devidamente regularizado, os segmentos em tangente são instalados dentro de dois tanques de testes em forma de U, impermeáveis, feitos de concreto reforçado. O poço de testes de concreto, com 2,5 m de profundidade e 8,0 m de largura, permite a construção de diques de contenção de, pelo menos, 1,25 m de altura, bem como o uso de maquinários e procedimentos de construção de estradas convencionais (Figura 2.20).

Figura 2.20 - Desenho esquemático da disposição das seções teste.



Fonte: Adaptado de CEDEX/CET (2021).

A finalidade do uso de poços de testes de concreto é isolar o pavimento do solo ao redor, permitindo suporte homogêneo à estrutura ao longo de cada teste e entre testes diferentes, de tal forma que os resultados possam ser comparáveis. Também permite que o subleito seja inundado para testes em diferentes condições de atuação de água subterrânea, simulando os efeitos de percolação ascendente e respectivos graus de saturação variáveis nos materiais.

As avaliações dos desempenhos mecânicos das seções teste tomaram em conta os seguintes parâmetros:

- Estanqueidade superficial, considerando os níveis de irregularidade antes e depois dos testes, medidos com perfilógrafo nas seções transversais dos pavimentos;
- Afundamento na trilha de roda, medido no centro das zonas de aplicação de carregamento, a cada metro nas seções teste, sendo considerando ao final um valor absoluto ou a diferença entre duas avaliações consecutivas, denominado PRC. Além disso, o máximo valor deste afundamento também é tomado conta, nas mesmas condições que o PRC, ou seja, em condição absoluta ou em relação a dois testes comparativos, denominado PRM;
- Avaliação da deterioração dos pavimentos, em função das ocorrências de trincamento, identificadas por observação direta dos técnicos sobre as superfícies e contabilizadas por marcações feitas com gabaritos pré-definidos, considerando os seguintes parâmetros em escala percentual: comprimento dos

trincamentos (LF); extensão da área trincada (AF); gravidade do trincamento, a partir de testes executados na área trincada utilizando diferentes carregamentos, em função do tipo de trinca (GF);

- Medições deflectométricas também foram realizadas, utilizando viga Benkelmann com carga de 13,0 t, conforme estabelecido legalmente para eixos ESRD na Espanha; e *Falling Weight Deflectometer* (FWD) do tipo KUAB com carga equivalente máxima de 5,0 t.

Os resultados destes levantamentos contribuíram para estabelecer critérios de avaliação de pavimentos que foram incorporados no Guia de Dimensionamento Espanhol (ROMERO et al., 1992), no que diz respeito aos limites considerados para determinar colapso estrutural do pavimento:

- PRC:
 - Média do PRC do subtrecho analisado $\geq 15,0$ mm;
 - $\geq 20\%$ dos perfis medidos tendo PRC $\geq 25,0$ mm.
- PRM:
 - Média do PRM do subtrecho analisado $\geq 20,0$ mm;
 - $\geq 20\%$ dos perfis medidos tendo PRC $\geq 30,0$ mm.
- Trincamento:
 - LF $\geq 50\%$, AF $\geq 40\%$, e GF $\geq 60\%$.

É possível verificar que o projeto da pista experimental do CEDEX teve muita influência da concepção estabelecida para a *manège de fatigue* do então *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LCPC), pois diversos elementos foram incorporados em sua solução, podendo ser citados: solicitação da estrutura do pavimento por módulo automatizado; controle da pressão de insuflagem das rodas por sistema pneumático; varredura transversal do eixo solicitante na seção teste; estrutura em concreto reforçado, tipo poço, para construção das estruturas de pavimento; e, controle de saturação pela água por bombeamento hidráulico.

Entretanto, as seguintes limitações colocam a pista experimental do CEDEX em desvantagem quando comparada à do LCPC: baixa velocidade de teste, não sendo possível reproduzir velocidades reais de campo; apenas eixos simples de roda dupla ou pneus extralargos podem ser acoplados no módulo automatizado, não permitindo a incorporação de eixos tandem

duplos e triplos, o que limita as variações de carregamentos aplicados, bem como impede a análise da sobreposição dos esforços gerados nas camadas subjacentes por eixos duplos e triplos.

Ainda, os critérios definidos na campanha experimental realizada que abasteceram o Guia de Dimensionamento Espanhol foram baseados majoritariamente apenas em avaliação de condições superficiais. Apenas os dados deflectométricos com a viga Benkelmann e o FWD exploraram a resposta das camadas subjacentes.

Em contrapartida, não foram tomados dados de temperatura, umidade e das amplitudes das deformações de tração e compressão no interior das camadas, o que impede a avaliação em tempo real do processo de fadiga e perda de rigidez, comprometendo a acurácia das avaliações realizadas. Ensaios de verificação da condição de aderência nas interfaces dos materiais também não foram executados.

2.2.8 Pista Experimental CAPTIF

A *New Zealand Transport Agency* (NZTA), em parceria com a *University of Canterbury* desenvolveram uma pista experimental denominada de *Canterbury Accelerated Pavement Testing Indoor Facility* (CAPTIF), a qual foi construída entre 1984 e 1985 nas instalações da Universidade mencionada, com o intuito de melhorar o padrão tecnológico de estudos preliminares em verdadeira grandeza realizados no país por Paterson, entre 1969 e 1970 (NZTA, 2012).

Como o próprio nome indica, trata-se de uma pista localizada em ambiente fechado. O traçado é projetado em circuito circular, com faixa de tráfego de 4,0 m de largura, e circunferência com 9,4 m de raio. O anel da pista é construído em concreto armado, em forma de tanque, com seção variável ao longo da profundidade de 1,5 m, pelas mesmas razões já explanadas nos tópicos 2.2.6 e 2.2.7 (Figura 2.21).

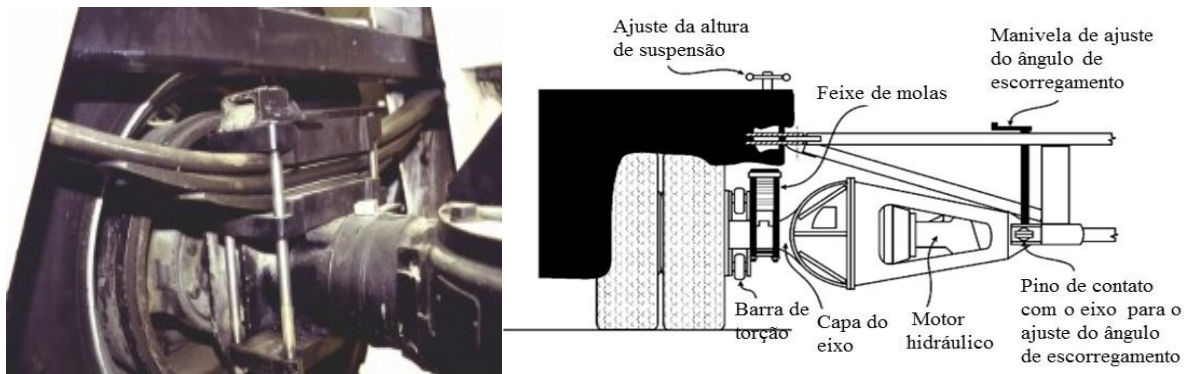
Figura 2.21 - Pista experimental CAPTIF.



Fonte: NZTA (2012).

A estrutura do pavimento é solicitada realizada por semi-eixos fixados na extremidade externa de dois braços mecânicos treliçados, com diâmetro de 18,4 m. Cada semi-eixo dispõe de rodas duplas e um sistema de tração hidráulico diretamente acoplado nas rodas (Figura 2.22). As cargas aplicadas podem variar de 2,1 t a 6,0 t, acrescidas de mais 0,275 t de peso residual proveniente dos braços mecânicos.

Figura 2.22 - Sistema de tração hidráulico das rodas.



Fonte: Adaptado de NZTA (2012).

Uma bomba hidráulica com potência de 50 kW é interligada à torre central, que rotaciona em torno de seu próprio eixo, permitindo que até 18.000 ciclos sejam completados em 24 horas contínuas de teste. A velocidade aplicada pode variar de 5 km/h a 50 km/h, programável para variações a cada 1,0 km, com capacidade de realizar até 833 ciclos/hora/braço. Este módulo operacional é denominado *Simulated Loading and Vehicle Emulator (SLAVE)* (Figura 2.23).

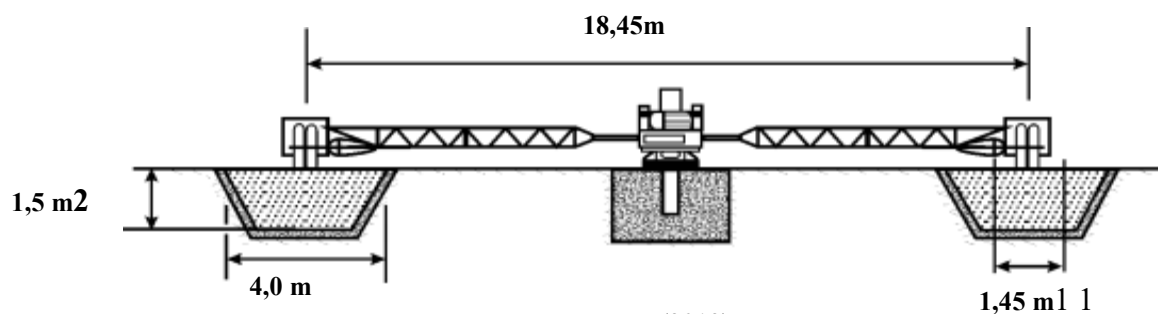
Figura 2.23 - Módulo operacional SLAVE.



Fonte: NZTA (2012).

É possível realizar varreduras transversais em uma faixa de até 1,0 m, com possibilidade de variação a cada 1,0 cm, ao longo da faixa trafegável de 1,45 m estabelecida em projeto, devido a um atuador hidráulico no terminal do eixo (Figura 2.24). A geometria dos aros dos pneumáticos pode ser ajustada para cada caso, em razão do módulo acoplador possuir regulador de curvatura e convergência. Entretanto, apenas eixos simples de rodas duplas (ESRD) são possíveis de serem testados. Além disso, toda a operação é controlada por sistema *Programmable Logic Control* (PLC), via modem *wireless*.

Figura 2.24 - Desenho esquemático da CAPTIF e respectiva faixa trafegável na pista experimental.



Fonte: NZTA (2012).

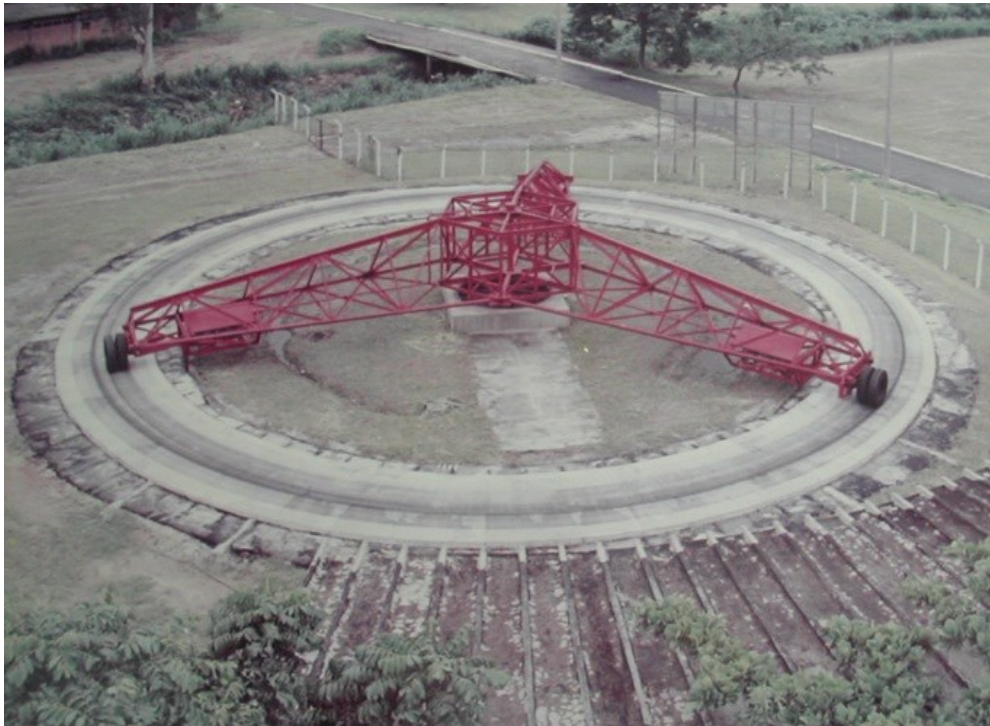
Durante a construção das estruturas dos pavimentos, diversos procedimentos de controle e instrumentação são instalados, podendo ser destacados: deflectometria por *Falling Weight Deflectometer* (FWD), bobinas 3D indutivas de deformação, sensores de deformação do tipo *strain gauges* em formato I ou H, células de pressão, sensores de umidade tipo *Time Domain Reflectometry* (TDR), além de medidores de sucção.

Dadas às características da pista experimental CAPTIF, depreende-se que possui as mesmas limitações já apontadas no tópico 2.2.7 para as instalações do CEDEX. Porém, conta com um aparato de instrumentação mais robusto, considerando o monitoramento de parâmetros físicos e do comportamento mecânico dos materiais em tempo real, no interior das camadas do pavimento.

2.2.9 Pista Experimental do IPR

A pista experimental do Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), o qual faz parte da estrutura organizacional do atual Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), começou a ser construída em 1975 no Estado do Rio de Janeiro, no Centro Rodoviário em Parada de Lucas, Km 163 da Rodovia Presidente Dutra. Após vários estudos fotográficos e de projetos, bem como visitas a diversas instalações do gênero em âmbito mundial, optou-se pela geometria circular, do tipo carrossel de fadiga, com base nas instalações da *Washington University* (SILVA e MOTTA, 1999) (Figura 2.25).

Figura 2.25 - Pista experimental do IPR.



Fonte: IPR (2009).

A pista experimental possui 33,0 m de diâmetro, enquanto o trem de prova fabricado no Brasil dispõe de diâmetro máximo de 28,46 m. Os três braços mecânicos possuem estrutura

treliçada, cada um com rodas duplas de pneus de caminhão 1100R22 que utilizam o próprio peso da estrutura para realizar a função de carga útil dos eixos, a qual é fixa em 5,7 t, com uma pressão de insuflagem dos pneus de 0,7 MPa (105 psi).

A velocidade máxima que pode ser atingida é de 80 km/h, porém, normalmente se utilizam velocidades mais baixas durante os testes, em torno de 40 km/h. Um sistema de giro excêntrico permite o ajuste da amplitude de varredura lateral das rodas em até 0,83 m por ciclo. A uma velocidade média de 40 km/h, a frequência de carregamento é de 1350 ciclos/hora, considerando a passagem dos três eixos (SILVA, 2001).

A propulsão do trem de prova é realizada por três motores de corrente contínua com 60 cv de potência cada, posicionados diretamente à estrutura dos braços na torre central e acionados por unidade de controle adjacente à pista. Um redutor hidráulico acoplado em cada conjunto de rodas duplas permite simular o tracionamento dos eixos em condições reais e não como um eixo rebocado (VALE, 2008).

Desde a sua inauguração até o presente momento, a pista experimental do IPR foi utilizada em cerca de uma dezena de pesquisas (VALE, 2008), logo, tendo contribuído muito pouco ao meio técnico-acadêmico-científico nacional, em relação ao potencial de um equipamento desta natureza.

A solução adotada pelo IPR tem como vantagens a geometria circular, em formato de carrossel, que permite a partir dos seus três braços de teste executar maiores quantidades de ciclos/hora de solicitação, em comparação com outras soluções já abordadas nos tópicos 2.2.3 (*Road Research Laboratory - Road Machine*), 2.2.7 (CEDEX) e 2.2.8 (CAPTIF), além daquelas que necessitam de condutores humanos para realizar os percursos de solicitação dos pavimentos, casos apresentados nos tópicos 2.2.2 (*Bureau of Public Roads*), 2.2.4 (*WASHO Road Test*) e 2.2.5 (*AASHO Road Test*).

Os acionamentos mecânicos e hidráulicos efetuados a partir de central de controle também conferem à pista do IPR um ganho prático na trabalhabilidade do equipamento, bem como à segurança dos seus operadores. Além disso, permite ter um maior controle dos ciclos percorridos em cada campanha experimental.

Em contrapartida, a velocidade usualmente praticada nos testes, em torno de 40 km/h, devido a limitações técnicas das instalações, é muito distante daquelas praticadas em condições reais de tráfego, sobretudo em rodovias, o que prejudica uma análise acurada e realista das condições de solicitação dos pavimentos, não permitindo a aferição de uma confiável relação campo/laboratório nas análises do comportamento dos materiais submetidos a carregamento dinâmico.

Os trens de prova são limitados ao acoplamento de semi-eixos simples de rodas duplas (ESRD), com carga máxima de 5,7 t. Logo, torna impraticável o estudo do efeito dos danos causados por configurações de eixos tandem duplos e triplos, e conseqüentemente, da sobreposição das tensões propagadas às camadas subjacentes dos pavimentos, principalmente no subleito.

Não possui uma estrutura tipo tanque na circunferência da pista experimental, mesmo que em parte de seu comprimento, que permita homogeneizar as condições de suporte e confinamento da estrutura do pavimento, bem como comparar os resultados obtidos em outras seções teste, para fins de controle das condições de contorno necessárias ao desenvolvimento de modelos matemáticos capazes de simular o comportamento dos materiais. Ainda, a instrumentação de suas instalações ainda é bastante incipiente.

2.3 MÓDULOS LINEARES DE TESTES

Os módulos lineares de testes, denominados mundialmente como *Accelerated Loading Test (ALT)*, *Accelerated Loading Facility (ALF)* ou ainda *Accelerated Pavement Test (APT)*, foram desenvolvidos para diminuir a dependência dos testes executados em pistas experimentais com instalações fixas. Visam principalmente à portabilidade dos equipamentos a qualquer seção teste, em ambientes projetados exclusivamente para estas finalidades ou diretamente sobre os pavimentos das malhas viárias.

No Brasil e em alguns países, estes equipamentos recebem a nomenclatura de simuladores de tráfego. Entretanto, nesta pesquisa são denominados módulos lineares de testes, em razão de apresentarem limitações técnicas que não permitem simular as condições mais próximas das solicitações impostas pelo tráfego, o que será melhor discutido nos tópicos seguintes.

2.3.1 Heavy Vehicle Simulator - HVS

Há 35 anos, mais especificamente a partir de 1985, a empresa americana *Dynatest®* desenvolveu o primeiro módulo linear de testes para estudos sobre estruturas de pavimento denominado *Heavy Vehicle Simulator (HVS)* (Figura 2.26).

Figura 2.26 - Visão geral do HVS/Dynatest®.



Fonte: Dynatest® (2020).

As principais características do equipamento nas condições atuais são (PLESSIS et al., 2018):

- Estrutura treliçada sobre rodas, rebocável por uma unidade tratora;
- Comprimento linear de teste variável conforme o modelo (há quatro no mercado atualmente, sendo um desenvolvido para testes aeronáuticos, não considerado nestas especificações), entre 8,0 m a 14,0 m;
- Solicita a estrutura do pavimento a partir de um semi-eixo de roda simples ou dupla (Figura 2.27), com carga que pode variar de 2,0 t a 20,5 t;
- As velocidades máximas aplicáveis variam de 10 km/h a 20 km/h, a depender do modelo;
- Pode executar testes uni ou bidirecionalmente, isto é, em movimentos de ida e volta do eixo;
- Permite executar varredura transversal das rodas em até 0,70 cm para cada lado do eixo central de posicionamento;
- A depender da velocidade utilizada pode atingir a marca de ciclos 892 ciclos/hora de solicitação;
- Comporta painéis de isolamento térmico nas laterais de sua estrutura, a fim de permitir o controle dos níveis de temperatura e umidade do ar, a partir de unidade climatizadora (Figura 2.26);

- Todos os comandos de acionamento são controlados por sistema eletromecânico programável.

Figura 2.27 - Eixo solicitante do HVS/Dynatest®.



Fonte: Dynatest® (2020).

As vantagens deste equipamento são a portabilidade, que permite executar testes em qualquer estrutura de pavimento, e a possibilidade de realizar varreduras transversais.

Entretanto, realizam ciclos de aplicação do carregamento em distâncias muito curtas, o que acarreta na aplicação de velocidades muito baixas de teste. Não comporta o acoplamento de semi-eixos tandem duplos e triplos. A solução de controle térmico desenvolvida não possibilita um isolamento adequado das seções teste, em razão de possuir muitas aberturas ao meio externo, resultando na falta de acurácia de parâmetros fundamentais para o entendimento do comportamento viscoelástico linear de misturas asfálticas, por exemplo, como a temperatura e a umidade.

Ainda, quando são aplicadas cargas em regime de ida e volta, atuam de forma não compatível com os movimentos executados pela frota circulante sobre as estruturas dos pavimentos, os quais se dão em uma direção em cada faixa de tráfego. Este fator atua diretamente nas condições de orientação dos esforços gerados, amplificando as condições de anisotropia dos materiais, o que prejudica a acurácia dos resultados obtidos.

Além disso, para que avaliações quanto à evolução das amplitudes de deformação ou tensão possam ser realizadas, em relação à verificação dos valores admissíveis estabelecidos nas

metodologias de dimensionamento racionais para a resistência à fadiga dos materiais, dependem de instrumentações previamente realizadas nas estruturas dos pavimentos, e que possibilite a tomada de medições durante as solicitações impostas pelos carregamentos aplicados, o que normalmente não está disponível em trechos rodoviários reais.

Do contrário, afundamentos nas trilhas de roda, desgastes superficiais e o surgimento de trincamentos por fadiga serão avaliados em relação ao número de ciclos aplicados, porém, sem qualquer conhecimento da magnitude dos esforços atuantes no interior das estruturas solicitadas.

Pelas razões expostas, tem-se que estas soluções de módulos lineares de teste não podem ser denominadas de simuladores de tráfego.

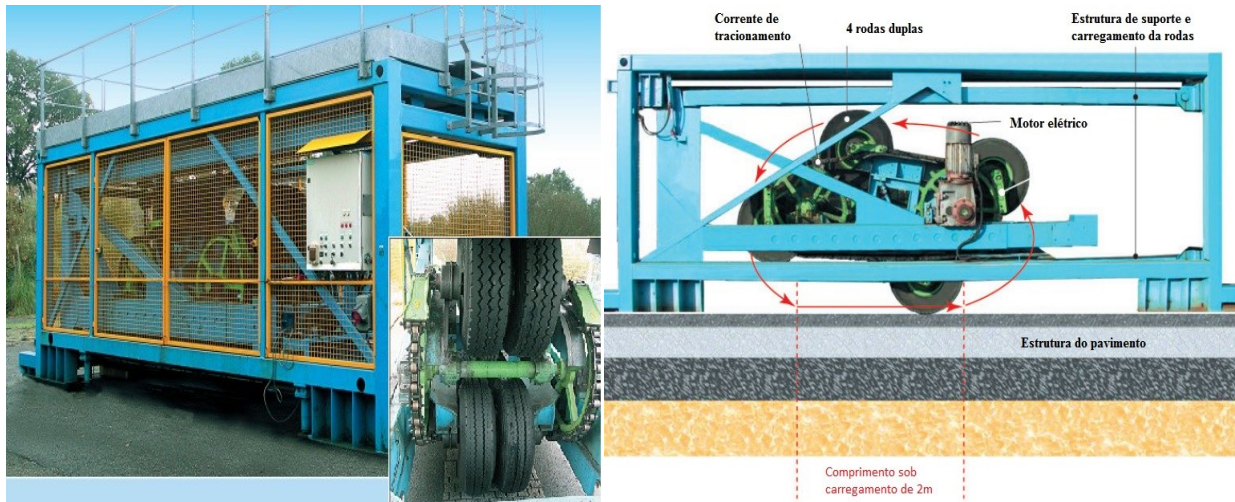
2.3.2 FABAC - LCPC

Este equipamento foi desenvolvido entre os anos de 1995 e 1999 na França, por ocasião de um projeto nacional de pesquisa denominado *Fatigue du Béton Armé Continu* (FABAC) (UGE, 2021).

O equipamento consiste de uma estrutura treliçada com 10,0 m de comprimento, 3,25 m de altura e 2,50 m de largura, com peso total de 18 toneladas. Possui potência instalada de 20 kW. A velocidade de aplicação do carregamento pode variar de 0,5 km/h a 5 km/h, mas sendo normalmente aplicados 3,7 km/h nos testes. Em trabalho contínuo pode realizar até 1785 ciclos/hora de carregamento sobre a seção teste.

Dispõe de um conjunto com quatro trens de rodas, podendo ser simples com pneus extralargos ou duplas, que realizam movimentos circulares por acoplamento a um sistema de corrente dentada, tracionado por um motor elétrico, podendo aplicar uma carga de rolamento variável de 3,0 t a 6,5 t, esta última correspondente ao semi-eixo padrão francês (Figura 2.28).

Figura 2.28 - Equipamento FABAC: (a) visão geral e (b) princípio de funcionamento.



Fonte: UGE (2021).

Possui um sistema com cilindros pneumáticos que corrige continuamente a distribuição de forças entre os suportes e as cargas rolantes, a fim de manter constante a força aplicada ao pavimento na área solicitada. O comprimento de aplicação da carga é de 2,0 m. Não permite varredura transversal pelas rodas.

Diante de suas limitações técnicas, não tem sido mais utilizado em estudos de pavimentos submetidos a condições de elevada mobilidade e intensidade de carregamento aplicado. Atualmente, é muito requisitado na verificação de desgastes superficiais, aderência pneu-pavimento e afundamentos na trilha de roda (Figura 2.29), ocasionados em revestimentos de vias urbanas com tráfego canalizado e de baixa velocidade.

Figura 2.29 - Avaliação de afundamentos nas trilhas de roda, aderência pneu pavimento e desgaste superficial de revestimentos urbanos com a utilização do equipamento FABAC.



Fonte: UGE (2021).

Cabe destacar neste contexto que os perímetros urbanos na França possuem um controle rígido para a trafegabilidade de veículos, sobretudo os pesados e extensos, além de

muitas limitações da malha viária quanto às dimensões, normalmente estreitas e sem grandes raios de giro, o que diminui consideravelmente as velocidades do tráfego. Logo, as características do FABAC compreendem estas condições limitantes. Porém, como já mencionado, não se aplicam a tráfegos de vias com elevada mobilidade e intensidade de aplicação das cargas.

2.3.3 LAPAV/UFRGS

Criado em 1986, o Laboratório de Pavimentação (LAPAV) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) possui uma área construída de 300 m², e um entorno com 8.000 m², onde atualmente se localizam 18 trechos experimentais e um módulo linear de testes (Figura 2.30), em funcionamento desde 1994 (LAPAV/UFRGS, 2021). O projeto utilizou sucatas de pontes e foi baseado no HVS Dynatest® abordado no tópico 2.3.1, com adaptações.

Figura 2.30 - Módulo linear de testes do LAPAV/UFRGS.



Fonte: LAPAV/UFRGS (2021).

Foi o segundo equipamento desenvolvido no Brasil para a realização de testes sobre estruturas de pavimento em verdadeira grandeza. As dimensões do simulador de tráfego do LAPAV/UFRGS são de 15,0 m de comprimento, 2,5 m de largura e 4,3 m de altura. Suas principais características são (RODRÍGUEZ, 2018):

- Percurso de atuação de carga no pavimento: 8,0 m;
- Percurso de aceleração e desaceleração: 3,0 m;
- Carga do semi-eixo atuante sobre o pavimento: regulável de 4,1 t a 6,1 t;
- Princípio de aplicação de carga: hidráulico;
- Aplicação de carga: linear, único sentido, não tracionada;
- Sistema de rodado: simples ou duplo, articulado, regulável;
- Velocidade de deslocamento: ~5 km/h;
- Princípio de acionamento geral: elétrico;
- Painel de controle com contador digital do número de ciclos de carga;
- Ciclos de carga entre 18 e 21 segundos (180 a 190 ciclos por hora de atividade).

Em que pese o reconhecimento por tratar-se de uma iniciativa nacional quanto ao desenvolvimento de um equipamento que permita realizar estudos em verdadeira grandeza dos pavimentos, tem-se que as suas limitações são corroborantes aos pontos já apontados nas abordagens dos tópicos 2.3.1 e 2.3.2. Possui ainda o agravante de não permitir a execução de varreduras transversais nos trechos experimentais e não dispor de sistema de tracionamento das rodas, as quais atuam basicamente como elemento rebocado sobre as estruturas dos pavimentos.

2.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE A ESCOLHA DO MODELO PARA PROJETO

A partir da análise das características físicas e operacionais das pistas experimentais e módulos lineares de teste apresentados, é possível ter em que conta as seguintes considerações:

➤ Para as pistas experimentais:

- Traçados que dependem da condução dos veículos de teste por atuação humana e/ou que se encontram em locais distantes da estrutura técnico-administrativa do Órgão gestor, tornam as campanhas experimentais pouco praticáveis, dispendiosas e cansativas, com destaque para a logística de mobilização de pessoal dedicado em turnos de revezamento de escala para cumprimento das jornadas de trabalho, consumo de combustível elevado, e manutenção constante da frota de veículos devido ao desgaste. Ainda, tendem a ser abandonadas após

utilização, caso não sejam aproveitadas em futuros traçados ou para outras finalidades;

- Além disso, as situações descritas influenciam na ausência de controle das condições de aplicação de carregamento, sobretudo no que tange ao posicionamento das cargas e da passagem sobre sensores instalados na estrutura do pavimento, quando esta situação se aplica, influenciando na perda da acurácia e repetibilidade das medições realizadas.
- Quando não se dispõe de central de controle dos acionamentos e de aquisição de dados interligada às instalações da pista experimental, não há possibilidade de se acompanhar a evolução em tempo real das amplitudes de deformação ou tensão nas camadas do pavimento, relacionadas ao decréscimo de rigidez dos materiais causados pelo fenômeno da fadiga. Como resultado, não há possibilidade de se monitorar e determinar o comportamento mecânico das estruturas de pavimento de forma precisa e confiável;
- Nas instalações que não possuem capacidade de operação em velocidades compatíveis com as aplicadas pelo tráfego em condições reais, e que não dispõem de controle da temperatura e da deformação nas camadas do pavimento, há impossibilidade de se acompanhar a evolução reológica e mecânica dos materiais, sobretudo daqueles regidos pelo comportamento viscoelástico linear, dependentes das condições de temperatura e frequência de solicitação, restando apenas as verificações visuais e medições superficiais;
- Em condições que não possibilitam a utilização de diferentes configurações de eixos, sobretudo tandem duplos e triplos, há fortes limitações nas análises mecânicas realizadas nas estruturas dos pavimentos, com destaque para a ausência de estudos que verifiquem a influência da sobreposição dos esforços espraçados ao longo da profundidade das camadas na resposta do comportamento mecânico dos materiais, e que permita considerar estas condições nas equações de dimensionamento;

➤ Para os módulos lineares de teste:

- Possuem dimensões muito reduzidas, que acarretam na aplicação de velocidades muito baixas de solicitação. Não permitem a solicitação por diversas configurações de eixos simultaneamente. Em alguns casos as rodas são conduzidas nos trechos experimentais sem mecanismos de tração, estando dispostas apenas em condições de rebocamento pela estrutura mecânica, o que afeta sensivelmente o mecanismo de transmissão do carregamento para as estruturas de pavimento, e conseqüentemente, a intensidade aplicada.

Diante das considerações discorridas, em consonância às abordagens já efetuadas no transcurso deste capítulo, tem-se que a pista experimental do *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LCPC), atual *Université Gustave Eiffel* (UGE), foi escolhida como modelo para embasar o projeto proposto neste trabalho. As motivações principais para tanto são:

- O traçado em circuito fechado circular, em formato de carrossel, permite que sejam instalados sistemas de controle autônomo dos módulos de acionamento para comandar a movimentação dos trens de teste, sem a dependência de mobilização de condutores humanos e de frotas de veículos comerciais;
- Aliado ao fator descrito no item anterior, a disposição de quatro braços servo-controlados por um potente sistema motriz com potência de 1000 cv ou 745 kW, possibilita o alcance de velocidades operacionais de 100 km/h, com segurança, viabilizando a realização de testes em condições reais de solicitação no campo, perfazendo até 2700 ciclos/hora para uma velocidade de 80 km/h, por exemplo, o que corresponde à passagem de $5,0 \times 10^5$ a $2,0 \times 10^6$ ciclos de carregamento por caminhões em apenas um mês. Estas características a conferem o melhor desempenho entre todos os equipamentos existentes no mundo atualmente, destinados aos testes de pavimentos em verdadeira grandeza;
- O fato de reunir em apenas um equipamento, todos os pontos positivos, além de outras características adicionais, em relação às demais soluções e instalações

apresentadas, compreendo ainda elevada versatilidade estrutural e de desempenho.

2.5 SUSPENSÕES VEICULARES

Em um veículo de transporte, o sistema responsável por fazer a interface entre o corpo (chassi) do veículo (Figura 2.31) e as rodas é denominado de suspensão veicular, o qual atua na absorção de impactos, sustentação do peso do chassi e guia do veículo na direção correspondente. É composto basicamente por molas, amortecedores, eixos, balancins, tirantes, batentes e balanços. São classificados em três tipos: rígido, independente e semi-independente (FREITAS, 2006).

Figura 2.31 - Chassi veicular.



Fonte: LSV (2021).

A suspensão rígida dispõe de um chassi central interligando os eixos que acoplam as rodas em suas extremidades, em que dois feixes de molas fixam os eixos ao chassi (Figura 2.32). Neste sistema, a movimentação de uma roda, notadamente o deslocamento vertical, afeta diretamente a outra, alterando características de estabilidade e aderência da roda oposta. É mais utilizado em caminhões e caminhonetas pela simplicidade e robustez (PARCZEWSKI e WNEK, 2015).

Figura 2.32 - Sistema de suspensão rígida.



Fonte: LSV (2021).

Na suspensão independente, o deslocamento vertical de uma roda não afeta aquela que se encontra no lado oposto, em razão de cada extremidade dispor do seu próprio sistema de transmissão dos esforços (Figura 2.33). É projetada normalmente para os eixos dianteiros dos veículos de passeio, pois proporciona maior conforto e melhor estabilidade, sobretudo em trechos geométricos concordados por curvas, principalmente quando possuem controle de tração (LIU, 2010).

Figura 2.33 - Sistema de suspensão independente.



Fonte: LSV (2021).

A suspensão semi-independente possui características intermediárias entre os sistemas mencionados, sendo o fator diferencial a presença de um eixo de torção que atenua a interferência do deslocamento vertical entre as rodas opostas (Figura 2.34). É muito utilizada nos eixos traseiros dos veículos de passeio (SERT e BOYRAZ, 2017).

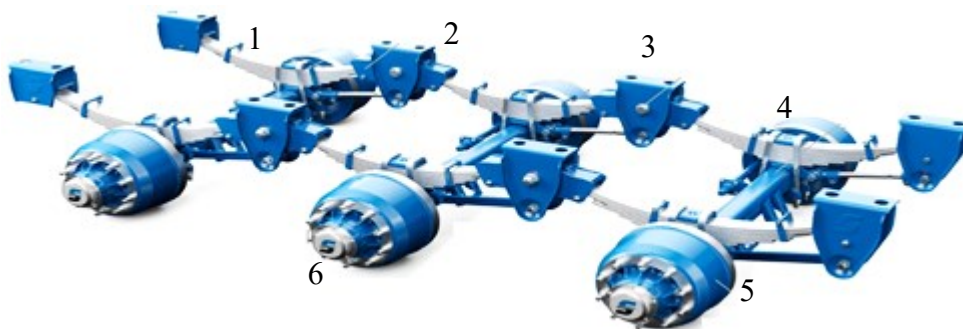
Figura 2.34 - Sistema de suspensão semi-independente.



Fonte: LSV (2021).

É importante esclarecer que a utilização em larga escala das suspensões rígidas em caminhões, também se dá pela facilidade de distribuição uniforme do carregamento entre os eixos, a partir de balancins instalados entre os feixes de molas. O balancim é uma peça fixada por um pino em seu centro e nos terminais sustenta a carga das extremidades de dois feixes de molas, funcionando como o braço de uma balança. Desta forma, as suspensões de feixe de molas podem ser utilizadas em eixos tandem duplos e triplos, até mesmo em configurações com maior quantidade de eixos (Figura 2.35).

Figura 2.35 - Sistema de suspensão rígida para eixos tandem.



- 1 - Feixe de molas
- 2 - Balancim
- 3 - Bucha
- 4 - Fixação dos eixos por grampos e placas de torque
- 5 - Tambor outboard
- 6 - Cubo radial

Fonte: Adaptado de SUSPENSYs® (2021).

2.5.1 Molas

As molas são responsáveis por suportar a carga do veículo e, em alguns casos também têm a função de alinhamento e de suporte da torção do eixo nas ocasiões de frenagem e aceleração (SOLIMAN et al., 2001). Neste contexto, serão abordados os três tipos de molas mais utilizados em suspensões veiculares, a saber: feixe de molas, molas pneumáticas e molas helicoidais.

Os feixes de molas são compostos por um conjunto de lâminas de aço que podem ter espessuras variadas (Figura 2.36). São unidos por cintas de aço interligadas por calços ou pinos, mas também podem dispor de olhais nas lâminas mais compridas para fixação no chassi. Assim, tem-se que executam funções variadas, como a de alinhamento e bloqueio do giro do eixo, além do suporte da carga. Esse tipo de mola é o mais utilizado na maioria dos veículos de carga de todos os portes, devido à simplicidade e funcionalidade com baixo custo e confiabilidade, além de exigir pouca manutenção (PAPAIOANNOU e KOULOCHERIS, 2018).

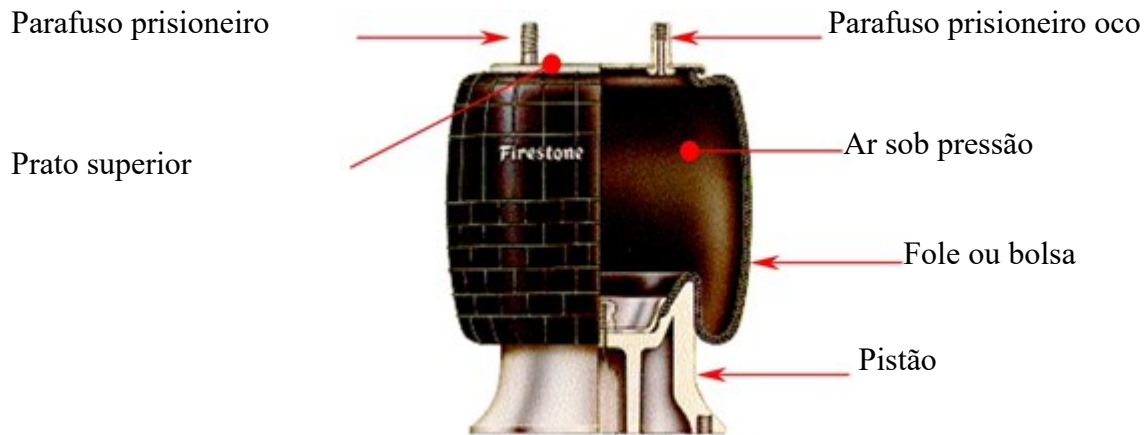
Figura 2.36 - Feixe de mola.



Fonte: LOCAL MOTORS® (2019).

As molas pneumáticas (Figura 2.37) possuem um sistema de controle a ar comprimido que pode variar a pressão e o volume do ar. Assim, têm a capacidade de regular a altura da mola em função do peso da carga transportada, fazendo com que a absorção de oscilações seja muito suave (QUAGLIA et al., 2012).

Figura 2.37 - Mola pneumática.



Fonte: FIRESTONE® (2021).

Devido à tecnologia utilizada, este sistema tem um custo de fabricação e de manutenção maior quando comparado aos feixes de molas e às molas helicoidais. Por esta razão, somente são utilizados em situações que necessitam de conforto ou significativa atenuação das oscilações na suspensão dos veículos. Ainda, este tipo de mola somente possui a função de suportar as cargas dos veículos, podendo ser aplicadas nos três tipos de suspensões descritas no tópico 2.5.

As molas helicoidais (Figura 2.38) desempenham a função básica de suportar a carga dos veículos. Compõem normalmente o conjunto das suspensões independentes e semi-independentes, devido ao baixo custo e a pouca exigência de manutenção, quando comparadas com a solução pneumática (BANERJEE, 2020).

Figura 2.38 - Mola helicoidal.



Fonte: Adaptado de FORD® (2021).

O feixe de molas é a solução mais especificada nos projetos dos veículos de carga, seguido pelas molas pneumáticas, muito utilizadas em ônibus e no transporte de materiais frágeis,

como o vidro. As molas helicoidais são muito encontradas em carros de passeio e na suspensão dianteira de caminhonetes.

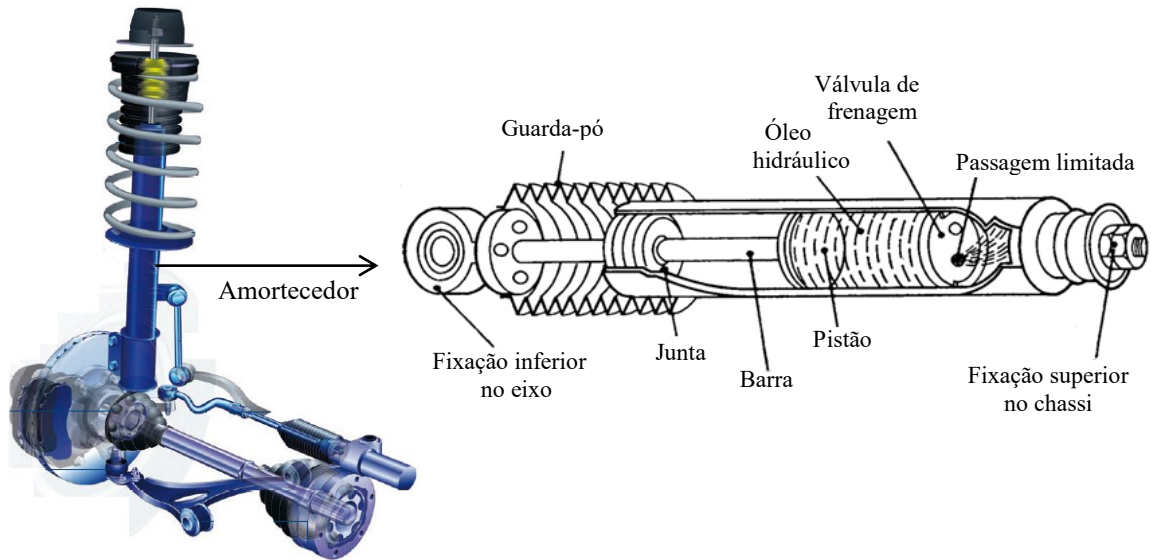
2.5.2 Amortecedores

Os amortecedores possuem a função de dissipar a energia das oscilações causadas nos sistemas de suspensão dos veículos, devido às imperfeições das superfícies em que trafegam, que geram perturbações no movimento das rodas. Ato contínuo, ocorre a transmissão para o sistema de molas e, conseqüentemente, para o chassi, fazendo o veículo oscilar verticalmente de forma repetida. Portanto, o amortecedor ao ser incluído no conjunto de suspensão, reduz a amplitude das oscilações verticais a níveis quase imperceptíveis. Trata-se de um componente tão importante quanto essencial para a estabilidade dos veículos, principalmente em velocidades mais elevadas (WANG et al., 2018).

Todavia, de acordo com Gillespie (1992), o amortecedor não deve ser o único responsável por atenuar os impactos provenientes das irregularidades do pavimento, mas o conjunto de suspensão como um todo, cabendo ao amortecedor apenas dissipar a energia acumulada no sistema.

O princípio do seu funcionamento é simples e consiste em imprimir força ao óleo hidráulico localizado no interior de sua estrutura, a partir da movimentação de um pistão sobre a válvula de frenagem, que empurra o fluido por um pequeno orifício de passagem, acarretando na dissipação de energia cinética (TODESCHINI, 2001) (Figura 2.38).

Figura 2.39 - Amortecedor hidráulico e seus componentes internos.



Fonte: Adaptado de CANAL DA PEÇA (2021) e TODESCHINI (2001).

CAPÍTULO 3

PROJETO DO CARROSSEL DE FADIGA

3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Após a pesquisa bibliográfica realizada no capítulo 2, notadamente os argumentos técnicos discorridos no tópico 2.4, foi estabelecido que o modelo a ser utilizado como referência para as especificações do projeto proposto neste trabalho, corresponde ao carrossel de fadiga concebido pelo *Laboratoire Central de Ponts et Chaussées* (LCPC), atual *Université Gustave Eiffel* (UGE), abordado no tópico 2.2.6.

Com a finalidade de estudar as condições de tráfego em escala de verdadeira grandeza, cada vez mais próximas das condições de solicitação das estruturas de pavimento observadas no campo, optou-se por considerar neste projeto o aporte de configurações reais de eixos de caminhões nas extremidades dos braços de teste. Isto implica no uso de eixos inteiros simples de roda dupla (ESRD), tandem duplo (ETD) e tandem triplo (ETT), com 4, 8 e 12 pneus, respectivamente, utilizando suspensão rígida com ligação por feixes de molas (Figura 2.35), uma condição de esforço nunca antes testada em um equipamento do tipo carrossel.

Estas condições de acoplamento de estruturas reais de eixos de caminhões permitem aferir de forma mais acurada o efeito do eixo completo sobre as camadas subjacentes do pavimento, principalmente a sobreposição das tensões espraiadas tanto em trajetória contínua quanto em varredura lateral, simulando a movimentação variável dos pneumáticos nas faixas de tráfego.

Todavia, além da inovação mencionada no projeto proposto, tem-se que a solução desenvolvida também comporta a possibilidade de utilização de semi-eixos ESRD, ETD e ETT, a partir do uso de molas pneumáticas (Figura 2.37), tal como se faz no carrossel de fadiga francês, o que caracteriza a forte versatilidade do modelo desenvolvido.

Portanto, a fim de não tornar a leitura do trabalho dispendiosa e cansativa, neste capítulo será realizada uma apresentação geral dos elementos componentes do carrossel de fadiga, princípios conceptivos e de funcionamento, bem como as respectivas especificações técnicas. O projeto detalhado, para fins mais particulares de consulta, se encontra na seção de Anexos.

3.2 LOCALIZAÇÃO

Quanto à localização para implantação do projeto, tem-se que duas alternativas são passíveis de consideração neste momento, logo, em condições de comportar as dimensões do carrossel de fadiga proposto neste trabalho.

A primeira opção compreende uma área de 71.611,39 m² (26°14'02" S e 48°53'12" W), adjacente ao terreno onde se encontra o atual Campus da UFSC/Joinville, nas instalações do condomínio industrial Perini Business Park (Figura 3.1).

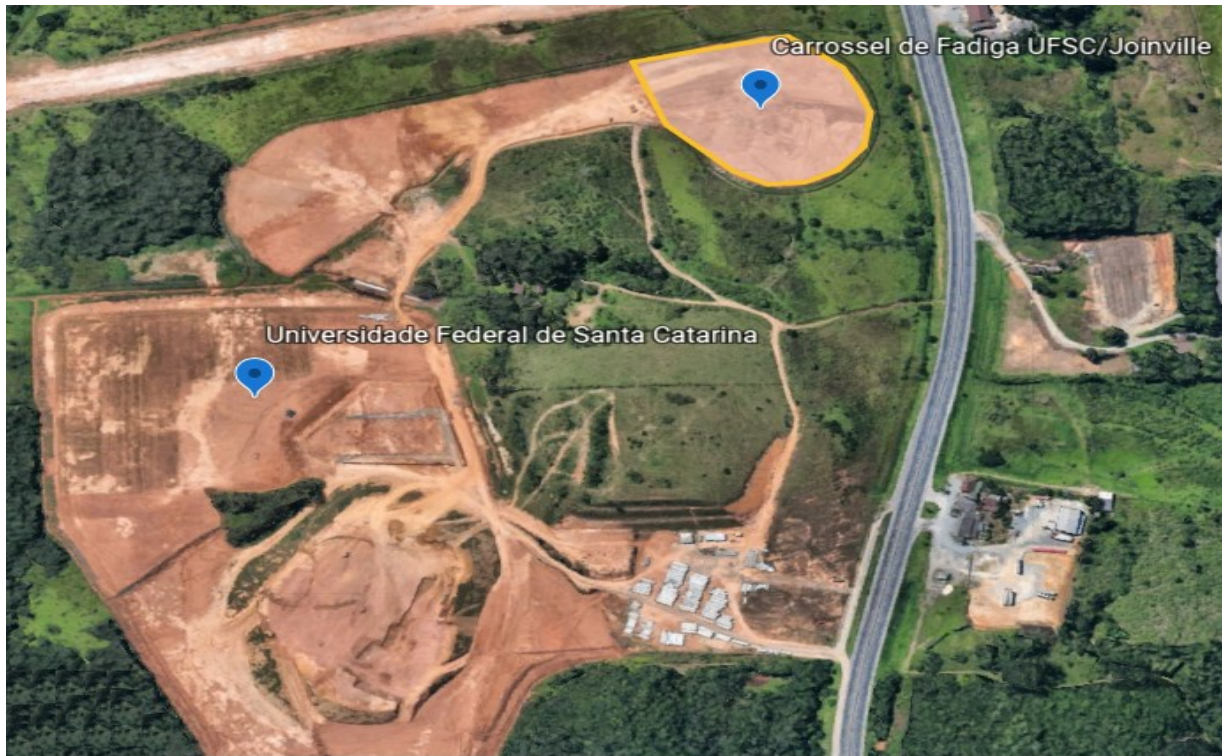
Figura 3.1 - Opção 1 de área para implantação do projeto no condomínio industrial Perini Business Park.



Fonte: Google Earth® (2021).

A segunda opção abrange uma área de 22.072,52 m² (26°23'37" S e 48°50'41" W), localizada no terreno da área denominada Curva do Arroz, pertencente à UFSC e originalmente destinada à construção do Campus da UFSC/Joinville, à margem da rodovia BR-101, km 51, sentido sul. A porção escolhida do terreno compreende a alça leste da pista de testes que havia sido projetada no local indicado na Figura 3.2, porém, não tendo sido finalizada a sua execução.

Figura 3.2 - Opção 2 de área para implantação do projeto na área da Curva do Arroz.



Fonte: Google Earth® (2021).

Entre as opções apresentadas para a construção do carrossel de fadiga, cabe destacar as vantagens e desvantagens de cada locação.

Devido à adjacência ao atual Campus da UFSC/Joinville, a área situada no condomínio industrial Perini Business Park possui maior facilidade para acompanhamento das obras de construção, bem como dos procedimentos de teste, manutenções e reconstruções das estruturas de pavimento, tão logo as instalações do carrossel de fadiga estejam aptas ao uso.

Além disso, há possibilidade de se fazer uma parceria institucional direta com o próprio condomínio supracitado, a fim de que executem a obra sem custo, e seja acrescido o valor da área ocupada no montante do aluguel pago pela UFSC, tal como ocorreu com a construção das próprias instalações do Campus.

A região próxima do local selecionado na Figura 3.1 possui construções já executadas com estacas cravadas de 10,0 m a 14,0 m de profundidade para atingir cotas resistentes de projeto, conforme consta na planta de locação do Campus da UFSC/Joinville (PERVILLE, 2017).

A desvantagem deste local é que se trata de uma área alugada e, portanto, caso o Campus da UFSC/Joinville mude as suas instalações em algum momento, o trabalho executado pode ser completamente perdido.

No caso da área da Curva do Arroz, tem-se que é um terreno de patrimônio da UFSC, não dependente de aluguel para que possa ser utilizado, logo, possui perspectiva vitalícia de serventia. A alça leste da pista de testes que seria construída no projeto original do Campus da UFSC/Joinville, já conta com um reforço prévio realizado sobre o solo natural, em forma de camada de aterro (UFSC, 2011), o que diminui os custos com a construção das instalações do carrossel.

A área escolhida é menor que a selecionada na primeira opção, porém, dispõe de potencial para ser aumentada, caso haja necessidade, utilizando a mesma estrutura da pista de testes já mencionada.

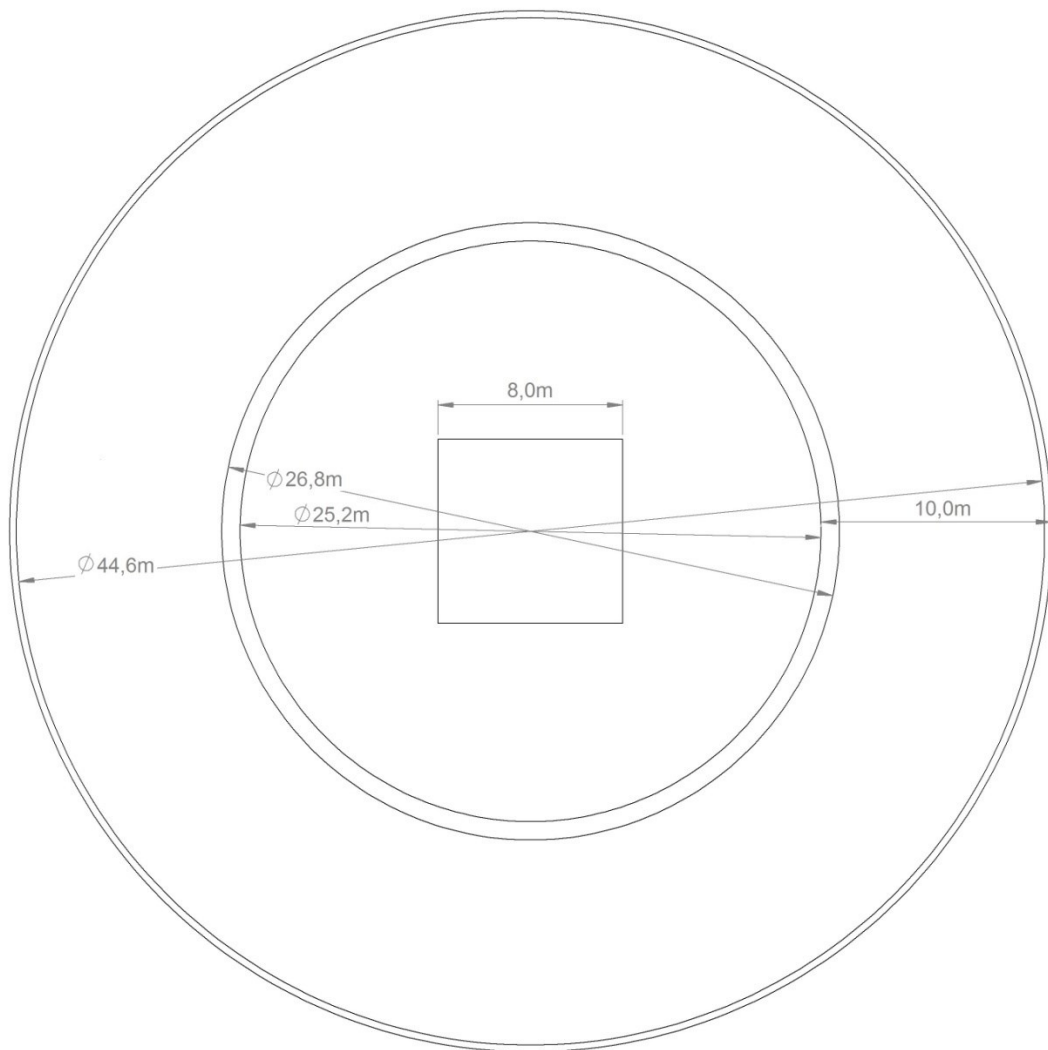
A desvantagem desta solução é a qualidade do terreno natural da Curva do Arroz, pois é composto por turfa com característica fortemente hidromórfica, nível d'água em condição aflorante, principalmente nas estações chuvosas, conforme sondagens com piezocone do tipo CPTu executadas no local (UFSC, 2011).

Ainda, há construções executadas no terreno com estaca cravada que atingiram cota resistente de assentamento em 24,0 m de profundidade. Por estas razões, deformações significativas por recalque ao longo do tempo são passíveis de ocorrência, prejudicando a estanqueidade das estruturas de pavimento construídas, ensejando custo não negligenciável para a viabilização de sua construção.

3.3 CARACTERÍSTICAS GERAIS DA PISTA DE TESTES

Com base nas características descritas em IFSTTAR (2013), a pista de testes que comportará o carrossel de fadiga possui formato circular com 44,6 m de diâmetro, 140,0 m de circunferência, em que a faixa de tráfego dispõe de 10,0 m de largura e 3,30 m de profundidade, permitindo a construção de até 6 seções teste distintas para solicitação simultânea. Uma ilha é formada ao centro, com 25,2 m de diâmetro, onde fica posicionada a central de acionamento dos braços de teste com dimensões de 8,0 m (largura) x 8,0 m (comprimento) (Figura 3.3).

Figura 3.3 - Dimensões gerais da pista de testes.

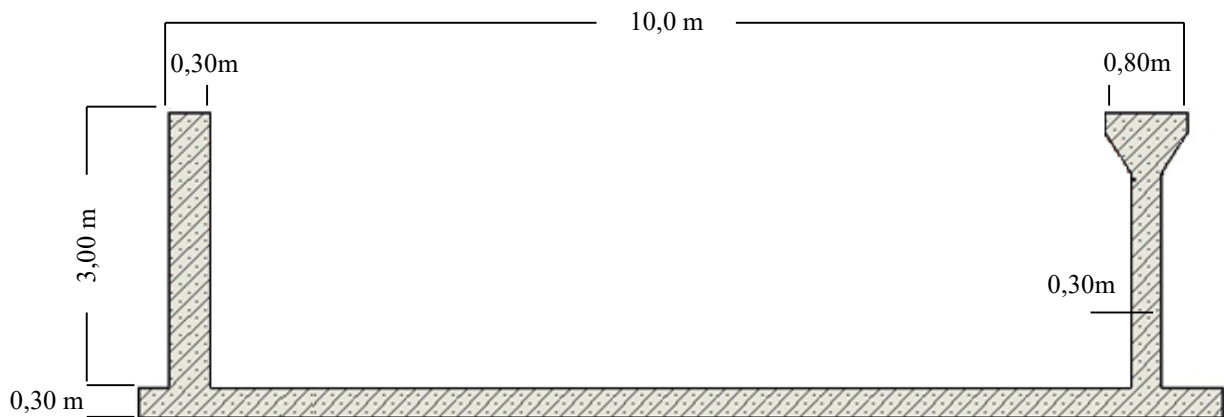


Fonte: Autor.

A variação da largura da faixa de tráfego para 10,0 m, em relação aos 6,0 m da pista original francesa, se dá em razão do acoplamento previsto de eixos inteiros reais de caminhões, conforme descrito no tópico 3.1, o que exige uma largura maior de pista para que possam ser utilizados durante os testes.

A referida pista é limitada por uma estrutura em concreto armado, tipo poço (Figura 2.15), contendo uma laje ao fundo e paredes laterais com 0,30 m de espessura, respectivamente. A parede interna possui uma plataforma com 0,80 m, para sustentar a passagem do eixo intermediário de apoio dos braços de teste (Figura 3.4), elementos que serão abordados com maiores detalhes nos tópicos seguintes.

Figura 3.4 - Desenho da estrutura em concreto armado da pista de testes.



Fonte: Autor.

A necessidade da construção de uma estrutura em concreto armado para a pista de testes é para manter estanques as condições tanto de confinamento quanto de capacidade de suporte das estruturas dos pavimentos, permitindo reproduzir as mesmas condições de contorno nas simulações numéricas, com o intuito de avaliar o comportamento dos materiais de forma mais controlada e acurada.

Desta forma, também é possível dispor de um sistema de controle de vazão d'água, para fins de variação dos níveis de saturação dos materiais durante as campanhas experimentais, simulando condições mais críticas de suporte às seções teste.

Entretanto, é importante esclarecer que esta pesquisa não tem como objetivo propor o projeto dos sistemas hídrico e estrutural, bem como elétrico de cabeamento para instrumentação das seções de teste, sendo apresentados apenas sob a forma de desenhos esquemáticos, para servirem de base ao projeto mecânico do carrossel de fadiga.

Cabe esclarecer que a pista no formato circular possibilita o controle autônomo da passagem das cargas solicitantes de forma mais prática, em relação às geometrias com outros formatos, devido permitir que os braços de teste sejam fixados em uma torre central que gira em torno do seu próprio eixo. Assim, torna viável o acoplamento de várias unidades de trens de eixos, bem como das velocidades praticadas, aumentando a capacidade de ciclos/hora de solicitação, diminuindo os tempos de testes para verificação da resposta em tempo real das estruturas de pavimento.

Além disso, as dimensões reduzidas da geometria circular acarretam em menores custos de implantação, manutenção, instrumentação e reconstrução, se comparadas aos circuitos com formato mais amplo.

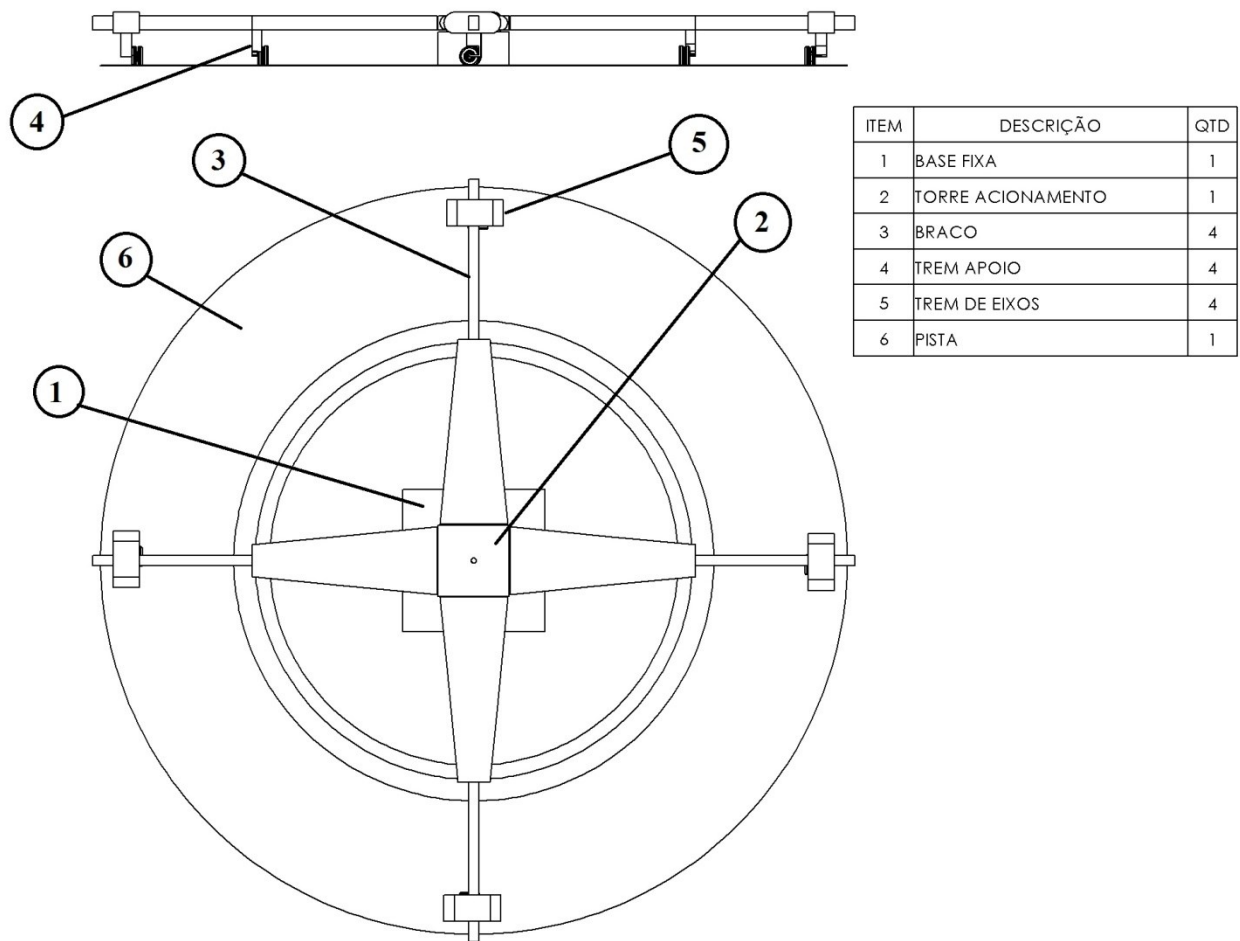
3.4 CARACTERÍSTICAS GERAIS DO CARROSSEL DE FADIGA

Para facilitar a compreensão do projeto proposto nesta pesquisa, tem-se que o carrossel de fadiga pode ser dividido em cinco elementos principais que compõe o equipamento:

- Base da torre de acionamento: consiste em uma estrutura localizada na ilha central da pista de testes, onde ficam posicionados os motores de acionamento que promovem o giro da torre para movimentação dos braços de teste;
- Torre de acionamento: responsável por acoplar os braços de teste e movimentá-los sobre a pista;
- Braço de teste: realiza a movimentação dos trens de apoio e de eixos sobre a estrutura do pavimento, garantindo rigidez e estabilidade aos ciclos de giro;
- Trem de apoio: suporta parte do peso do braço de teste, na função de um apoio intermediário, evitando momentos fletores excessivos e movimentos verticais de elevada amplitude, a fim de que o trem de eixos possa aplicar adequadamente a carga selecionada sobre o pavimento. Para tanto, cumpre trajetória circular sobre uma plataforma em concreto armado de 0,80 m, posicionada no topo da parede interna da estrutura da pista de testes (Figura 3.4);
- Trem de eixos: responsável por acoplar as configurações de eixos inteiros ou semi-eixos, regulando a carga sobre a estrutura de pavimento, de forma de que se mantenha constante durante os testes, bem como realiza os movimentos de varredura lateral dos eixos durante os ciclos de solicitação.

A Figura 3.5 ilustra uma visão geral da disposição dos elementos mecânicos do carrossel de fadiga.

Figura 3.5 - Elementos mecânicos do carrossel de fadiga.



Fonte: Autor.

As características básicas do carrossel de fadiga são as seguintes:

- Quatro braços de teste capazes de comportar eixos inteiros ou semi-eixos;
- Largura de varredura lateral dos pneumáticos de 1,2 m;
- Capacidade de simular velocidades de tráfego de 10 km/h a 100 km/h;
- Capacidade de carga de 285 kN ou 28,5 t em cada braço, acrescida por um fator estrutural de segurança admitido em 1,4, permitindo suportar até 40,0 t e acoplar com folga eixos inteiros sem tandem triplo (ETT), de acordo com os limites estabelecidos pelo Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN, 2021).

Dentre essas especificidades, a mais relevante delas é a capacidade de simular velocidades até 100 km/h, ou seja, em consonância às condições reais de solicitação em campo e em verdadeira grandeza. Essa característica é de fundamental importância, pois as misturas

asfálticas que comporão as estruturas de pavimento nas seções teste possuem comportamento viscoelástico linear, logo, dependentes da variável da variação de frequência do carregamento aplicado.

O diâmetro da pista de testes não tem influência direta nas condições de trafegabilidade, mas no tamanho da estrutura do carrossel de fadiga. Portanto, deve ser definido com cautela para não desperdiçar energia de acionamento.

O número de braços de teste tem influência direta no tempo de duração dos ensaios, pois quanto maior a quantidade, maior o número de ciclos/hora de solicitação, e conseqüentemente, maior a quantidade de deformações geradas por unidade de tempo.

A varredura lateral é importante para corresponder à variância da passagem das rodas em posições distintas nas faixas de tráfego dos pavimentos, pois na prática não estão sempre dispostas na mesma posição da pista de rolamento.

A capacidade de carga dos trens de eixos está relacionada com os limites estabelecidos na legislação atual de transporte de cargas do Brasil, regulamentada pelo Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN, 2021) com os limites por eixo já definidos, a saber: eixo simples de roda dupla (ESRD) com 12,0 t, eixo tandem duplo (ETD) com 22,0 t, e eixo tandem triplo (ETT) com 28,5 t.

3.4.1 Base e Torre Central de Acionamento

O acionamento do carrossel de fadiga envolve forças de grande intensidade, devido ao tamanho da estrutura e às cargas pesadas a serem deslocadas. Desta forma, a eficiência energética do equipamento deve ser alta, a fim de reduzir o desperdício do consumo de energia elétrica, que pode ser elevado quando comparado à potência necessária para movimentá-lo.

3.4.1.1 Prerrogativas técnicas

A base da torre de acionamento a ser construída na ilha central da pista de testes (Figura 3.5) deverá suportar as forças do torque de acionamento e radiais dinâmicas. A forma de acionamento será procedida com o uso de energia elétrica, utilizando motorreductores acionados por *servodrivers* eletrônicos, que controlam a aceleração e a velocidade de forma precisa e eficiente, minimizando perdas de energia. Os motores serão munidos de *encoder* para que o *driver* controle adequadamente a potência de acionamento e a velocidade com precisão. A fixação dos motores à base dar-se-á por parabolts chumbados no concreto.

A rigidez da estrutura deve suportar as condições de carregamento com baixa deformação mecânica para reduzir vibrações. Uma longa durabilidade dos componentes e a necessidade de pouca manutenção devem ser levados em consideração, a fim de reduzir custos com manutenção e tempo de equipamento parado.

3.4.1.2 Forças atuantes

Para o dimensionamento da estrutura devem ser estabelecidas as forças envolvidas no acionamento e a força peso de todo o conjunto. Para tanto, são definidos os valores de carregamento em função das medidas especificadas no projeto e as cargas de utilização, conforme as informações já fornecidas anteriormente.

Ainda, as condições mais extremas de solicitação devem ser tomadas em conta, para que não haja subdimensionamento da estrutura do equipamento, elementos de máquinas e motores de acionamento. As principais perdas por atrito também são previstas, provenientes do contato pneu-pavimento, arraste aerodinâmico e dos elementos de máquina.

a) Perdas por atrito no contato pneu-pavimento

As perdas por atrito no contato pneu-pavimento podem ser calculadas a partir do fator de atrito 'Frr', simplificado pelas Equações 3.1 e 3.2, para pneus radiais e diagonais, respectivamente (GILLESPIE, 1992).

$$Frr = (0,0041 + 0,000041 V) CR \quad (3.1)$$

$$Frr = (0,0061 + 0,000046 V) CR \quad (3.2)$$

onde:

Frr: fator de atrito, adimensional;

V: velocidade, em milhas por hora (mph);

CR: coeficiente relativo ao tipo da superfície do pavimento (Tabela 3.1).

Tabela 3.1 - Coeficiente relativo ao tipo de superfície do pavimento.

Superfície do Pavimento	CR
Concreto de cimento Portland liso	1,0
Concreto de cimento Portland desgastado e asfalto frio	1,2
Asfalto quente	1,5

Fonte: Gillespie (1992).

Assim, a potência referente às perdas por atrito no contato pneu-pavimento (P_{APP}) pode ser calculada pela Equação 3.3, deduzida a partir da equação clássica de potência em função do torque (T) e da velocidade angular (ω) para o movimento circular.

$$P_{APP} = \frac{F Frr R 2\pi n}{1000} \quad (3.3)$$

onde:

P_{APP} : potência devido às perdas por atrito no contato pneu-pavimento, em kW;

F: carga aplicada sobre os pneus, em N;

Frr: fator de atrito, adimensional;

R: raio, em m;

n: rps ou rotação por segundo dos braços do carrossel, determinada a partir da Equação 3.4.

Em que, considerando:

Perímetro (P): $2\pi R$

A velocidade de solitação: $v = \frac{P}{t} \rightarrow t = \frac{P}{v}$; sendo t = tempo, em segundos.

Substituindo 'P' por $2\pi R$, tem-se: $t = \frac{2\pi R}{v}$

Logo:

$$rps = \frac{1}{t} \quad (3.4)$$

Logo, tomando um raio de 20,0 m correspondente ao anel de testes do carrossel de fadiga, a velocidade de 27,8 m/s referente à máxima velocidade de solitação em 100 km/h, tem-se que a rotação por segundo (rps) obtida é de 0,22.

b) Perdas por arrasto aerodinâmico

As perdas aerodinâmicas podem ser calculadas pela Equação 3.5 (MCCORMICK, 1976), em que a força de arrasto depende da área projetada transversal ao sentido do movimento, do coeficiente de arrasto e da velocidade relativa.

$$F = C A \frac{\rho}{2} V^2 \quad (3.5)$$

onde:

F: força de arrasto aerodinâmico, em kg;

ρ : densidade do ar, variável conforme a temperatura do momento do teste, em kg/m³;

C: coeficiente de arrasto aerodinâmico;

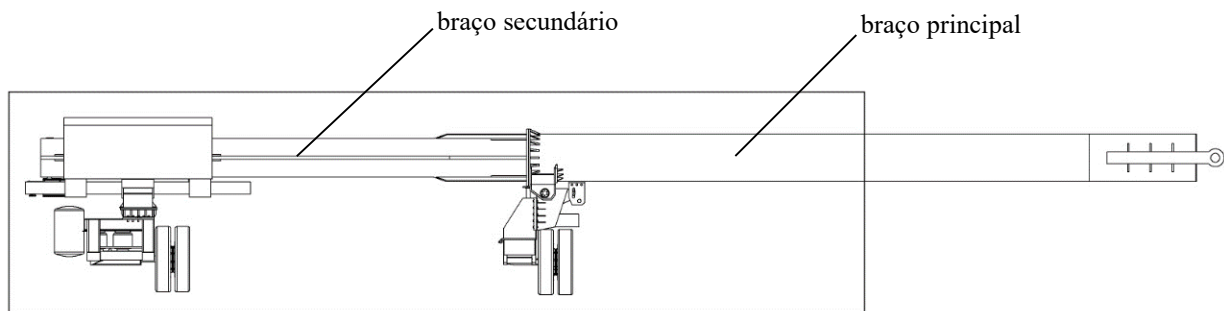
A: área transversal à direção do movimento, em m²;

V: velocidade, em m/s.

Devido à impossibilidade de determinar o coeficiente de arrasto com uso de simulação em túnel de vento para esta pesquisa, adotar-se-á uma composição de áreas utilizando coeficientes de geometrias conhecidas para o cálculo da força de arrasto aerodinâmico. Para tanto, o coeficiente da esfera (0,47) será utilizado para as superfícies curvas e do cubo (1,05) para as demais, extraído de McCormick (1976).

A área transversal à direção do movimento circular executado pelo carrossel de fadiga foi determinada considerando as dimensões do braço de teste (Figura 3.5, item 3), a partir da metade do braço principal até a extremidade do braço secundário, conforme indicado pelo destaque retangular na Figura 3.6, em consonância à respectiva configuração de eixos em cada caso. Foram obtidos os valores de 14,9 m² e 16,2 m² para situações com semi-eixos e eixos inteiros acoplados, respectivamente. Maiores detalhes sobre o projeto do braço de teste serão tratados no tópico 3.4.2, bem como as dimensões exatas para obtenção das áreas informadas se encontram identificáveis na seção de Anexos.

Tabela 3.6 - Região considerada para a determinação das áreas transversais à direção do movimento circular.



Fonte: Autor.

Cabe destacar que a região que abrange o destaque retangular foi a escolhida para o cálculo das áreas transversais, devido abranger a extremidade livre do braço de teste. Logo, possui maior influência da aceleração centrípeta durante o movimento circular realizado pelo carrossel de fadiga, se comparada à região próxima ao engate na torre central de acionamento, localizada na outra extremidade.

Desta forma, tomando como base a Equação 3.5, bem como o perímetro de 125,7 m percorrido pelo carrossel de fadiga para gerar as rotações por segundo das solicitações (Equação 3.4), tem-se que a potência referente às perdas por arrasto aerodinâmico (P_{AA}) pode ser calculada a partir da Equação 3.6, partindo do mesmo princípio adotado para a formulação da Equação 3.3.

$$P_{AA} = \frac{C A \rho V^2 R 2\pi n}{2000} \quad (3.6)$$

onde:

P_{AA} : potência devido às perdas por arrasto aerodinâmico, em kW.

c) Perdas por atrito nos rolamentos das rodas

As perdas por atrito nos rolamentos das rodas podem ser calculadas a partir de um *software* da fabricante SKF[®] disponível na rede mundial de computadores (SKF, 2021), o qual considera um cálculo complexo de diversos fatores e perdas parasíticas sobre estes aspectos. Contudo, devido as perdas desta natureza serem muito baixas, na ordem de menos de 0,3%, aliada à necessidade de potência extra para aceleração de todo o conjunto do carrossel de fadiga ser muito maior, a sua quantificação é irrelevante para fins de dimensionamento estrutural.

3.4.1.3 Definição das configurações dos carregamentos solicitantes e da potência instalada

O carrossel de fadiga dispõe de diversas possibilidades de utilização quanto à configuração e quantidade de eixos inteiros ou semi-eixos a serem acoplados nos trens de eixos, sempre levando em conta a simetria das cargas para não ocasionar desbalanceamento do centro de massa, a fim de evitar vibrações destrutivas ocasionadas pela geração de amplitudes verticais desiguais nos extremos dos braços de teste, situações que conduzem à fadiga precoce dos elementos mecânicos de atracação e apoio.

As seguintes possíveis combinações foram consideradas de eixos inteiros e semi-eixos para utilização, com base nas cargas por eixo admissíveis no Brasil (CONTRAN, 2021):

- 1: 4 braços com semi-eixo simples de roda dupla de 6,0 t (total de 24,0 t);
- 2: 4 braços com semi-eixo tandem duplo de 11,0 t (total 44,0 t);
- 3: 4 braços com semi-eixo tandem triplo de 14,25 t (total 57,0 t);
- 4: 4 braços com eixo simples de roda dupla de 12,0 t (total 48,0 t);
- 5: 4 braços com eixos inteiros tandem duplo de 22,0 t (total 88,0 t);
- 6: 2 braços com eixos tandem triplo de 28,5 t (total 57,0 t);

Como cada braço de teste possui capacidade de suportar cargas até 40,0 t, considerando o coeficiente estrutural de segurança em 1,4, conforme mencionado no tópico 3.4, tem-se que as combinações possíveis de serem previstas atendem às cargas por eixo admitidas pelo CONTRAN (2021). Porém, tanto a capacidade máxima dos carregamentos quanto os cuidados em relação à simetria de distribuição dos esforços nos braços devem ser respeitadas em todos os casos.

De toda forma, as seis combinações consideradas para efeito de dimensionamento estrutural, abrangem as condições mais críticas de carregamento aplicado por eixo em cada situação. Logo, têm-se que geram diferentes condições de esforços e perdas de energia tanto no contato pneu-pavimento quanto no arraste aerodinâmico.

A Tabela 3.2 apresenta os valores calculados em função da máxima velocidade de trabalho do carrossel de fadiga em 100 km/h, tomando em conta o CR mais crítico de 1,5 (Tabela 3.1) com o uso da Equação 3.2. Neste contexto, cabe esclarecer que apesar da indústria fabricante de pneus mundial produzir atualmente em maior escala a configuração de pneus radiais para caminhões, relacionado à Equação 3.1, tem-se que a utilização da Equação 3.2, para pneus diagonais, deu-se em razão de prover perdas calculadas mais críticas, devido dispor de maiores

coeficientes multiplicadores em sua formulação. Desta forma, proporcionando um dimensionamento para condições mais conservadoras no que tange às perdas por atrito no contato pneu-pavimento.

Desta forma, foi obtido o fator de atrito 'Frr' de 0,01343, enquanto as respectivas perdas de potência por atrito no contato pneu-pavimento e por arrasto aerodinâmico foram determinadas pelas Equações 3.3 e 3.6, respectivamente.

Tabela 3.2 – Combinações possíveis e respectivas perdas.

Combinação	Carga total (t)	Perdas no contato pneu-pavimento (kW)	Perdas Aerodinâmicas (kW)	Total das perdas (kW)	Total + 20% (kW)
1	24,0	87	367	454	545
2	44,0	160	367	527	632
3	57,0	207	367	574	689
4	48,0	175	399	573	688
5	88,0	320	399	719	862
6	57,0	207	199	407	488

Fonte: Autor.

A partir dos dados da Tabela 3.2, verifica-se que a combinação 5 é a condição que exige maior potência de acionamento, compreendendo 719 kW de perdas. Para segurança, foi estabelecido um fator de 1,2 ou 20% a mais de potência instalada nos conjuntos motorreductores, visando maior durabilidade destes equipamentos, com o intuito de que não trabalhem no limite de potência nominal na condição mais crítica de carregamento. Dessa forma, a potência instalada na torre central de acionamento será de 900 kW ou 1200 cv, composta por 4 motorreductores com 225 kW ou 300 cv por unidade. Cada motorreductor terá 14.500 N.m de torque e 150 rpm de velocidade de saída. Maiores detalhes das especificações serão disponibilizados no tópico 3.4.1.4.

Assim, garante-se folga no trabalho mecânico realizado pelo conjunto de motorreductores, sem que desenvolva as suas funções próximo ou superior ao limite estabelecido de potência para o sistema de acionamento da torre central.

Por esta razão, não foram adotados 4 braços de teste com eixos em tandem triplo na combinação 6, pois a potência total das perdas nominais atingiria 813 kW, com um pico de 976 kW ao adicionar 20% do coeficiente de segurança, o que acarretaria em um regime de trabalho próximo e superior, respectivamente, à potência dimensionada de 900 kW para o sistema de acionamento da torre central, além de gerar um consumo muito elevado de energia.

A adoção de conjuntos motorreduzidores elétricos para acionamento da torre central possibilita maior eficiência energética do que a solução baseada em motores e bombas hidráulicas, em razão das soluções do tipo *servodriver* permitirem o controle ideal e preciso da potência gerada em relação à potência entregue aos componentes, devido não haver perda parasítica mecânica significativa nas engrenagens durante os processos de transmissão. Como resultado, tem-se um sistema de acionamento que exige menor consumo de energia, e conseqüentemente, mais econômico, com rendimento em níveis acima de 90%, conforme será detalhado no tópico 3.4.1.4.

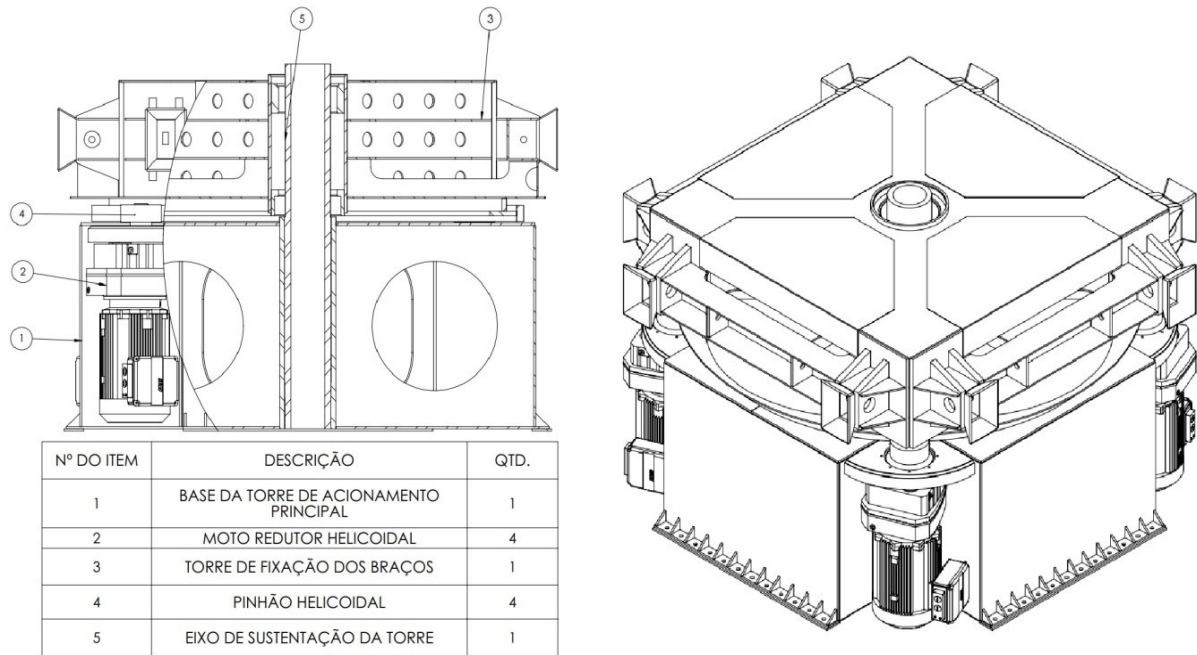
3.4.1.4 Concepção mecânica

A estrutura da torre de acionamento central do carrossel de fadiga tem a função de suportar os quatro braços girando em torno do seu eixo, em razão de ser submetida a forças radiais de elevada intensidade, dada à aceleração centrípeta ocasionada pelos movimentos circulares, além do momento de giro e da força peso. Entre estas variáveis mencionadas, a aceleração centrípeta ($a = V^2/R$) é a de maior grandeza, podendo atingir cerca de quatro vezes a força peso gravitacional na máxima velocidade de 100 km/h (28 m/s), considerando o raio de giro com 20,0 m dos braços de teste (Figura 3.3).

Portanto, esta trajetória circular de giro deve ter um controle suave e preciso para não gerar solavancos verticais na estrutura, o que contribuiria para o aumento das forças de carregamento.

A base da torre central de acionamento é ancorada a uma estrutura em concreto armado por flanges e parafusos do tipo parabolt. Desta base provém um eixo central, o qual é integrado por rolamentos à torre de fixação dos braços, conforme ilustram os itens 1, 3 e 5 da Figura 3.7.

Figura 3.7 - Visão geral da base e da torre central de acionamento.

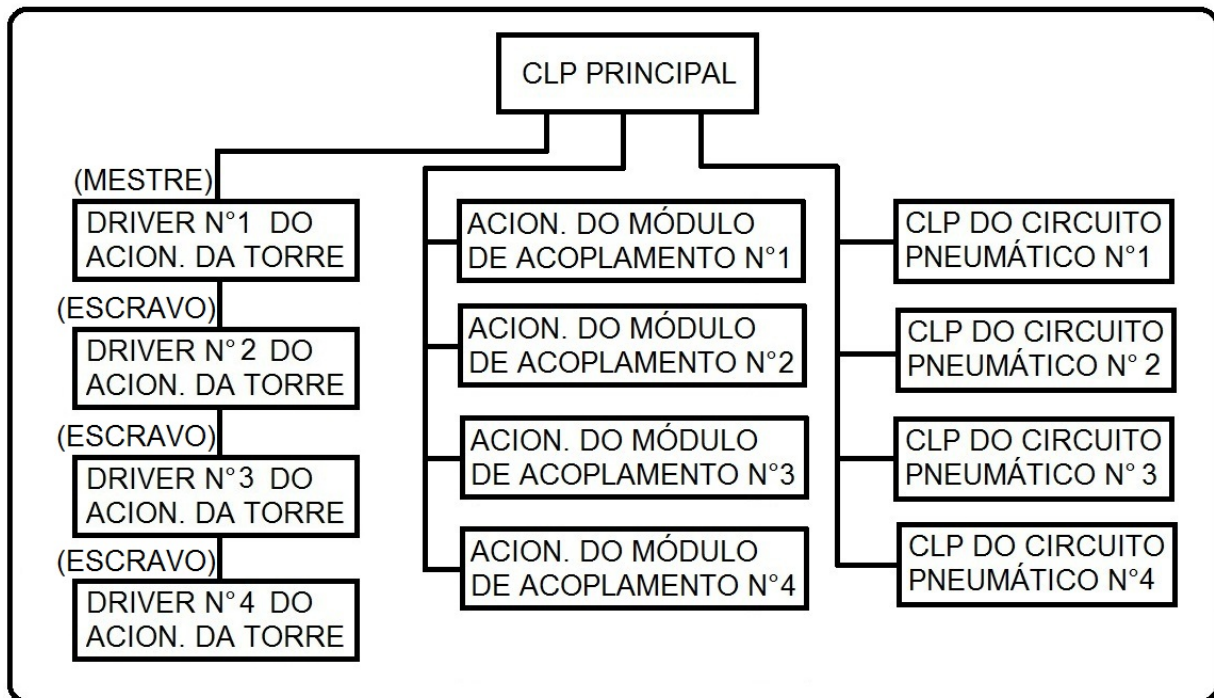


Fonte: Autor.

A torre central é acionada a partir de uma coroa dentada fixada na parte inferior. Quatro pinhões acoplados aos motorreduzores movem a referida coroa em um acionamento coordenado por sistema Controlador Lógico Programável (CLP). Logo, o CLP realiza o controle dos quatro *servodrivers* individualmente, e que cada unidade aciona um motorreduztor, também em número de quatro (Figura 3.7, item 2). Com este tipo de sistema instalado é possível limitar o torque máximo de acionamento, a fim de controlar a força de solicitação do equipamento.

Portanto, um CLP principal centraliza o funcionamento de todo o carrossel (Figura 3.8), controlando os *drivers* de cada motor elétrico do acionamento da torre central e dos módulos de acoplamento, além do sistema pneumático. Neste contexto, tem-se que o controle do acionamento da torre central é feito diretamente por apenas um *driver* denominado mestre, o qual controla os outros três chamados de *drivers* escravos.

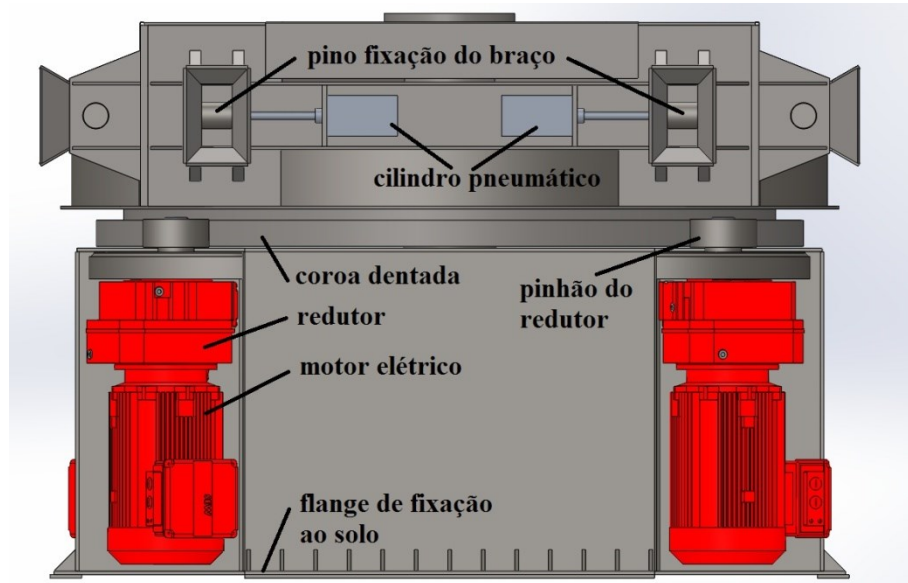
Figura 3.8 - Fluxograma de controle do carrossel de fadiga por sistema CLP.



Fonte: Autor.

Cada braço de teste é fixado à torre por dois pinos acoplados a cilindros pneumáticos acionados por molas no travamento e ar comprimido no retorno (Figura 3.9), para evitar que os pinos desacoplem involuntariamente por escorregamento ou ausência de pressão. A lubrificação dos pinhões do redutor deve ser procedida com o uso de graxa, enquanto tampas metálicas devem cobri-los, bem como a coroa dentada, a fim de proteger o conjunto da contaminação por poeira e do contato direto com água.

Figura 3.9 - Desenho esquemático do sistema de acionamento central.



Fonte: Autor.

Com esta configuração de acionamento é possível dimensionar a estrutura da base e da torre central, considerando as condições de potência instalada com 900 kW ou 1200 cv e velocidade máxima de trabalho em 100 km/h, especificadas ao final do tópico 3.4.1.3. A Figura 3.10 ilustra o modelo do motorreductor assíncrono de corrente alternada, bem como a Tabela 3.3 apresenta as respectivas especificações do equipamento, que permite o eixo de cada motorreductor suportar a máxima força radial de 86.200 N a ser aplicada para movimentação do conjunto pinhão/cremalheira, limitando o torque do acionamento.

Figura 3.10 - Motorreductor do sistema de acionamento principal.



Fonte: SEW EURODRIVE® (2021).

Tabela 3.3 - Especificações do motorreductor do sistema de acionamento central - modelo RF167DRE315L4/TF.

Função	Unidade	Valor
Velocidade nominal do motor	1/min	1783
Velocidade de saída	1/min	149
Redução total	-	11,99
Torque de saída	N.m	14500
Fator de serviço SEW-FB	-	1,20
Entrada posição de montagem	-	M2
Posição da caixa de terminais	°	0
Posição de entrada cabo/conector	-	X
Eixo de saída	mm	120 x 210
Força radial permitida com n = 1400	N	86200
Quantidade de lubrificante 1 st gear unit	Litro	82
Diâmetro do flange	mm	550
Potência do motor	kW	225
Fator de duração	-	S1-100%
Classe de eficiência	-	IE2
Eficiência (50/75/100% Pn)	%	- / 96 / 95,5
Marca CE	-	Sim
Tensão do motor	V	380/660
Circuito de ligação	-	R13
Frequência	Hz	60
Faixa de corrente	A	405/235
cos φ	-	0,89
Classe termal	-	155 (F)
Tipo de proteção do motor	-	IP55
Modelo desejado	-	Brasil (ABNT)
Peso líquido	kg	1740

Fonte: SEW EURODRIVE® (2021).

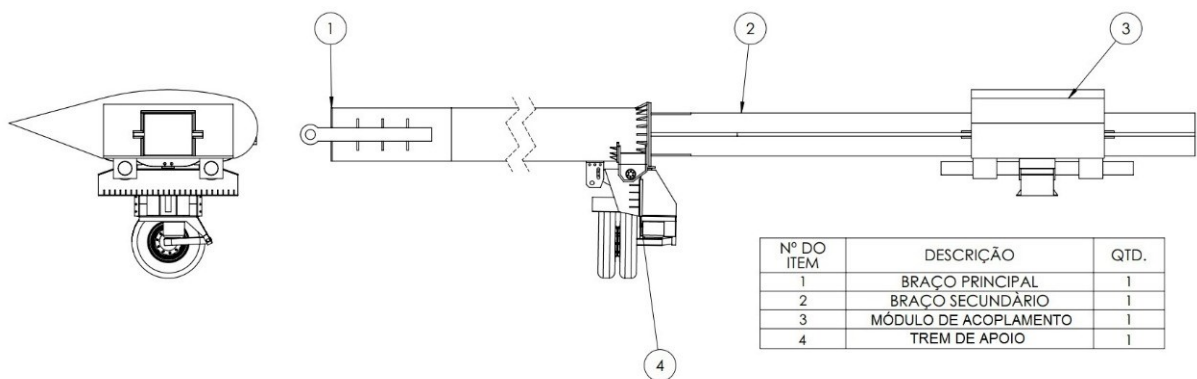
Os materiais para construção da base e da torre central de acionamento podem ser chapas de aço carbono, oxi-cortadas, unidas por soldagem ao eixo central e ao cubo pré-usinados, ou outro material apropriado. Entretanto, o aço carbono é mais econômico que a fabricação por fundição quando a quantidade produzida é pequena, além das peças terem menor peso próprio.

3.4.2 Braço de Teste

O braço de teste tem a função principal de transmitir o movimento circular da torre central de acionamento para o trem de eixos. O trem de apoio intermediário tem a função de suportar a força peso excedente que não é aliviada pelo sistema de controle de carga sobre o trem de eixos, além das prerrogativas funcionais já discutidas no tópico 3.4.

Na Figura 3.11 verifica-se que o braço principal (item 1) é acoplado ao conjunto base/torre central de acionamento (Figura 3.7), enquanto o braço secundário (item 2) estabelece a ligação entre o conjunto mencionado e o módulo de acoplamento (item 3) do trem de eixos. As rodas ao centro constituem parte do sistema do trem de apoio intermediário (item 4). Isolado à esquerda encontra-se uma vista em plano de corte do trem de eixos, fixado à parte inferior pelo eixo do módulo de acoplamento. Assim, o braço de teste deve suportar esforços dinâmicos de flexão e torção desde a fixação à torre até o encaixe ao referido módulo.

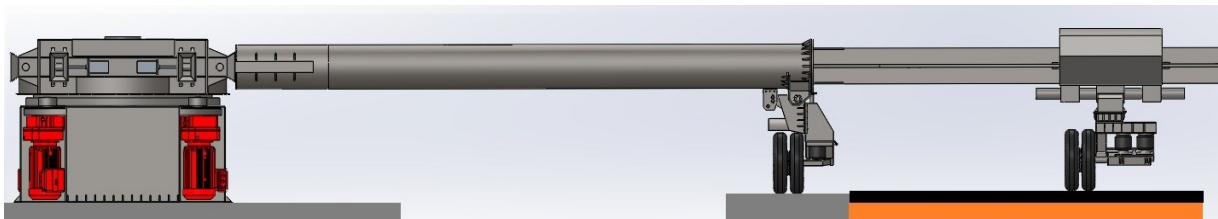
Figura 3.11 - Elementos componentes do braço de teste.



Fonte: Autor.

A Figura 3.12 ilustra uma visão geral do braço de teste composto o conjunto de elementos mecânicos que solicitam a estrutura de pavimento do carrossel de fadiga. As rodas de apoio intermediárias fazem parte do sistema de controle de carregamento do trem de eixos, o qual será abordado em detalhes no tópico 3.4.5.

Figura 3.12 - Visão geral do braço de teste na composição do carrossel de fadiga.



Fonte: Autor.

3.4.2.1 Prerrogativas técnicas

O sistema de encaixe do braço de teste à torre central de acionamento, descrito no tópico 3.4.1.4, deve ser simples, para permitir a montagem e desmontagem dos componentes, devido à

possibilidade de mudança para outro anel de pista de testes ou pela necessidade de alteração da quantidade de braços para uma dada campanha experimental.

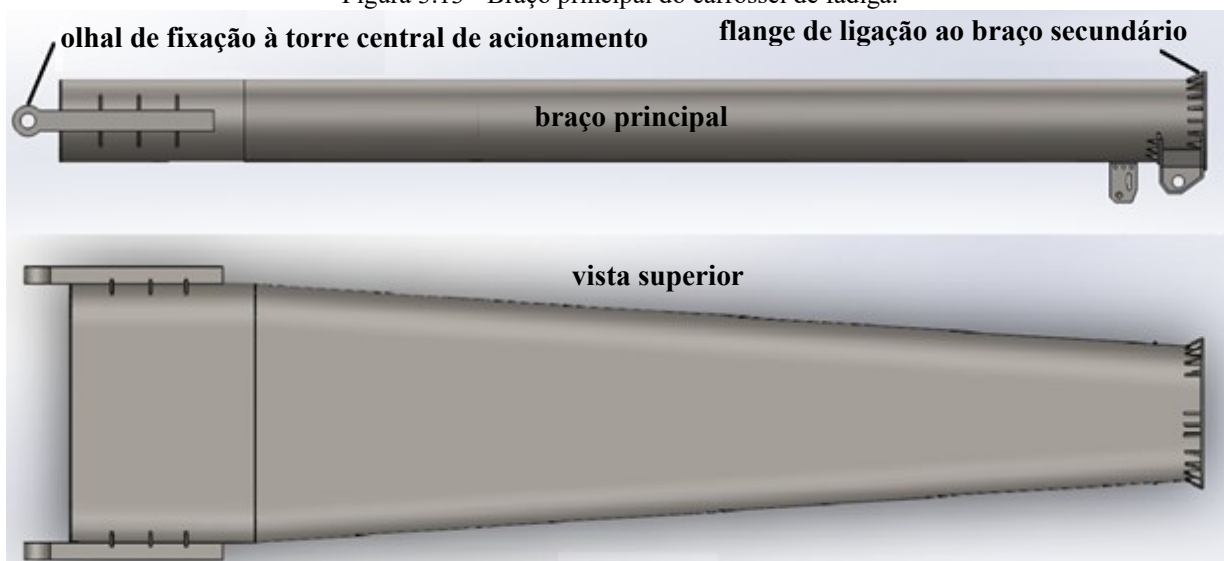
A estrutura do braço de teste deve possuir secção tubular para conferir maior rigidez aos esforços de torção e flexão gerados pelas forças de atrito, centrípeta e peso. Deverá também comportar um sistema de contrapesos para alteração e ajuste das cargas do trem de eixos, que seja robusto e de simples manuseio.

A necessidade de modificação no raio de atuação do trem de eixos para o adequado posicionamento na pista de testes é outra característica que deve ser prevista. Trata-se de um perfil com furações pré-definidas, que permitem a locação do trem de eixos em diferentes posições na seção transversal da pista, isto é, um ajuste fixo realizado antes de iniciar o ensaio. Porém, não corresponde ao sistema autônomo de varredura transversal de rodas. Ambas as soluções serão abordadas mais adiante.

3.4.2.2 Concepção mecânica

A estrutura do braço de testes é dividida em duas partes, o braço principal e o braço secundário. O braço principal é fixado à torre central de acionamento por duas hastes com engate tipo olhal e pino, enquanto na outra extremidade possui uma junta flangeada aparafusada para fixação ao braço secundário (Figura 3.13). Esta mesma extremidade da junta flangeada é suportada pelo conjunto de rodas do trem de apoio (Figura 3.12), o qual é fixado por três flanges soldadas à estrutura, a serem melhor detalhadas no tópico 3.4.3.

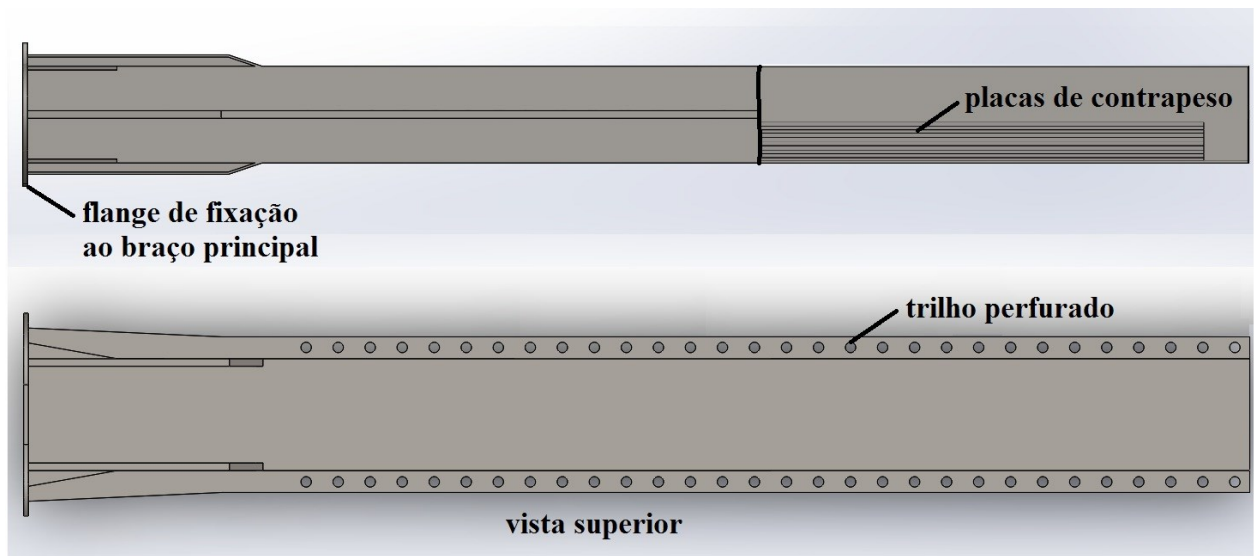
Figura 3.13 - Braço principal do carrossel de fadiga.



Fonte: Autor.

O braço secundário é fixado ao principal pela junta flangeada indicada na Figura 3.13, a qual deve suportar os esforços de flexão e tração oriundos da movimentação dinâmica durante os ensaios. Comporta também um perfil em forma de trilho perfurado e soldado em sua estrutura (Figura 3.14), para que seja possível regular a posição do módulo de acoplamento do trem de eixos antes do início dos ensaios, a partir de pinos de fixação, aonde se deseja realizar a passagem do carregamento sobre a pista de testes. Esta condição possibilita a solicitação da referida pista em sua plenitude durante a campanha experimental.

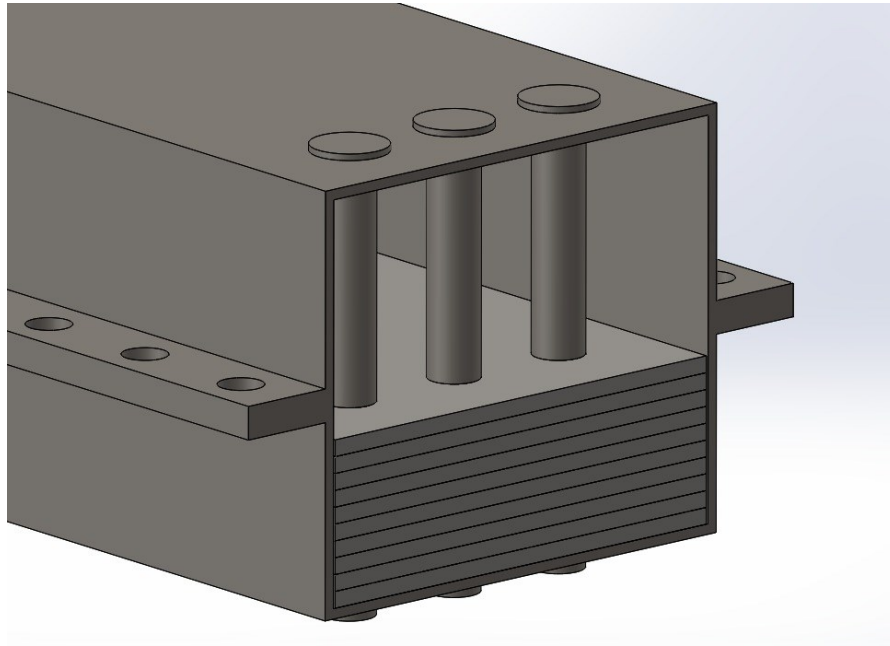
Figura 3.14 - Braço secundário do carrossel de fadiga.



Fonte: Autor.

Ainda, o braço secundário dispõe de um sistema para fixação de placas de contrapeso, as quais regulam a condição de carregamento que se deseja aplicar sobre o trem de eixos. As placas devem ser fabricadas em aço carbono, sendo removíveis e dispostas no interior da estrutura tubular à extremidade de contato com o módulo de acoplamento e travadas por pinos de fixação (Figura 3.15).

Figura 3.15 - Placas de contrapeso e respectivo sistema de travamento.



Fonte: Autor.

3.4.3 Trem de Apoio

A principal função do trem de apoio é suportar uma parte da força peso transferida pelo sistema de controle de carga do trem de eixos ao braço de testes secundário, a fim de manter a intensidade da solicitação invariável sobre a pista de testes, ou seja, absorve parte do esforço mecânico aliviado durante a execução dos ensaios. A força peso sobre este componente é variável e pode ser ajustada pelo sistema mencionado, balanceando a transferência de carga. Maiores detalhes acerca destas condições serão abordados no tópico 3.4.5 referente ao projeto do trem de eixos. Complementam as contribuições do trem apoio ao carrossel de fadiga os aspectos já discutidos no tópico 3.4.

3.4.3.1 Prerrogativas técnicas

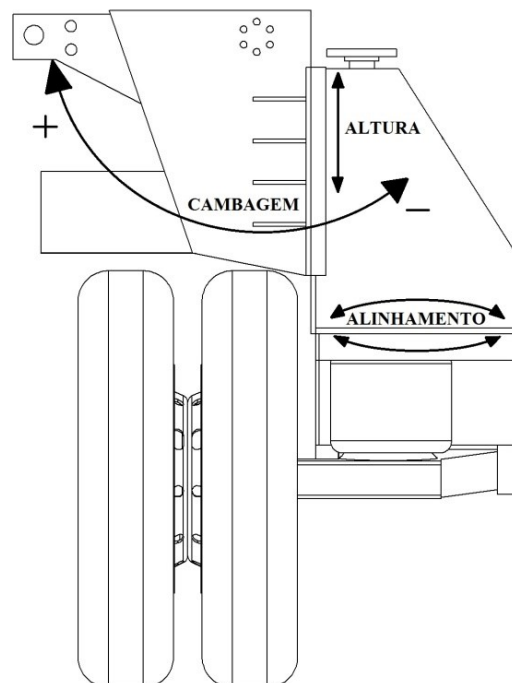
O trem de apoio é composto por um semi-eixo de roda dupla, comportando um sistema de regulagem de altura, alinhamento e cambagem. Suporta uma carga máxima baseada no limite de resistência admissível de dois pneus do tipo 11.00R22 da Goodyear[®], que comportam uma capacidade de carga unitária entre 3,250 t a 3,550 t, perfazendo um total de até 7,1 t para um conjunto de rodas duplas (YUMPU, 2021).

Como o braço de teste executa uma trajetória circular, é necessário que os pneus tenham um alinhamento perfeito com a tangente do movimento a ser executado, a fim de que não ocorra um arraste destes no sentido lateral, o que provocaria aumento das condições de atrito no contato com o pavimento, gerando maior desgaste dos pneus e desperdício de energia no acionamento do carrossel de fadiga. Portanto, o trem de apoio deve possuir um sistema de regulagem ou ajuste fino do ângulo em relação à trajetória de percurso.

Outro ajuste necessário é da cambagem das rodas ou ângulo perpendicular, em relação ao plano da superfície da plataforma de rolamento (Figura 3.12), com o intuito de evitar o desgaste desigual da banda de rodagem do par de pneus. Este ajuste de inclinação vertical também deve ser incluído no sistema de fixação do trem de eixos.

A altura dos pneumáticos em relação ao braço de teste também é outro fator que necessita de uma faixa de ajuste, devido à necessidade deste último estar nivelado com o plano horizontal, para evitar que a força centrífuga gerada durante o movimento circular altere substancialmente a força peso do braço sobre o trem de eixos. A Figura 3.16 ilustra os princípios de regulagem da altura, alinhamento e cambagem do trem de apoio.

Figura 3.16 - Sistemas de regulagem do trem de apoio.

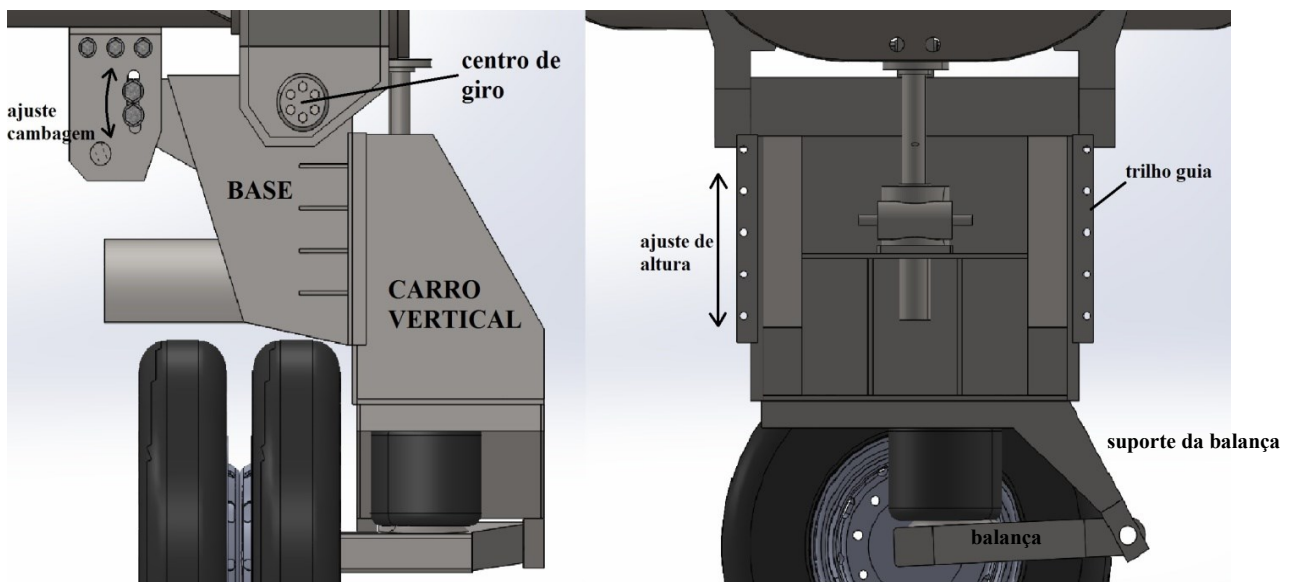


Fonte: Autor.

3.4.3.2 Concepção mecânica

O ângulo de cambagem é ajustado a partir de uma placa centrante com seis parafusos, em que a regulagem é realizada com dois parafusos que fixam a base do trem de apoio a uma placa dupla ancorada ao braço principal, em que um tirante com pinos acoplados às duas peças são utilizados para ajuste fino, desempenhando a função de um centro de giro. Para o ajuste da altura são utilizados dois trilhos guias que fazem com que o componente denominado carro vertical deslize para cima e para baixo guiado pela base adjacente, a partir de um atuador mecânico manual instalado no referido carro. Concluído o procedimento, os parafusos dos trilhos guias são apertados para bloquear o movimento (Figura 3.17).

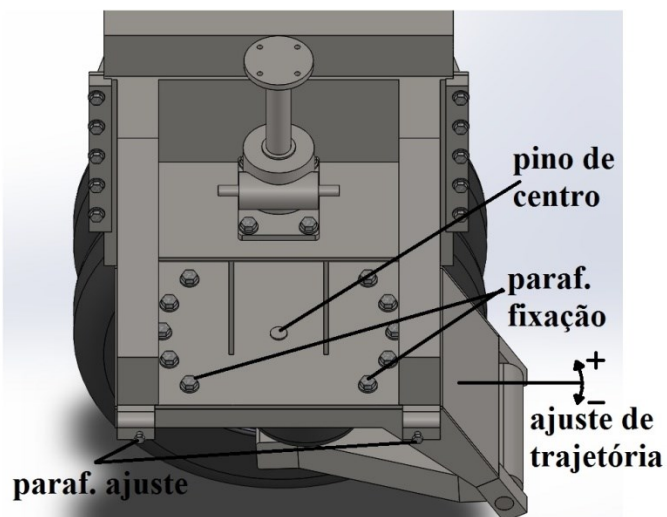
Figura 3.17 - Sistemas de ajustes vertical e cambagem.



Fonte: Autor.

O alinhamento da trajetória é regulado por dois parafusos de ajuste, fazendo com que o suporte da balança de suspensão (Figura 3.17) gire no eixo do pino de centro, o qual desloca o eixo de alinhamento para cima ou para baixo conforme a necessidade de alinhamento. O travamento é feito por parafusos de fixação que ancoram o carro vertical ao suporte da balança, os quais devem frouxos para execução do alinhamento, sendo apertados após a operação (Figura 3.18).

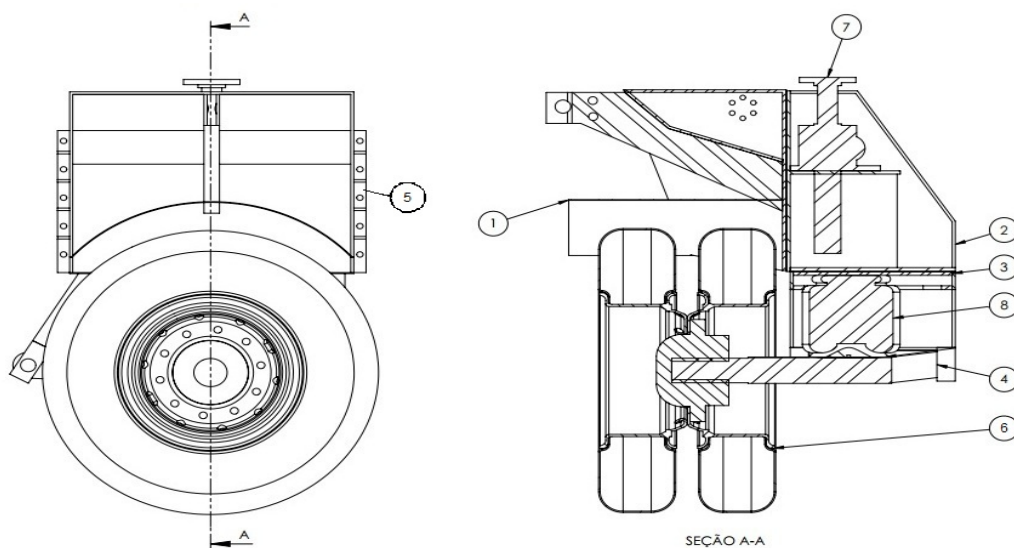
Figura 3.18 - Sistemas de alinhamento de trajetória das rodas.



Fonte: Autor.

O sistema de regulagem permite além do ajuste manual de altura, um ajuste fino com o uso da mola pneumática (Figura 3.19, item 9) instalada entre a balança da suspensão e o carro vertical, a qual pode ser inflada com ar comprimido fazendo o trem de apoio subir ou descer. A balança é fixada ao carro vertical por um pino de centro em aço carbono, deslizando em uma bucha de bronze lubrificada com graxa.

Figura 3.19 - Visão geral do apoio intermediário do braço de teste.



ITEM	DESCRIÇÃO	QTD.	ITEM	DESCRIÇÃO	QTD.
1	BASE DO TREM DE APOIO	1	5	GUIA DO CARRO	2
2	BASE INTERMED RODA MEDIA	1	6	SUBMONTAGEM PNEUS	1
3	BASE DE FIXAÇÃO DA BALANÇA	1	7	ATUADOR MECÂNICO 20T	1
4	BALANÇA DO TREM DE APOIO	1	8	MOLA PNEUMÁTICA	1

Fonte: Autor.

3.4.4 Módulo de Acoplamento

O módulo de acoplamento faz a ligação do braço de teste secundário ao trem de eixos (Figura 3.11, item 3), transmitindo o movimento circular gerado pela torre central de acionamento (Figura 3.12), bem como a força peso do braço mencionado e respectivos contrapesos (Figura 3.15) diretamente ao trem de eixos. Desempenha uma das funções essenciais durante as campanhas experimentais, que é o movimento de varredura transversal das rodas.

A fixação do módulo de acoplamento ao braço de teste secundário deve ser robusta e segura, para que não haja nenhuma possibilidade de desprendimento, o que causaria uma situação catastrófica com risco de morte para qualquer pessoa próxima do equipamento, devido à força centrípeta ser quatro vezes maior que a força da gravidade quando o equipamento estiver a uma velocidade de 100 km/h. Logo, um coeficiente de segurança deve ser previsto no projeto estrutural para reduzir a possibilidade de falhas.

3.4.4.1 Prerrogativas técnicas

O módulo de acoplamento deve suportar forças centrípetas que podem chegar a quatro vezes a força peso gravitacional, conforme já mencionado, além de executar movimentos de varredura transversal do trem de eixos, que representam a passagem aleatória dos veículos sobre as estruturas de pavimento, em faixas de trânsito e não em trilhas de roda fixas. A variação deste movimento lateral deve ser ajustável no curso dos testes, bem como a velocidade e a repetibilidade.

Outra função a ser desempenhada por este módulo compreende a necessidade de posicionamento radial da estrutura base do acoplador do trem de eixos no braço de teste secundário, com a finalidade de selecionar uma faixa de abrangência transversal para a passagem das rodas do trem de eixos sobre a pista de testes, conforme a necessidade.

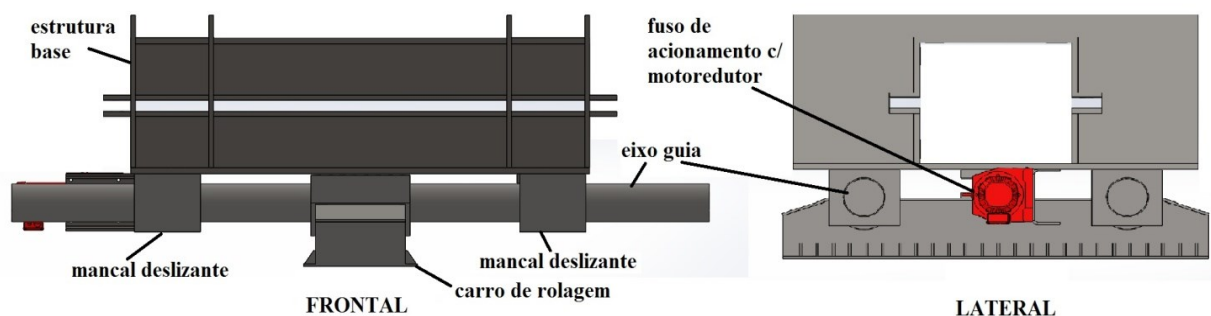
3.4.4.2 Concepção mecânica

O módulo de acoplamento é composto por três subconjuntos (Figura 3.20):

- Estrutura base;
- Acoplador do trem de eixos;

- Sistema de acionamento do acoplador do trem de eixos.

Figura 3.20 - Vistas frontal e lateral do módulo de acoplamento do trem de eixos.

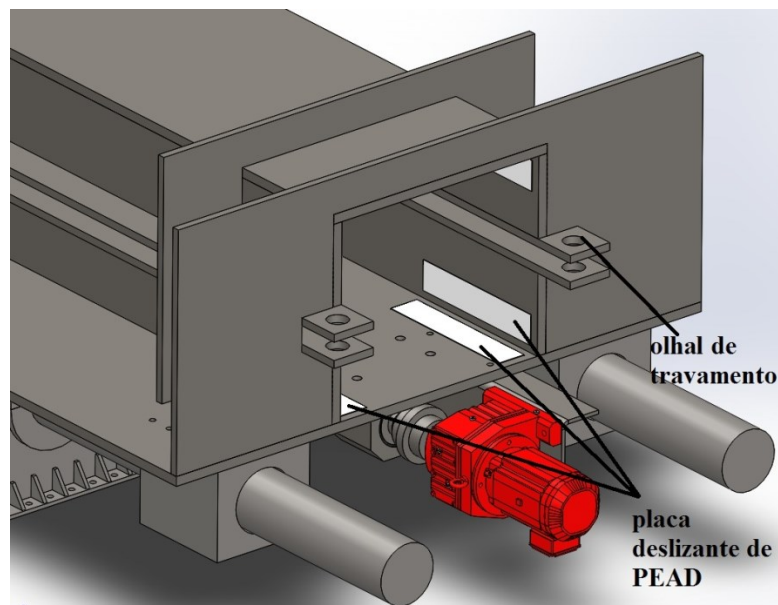


Fonte: Autor.

A estrutura base desliza sobre o braço de teste secundário a partir de chapas de aço carbono soldadas entre si, formando um guia em formato tubular que envolve o braço secundário (Figuras 3.11 e 3.12).

Um conjunto de oito pares de placas fabricadas com Polietileno de Alta Densidade (PEAD) fazem o contato entre a estrutura base e o tubo de aço do braço, garantindo as propriedades de baixo coeficiente de atrito e alta resistência a abrasão, necessárias à maior durabilidade dos componentes. Ainda, as placas de PEAD permitem que a estrutura base deslize de modo que a regulagem da posição desejada do acoplador do trem de eixos seja obtida com precisão. Para o travamento da estrutura base são utilizados quatro olhais posicionados nas faces laterais e fixados por pinos de aço temperado. Na face inferior da estrutura base são usinadas furações, roscas e plainados os pontos de ancoragem dos mancais guia e do fuso de acionamento (Figura 3.21).

Figura 3.21 - Sistemas de guias e olhal de travamento do módulo de acoplamento.



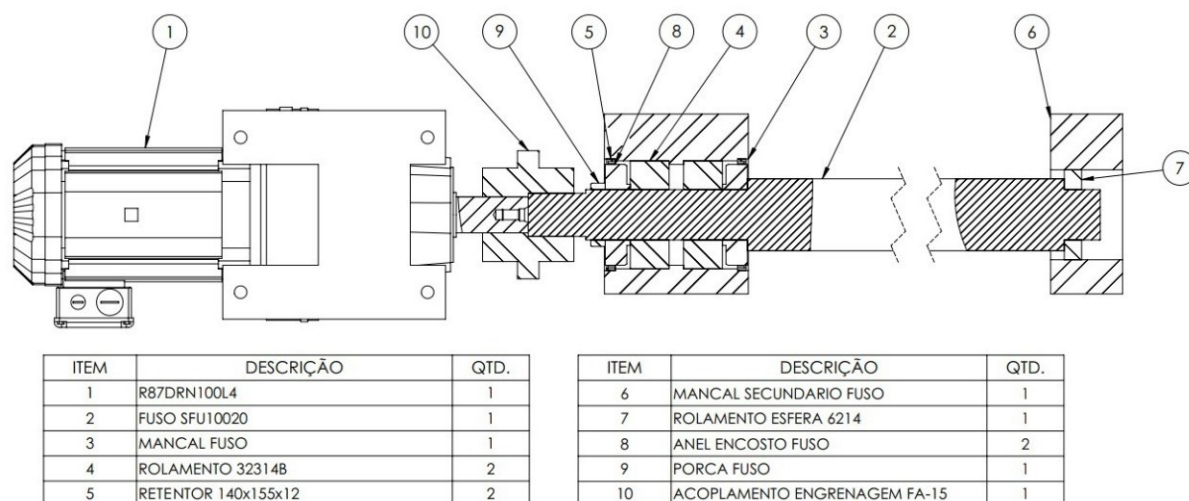
Fonte: Autor.

O módulo de acoplamento do trem de eixos possui uma base fabricada em chapas de aço carbono soldadas, com dois mancais usinados para fixação de um par de eixos guias (Figuras 3.20 e 3.21), fabricados em aço 4340 temperados, retificados e aparafusados na referida base. O par de mancais deslizantes suporta e orienta os eixos guia, com buchas de bronze lubrificadas por graxa e fixados à estrutura base por parafusos. Além disso, os eixos guias devem ser cobertos por tubos guarda pó sanfonados para proteção das guias do contato direto com poeira, areia e água.

O sistema de acionamento do módulo de acoplamento é composto por um fuso de esferas retificado com 100,0 mm de diâmetro e, de um passo com 20,0 mm que gira a uma velocidade máxima de 20 rpm, realizando movimentos a uma velocidade máxima de 400 mm/min. Portanto, considerando a velocidade máxima de 100 km/h de operação do carrossel de fadiga, tem-se que para completar o perímetro de 125,7 m do anel da pista de testes, ou seja, uma volta completa, é gasto o tempo de 4,5 s. Assim, o fuso desloca-se 30,0 mm a cada volta para um sentido de varredura, necessitando de 40 voltas para completar o comprimento total de 1,2 m.

O fuso é fixado por dois rolamentos de rolos cônicos opostos entre eles, ancorados a um mancal fabricado em aço 4340 aparafusado na estrutura base. Os rolamentos são lubrificados com graxa e a vedação é feita por dois retentores que protegem os anéis de encosto também fabricados em aço 4340 temperados e retificados (Figura 3.22).

Figura 3.22 - Sistema de acionamento do módulo de acoplamento.



Fonte: Autor.

Na extremidade do fuso, um rolamento de esferas blindado (Figura 3.22, item 7) executa a fixação radial deste ao mancal ancorado à estrutura base (item 6), permitindo que haja dilatação axial do fuso no sentido horizontal. Um redutor planetário é acoplado a um motor elétrico assíncrono de corrente alternada (Figura 3.23), amplificando o torque de acionamento para 1650 N.m na saída do redutor (Tabela 3.4).

Figura 3.23 - Motorreductor de acionamento do módulo de acoplamento.



Fonte: SEW EURODRIVE® (2021).

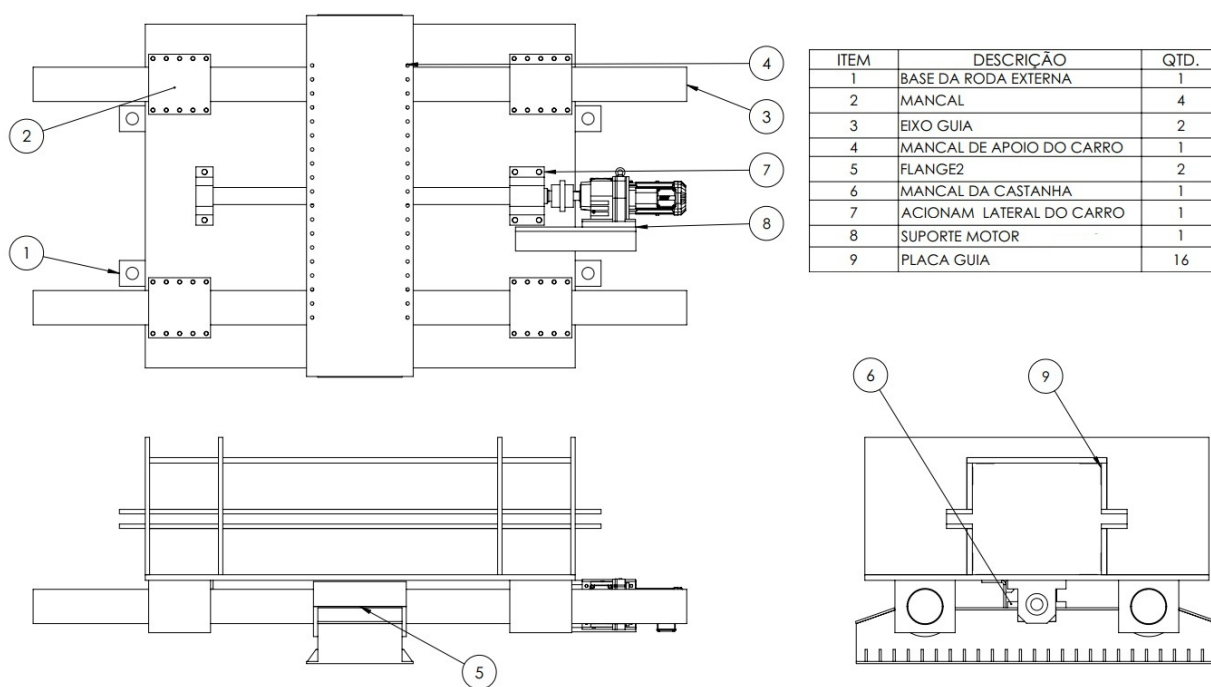
Tabela 3.4 - Especificações do conjunto motorreductor de acionamento do módulo de acoplamento - modelo R87DRN100L4.

Função	Unidade	Valor
Velocidade nominal do motor	l/min	1758
Velocidade de saída	l/min	21
Relação de transmissão média	-	81,92
Torque de saída	N.m	1650
Fator de serviço SEW-FB	-	0,95
Entrada posição de montagem	-	M1
Posição da caixa de terminais	°	0
Eixo de saída	mm	120 x 210
Força radial permitida com n = 1750	N	11100
Quantidade de lubrificante Redutor	Litro	2,3
Potência do motor	kW	3,7
Fator de duração	-	S1-100%
Classe de eficiência	-	IR3
Eficiência (50/75/100% Pn)	%	87,75 / 89,4 / 89,5
Tensão do motor	V	220/380
Circuito de ligação	-	R13
Frequência	Hz	60
Faixa de corrente	A	15/8,7
cos φ	-	0,72
Classe termal	-	155 (F)
Tipo de proteção do motor	-	IP55
Modelo desejado	-	Brasil (ABNT)
Momento de inércia de massa do motor	10^{-4} kg.m ²	
Peso líquido	kg	95

Fonte: SEW EURODRIVE® (2021).

A interação entre o redutor e o fuso é realizada por um acoplador de aço, modelo FA-15, (Figura 3.22, item 10) com sistema de engrenagem capaz de suportar torques de até 4000 N.m, conforme especificações da fabricante AFX Acoplamentos (2021), permite desalinhamento entre eixos de até 0,5°. O módulo de acoplamento possui uma estrutura base que comporta muitos furos, com a finalidade de facilitar a fixação do trem de eixos, conforme ilustra a Figura 3.24.

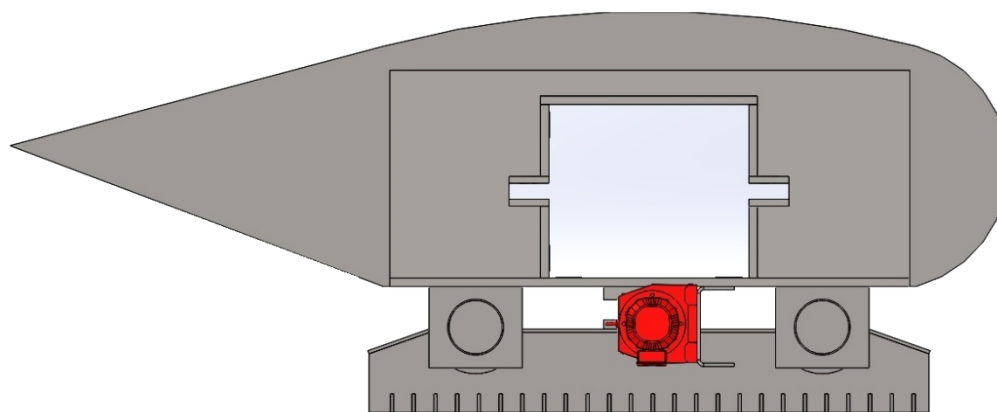
Figura 3.24 - Desenho esquemático da estrutura do módulo de acoplamento.



Fonte: Autor.

Por fim, uma cobertura do módulo de acoplamento com formato aerodinâmico (Figura 3.25) é necessária para reduzir a força de atrito do ar durante a movimentação circular, visando à redução do consumo de energia e da potência de acionamento.

Figura 3.25 - Estrutura do módulo de acoplamento com a cobertura aerodinâmica.



Fonte: Autor.

3.4.5 Trem de Eixos

O trem de eixos é o mecanismo final do carrossel de fadiga e tem por finalidade receber a força peso do módulo de acoplamento, transmitindo-a uniformemente às rodas correspondentes às configurações de eixos inteiros ou semi-eixos que aplicarão o carregamento sobre as estruturas de pavimento. Esse processo deve ocorrer de forma a replicar as mesmas condições de esforços e uniformidade de movimento verificados à passagem de um veículo em verdadeira grandeza sobre o pavimento de uma rodovia.

A nomenclatura trem de eixos foi escolhida para indicar que podem ser dispostos diversos tipos de configuração neste componente, conforme abordado no tópico 3.4.1.3.

3.4.5.1 Prerrogativas técnicas

O trem de eixos, assim como o trem de apoio, também precisa ser alinhado no sentido tangencial do raio da trajetória circular do movimento do carrossel de fadiga, a fim de que as rodas possam girar sem escorregamento lateral ou desperdício de energia.

Deve possuir um sistema de controle da força peso sobre os eixos inteiros ou semi-eixos de forma precisa, para que não ocorram oscilações que afetem a mecânica do movimento linear, fator que culminaria na variação dos esforços aplicados sobre o pavimento e respectivas amplitudes de deformação geradas, acarretando na ausência de acurácia dos dados obtidos.

3.4.5.2 Concepção mecânica

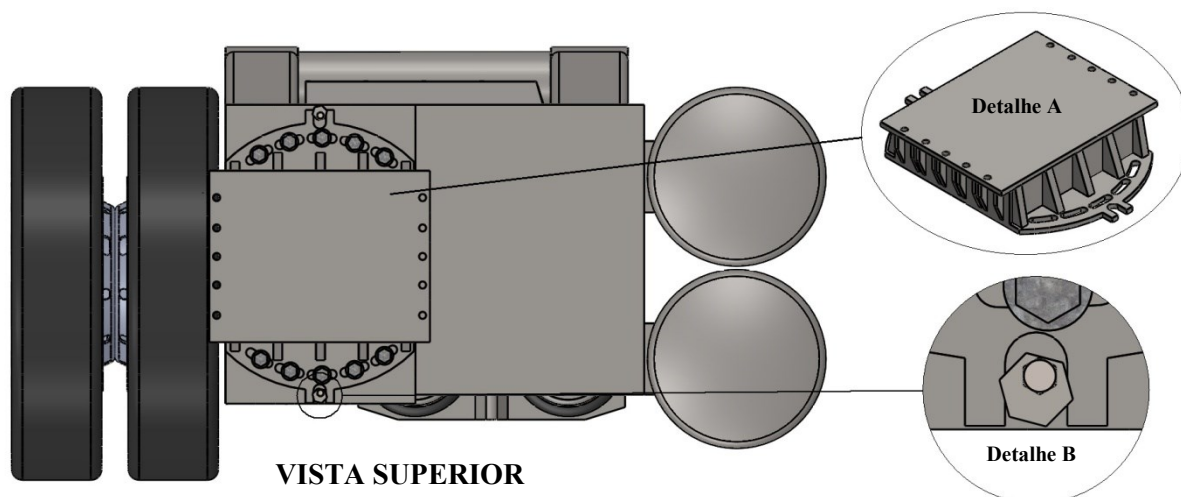
O trem de eixos pode ser dividido em três componentes principais:

- Sistema de alinhamento;
- Estrutura mecânica;
- Sistema de suspensão de controle de carga.

O sistema de alinhamento se dá a partir de um flange de ligação que faz a integração do trem de eixos ao módulo de acoplamento, fixada por parafusos (Figura 3.26, detalhe A). O alinhamento é realizado por uma bucha excêntrica instalada nas duas extremidades do flange na face inferior (detalhe B), em que movendo as buchas para direita ou esquerda consegue-se fazer

com que o trem de eixos gire por intermédio de um pino centralizado no flange. Dessa forma é possível alinhar o trem de eixos e travar os parafusos do flange na posição desejada.

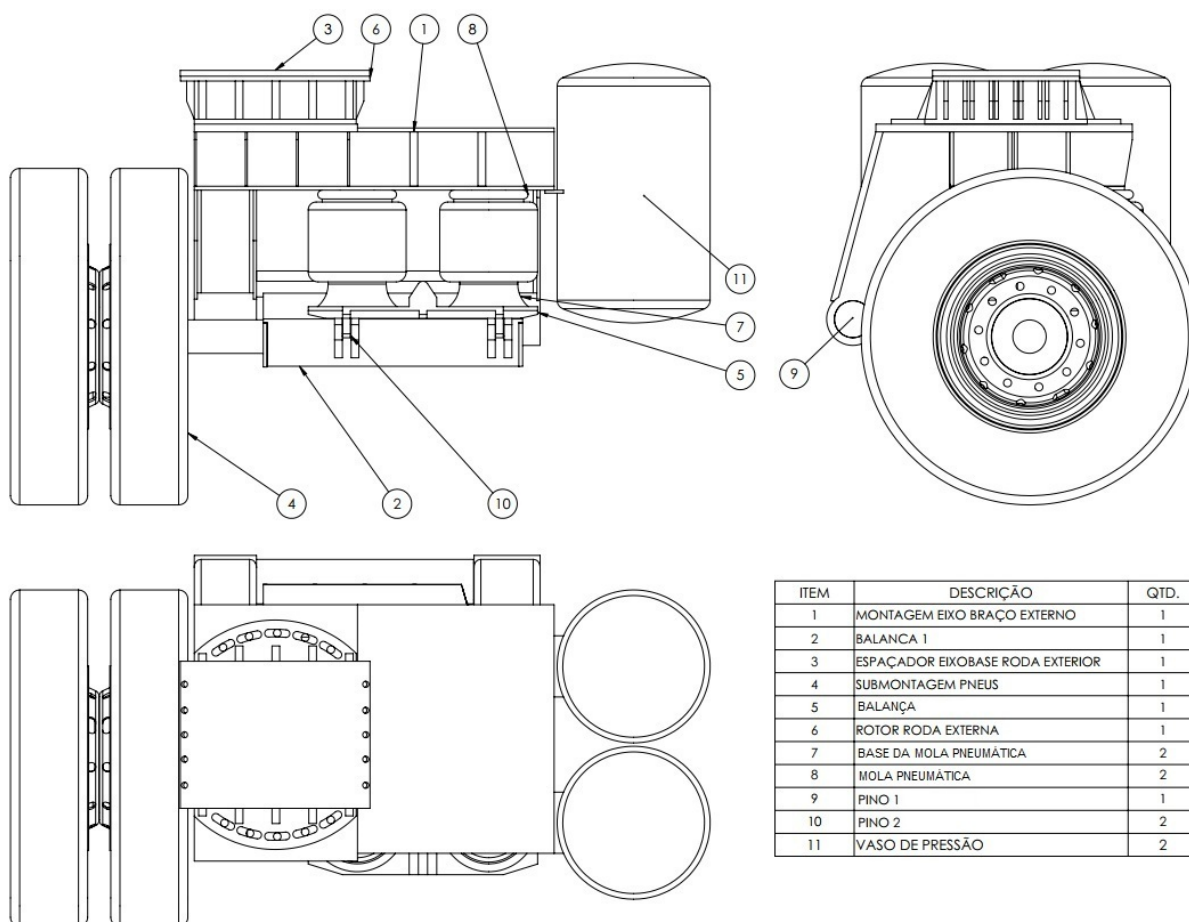
Figura 3.26 - Detalhe do flange de ligação e das buchas excêntricas de alinhamento do trem de eixos.



Fonte: Autor.

A estrutura da base é fabricada em chapas de aço carbono oxi-cortadas e soldadas entre si, formando uma estrutura tubular com rigidez capaz de suportar esforços de torção e flexão. A balança onde são soldados os eixos inteiros ou semi-eixos (Figura 3.27, item 2) é guiada por buchas e pinos fixados à estrutura da base (item 10). Duas molas pneumáticas (itens 7 e 8) fixadas a uma bandeja articulada (item 5) fazem a transmissão da força peso para a balança.

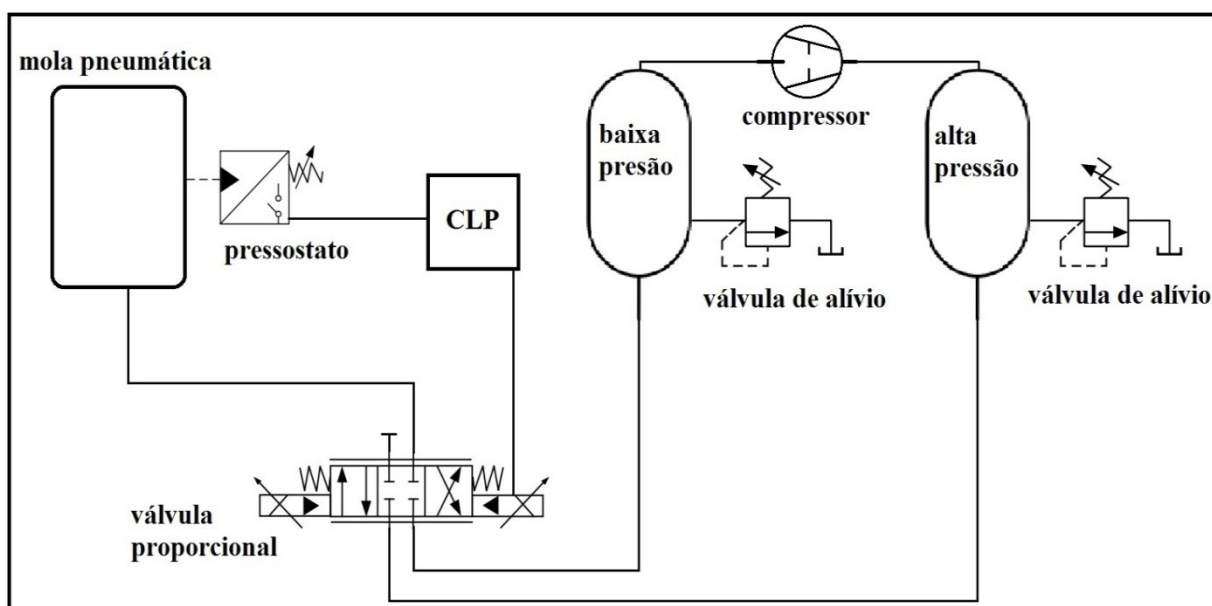
Figura 3.27 - Desenho esquemático do trem de eixos.



Fonte: Autor.

A fim de obter uma uniformidade na aplicação da carga sobre o pavimento, o trem de eixos que é responsável por tal esforço, deve possuir um sistema de suspensão capaz de corrigir a força peso transmitida aos eixos inteiros ou semi-eixos, transferindo eventuais distorções para o braço de teste, e conseqüentemente para o trem de apoio. Como base para esse sistema são utilizadas duas molas pneumáticas, um sistema de controle pneumático, um compressor de ar e dois reservatórios de ar comprimido, sendo um de alta pressão e outro de baixa pressão, conforme ilustra a Figura 3.28.

Figura 3.28 - Projeto do circuito pneumático.



Fonte: Autor.

Observando a Figura 3.28, é possível identificar que o sistema de suspensão funciona da seguinte forma: dois reservatórios de ar comprimido, sendo um de alta e outro de baixa pressão alimentam uma válvula proporcional com centro fechado, um sistema Controlador Lógico Programável (CLP) recebe sinal do pressostato instalado na mola pneumática e verifica a necessidade de aumentar ou reduzir a pressão interna da mola. A partir do acionamento da válvula proporcional, o CLP faz uma correção de pressão e, em um período de tempo da ordem de milissegundos procede nova verificação, executando um controle contínuo da pressão interna da mola.

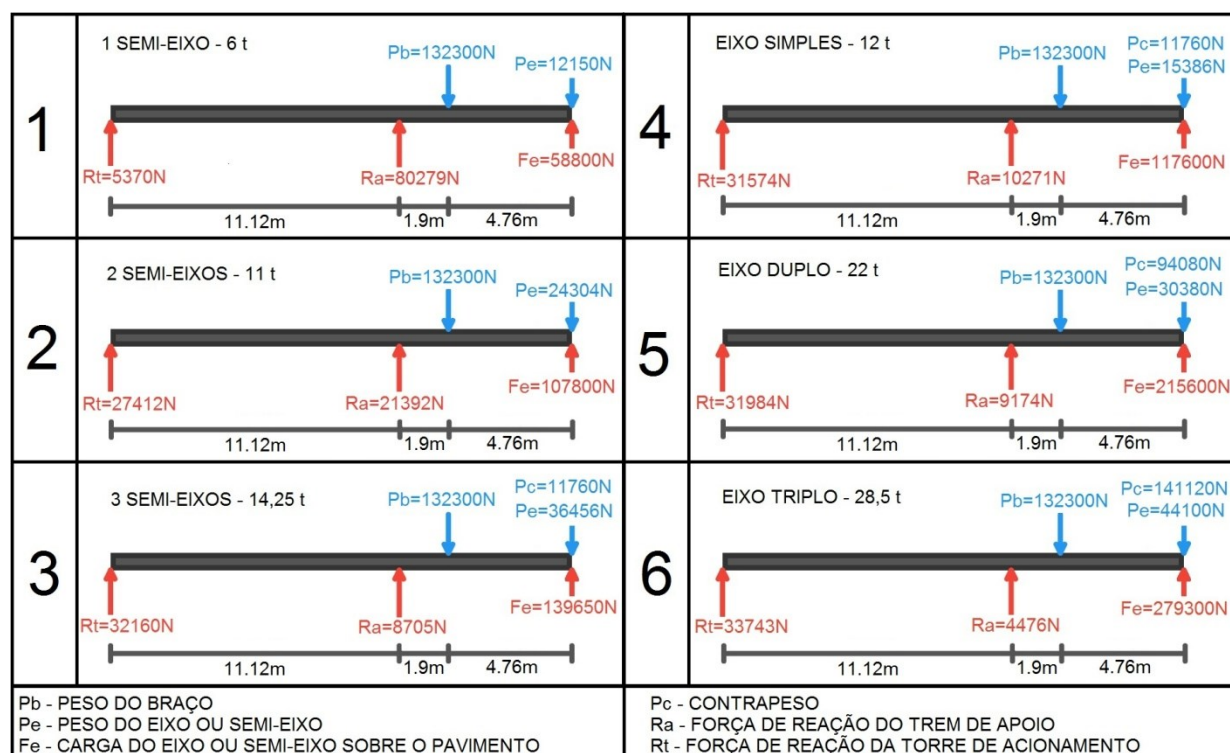
Partindo do princípio da automação pneumática, tem-se que em uma mola pneumática a pressão é diretamente proporcional à força da mola (SANTOS e SILVA, 2014). Portanto, controlando a pressão pode-se controlar a força da mola.

3.4.5.3 Considerações sobre o cálculo de potência instalada no acionamento central

Após a finalização do projeto de todas as partes do carrossel de fadiga, foi possível verificar que o peso próprio do braço de teste possui 13,5 t. Neste contexto, fez-se necessária uma revisão dos cálculos referentes à potência instalada no acionamento central do equipamento, devido à ausência de informações suficientes no tópico 3.4.1 para determinação definitiva dos valores envolvidos.

A distribuição das cargas aplicadas no braço de teste foi baseada na posição do seu centro de massa e das reações referentes às cargas distribuídas ao longo do seu comprimento, sobretudo nos elementos mecânicos denominados torre central de acionamento, trem de apoio e trem de eixos. Para tanto, foram consideradas as mesmas seis combinações de carregamento solicitante indicadas no tópico 3.4.1.3. A Figura 3.29 ilustra o princípio da distribuição de carregamento mencionada.

Figura 3.29 - Distribuição das forças em N no braço de teste. À esquerda do braço tem-se a fixação na torre central de acionamento e à direita tem-se a fixação no módulo de acoplamento - distâncias em metros.



Fonte: Autor.

A partir da distribuição de carregamento ilustrada na Figura 3.29, tem-se que a Tabela 3.5 apresenta os valores referentes à potência instalada no sistema de acionamento central, incluindo a real força peso do braço de teste, o qual na fase inicial do projeto poderia apenas ser estimado.

Tabela 3.5 – Combinações possíveis e respectivas perdas, incluindo a força peso do braço de teste.

Combinação	Carga eixo (t)	Carga trem de apoio (t)	Perdas no contato pneu-pavimento (kW)	Perdas Aerodinâmicas (kW)	Total das perdas (kW)	Total + 20% (kW)
1	24,0	32,8	165	367	531	638
2	44,0	8,7	181	367	547	657
3	57,0	3,6	216	367	582	699
4	48,0	4,2	185	399	583	700
5	88,0	3,7	329	399	728	873
6	57,0	0,9	210	199	409	491

Fonte: Autor.

Observando a Tabela 3.5, verifica-se que mesmo após a inclusão da real força peso do braço de teste, não há necessidade de alteração da potência instalada prevista inicialmente de 900 kW ou 1200 cv, permanecendo inalteradas as especificações já efetuadas no transcurso deste trabalho.

3.4.6 Sistema de Acoplamento de Eixos Inteiros

O projeto de um sistema de acoplamento de eixos inteiros ao trem de eixos do carrossel de fadiga cumpre parte das contribuições diretas deste trabalho, em relação ao modelo original francês tomado como base. O intuito é permitir a solicitação das estruturas de pavimento a partir de configurações reais dos veículos considerados no dimensionamento das estruturas de pavimento, notadamente os eixos simples de roda dupla (ESRD), tandem duplo (ETD) e triplo (ETT).

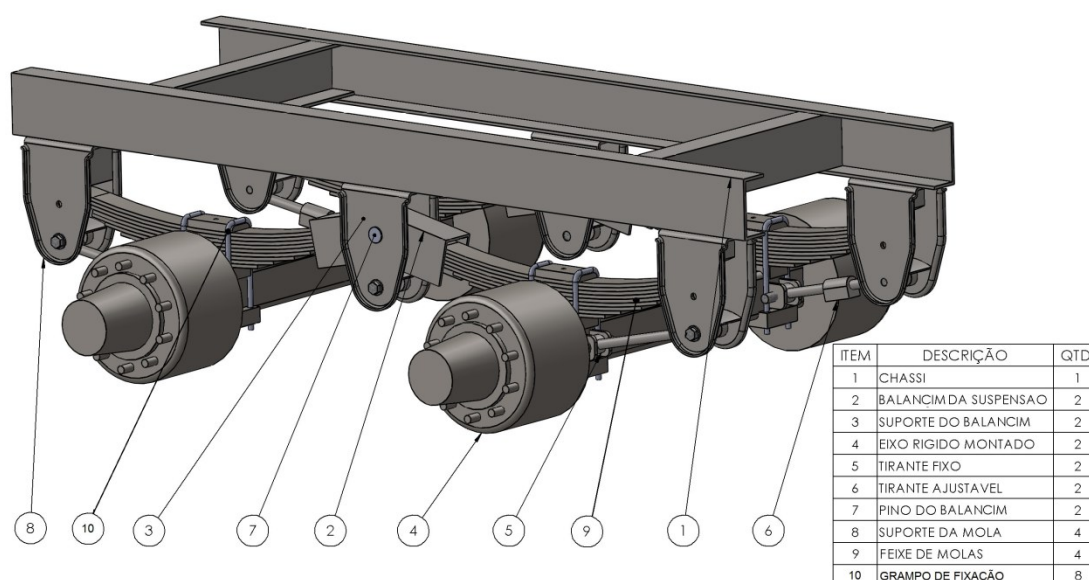
3.4.6.1 Prerrogativas técnicas

Antes de apresentar o projeto estrutural deste sistema de acoplamento, faz-se necessário compreender o mecanismo utilizado no alinhamento dos eixos em caminhões e, de que forma pode ser modificado para adaptação ao movimento circular do carrossel de fadiga. O objetivo é propor uma solução da forma mais simples possível, sem que haja necessidade de alteração dos componentes principais da suspensão.

O sistema de suspensão de um caminhão, conforme abordado no tópico 2.5, é basicamente composto por eixos rígidos que suportam na maior parte das vezes dois pares de rodas em suas extremidades.

Os eixos são suportados por dois feixes de molas (Figura 3.30, item 9) e fixados ao eixo por grampos (item 10), ambos em aço carbono temperado. As extremidades dos feixes de molas são apoiadas em suportes e balancins. O alinhamento dos eixos é mantido por dois tirantes longitudinais fixados ao eixo em uma extremidade e na outra ao suporte da mola soldado ao chassi. No contato com o eixo o tirante é fixo sem ajuste (item 5), enquanto é ajustável no contato com o suporte da mola (item 8), a partir de uma porca que regula o seu comprimento, permitindo o correto posicionamento do eixo (item 6).

Figura 3.30 - Suspensão de eixos rígidos em tandem duplo.



Fonte: Autor.

3.4.6.2 Concepção mecânica

Para tanto, é preciso avaliar se o sistema de suspensão projetado é capaz de desenvolver trajetórias circulares com raio variável entre 15,0 m e 20,0 m, tal como se verifica no anel da pista de testes do carrossel de fadiga. Neste contexto, cabe uma observação importante, pois em que pese os caminhões também serem projetados para executar concordâncias horizontais, tem-se que compreendem raios de curvaturas a partir de 25,0 m, tomado como o menor valor nos projetos geométricos de rodovias novas no Brasil, de acordo com DNIT (1999).

Nas ocasiões em que os veículos realizam trajetórias curvilíneas com raios de 10,0 m a 20,0 m, como em algumas situações presenciadas em áreas urbanas, por exemplo, acarretam em condições de trabalhos mecânicos que geram esforços na suspensão e nos pneumáticos, provocando forte desgaste destes componentes quando submetidos a estes tipos de solicitações repetidas vezes.

Assim, nas condições de trabalho pertinentes ao carrossel de fadiga, com velocidades normalmente praticadas entre 60 km/h e 100 km/h em um raio variável de 15,0 m a 20,0 m, não é desejável que os pneumáticos sofram escorregamento lateral devido a desalinhamentos do eixo em relação ao centro do raio de giro, pois acarretaria em desgaste dos pneumáticos, desperdício de energia e depreciação acelerada de componentes.

Como exemplo, será analisada a possibilidade de alinhamento da suspensão padrão de um caminhão no perímetro de uma trajetória circular com raio de 19,0 m, considerando a posição central dos eixos inteiros, em relação ao raio máximo de 20,0 m do carrossel de fadiga proposto neste trabalho (Figura 3.3).

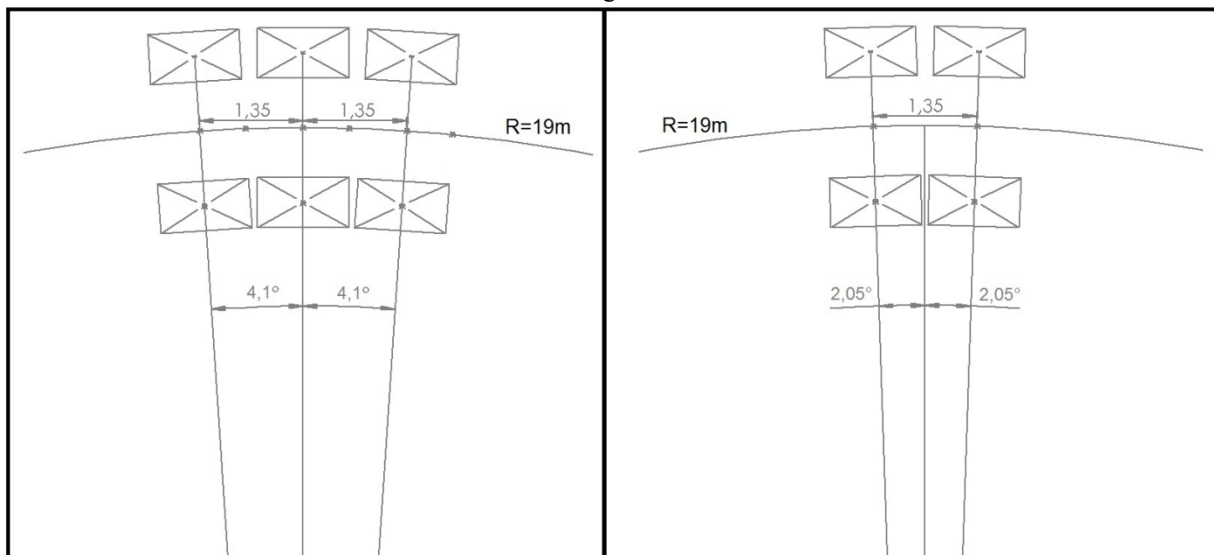
Uma vez o eixo inteiro fixado por grampos no feixe de molas (Figura 3.30, item 10), tem impedido o seu movimento transversal, fazendo com que o feixe funcione como um tirante transversal, também limitando a movimentação direcional do eixo devido a sua rigidez. Como as folgas existentes entre o feixe de molas (item 9), o balancim (item 2) e o suporte da mola (item 8) são pequenas, este sistema de suspensão somente possui folga suficiente para proceder ao alinhamento da trajetória retilínea alinhada ao chassi.

Verifica-se então que é inviável a simples utilização direta de um conjunto de eixos simples de roda dupla, tandem duplo ou triplo no carrossel de fadiga, devido à ausência de graus de liberdade dos referidos conjuntos, no que diz respeito aos ajustes de ângulos necessários ao alinhamento dos eixos.

É importante esclarecer que o eixo deve estar sempre alinhado com o centro do movimento circular, que neste caso é o da torre central de acionamento do carrossel. O ângulo de ajuste entre os eixos é calculado dividindo 360° pelo perímetro na linha média do eixo e multiplicando pela distância considerada entre eixos de 1,35 m, respeitando as dimensões padronizadas pelo CONTRAN (2021).

Neste caso, tomando em conta um eixo em tandem triplo e um raio de 19,0 m, obtém-se um ângulo de $4,1^\circ$. Para a suspensão de eixos em tandem duplo, o ângulo de alinhamento para cada eixo é a metade do calculado ($2,05^\circ$), pois cada eixo é alinhado separadamente. No entanto, para a suspensão em tandem triplo, o eixo central permanece alinhado em 0° com a tangente (Figura 3.31).

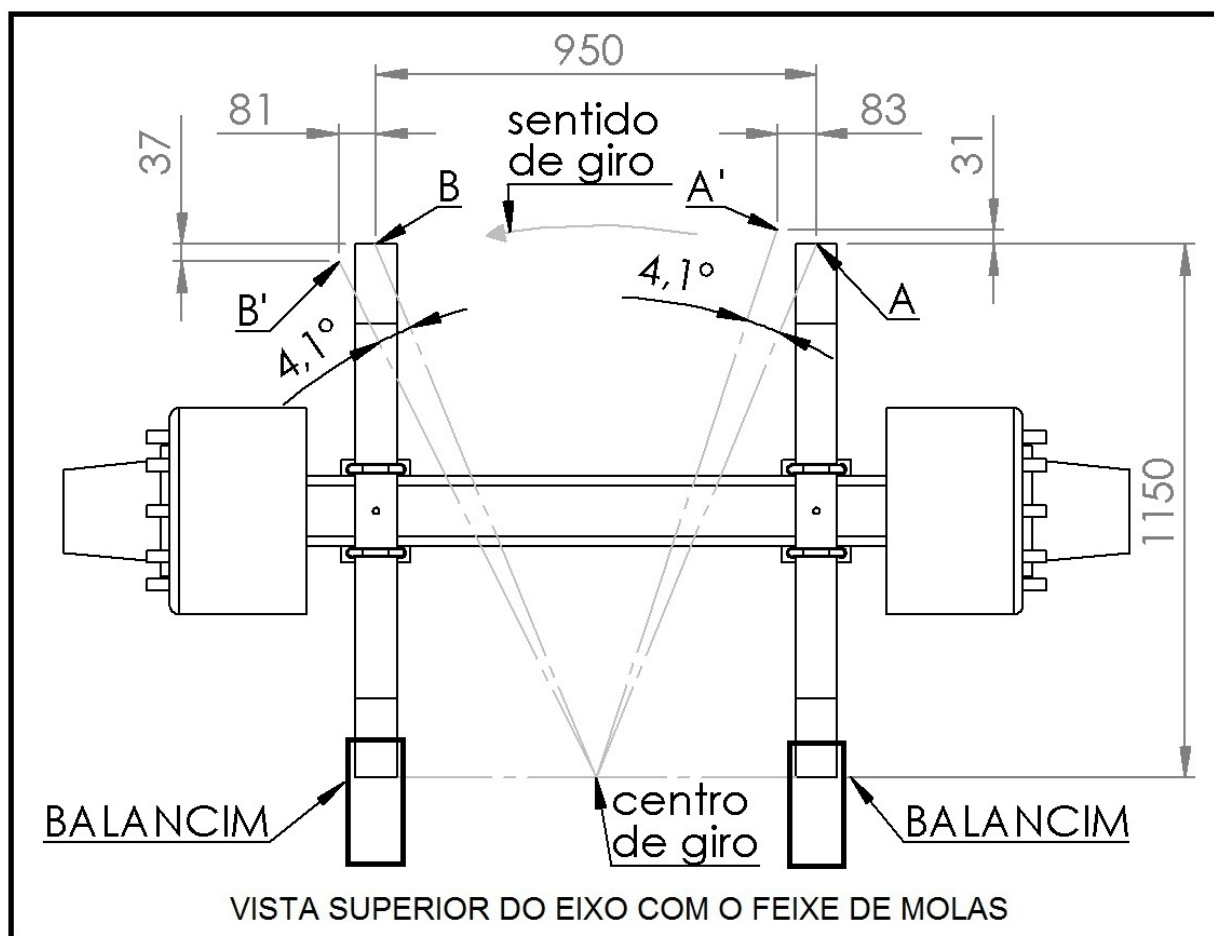
Figura 3.31 - Geometria dos eixos em tandem triplo e tandem duplo alinhados a trajetória circular do carrossel e o ângulo entre eixos.



Fonte: Autor.

Logo, considerando o movimento de giro para um ajuste de até $4,1^\circ$ entre os eixos, é possível observar um movimento transversal do feixe de molas de até 83,0 mm do ponto A para o ponto A' (Figura 3.32). O ponto A representa o ponto de fixação da extremidade do feixe de mola ao suporte do chassi (Figura 3.30, item 5) e o ponto A' representaria a posição que a extremidade do feixe de molas deveria ter para um ajuste de trajetória de $4,1^\circ$ (Figura 3.30, item 6), alinhando o eixo à tangente do movimento circular do carrossel de fadiga. Nas extremidades da mola que se encaixam no balancim (Figura 3.30, item 2) é possível notar o centro de giro, pois as molas não se movem transversalmente.

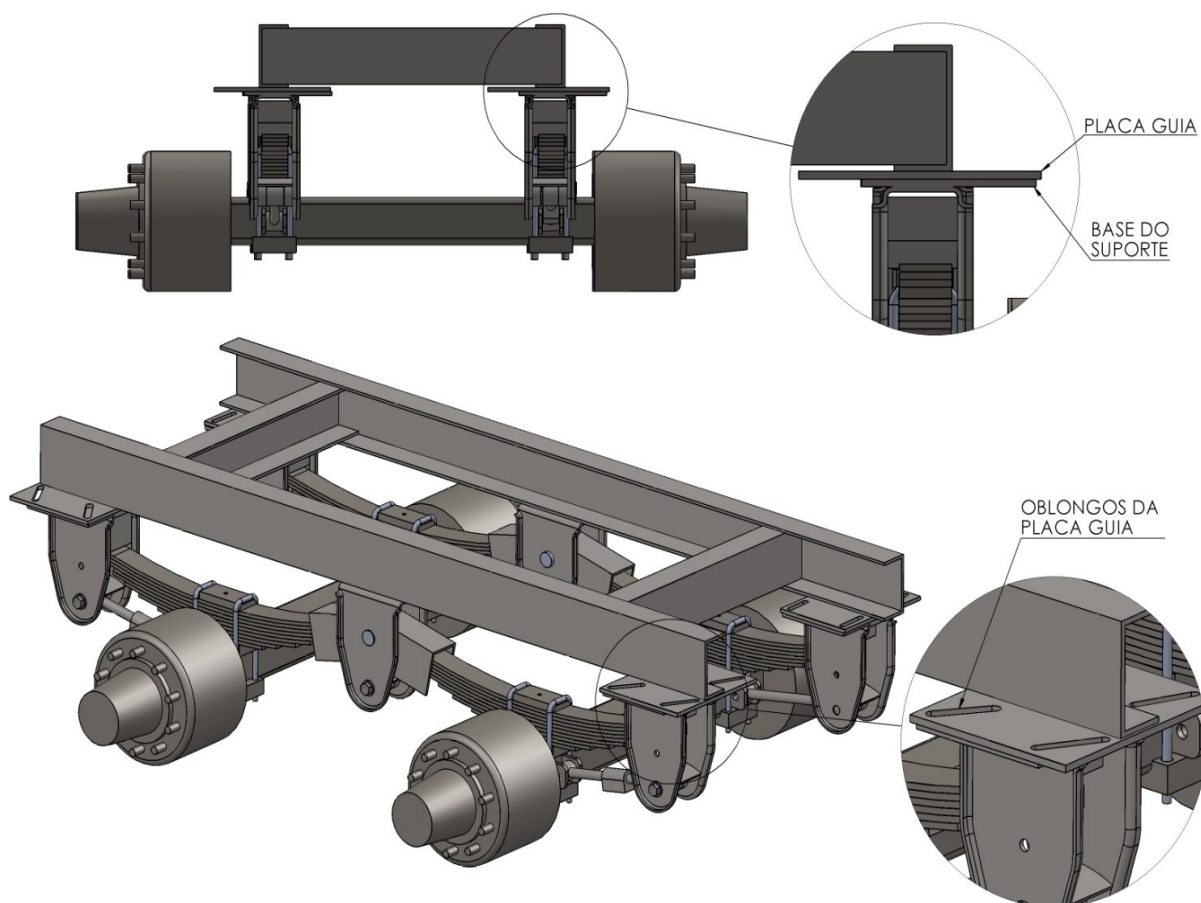
Figura 3.32 - Deslocamento do conjunto eixo e mola, com geometria simplificada, considerando o comprimento da mola de 1150,0 mm e a distância entre molas de 950,0 mm, para um giro de $4,1^\circ$ em relação ao chassi.



Fonte: Autor.

A partir da análise geométrica apresentada na Figura 3.32, foi possível desenvolver uma solução baseada na movimentação dos suportes do feixe de molas, capaz de realizar a regulação do ângulo de giro dos eixos, mantendo a posição do balancim inalterada. Desta forma, a solução encontrada foi incluir duas placas de fixação, uma em cada extremidade do eixo, constituindo uma placa guia soldada ao chassi com oblongos para guiar e fixar os parafusos ancorados à placa base do suporte (Figura 3.33). Além do movimento transversal, há um movimento longitudinal do suporte da mola que também fixa o tirante do eixo, fazendo-o se movimentar em sentidos opostos, em que o ponto A' desloca-se 31,0 mm enquanto o ponto B' desloca-se 37,0 mm no sentido oposto (Figura 3.32).

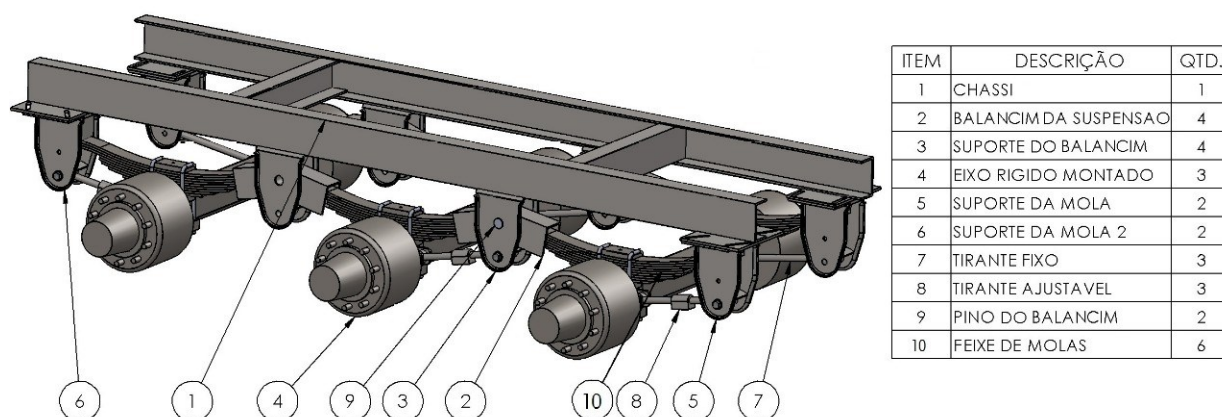
Figura 3.33 - Solução desenvolvida para alinhamento dos eixos em tandem no carrossel de fadiga.



Fonte: Autor.

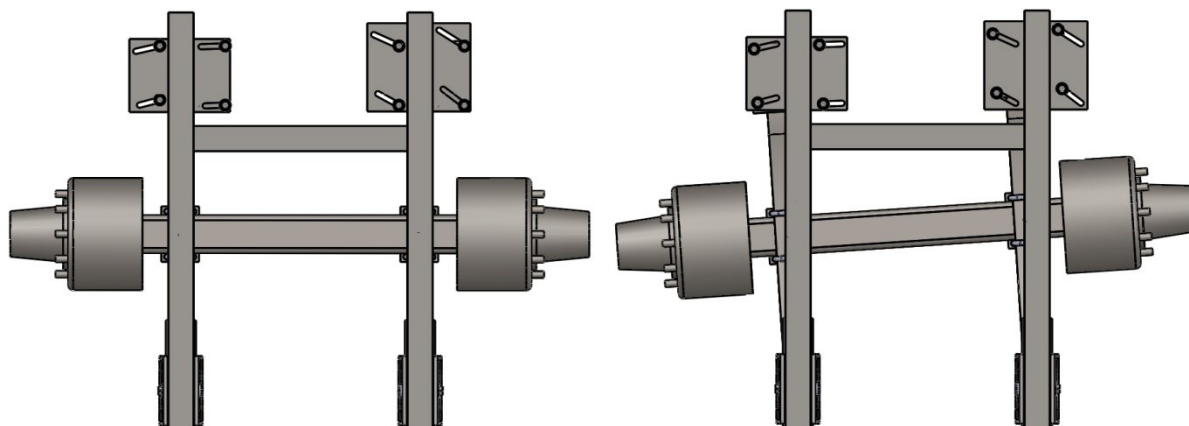
A solução desenvolvida foi pensada para que a adequação apresentada na Figura 3.33 ocorresse sem modificar as características ou medidas das peças componentes do sistema de suspensão original, apenas adicionando itens. Logo, a aplicabilidade se dá tanto para eixos em tandem duplo como em tandem triplo, pois para este último a diferença está em adicionar um eixo no centro e mais um par de balancins com suportes e tirantes (Figura 3.34). No caso dos eixos simples de roda dupla não há necessidade de nenhuma adaptação, pois basta utilizar a regulagem do tirante ajustável (Figura 3.30, item 6) para alinhar o eixo com a tangente do movimento circular.

Figura 3.34 - Suspensão de eixos rígidos em tandem triplo.



Fonte: Autor.

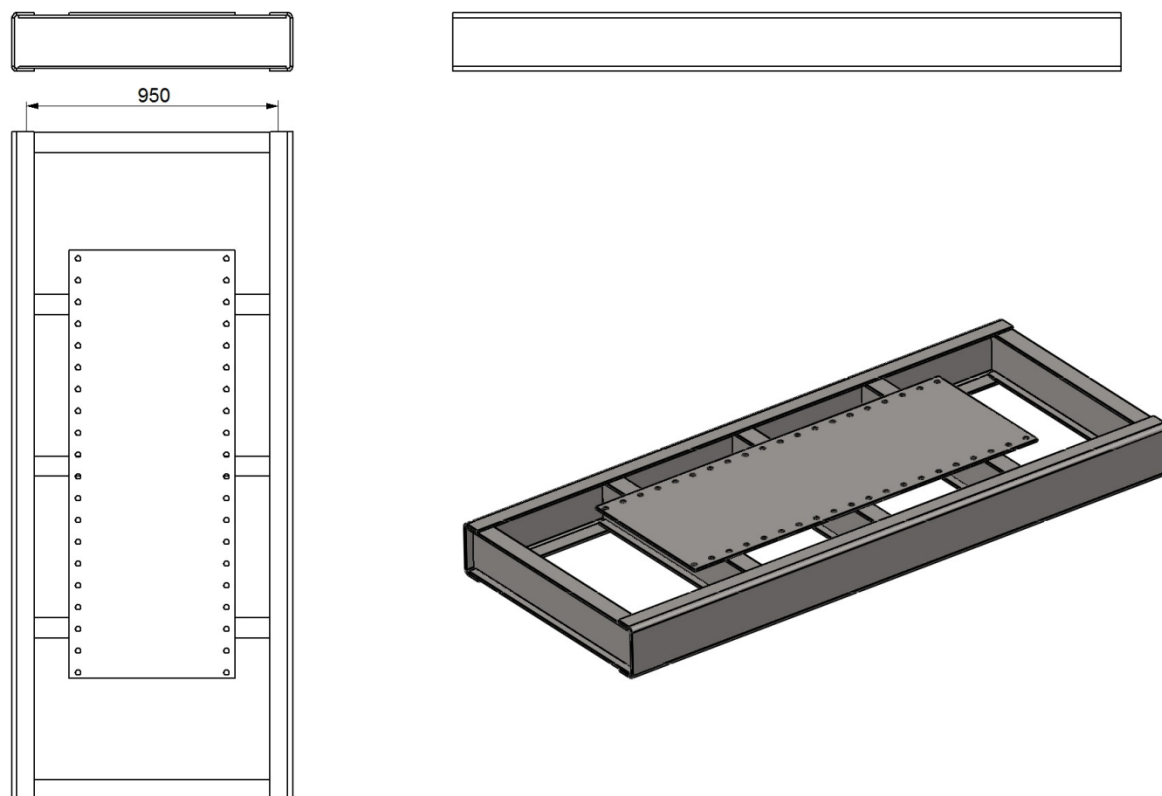
A Figura 3.35 ilustra uma vista em planta do chassi compreendendo o ajuste do ângulo de giro do eixo em 0° e com $4,1^\circ$, sendo possível observar a movimentação do eixo e do mecanismo adaptado desenvolvido, que faz com que a base do feixe de molas deslize pelos oblongos mudando a direção do eixo para a esquerda em $4,1^\circ$, pois na base estão fixados os tirantes que são também responsáveis pelo alinhamento do eixo.

Figura 3.35 - Vista em planta do eixo à esquerda com 0° e à direita com $4,1^\circ$ em relação ao chassi.

Fonte: Autor.

Para a fixação do chassi dos eixos inteiros ao módulo de acoplamento do braço do carrossel de fadiga, abordado no tópico 3.4.4, foi projetada uma base adaptadora com a mesma largura padrão de 950,0 mm entre centros dos chassis de carreta (Figura 3.36).

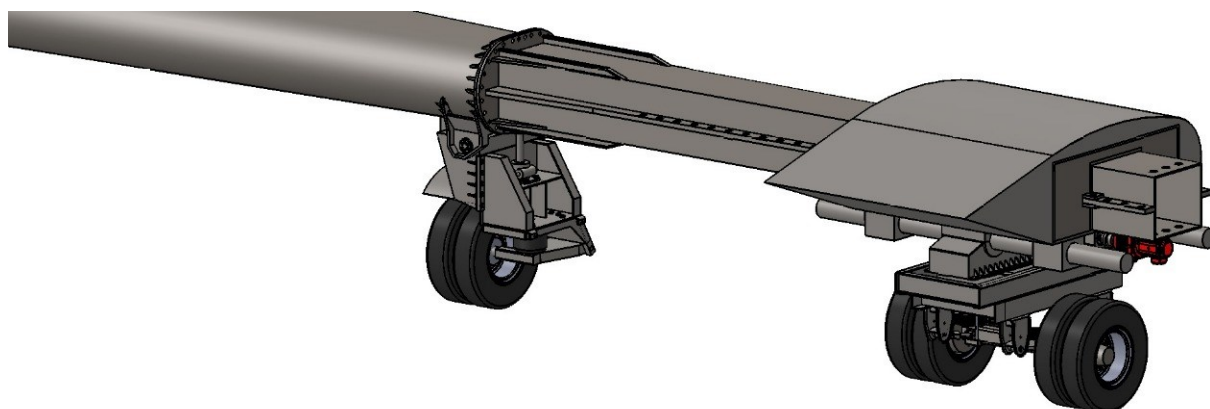
Figura 3.36 - Base adaptadora para fixação de chassi com eixos simples, duplo ou triplo.



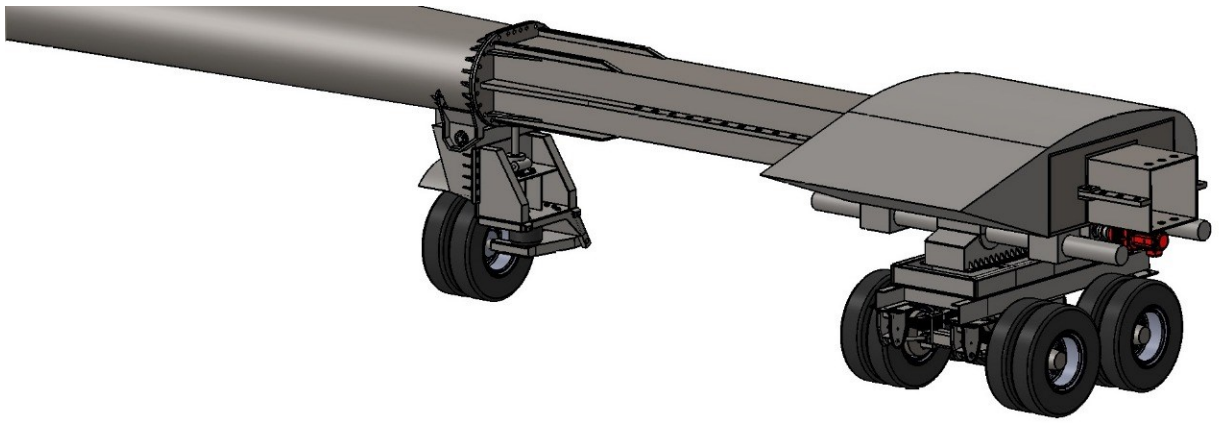
Fonte: Autor.

Assim, na Figura 3.37 tem-se a ilustração da solução final referente à montagem dos eixos inteiros simples de roda dupla, tandem duplo e triplo, no braço do carrossel de fadiga, compreendendo a base adaptadora demonstrada na Figura 3.36.

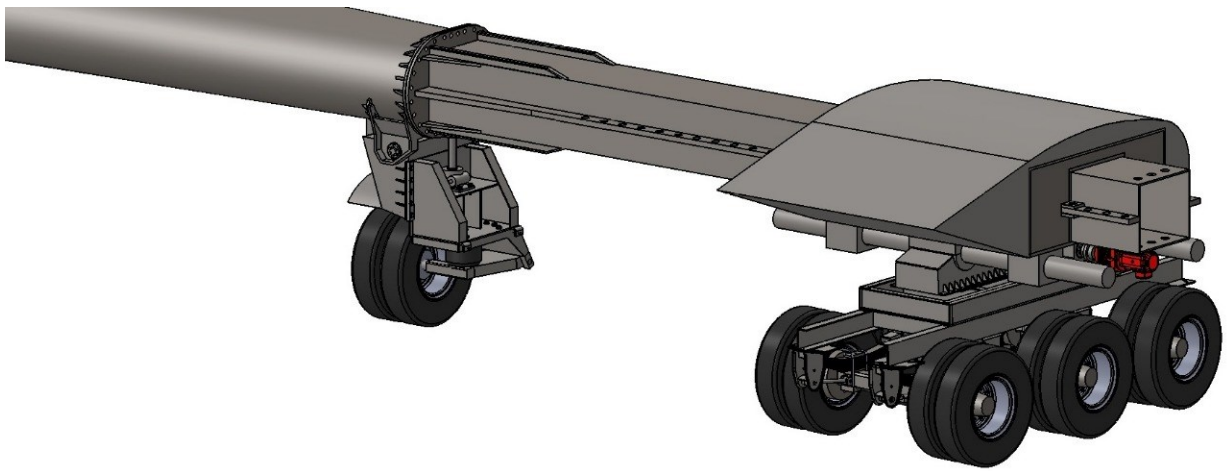
Figura 3.37 - Braço do carrossel de fadiga com eixos simples de roda dupla (a), tandem duplo (b) e triplo (c).



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autor.

CAPÍTULO 4

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A partir da compilação de informações provenientes de diversas soluções de projeto aplicadas ao estudo da mecânica dos pavimentos em verdadeira grandeza, foi possível estabelecer os critérios para o desenvolvimento da proposta apresentada nesta pesquisa, em relação à concepção do carrossel de fadiga da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), mais especificamente no Campus da UFSC/Joinville.

A definição pelo modelo similar ao utilizado pela *Université Gustave Eiffel* (UGE) de Nantes, na França, se deu em razão de possibilitar maior versatilidade nas condições de uso, destacando-se a variação nas adaptações das configurações dos carregamentos solicitantes; possibilidade diversificada de exploração da instrumentação das seções teste; simulação de velocidades reais de tráfego; monitoramento em tempo real da evolução do comportamento mecânico das estruturas de pavimento; automação completa dos sistemas de acionamento e controle do equipamento.

Ainda, possui o melhor desempenho na atualidade referente aos equipamentos em escala de verdadeira grandeza para estudos de estruturas de pavimento no mundo, devido o aporte dos quatro braços de teste permitir o cumprimento de até 2700 ciclos/hora a uma velocidade de 80 km/h, sendo ainda possível realizar testes a 100 km/h com segurança. Estas condições possibilitam gerar em apenas um mês, danos que ocorreriam em 20 anos nas rodovias submetidas a um tráfego médio, por exemplo.

Entretanto, mesmo a solução proposta neste trabalho tendo incorporado todas as vantagens mencionadas do carrossel francês, tem-se que alguns desenvolvimentos foram aportados como contribuição direta de sua realização, em relação ao modelo original de base.

O alargamento da plataforma de rolamento do anel da pista de testes de 6,0 m para 10,0 m, permite que os eixos inteiros adaptados dos chassis reais de caminhões sejam melhor comportados à geometria circular, principalmente no que diz respeito à regulação dos trens de eixos em conjunto com os módulos de acoplamento, no que tange à execução dos movimentos de varredura transversal das seções teste.

A adoção de conjuntos motorreductores elétricos para acionamento da torre central possibilita maior eficiência energética do que a solução baseada em motores e bombas hidráulicas, em razão das soluções do tipo *servo driver* permitirem o controle via *encoder* ideal e preciso da potência gerada em relação à potência entregue aos componentes, devido não haver

perda parasítica mecânica significativa nas engrenagens durante os processos de transmissão. Como resultado, tem-se um sistema de acionamento que exige menor consumo de energia, e conseqüentemente, mais econômico, com rendimento em níveis acima de 95%.

A alocação do sistema de contrapesos na extremidade de ligação dos braços de teste secundários com os módulos de acoplamento dos trens de eixos, viabiliza maior facilidade de manuseio das placas de incremento de carga, devido serem posicionadas pelo operador diretamente na abertura da estrutura tubular dos braços, de fácil acesso, ao contrário das intervenções no interior das asas aerodinâmicas dos referidos módulos, o que constitui um procedimento mais trabalhoso e que exige muita perícia em sua execução, aumentando o risco de acidentes.

A possibilidade de acoplamento de chassis inteiros de caminhões nos trens de eixos possibilita a realização de testes com configurações reais em verdadeira grandeza, dispondo das mesmas distâncias entre rodas e entre-eixos da frota circulante, capazes de reproduzir exatamente os mesmos esforços distribuídos pela aplicação das cargas no campo, sem a necessidade de se adaptar estruturas não compatíveis com esta realidade. Situação nunca antes projetada e testada em qualquer solução de pista experimental do tipo carrossel no mundo. Ademais, o projeto proposto também permite o acoplamento de semi-eixos nas mesmas configurações dos eixos inteiros, isto é, simples de roda dupla, tandem duplo e triplo.

A utilização de suspensões rígidas com feixes de mola permite o acoplamento dos chassis inteiros de caminhões, enquanto para os semi-eixos será adotado um sistema de molas pneumáticas, conforme já praticado no carrossel francês. Desta forma, garante-se a versatilidade de utilização de configurações diversificadas de eixos.

Dado o exposto, verifica-se que o projeto proposto é capaz de não apenas reproduzir as melhores condições de testes em verdadeira grandeza sobre estruturas de pavimento em âmbito mundial, mas também de propor soluções que tornem a sua utilização mais racional e com maior eficiência energética, fatores que aportam melhor trabalhabilidade e maior longevidade ao uso do equipamento.

Além disso, o projeto apresentado incorpora um legado de desenvolvimento em sua proposição ao meio rodoviário nacional, pois permite que sejam realizadas análises em verdadeira grandeza de estruturas de pavimento com precisão e acurácia em similitude ao que melhor se dispõe nestes tipos de instalações atualmente no mundo, colocando o Brasil em posição de vanguarda científica na América do Sul, e mesmo em comparação a diversos países de outros continentes.

Em condições práticas, a implantação deste projeto proposto no país viabilizará uma enorme gama de estudos técnico-científicos, capazes de estabelecer para as condições brasileiras a formação de bancos de dados referentes aos parâmetros dos comportamentos mecânico e reológico dos materiais constituintes das estruturas de pavimento, permitindo a comparação dos resultados obtidos em campo em relação aos procedimentos de testes laboratoriais.

Logo, o aprimoramento constante desta relação campo/laboratório possibilitará o seu estreitamento gradativo, e conseqüentemente a dedução de equações constitutivas para o dimensionamento de pavimentos, capazes de compreender as leis de comportamento dos materiais, a resposta destes em verdadeira grandeza e sob sollicitação dinâmica, a fim de que seja formulada uma metodologia de cunho racional e cientificamente confiável para o Brasil, apta a conceber estruturas que possam, de fato, garantir durabilidade nos períodos de serviço para os quais foram projetadas.

Como recomendações aos trabalhos futuros, tem-se ainda a necessidade de complementar a solução proposta, a partir do desenvolvimento dos seguintes projetos:

- Elétrico: para comportar o cabeamento de instalação dos sensores de instrumentação das seções teste, bem como de comunicação em tempo real com a sala de controle;
- Hidráulico: para simulação da variação dos níveis de saturação pela água das camadas subjacentes do pavimento;
- Estrutural: para construção das estruturas em concreto armado e cálculo dos esforços aplicados sobre as peças que fazem parte do conjunto do carrossel de fadiga. Ainda, especificar as propriedades mecânicas dos elementos estruturais que o compõe, a fim de possibilitar a realização de simulações numéricas acuradas por elementos finitos, correspondentes ao comportamento mecânico do equipamento em condições dinâmicas de sollicitação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHO (1961), AASHO interim guide for the design of flexible pavement structures. American Association of State Highway Officials, Committee on Design, 1st edition.
- AFX (2021), Acoplamento metálico de engrenagens. Disponível em http://www.afxacoplamentos.com.br/pdf/130_manual.pdf.
- BALAY, J-M. e AUNIS, J. (1998), An applied research program on continuous reinforced concrete pavement: the Fabac project, In: 8th International conference on Concrete Roads, Lisbon.
- BANERJEE, A. (2020), Design and analysis of helical spring profiles in an electric vehicle suspension system using finite element method. International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology; Vol. 6, Issue 3, ISSN: 2454-132X, pp. 462-467.
- BOULET e GRAMSAMMER (1983), L'auscultation des chaussées: l'outil d'une politique d'entretien preventif d'un réseau routier. Communications des LPC à la 5^{ème} Conférence Internationale sur le Dimensionnement des Chaussées Souples. Rapports des Laboratoire, Série Construction Routière CR-2. ISSN 0755-236X, pp. 63-132. Paris, France.
- BURMISTER, D. M. (1943), Theory of Stresses and Displacements in Layered Systems. HRB Proceedings, 23:126.
- BURMISTER, D. M. (1958), Evaluation of Pavement Systems of the WASHO Road Test by Layered System Methods. HRB Bulletin, Issue n° 177, pp. 26-54, <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/hrbulletin/177/177-003.pdf>
- BRILLET, F. ; LORINO, T. ; DUMEIX, T. (2006), Analysis of road maintenance sequences according to the evolution of Distresses. 10th International Conference on Asphalt Pavements, Québec, August 12-17.
- CANAL DA PEÇA (2021), Como funciona o amortecedor? Disponível em <https://www.canaldapeca.com.br/blog/tudo-o-que-voce-precisa-saber-sobre-amortecedores/>
- CEDEX/CET (2021), Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas - Centro de Estudios del Transporte. Disponível em http://www.cedex.es/CEDEX/LANG_CASTELLANO/ORGANISMO/CENTYLAB/CET/
- CHABOT, A.; CHUPIN, O.; DELOFFRE, L.; DUHAMEL, D. (2010), Viscoroute 2.0: A tool for the simulation of moving load effects on asphalt pavement, Road Materials and Pavement Design (RMPD) 11 (2), 227–250, <https://doi.org/10.1080/14680629.2010.9690274>.

- CHABOT, A. ; POUTEAU, B. ; BALAY, J-M. ; DE LARRARD, F. (2008), FABAC Accelerated Loading Test of Bond between Cement and Asphalt Material Layers. Proposed to the Sixth International RILEM Conference on Cracking in Pavements, Chicago, June 16-18.
- CONTRAN (2021), Resolução nº 01. Diário Oficial da União (DOU), de 8 de janeiro de 2021. Estabelece normas sobre o uso de rodovias federais por veículos ou combinações de veículos e equipamentos, destinados ao transporte de cargas indivisíveis e excedentes em peso ou dimensões, observados os limites e os requisitos estabelecidos pelo Conselho Nacional de Trânsito. Disponível em <https://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-n-1-de-8-de-janeiro-de-2021-298507898>
- CRONEY, P. e CRONEY, D. (1998), The design and performance of road pavements. 3rd ed., New York: McGraw-Hill.
- DNIT (2020), Custos referenciais. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – CGCIT. Brasília, DF. Disponível em <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-e-pagamentos/custos-e-pagamentos-dnit>.
- DNIT/IPR (2020), Manual de Ajuda – Programa MeDiNa: versão 1.1.5. Convênio COPPE/UFRJ/DNIT – Projeto TED nº 628/2014, Processo nº 50607.002043/2013-00., 38 p. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes/Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Brasília, DF. Disponível em https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/medina/manual_medina_1_1_5.pdf. Última consulta em março de 2021.
- DNIT (2006), Manual de pavimentação. Publicação IPR-719. 3^a Edição Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. 274 p. Rio de Janeiro, Brasil.
- DNIT (1999), Manual de projeto geométrico de rodovias rurais. Publicação IPR-706. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. 195 p. Rio de Janeiro, Brasil.
- DRCR/SETRA/LCPC (1977), Catalogue des structures types de Chaussées neuves. Circulaire 77-1156 du 5 décembre. Direction des Routes et de la Circulation Routière (DRCR), Sêrvice d'Études Techniques des Routes et Autoroutes (SETRA), Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC). Paris, France.
- DYNATEST (2020), Heavy Vehicle Simulator (HVS). Dynatest brochure. Available at <https://www.dynatest.com/heavy-vehicle-simulator-hvs>; <http://dynatest.com.br/conheca-o-heavy-vehicle-simulator-equipamento-de-avaliacao-do-desempenho-de-pavimentos/>
- FIRESTONE[®] (2021), Suspension – Firestone air springs. Available at <https://www.firestoneip.com/products/suspension/>

- FORD® (2021), Ford helical springs. C&G Ford Parts. Available at https://cgfordparts.com/wwwsectionfiles/cg_cat2_front_suspension_coil_spring.html
- FLADVAD, M. e ERLINGSSON, S. (2021), Permanent deformation modelling of large-size unbound pavement materials tested in a heavy vehicle simulator under different moisture conditions. *Road Materials and Pavement Design*, <https://doi.org/10.1080/14680629.2021.1883464>
- FREITAS, L. M. P. J (2006), Estudo da dinâmica vertical de uma suspensão veicular do tipo MacPherson. Dissertação de Mestrado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 131 p. São Carlos, SP.
- GHADIMI, B.; NIKRAZ, H.; LEEK, C.; NEGA, A. (2013), A Comparison between Austroads Pavement Structural Design and AASHTO Design in Flexible Pavement. *Advanced Materials Research*, 723, 3–11. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.723.3>
- GILLESPIE, T. D. (1992). *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers. SAE International, product code R-114, ISBN 978-1-56091-199-9, 519 p.
- GOOGLE EARTH® (2021), Computer program. Google Inc. Available at <https://www.google.com/earth/>
- GUIDE TECHNIQUE (1994), Conception et dimensionnement des structures de chaussée. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) en partenariat avec Service d'Étude Technique des Routes et Autoroutes (SETRA), ISBN 2-7208-7010-2. Paris, France.
- HORNYCH, P.; KERZREHO, J.P.; CHABOT, A.; BODIN, D.; BALAY, J-M; DELOFFRE, L. (2018), The LCPC's ALT facility contribution to pavement cracking knowledge. Sixth International RILEM Conference on Cracking in Pavements at Chicago, Il (USA), Volume: Pavement Cracking – Al-Qadi, Scarpas & Loizos (eds) © 2008 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-47575-4: 13-23, <https://doi.org/10.13140/2.1.2361.9529>
- HRB (1962), The AASHO Road Test - Report 7: Summary Report. Highway Research Board of the NAS-NRC, Division of Engineering and Industrial Research, Special Report 61G. Available at <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr61g/61g.pdf>
- HRB (1961), The AASHO road test: history and description of project. Highway Research Board, Special Report 61A, Publication 310, National Academy of Sciences, National Research Council, 56 p. Available at <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr61a/61a.pdf>

- HRB (1954), The WASHO road test, Part 1: design, construction and test proceedings. Highway Research Board, Special Report 18, Publication 816, National Academy of Sciences, National Research Council, 121 p. Available at <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr18.pdf>
- HUANG, Y.; WANG, L. E. XIONG, H. (2017), Evaluation of pavement response and performance under different scales of APT facilities. *Road Materials and Pavement Design*, 18:sup3, 159-169, <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1329871>
- HUET, C. (1963), Étude par une méthode d'impédance du comportement viscoélastique des matériaux hydrocarbonés. Thèse de Docteur. Faculté des Sciences de l'Université de Paris.
- IFSTTAR (2013), Dossier de presse - Le manège de fatigue des structures routières: 35 ans d'innovations! Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux. Disponible au <https://docplayer.fr/40281627-Dossier-de-presse-le-manege-de-fatigue-des-structures-routieres-35-ans-d-innovations.html>
- INGLE, G. S. e BHOSALE, S. S. (2019), Development of full-scale laboratory accelerated pavement testing facility: a step toward performance assessment of geosynthetics reinforced pavement. *Innov. Infrastruct. Solut.* 4, 21, <https://doi.org/10.1007/s41062-019-0209-0>
- IPR (2009), Atividades e produtos. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Apresentação proferida pelo Eng. Civil Chequer Jabour Chequer, M.Sc. (Gerente de Projeto do DNIT e Coordenador do IPR). Disponível em <https://slideplayer.com.br/slide/1351912/>
- JI, X.; ZHENG, N.; NIU, S.; MENG, S.; XU, Q. (2016), Development of a rutting prediction model for asphalt pavements with the use of an accelerated loading facility. *Road Materials and Pavement Design*, 17:1, 15-31, <https://doi.org/10.1080/14680629.2015.1055337>
- JI, X.; ZHENG, N.; HOU, Y.; NIU, S. (2013), Application of asphalt mixture shear strength to evaluate pavement rutting with accelerated loading facility (ALF). *Construction and Building Materials*, Vol. 41, pp. 1-8, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.111>.
- JONES, D.; HARVEY, J.; AL-QADI, I.; MATEOS, A. (2012), *Advances in pavement design through full-scale accelerated pavement testing*. 1st edition, CRC Press, ISBN 9780415621380, 560 p.
- KOBISCH, R. (2000), Comportement et modélisation des structures de chaussées. Base de données des sections tests SHRP françaises, n° de Dossier 980238.
- LAPAV/UFRGS (2021), Simulador de tráfego. Laboratório de Pavimentação, Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Disponível em <https://www.ufrgs.br/lapav/institucional/>

- LAY, M.; METCALF, J.; SHARP, K. (2021), Paving our ways: a history of the world's roads and pavements. 1ST ed., CRC Print, ISBN 978-1-003-05630-0 (ebook).
- LIU, Y. (2010), Modeling abstractions of vehicle suspension systems supporting the rigid body analysis. *International Journal of Vehicle Structures and Systems (IJVSS)*, Vol. 1 (4), <https://doi.org/10.4273/ijvss.2.3-4.05>
- LOCAL MOTORS® (2019), Feixe de molas traseiro Fiat Ducato. Disponível em <https://localmotors.com.br/classificado/4279/feixe-molas-traseiro-fiat-ducato-em-sao-jose-dos-campos-sp>
- LSV (2021), Sistemas veiculares automotivos. Laboratório de Sistemas Veiculares. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Campus Joinville. Disponível em <https://labsistemasveiculares.ufsc.br/sistemas/>
- MANUEL LPC (2007), Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobés. Groupe de Travail RST "Formulation des enrobés". Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Paris, France.
- MCCORMICK, B. W. (1976), Aerodynamics, aeronautics, and flight mechanics. John Wiley & Sons, Inc., Copyright from 1995, ISBN 0-471-57506-2, 652 p. New York, USA.
- MERIGHI, J. V.; FORTES, R. M.; PAPPALARDO JR., A. (2002), 3D finite element study of CEFET-SP accelerated pavement tests. In: Third International Symposium on 3D Finite Element for Pavement Analysis, Design and Research, 2002, Amsterdam. Proceedings of Third International Symposium on 3D Finite Element for Pavement Analysis, Design and Research, 2002. p. 351-362.
- MINFRA (2020), Anuário Estatístico de Transportes 2010-2019. Ministério da Infraestrutura. 67 p. Brasília, DF. Disponível em <https://ontl.epl.gov.br/publicacoes/anuario-estatistico/>.
- MSHD (1951), Report on Maryland road test one-MD. Michigan State Highway Department, 7 p. Available at https://www.michigan.gov/documents/mdot/R-159_440221_7.pdf
- NARA (1995), Web version based on Guide to Federal Records in the National Archives of the United States. Washington, DC: National Archives and Records Administration, 3 volumes, 2428 pages, available at <https://www.archives.gov/research/guide-fed-records/groups/030.html>
- NZTA (2012), Canterbury accelerated pavement testing indoor facility: a world-leading pavement testing facility. New Zealand Transport Agency. Available at <https://www.nzta.govt.nz/assets/resources/captif/docs/capitif.pdf>

- OTTO, G. G.; SIMONIN, J-M; PIAU, J-M; COTTINEAU, L-M; CHUPIN, O.; MOMM, L.; VALENTE, A. M. (2017), Weigh-in-motion (WIM) sensor response model using pavement stress and deflection. *Construction and Building Materials*, Vol. 156, pp. 83-90, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.085>.
- PAPAIIOANNOU, G. e KOULOCHERIS, D. (2018), An approach for minimizing the number of objective functions in the optimization of vehicle suspension systems. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 435, pp. 149-169, ISSN 0022-460X, <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2018.08.009>
- PARCZEWSKI, K. e WNEK, H. (2015), The influence of the type of suspensions on vehicle stability and steerability, In: *Proceedings of the 19th International Conference. Transport Means*.
- PÉREZ, S. A. ; BALAY, J. M. ; TAMAGNY, P. ; PETIT, C. (2007), Accelerated pavement testing and modeling of reflective cracking in pavements. *Engineering Failure Analysis*, 14 (8): 1526-1537.
- PERVILLE (2017), Planta de locação de estacas da UFSC/Campus Joinville. Arquivo PVL-0214.00-EP-DM-00001_R00_Locacao_Estacas. Joinville, SC.
- PIMENTEL, J M. F. (2007), Accelerated testing methodology for evaluating pavement patching materials. Thesis submitted to the Faculty of the Worcester Polytechnic Institute in partial fulfillment of the requirements for the Degree of Master of Science in Civil Engineering, 77 p.
- PLESSIS, L. du; ULLOA-CALDERON, A.; HARVEY, J.T.; COETZEE, N.F (2018), Accelerated pavement testing efforts using the Heavy Vehicle Simulator. *International Journal of Pavement Research and Technology*, Vol. 11, Issue 4, pp. 327-338, ISSN 1996-6814, <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.09.016>.
- QIAN, J.; CHEN, K.; TIAN, Y.; ZENG, F.; WANG. L. (2019), Performance evaluation of flexible pavements with a lateritic gravel base using accelerated pavement testing. *Construction and Building Materials*, Vol. 228, 116790, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116790>.
- QUAGLIA, G; SCOPESI, M.; FRANCO, W. (2012), A comparison between two pneumatic suspension architectures. *Vehicle System Dynamics*, Vol. 50, Issue Number 4, pp. 509-526, <https://doi.org/10.1080/00423114.2011.602420>

- RODRÍGUEZ, C. A. M (2018), Avaliação do comportamento mecânico de um ECC (Engineered Cementitious Composites) com fibras de polipropileno no recapeamento de pavimentos. Tese de doutorado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 260 p. Porto Alegre, RS.
- ROMERO, R.; RURZ, A. E PÉREZ, J. (1992), First test on the CEDEX test track. TRANSPORTATION RESEARCH RECORD (TRR), vol. 1354, pp. 65-73. Disponível em <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1992/1354/1354-006.pdf>
- SANTOS, A. A. e SILVA, A. F. (2014), Automação pneumática. Publindústria, 3ª edição, ISBN 9789897230721, 340 p.
- SAYEGH, G. (1965), Contribution à l'étude des propriétés viscoélastiques des bitumes purs et des bétons bitumineux. Thèse de Docteur Ingénieur. Faculté des Sciences de Paris.
- SELVARAJ, S. I. (2012), Review on the use of instrumented pavement test data in validating flexible pavement mechanistic load response models. Procedia - Social and Behavioral Sciences, Vol. 43, pp. 819-831, ISSN 1877-0428, <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.04.157>.
- SERT, E. e BOYRAZ, P. (2017), Optimization of suspension system and sensitivity analysis for improvement of stability in a midsize heavy vehicle. Engineering Science and Technology, an International Journal, Vol. 20, Issue 3, pp. 997-1012, ISSN 2215-0986, <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2017.03.007>.
- SEW EURODRIVE (2021), Produtos: motorreductores. Catálogos de especificação. Disponível em <https://www.sew-eurodrive.com.br/>
- SILVA, P. D. (2001), Estudo do reforço de concreto de cimento (whitetopping) na pista circular experimental do Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Tese de doutorado apresentada a COPPE/UFRJ, 358 p., Rio de Janeiro, RJ.
- SILVA, P. D. E. A. da e MOTTA, L. M. G. da (1999). Instrumentação da pista circular experimental do IPR/DNER. Revista Transportes, Vol. 7, nº 2, <https://doi.org/10.14295/transportes.v7i2.227>
- SKF (2021). SKF Bearing Select - Version: 1.2.96. Available at <https://www.skfbearingselect.com/>
- SOLIMAN, A. M.; ABD ALLAH, S. A.; EL-BETER, A. A.; HAMID, M. S. (2001), Heavy vehicle systems. A Special Series of the International Journal of Vehicle Design, Vol. 8, Issue Number: 3/4, pp. 316-334.

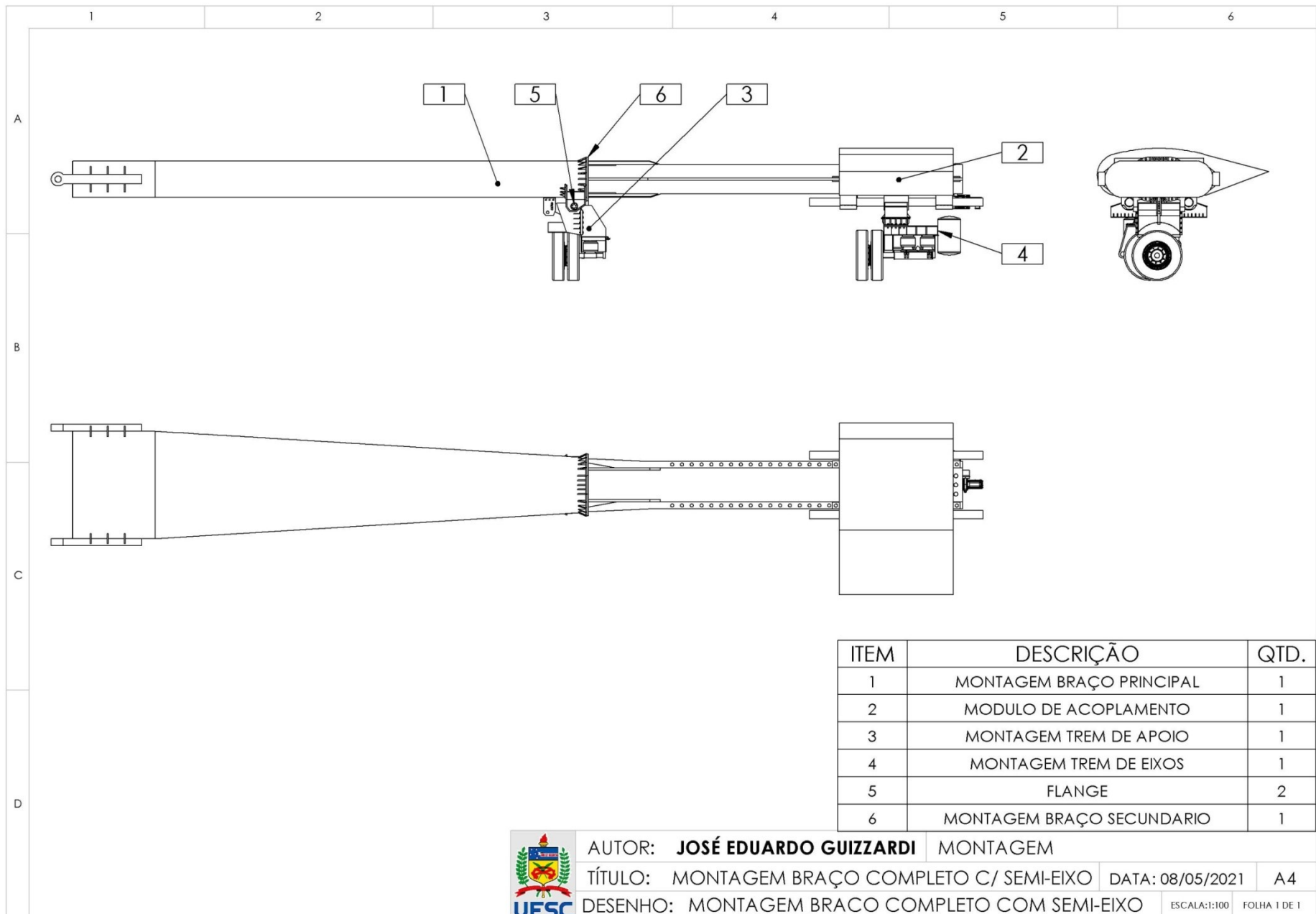
- SUSPENSYS® (2021), Suspensão Lubfree Tandem. Disponível em <https://www.suspensys.com/pt/produtos/semirreboques/suspens%C3%A3o-mec%C3%A2nica/suspens%C3%A3o-mec%C3%A2nica-lubfree-tandem/>
- TIAN, Y.; LEE, J.; NANTUNG, T; HADDOCK, J. E. (2017), Development of a mid-depth profile monitoring system for accelerated pavement testing. *Construction and Building Materials*, Vol. 140, pp. 1-9, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.106>.
- TODESCHINI, H. (2001), Projeto mecânico do mecanismo de aplicação de carga do sistema de deslocamento longitudinal e vertical de um simulador de teste acelerado de pavimentos rodoviários. Dissertação de mestrado apresentada à Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), 125 p. Porto Alegre, RS.
- UFSC (2011), Pistas de testes para desenvolvimento veicular: projeto de terraplenagem e drenagem pluvial. Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville, 97 p.
- UGE (2021), Plaque des machines FABAC. Université Gustave Eiffel. Disponible au <https://lames.univ-gustave-eiffel.fr/equipements/les-machines-fabac>
- UNGUREANU, D.; ȚĂRANU, N; HOHA, D.; ZGHIBARCEA, S.; ISOPESCU, D. N.; BOBOC, V.; OPRÎȘAN, G; SCUTARU, M. C.; BOBOC, A. HUDIȘTEANU, I. (2020), Accelerated testing of a recycled road structure made with reclaimed asphalt pavement material. *Construction and Building Materials*, Vol. 262, 120658, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120658>.
- VALE, A. F. (2008), Método de uso de simuladores de tráfego linear móvel de pista para a determinação de comportamento e previsão de desempenho de pavimentos asfálticos. Tese de doutorado apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 306 p. São Paulo, SP.
- WANG, C.; WANG, W.; ZHAO, W.; WANG, Y.; ZHOU, G. (2018), Structure design and multi-objective optimization of a novel NPR bumper system, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 153, Pages 78-96, ISSN 1359-8368, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.07.024>.
- WEST, R.C.; VAN WINKLE, C.; MAGHSOODLOO, S.; DIXON, S. (2017), Relationships between simple asphalt mixture cracking tests using N_{design} specimens and fatigue cracking at FHWA's accelerated loading facility. *Road Materials and Pavement Design*, 18:sup4, 428-446, <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1389083>
- XU, Q. e MOHAMMAD, L. N. (2008), Modeling asphalt pavement rutting under accelerated testing. *Road Materials and Pavement Design*, 9:4, 665-687, <https://doi.org/10.1080/14680629.2008.9690144>

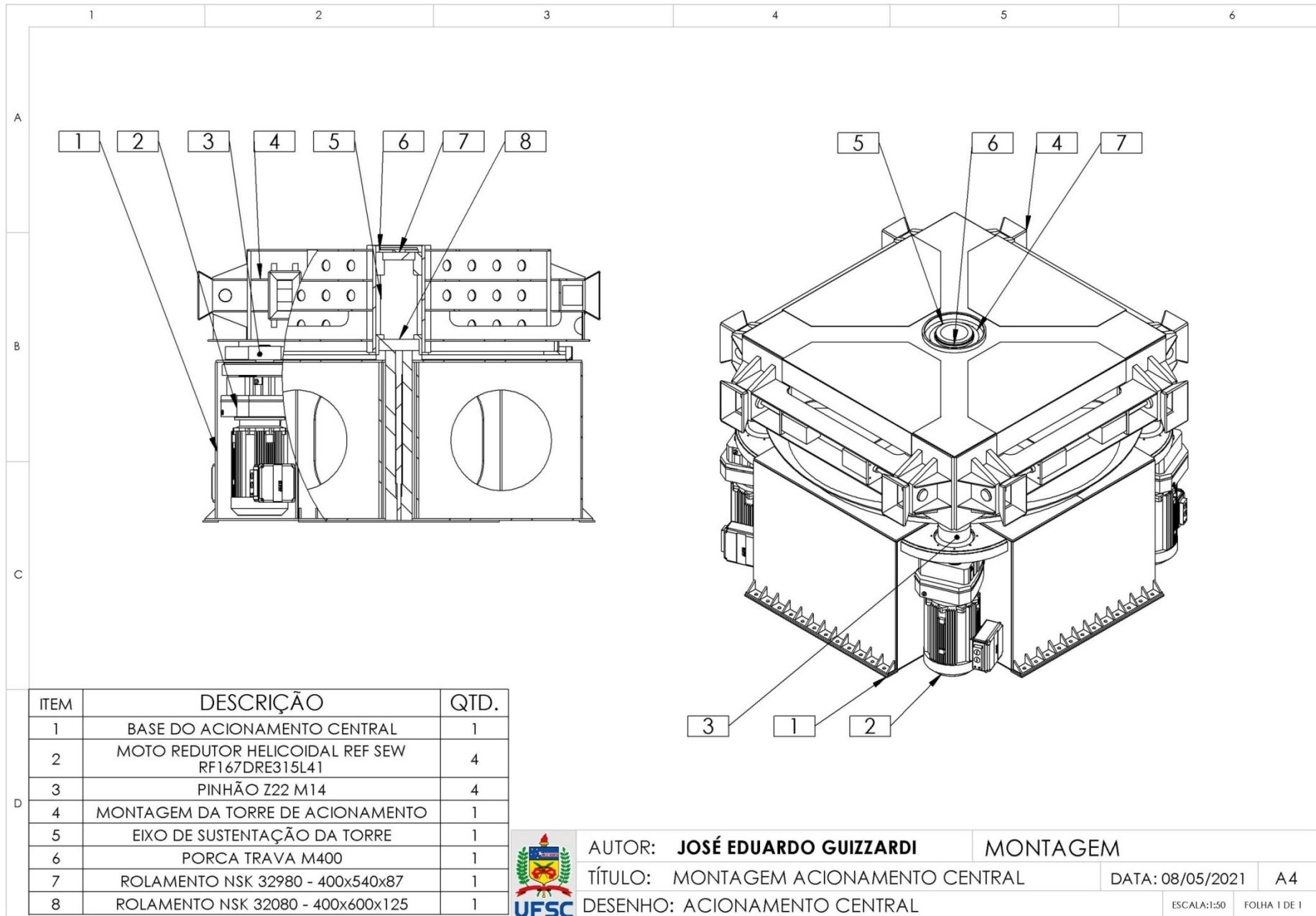
YUMPU (2021), Quadro de aplicação de pneus: pneu radial Goodyear modelo G658 11.00R22.
Disponível em <https://www.yumpu.com/pt/document/read/13754125/catalogo-de-caminhoes-e-onibus-goodyear/7>

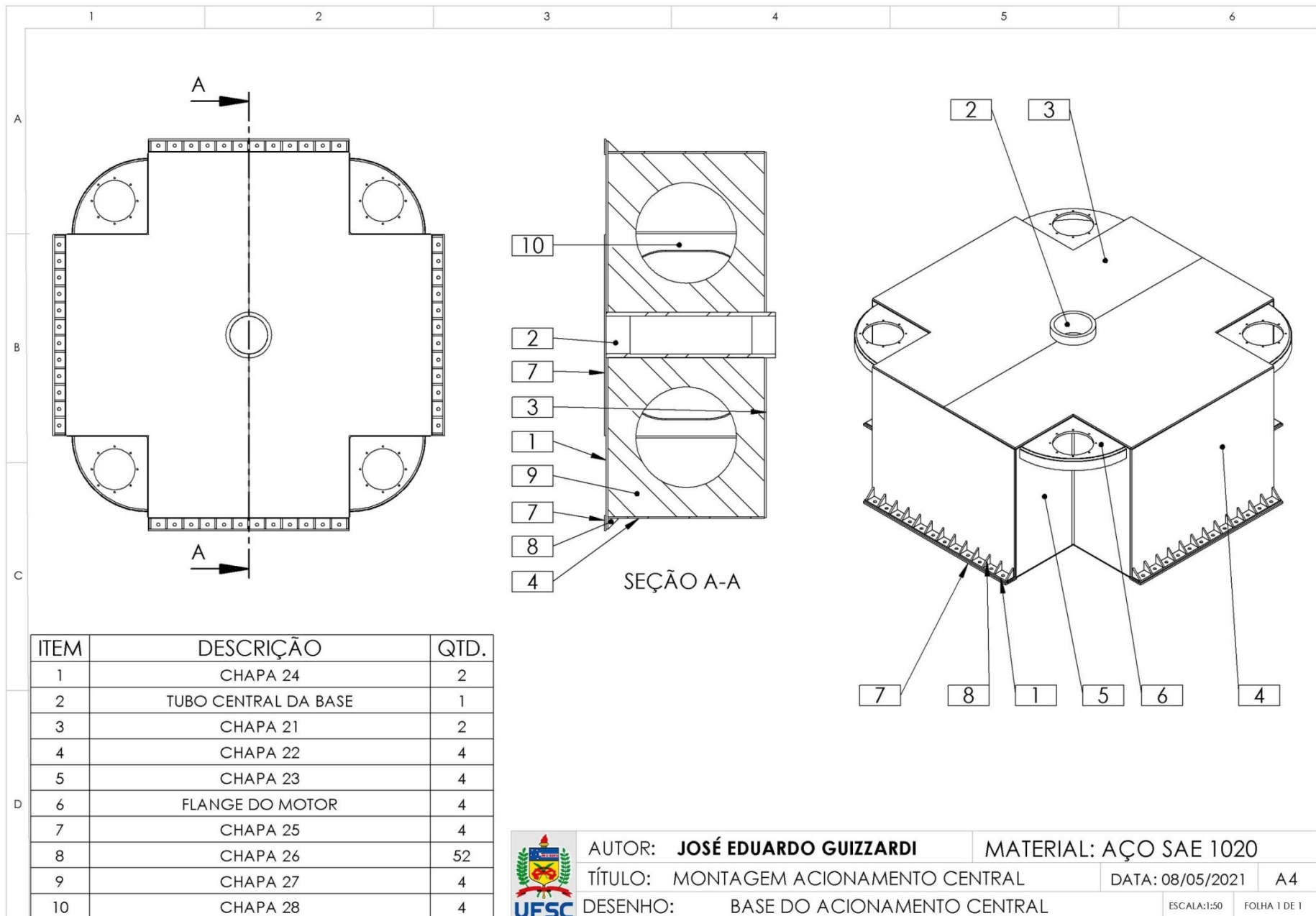
ANEXOS

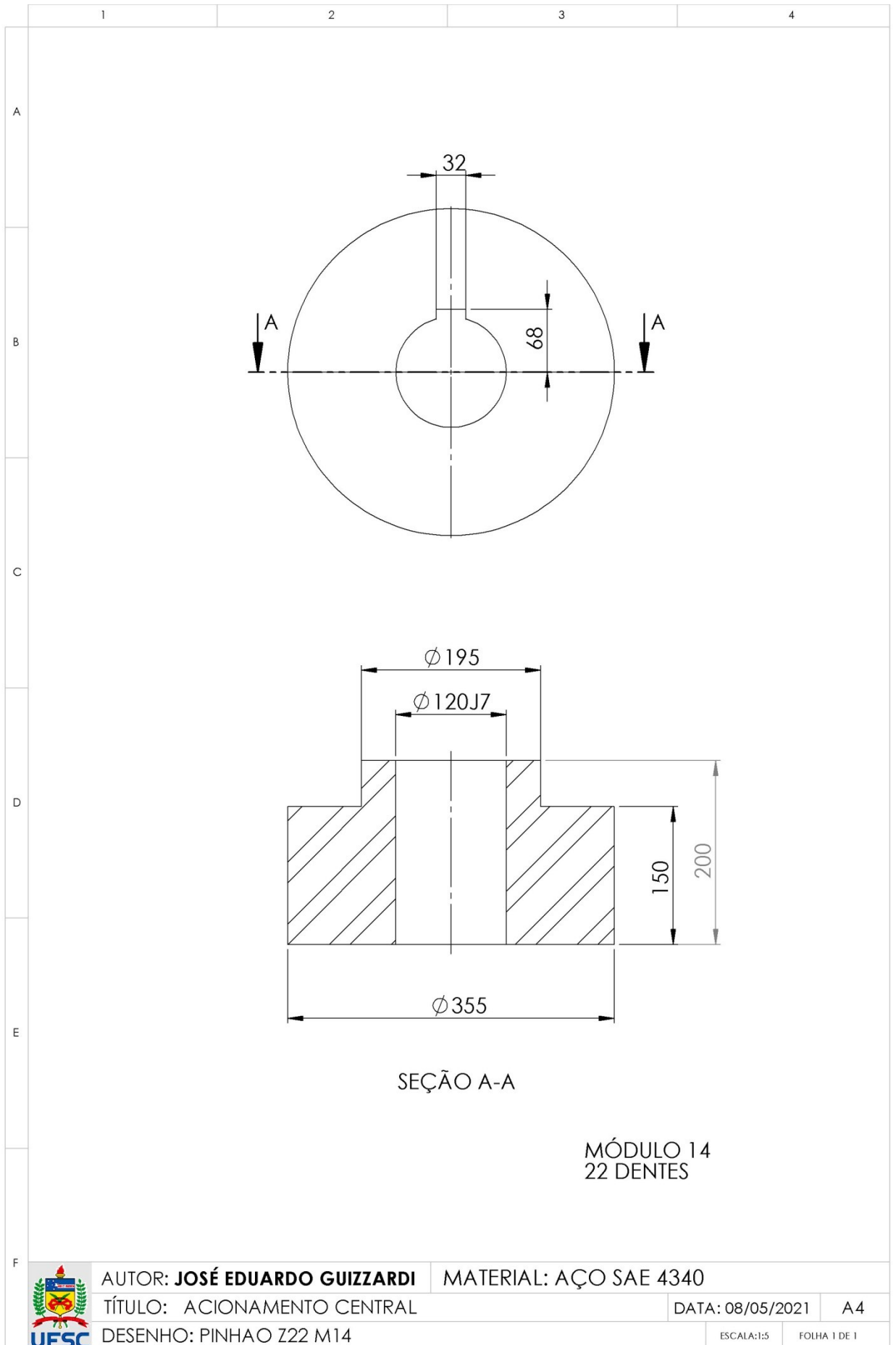
ANEXO I

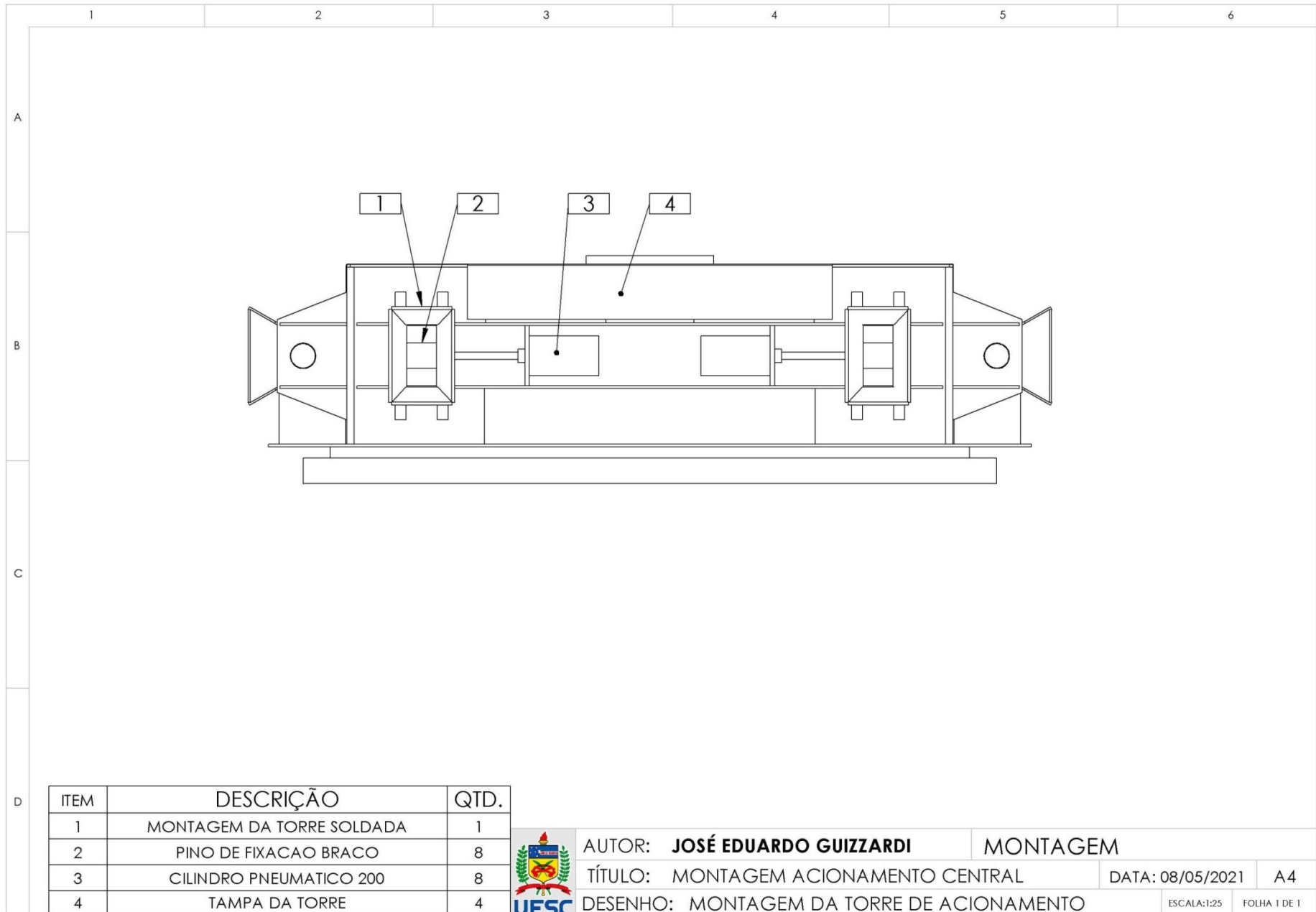
BASE E TORRE CENTRAL DE
ACIONAMENTO

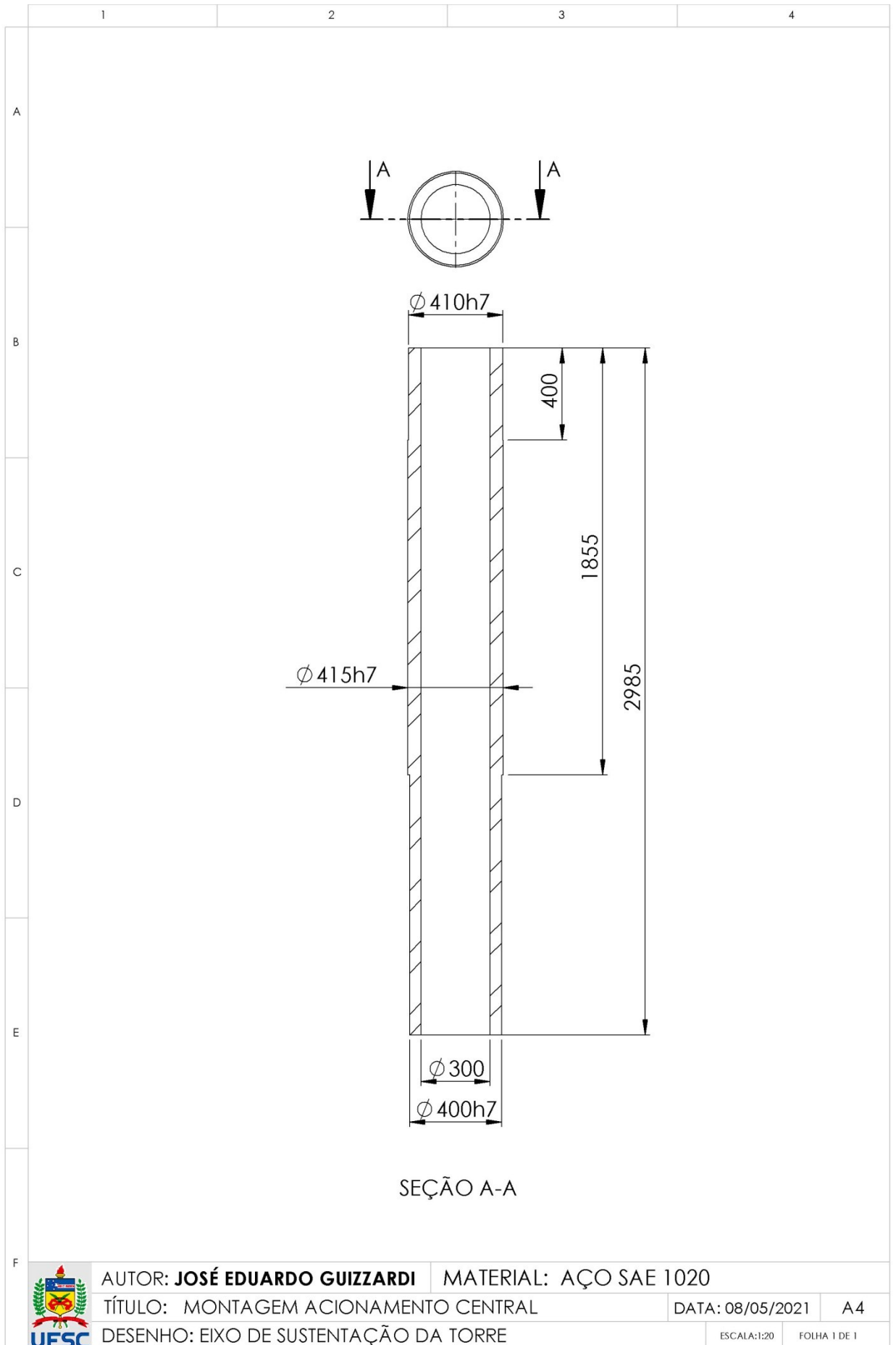


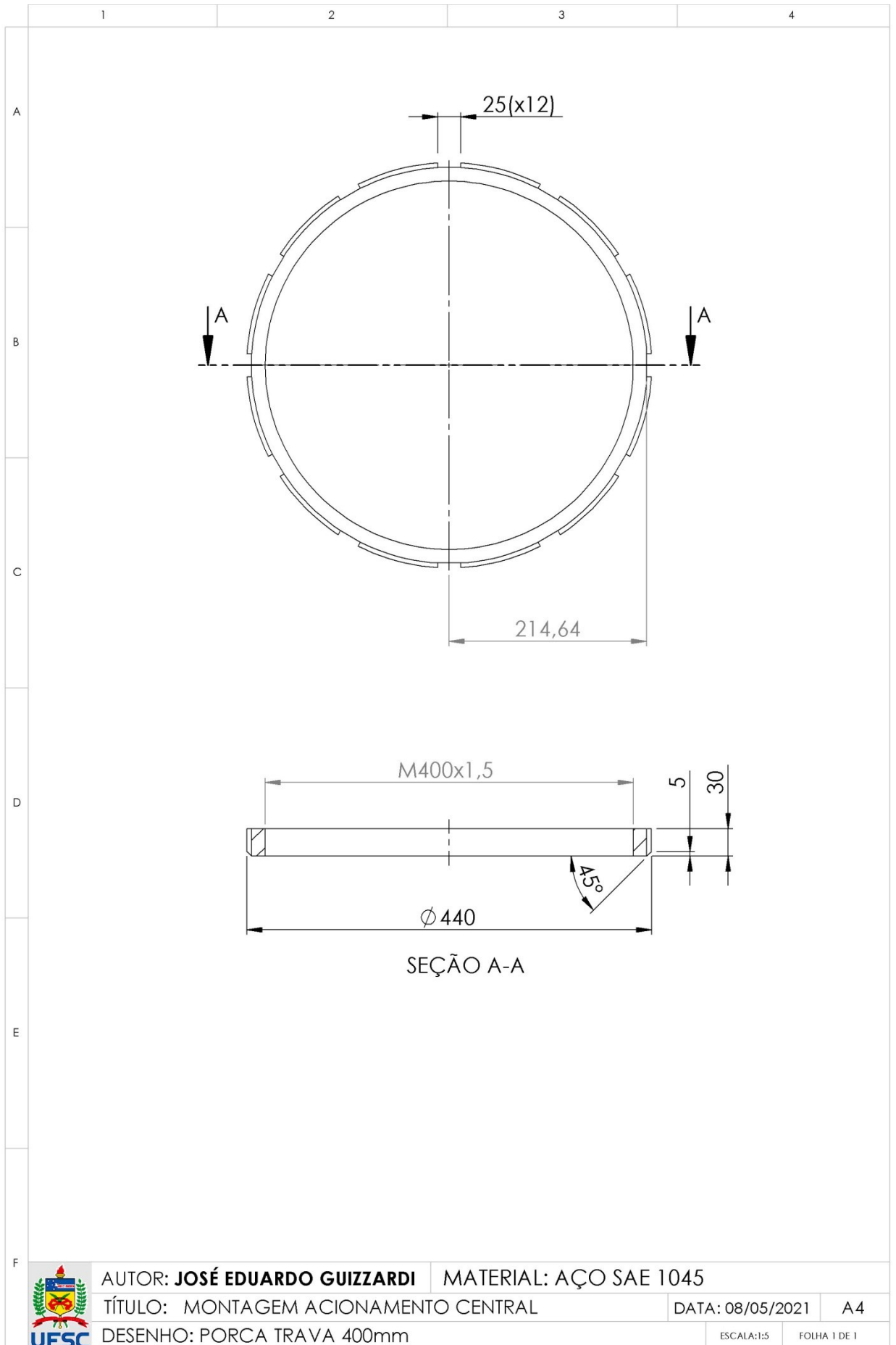


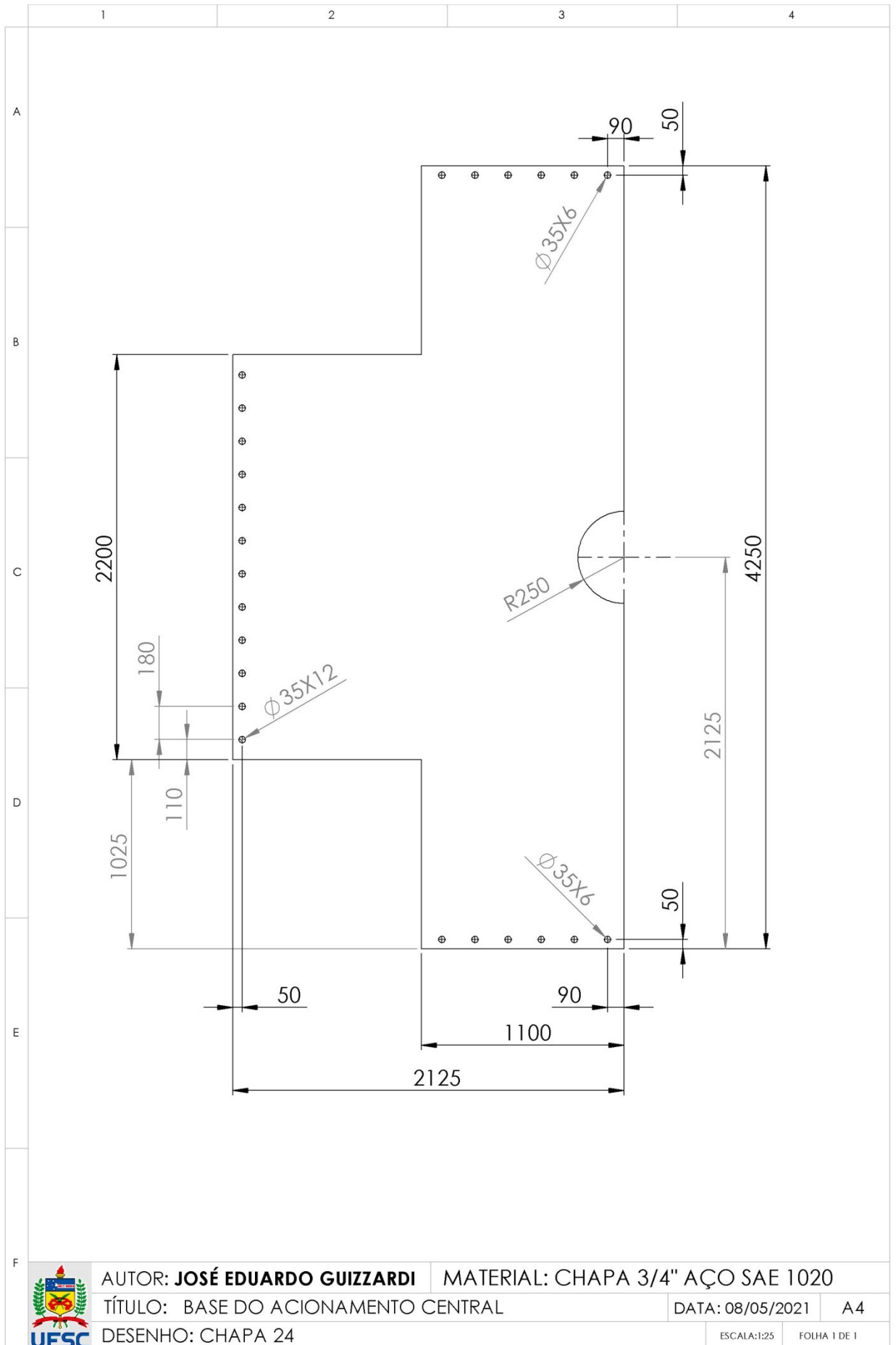












AUTOR: JOSÉ EDUARDO GUIZZARDI

MATERIAL: CHAPA 3/4" AÇO SAE 1020

TÍTULO: BASE DO ACIONAMENTO CENTRAL

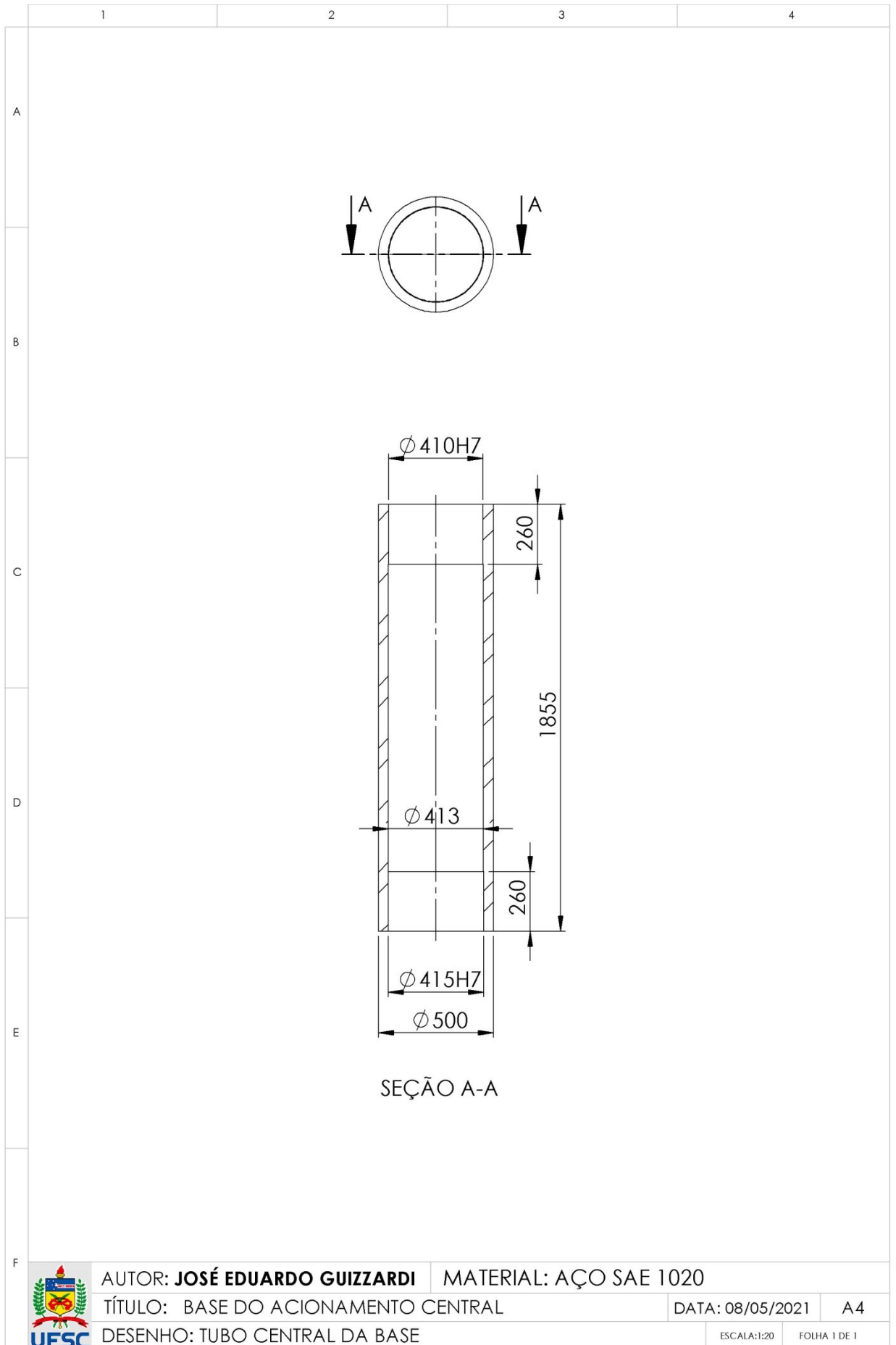
DATA: 08/05/2021

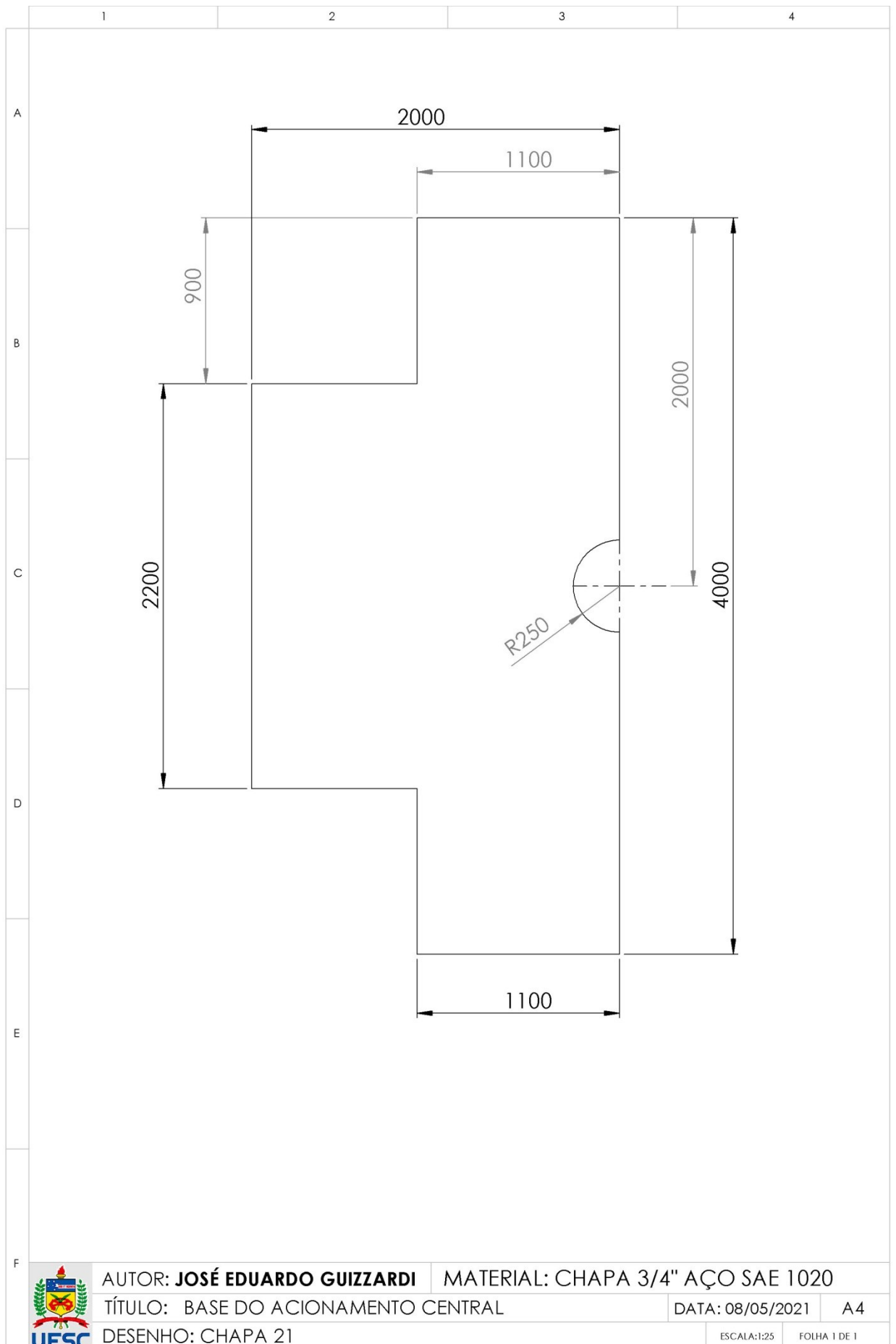
A4

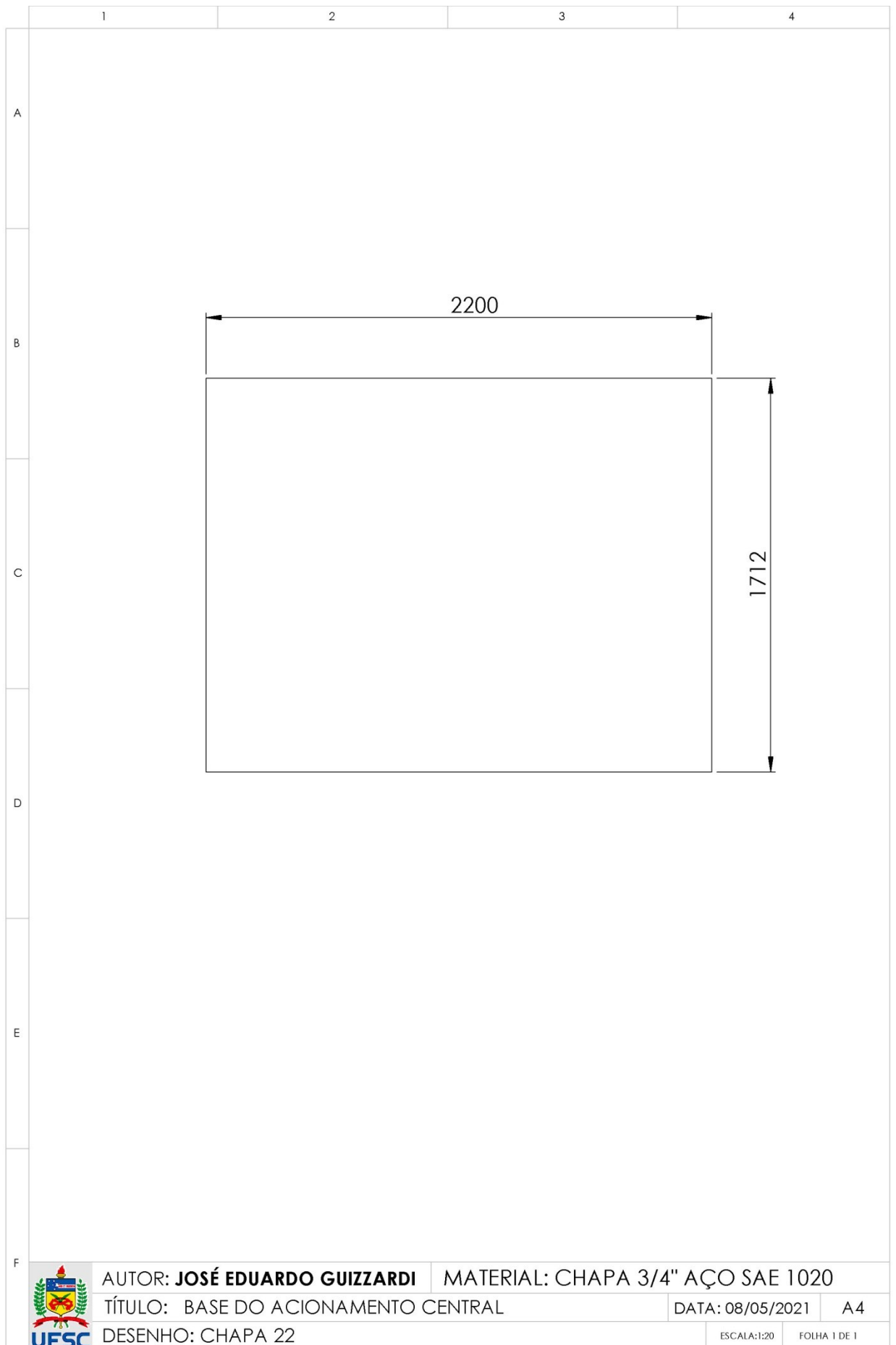
DESENHO: CHAPA 24

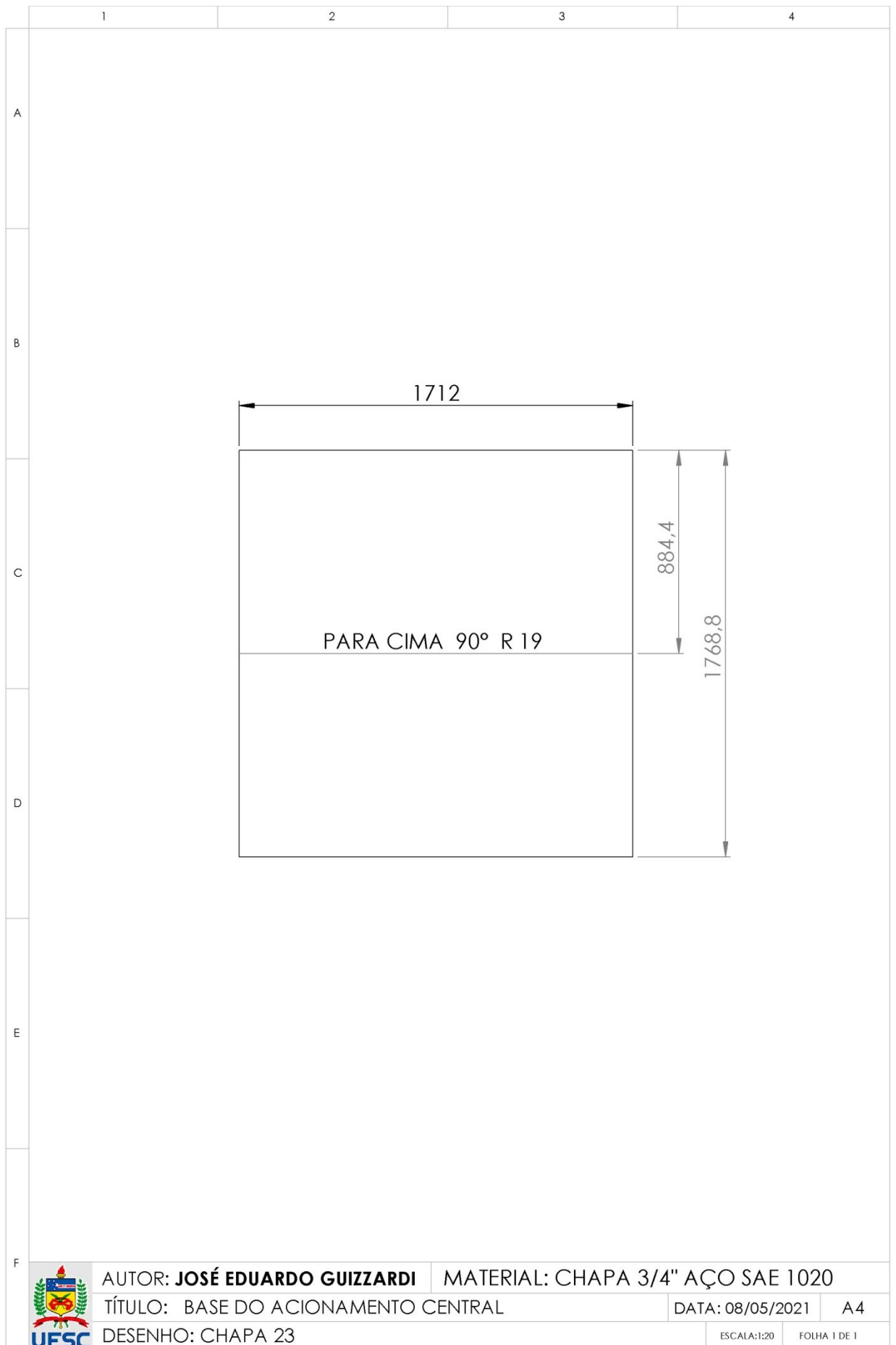
ESCALA:1:25

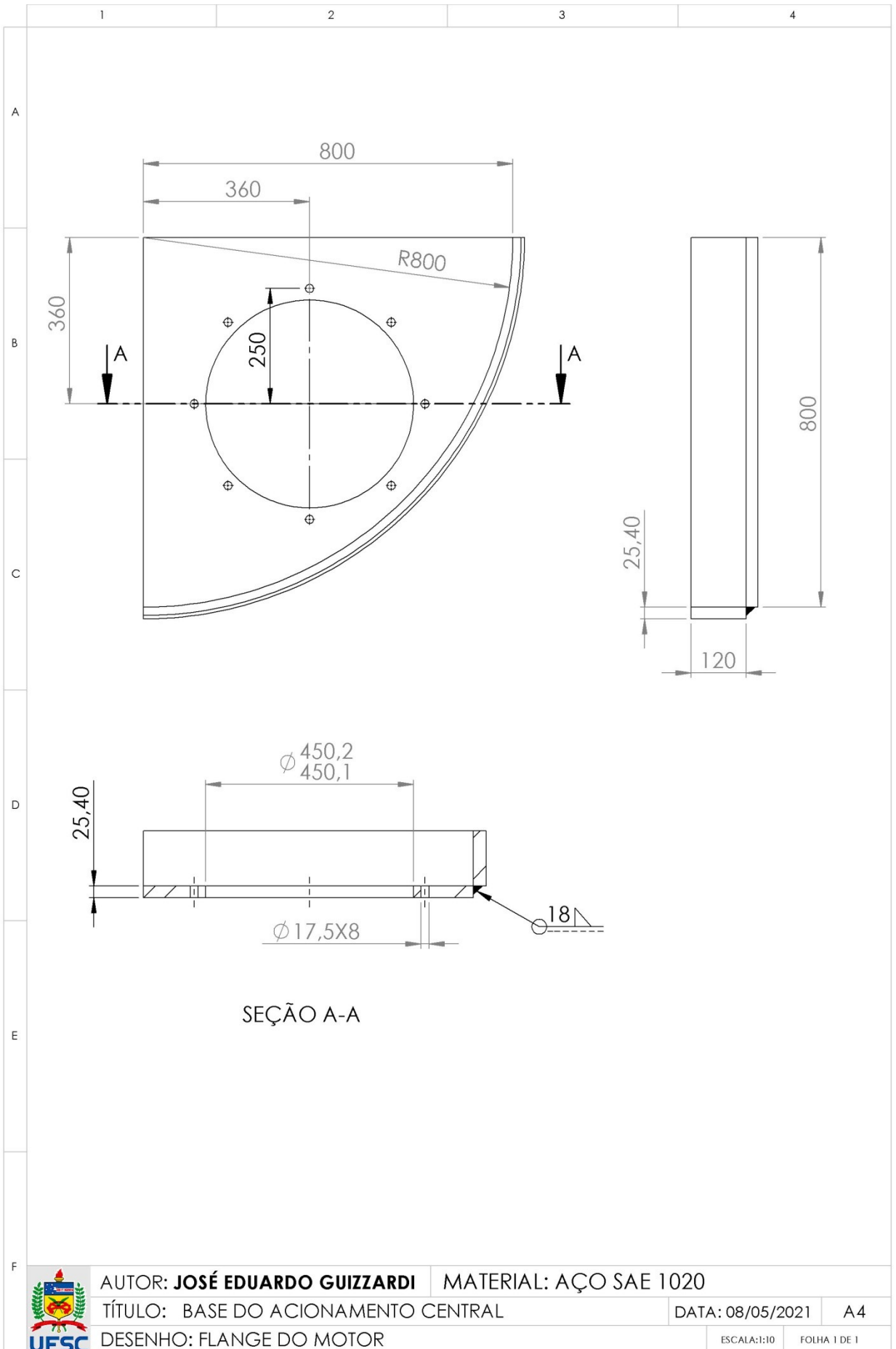
FOLHA 1 DE 1

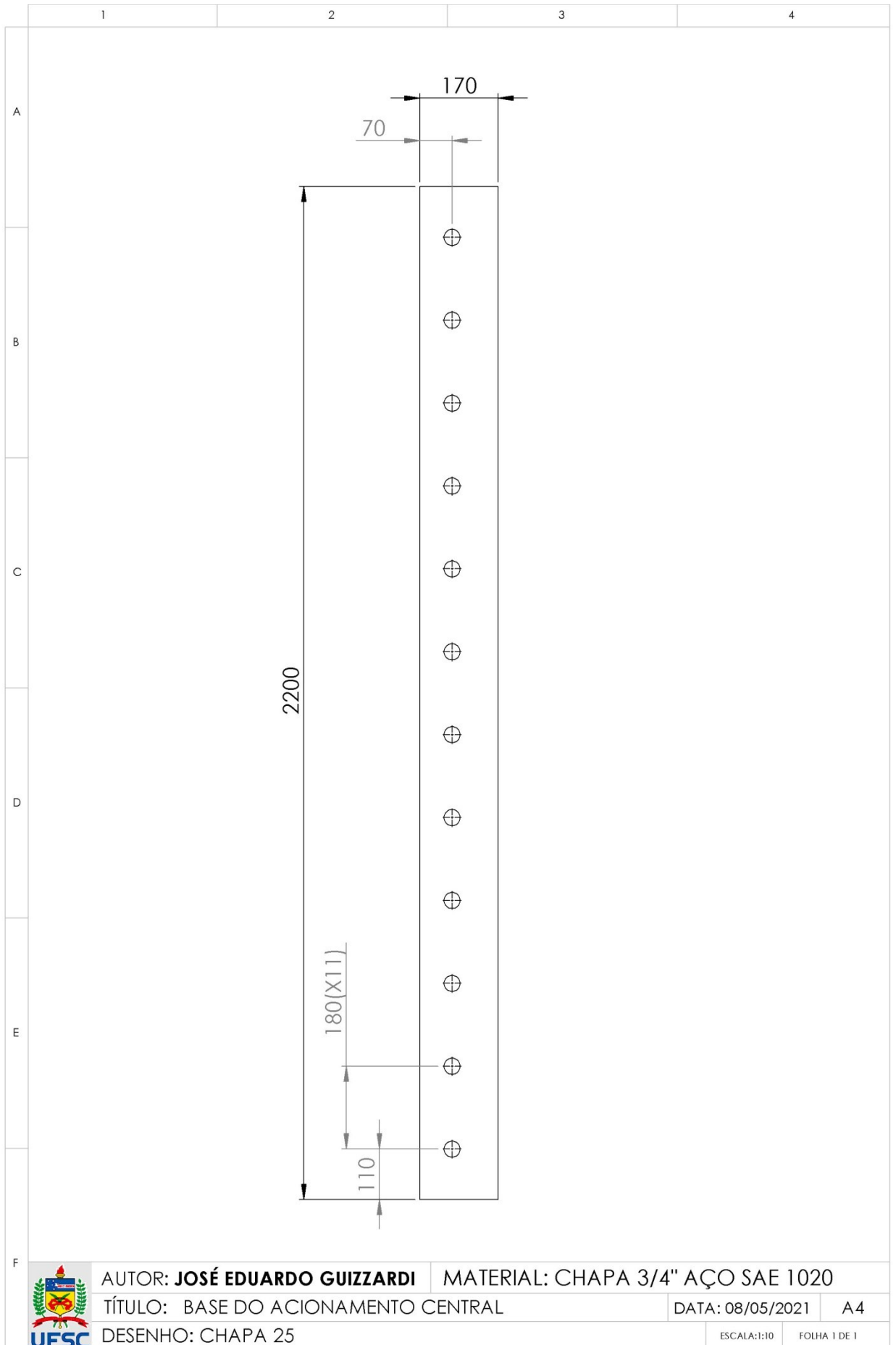












AUTOR: **JOSÉ EDUARDO GUIZZARDI**

MATERIAL: CHAPA 3/4" AÇO SAE 1020

TÍTULO: BASE DO ACIONAMENTO CENTRAL

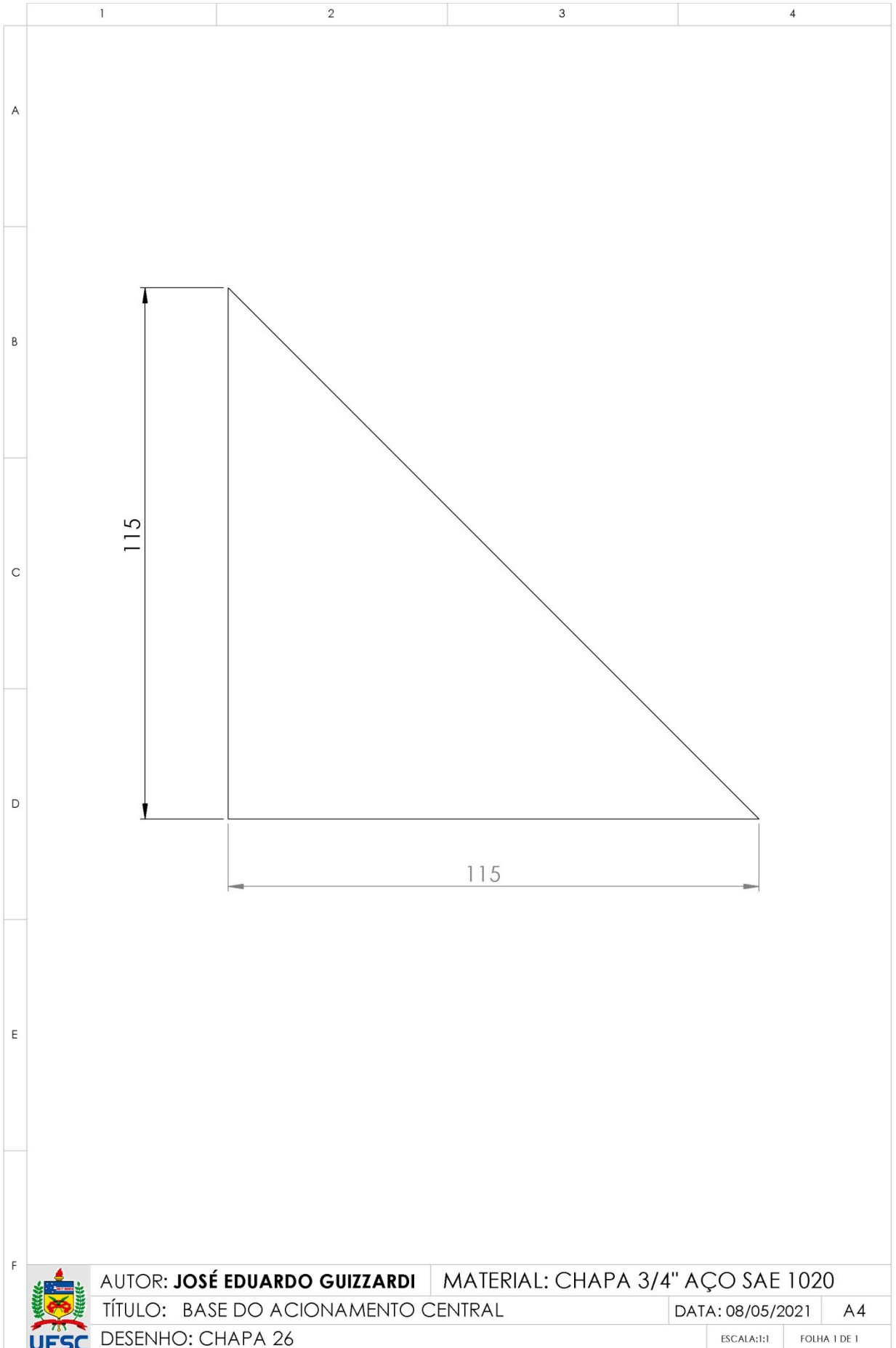
DATA: 08/05/2021

A4

DESENHO: CHAPA 25

ESCALA:1:10

FOLHA 1 DE 1



AUTOR: **JOSÉ EDUARDO GUIZZARDI**

MATERIAL: CHAPA 3/4" AÇO SAE 1020

TÍTULO: BASE DO ACIONAMENTO CENTRAL

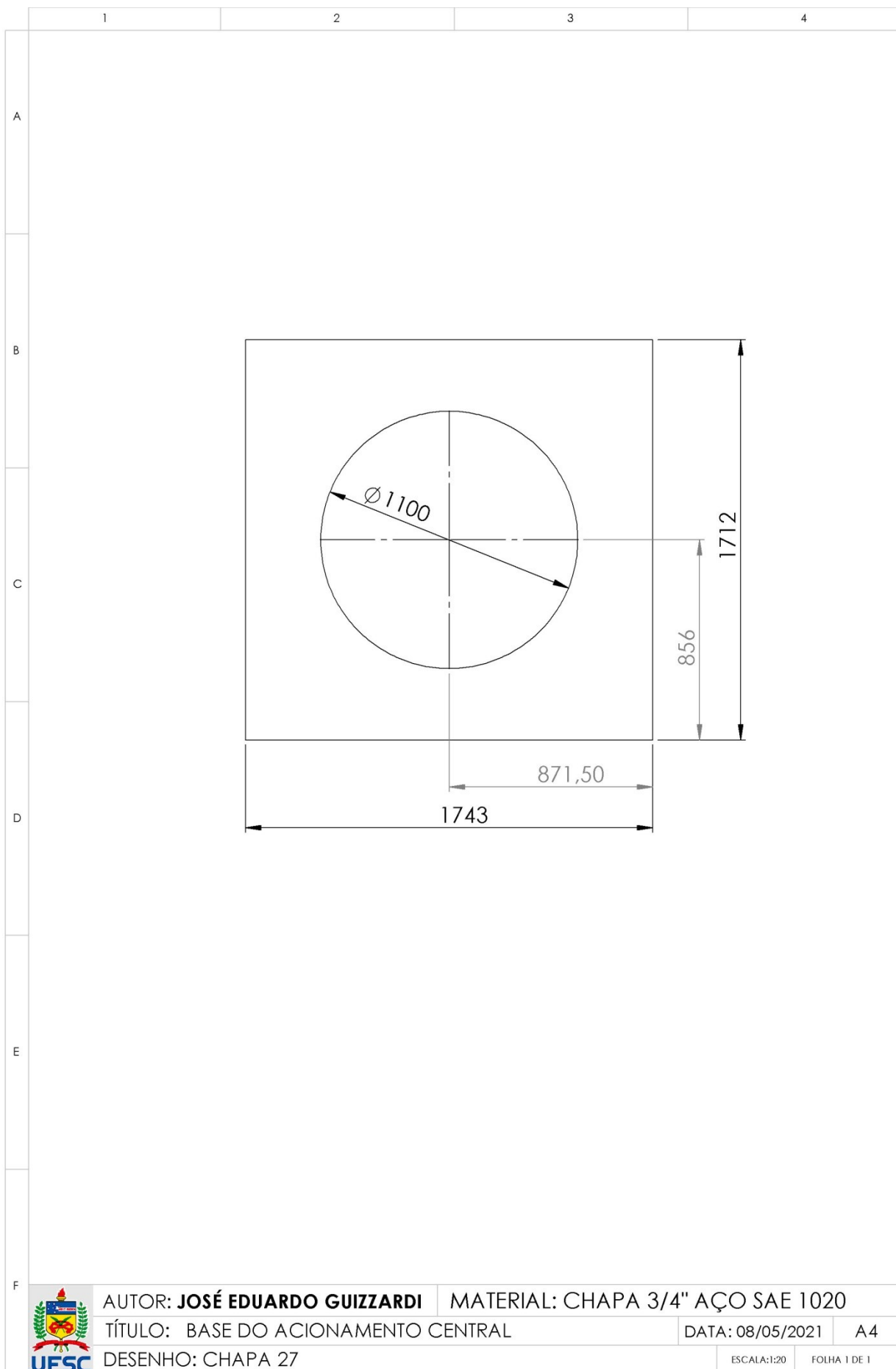
DATA: 08/05/2021

A4

DESENHO: CHAPA 26

ESCALA:1:1

FOLHA 1 DE 1

AUTOR: **JOSÉ EDUARDO GUIZZARDI**

MATERIAL: CHAPA 3/4" AÇO SAE 1020

TÍTULO: BASE DO ACIONAMENTO CENTRAL

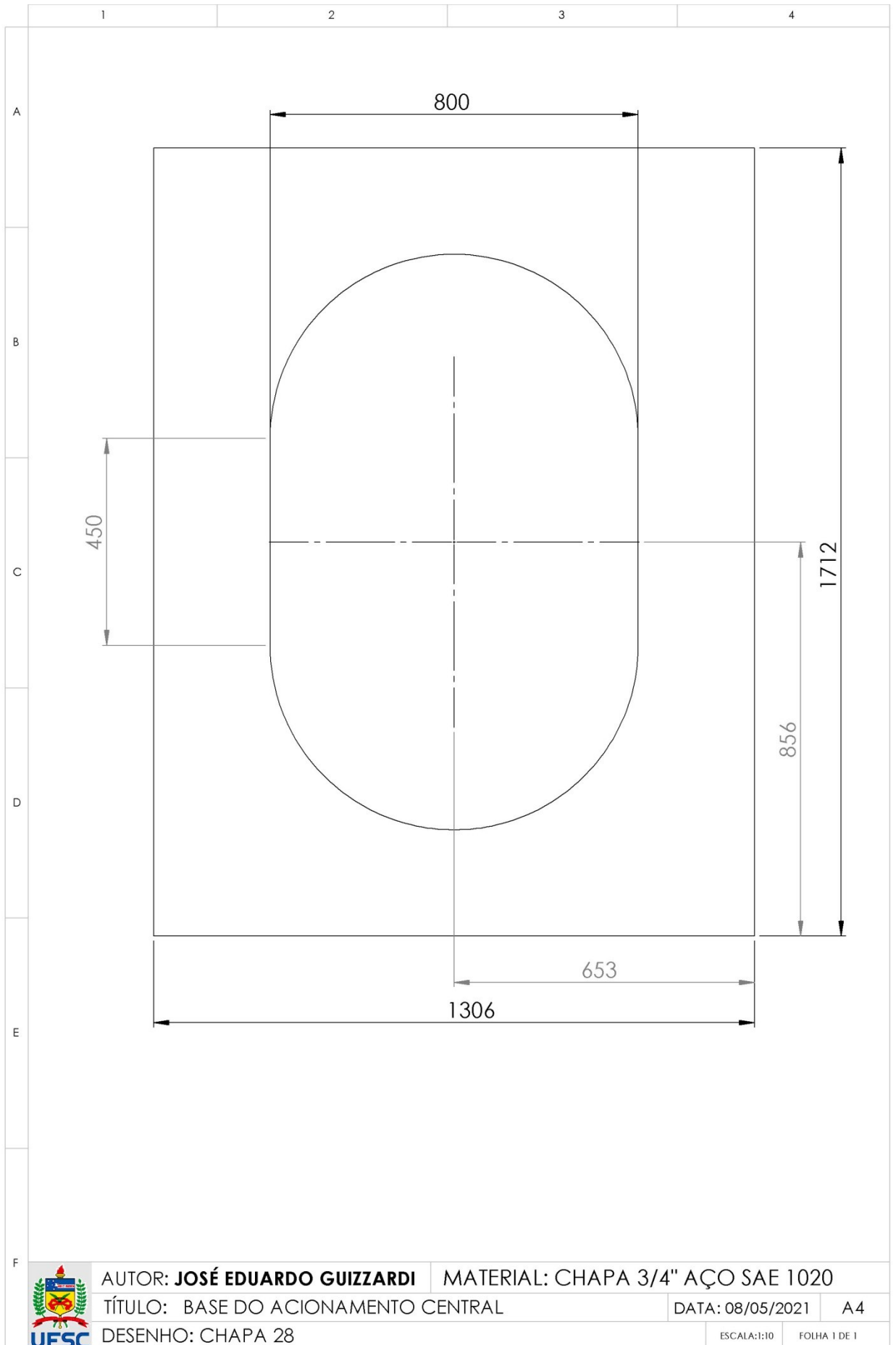
DATA: 08/05/2021

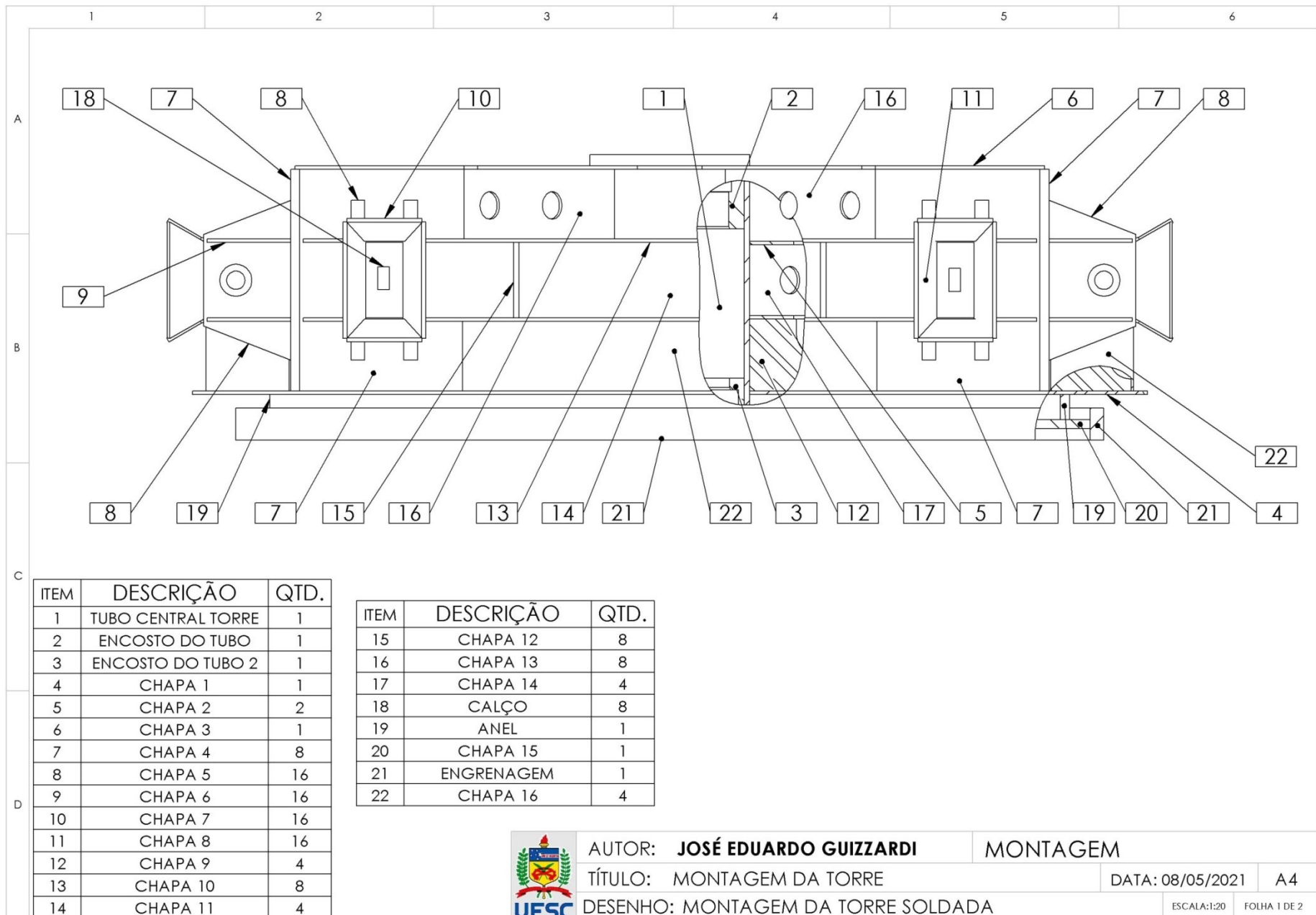
A4

DESENHO: CHAPA 27

ESCALA:1:20

FOLHA 1 DE 1





AUTOR: **JOSÉ EDUARDO GUIZZARDI**

MONTAGEM

TÍTULO: MONTAGEM DA TORRE

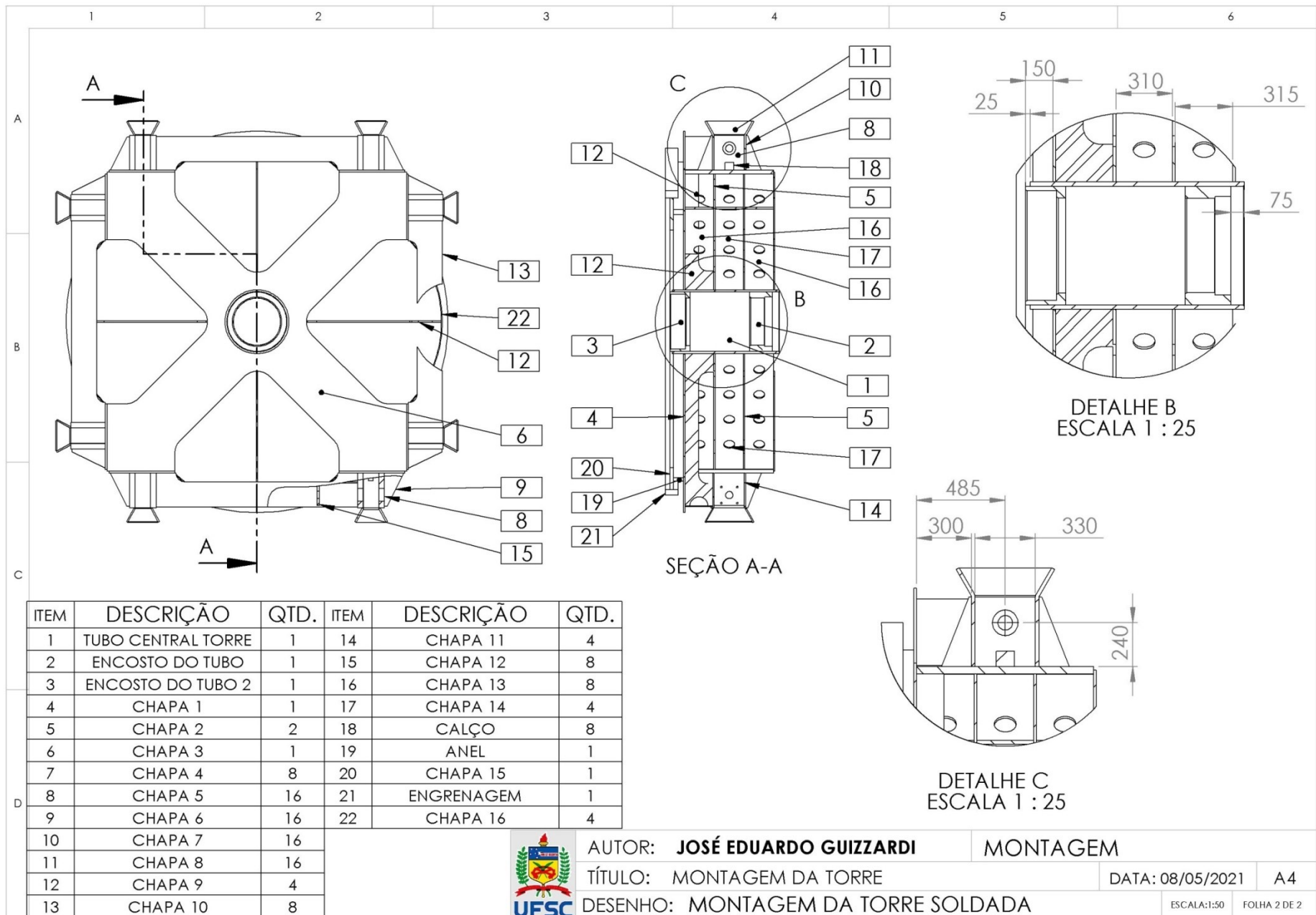
DATA: 08/05/2021

A4

DESENHO: MONTAGEM DA TORRE SOLDADA

ESCALA: 1:20

FOLHA 1 DE 2



AUTOR: **JOSÉ EDUARDO GUIZZARDI**

MONTAGEM

TÍTULO: MONTAGEM DA TORRE

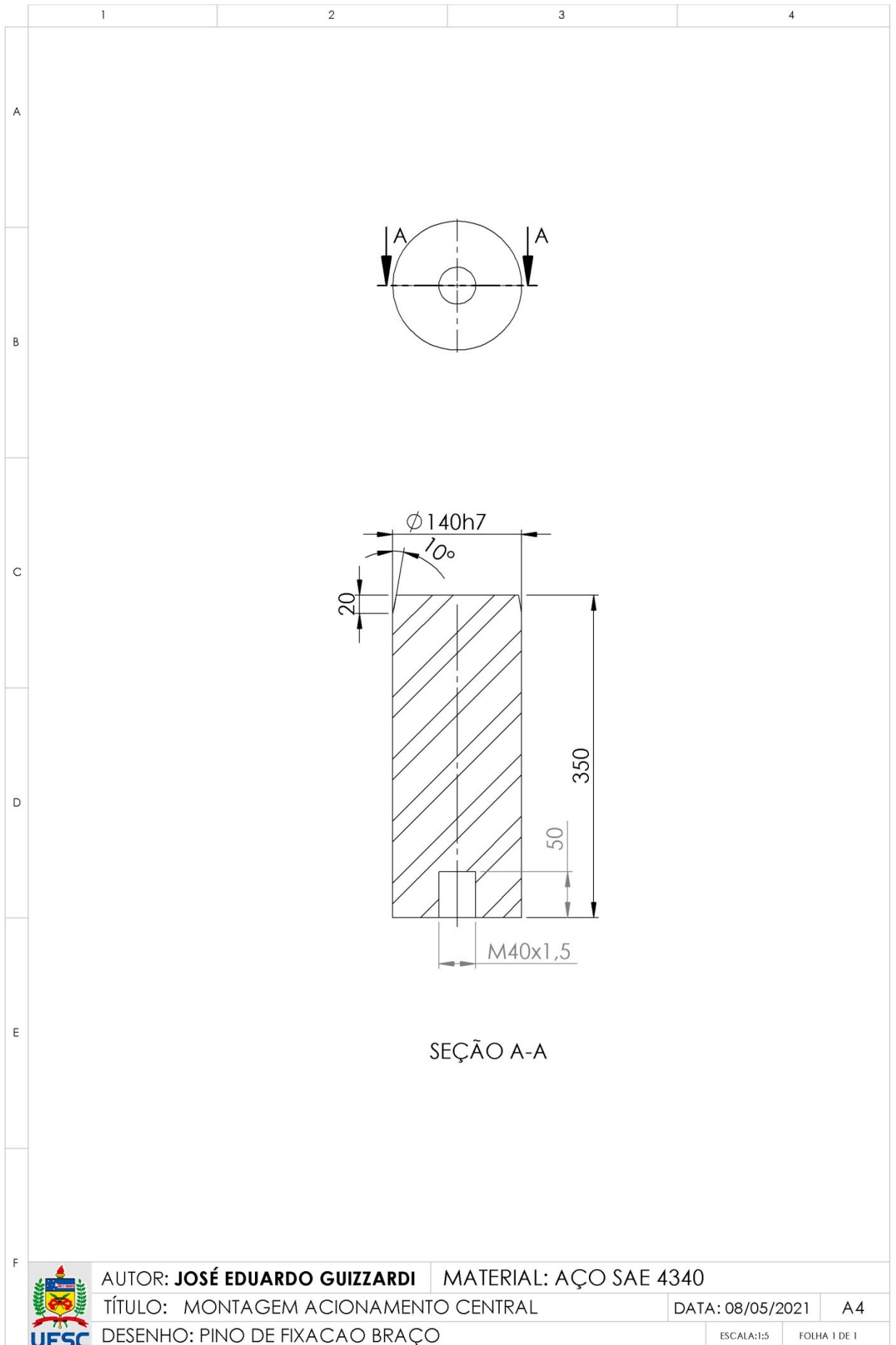
DATA: 08/05/2021

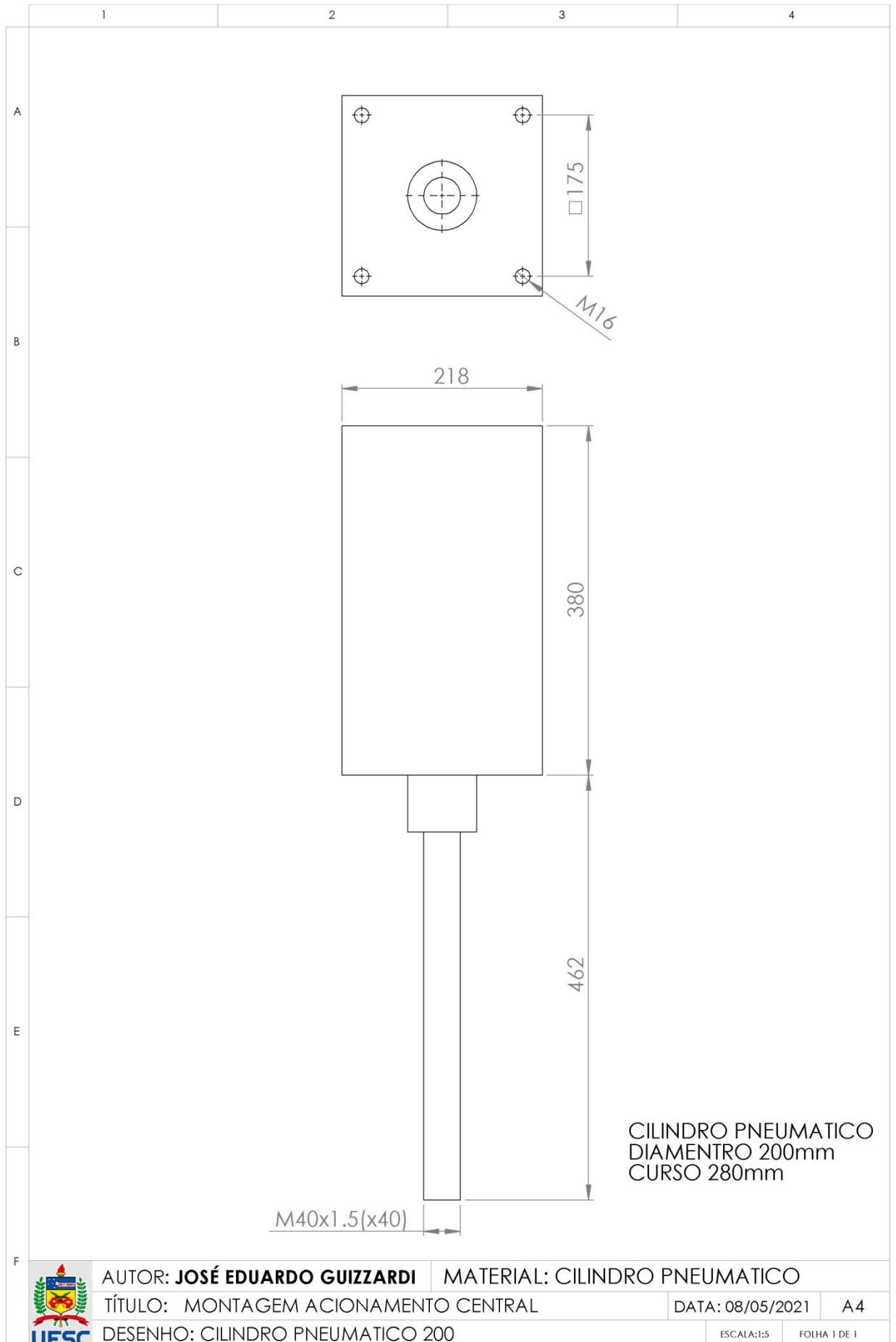
A4

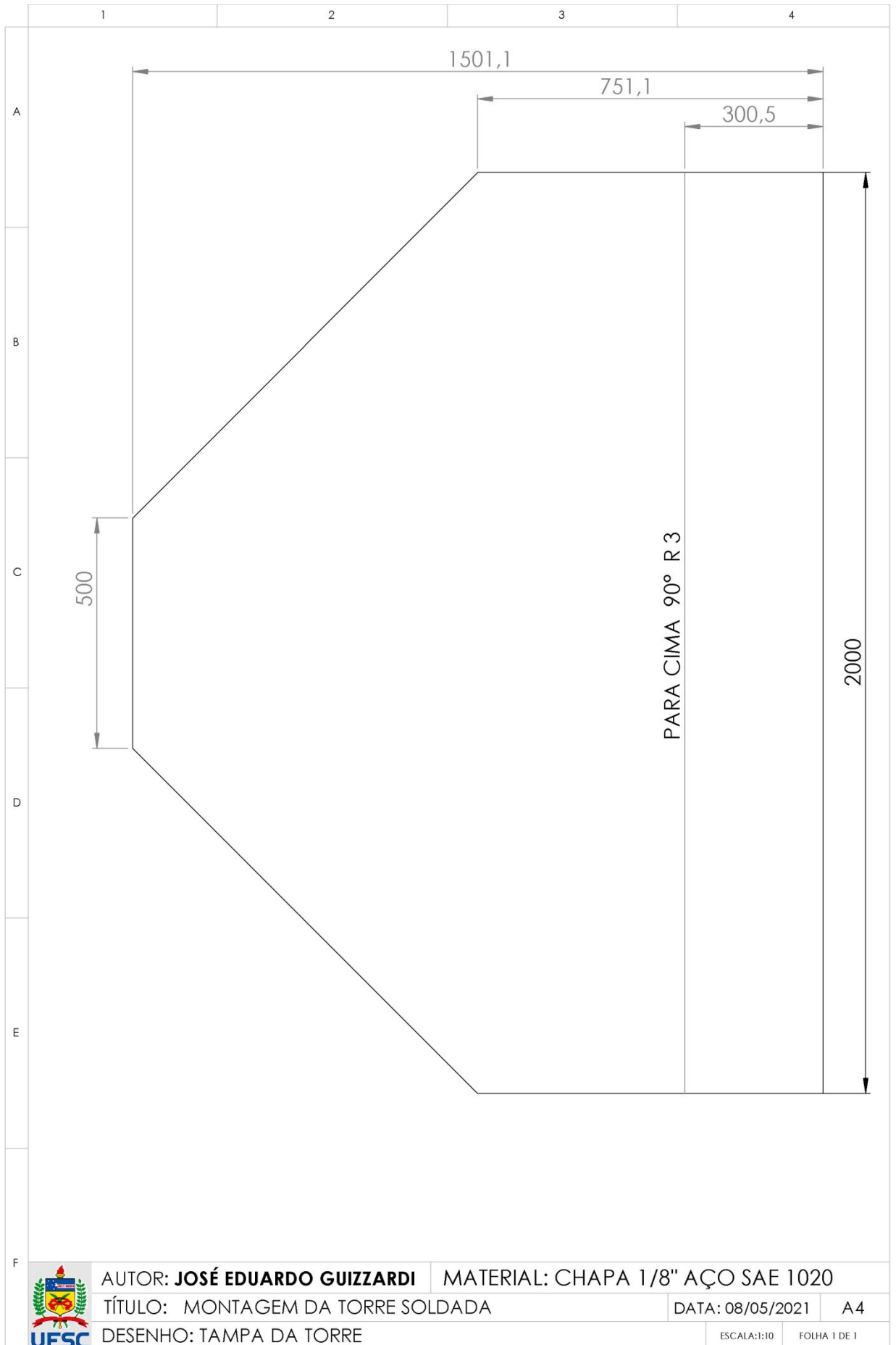
DESENHO: MONTAGEM DA TORRE SOLDADA

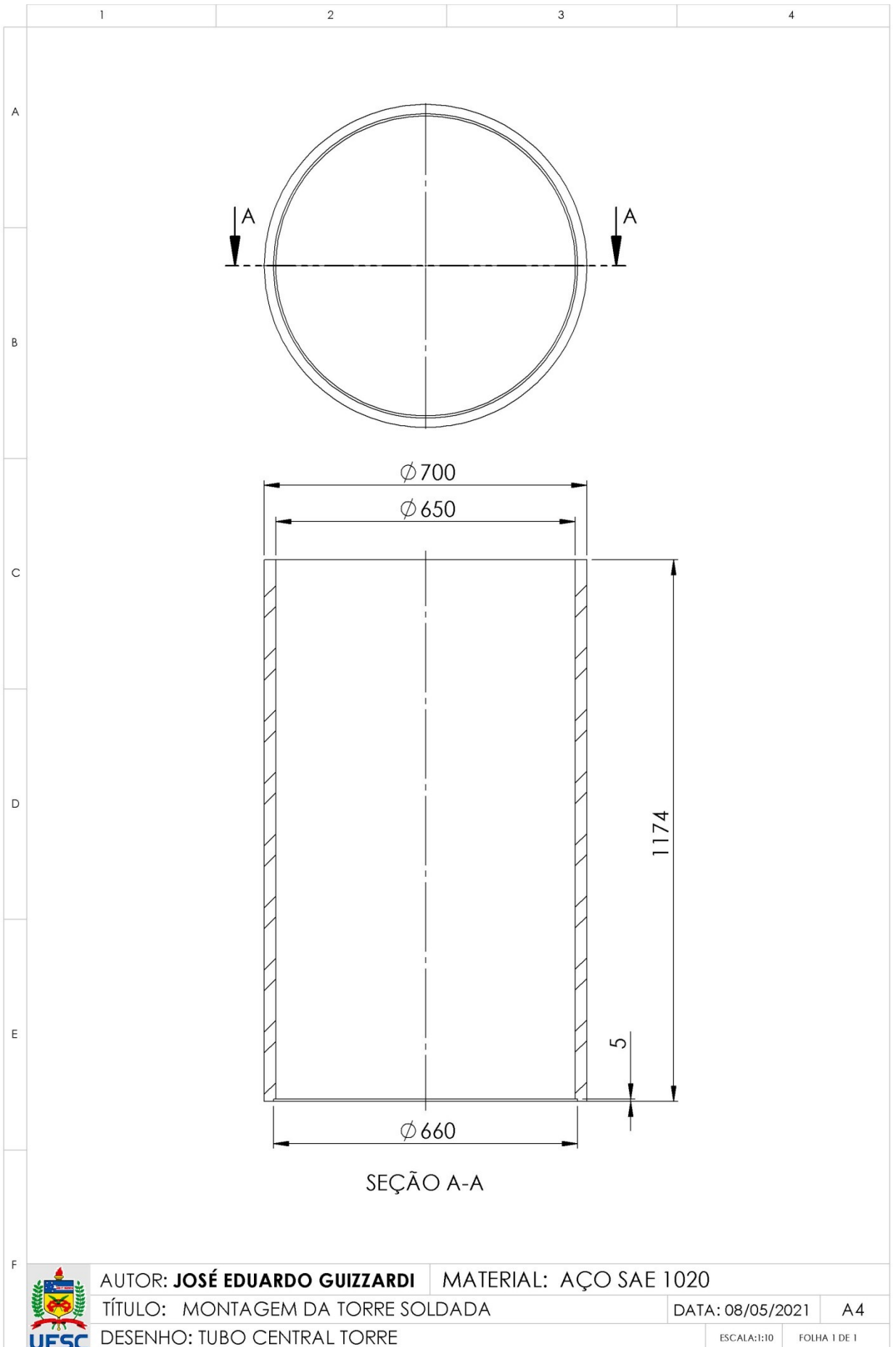
ESCALA:1:50

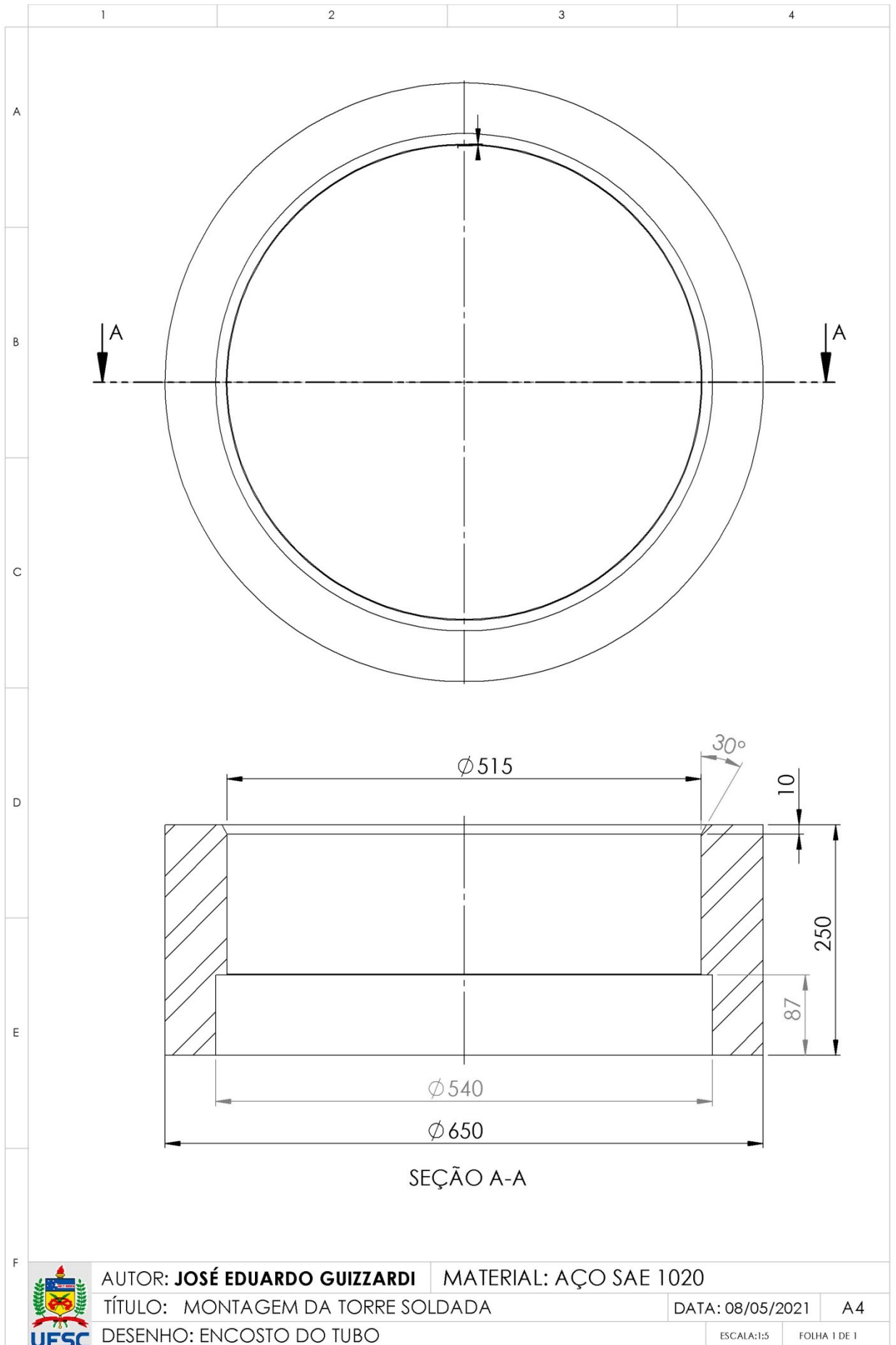
FOLHA 2 DE 2

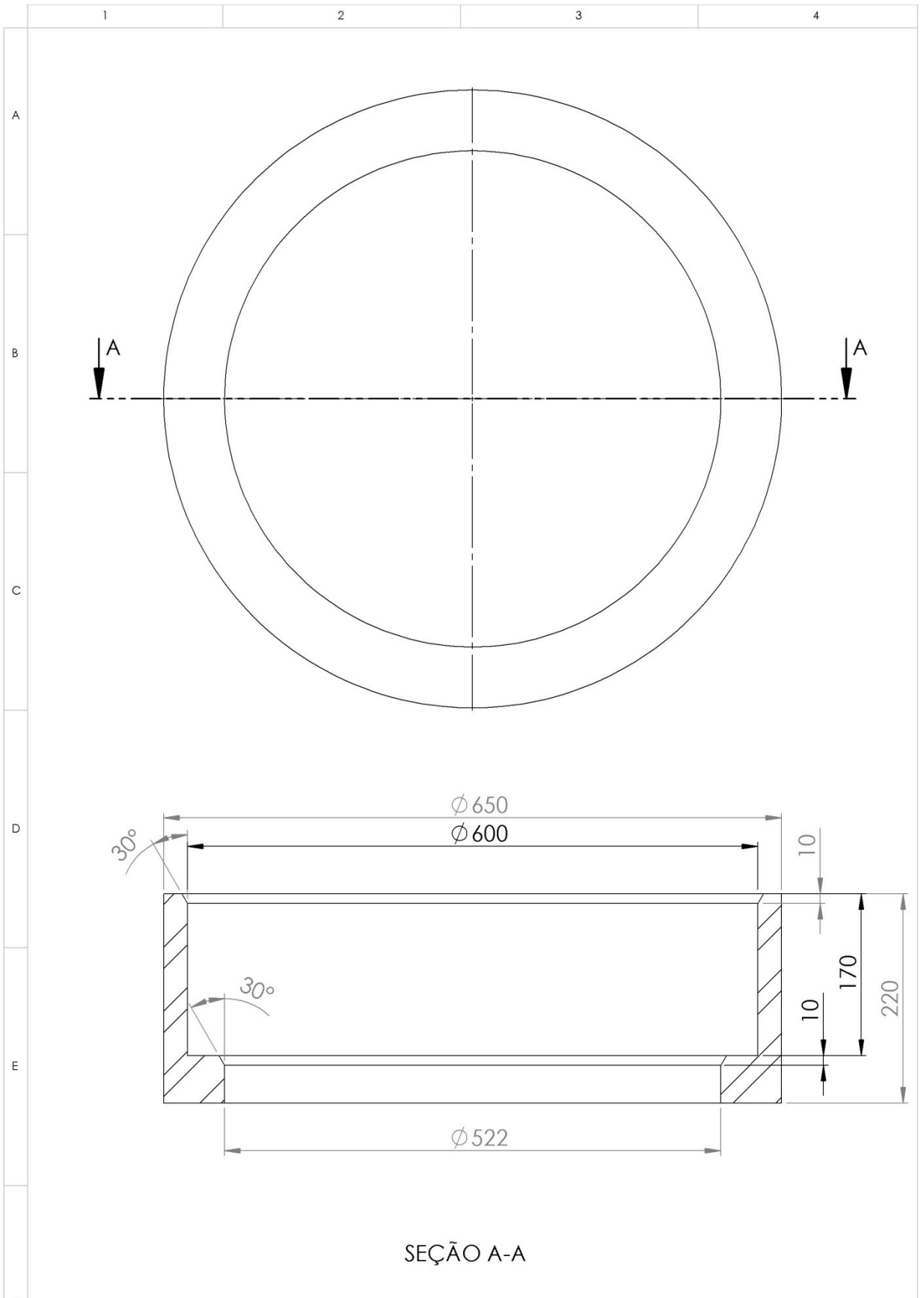




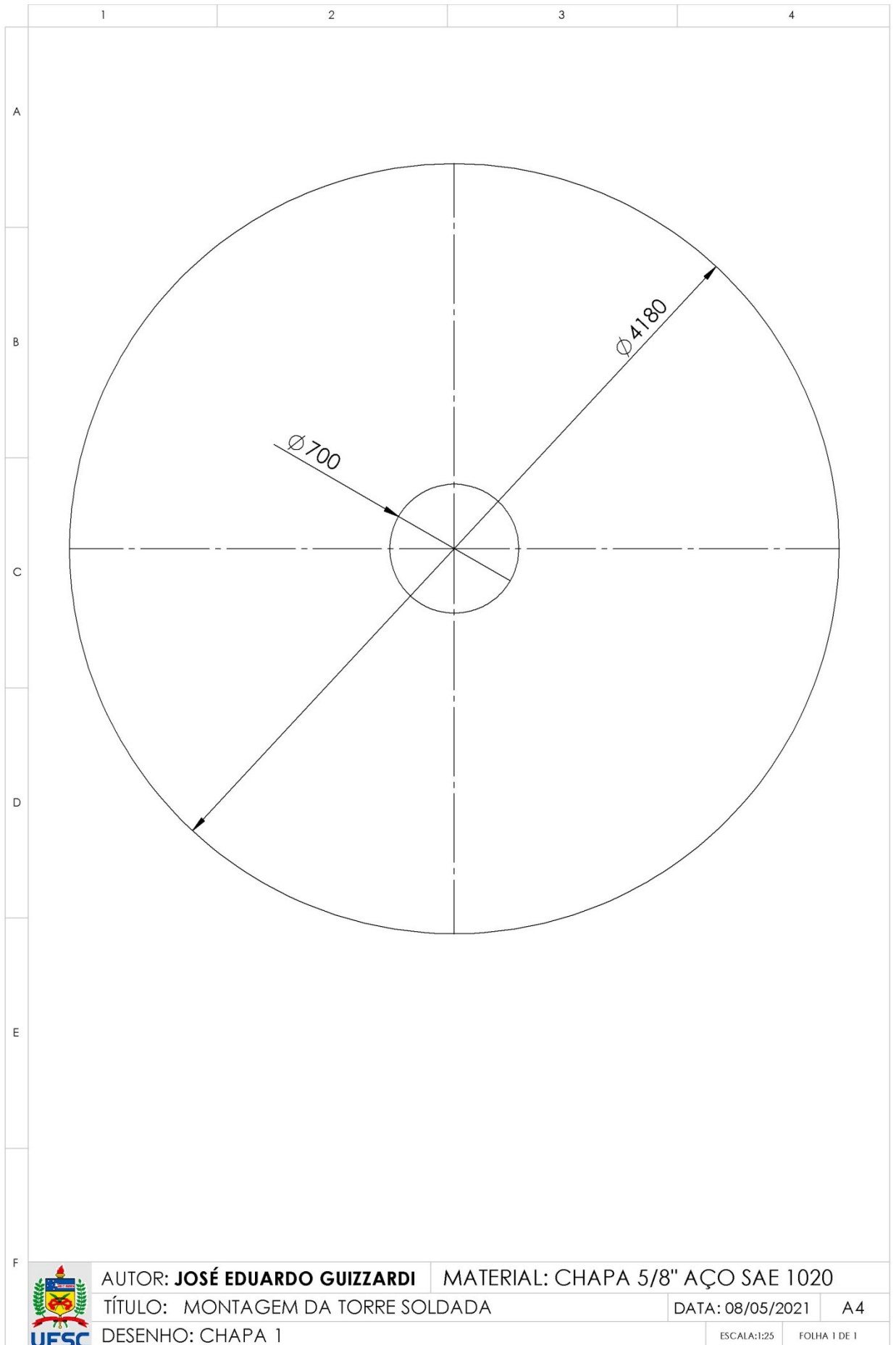


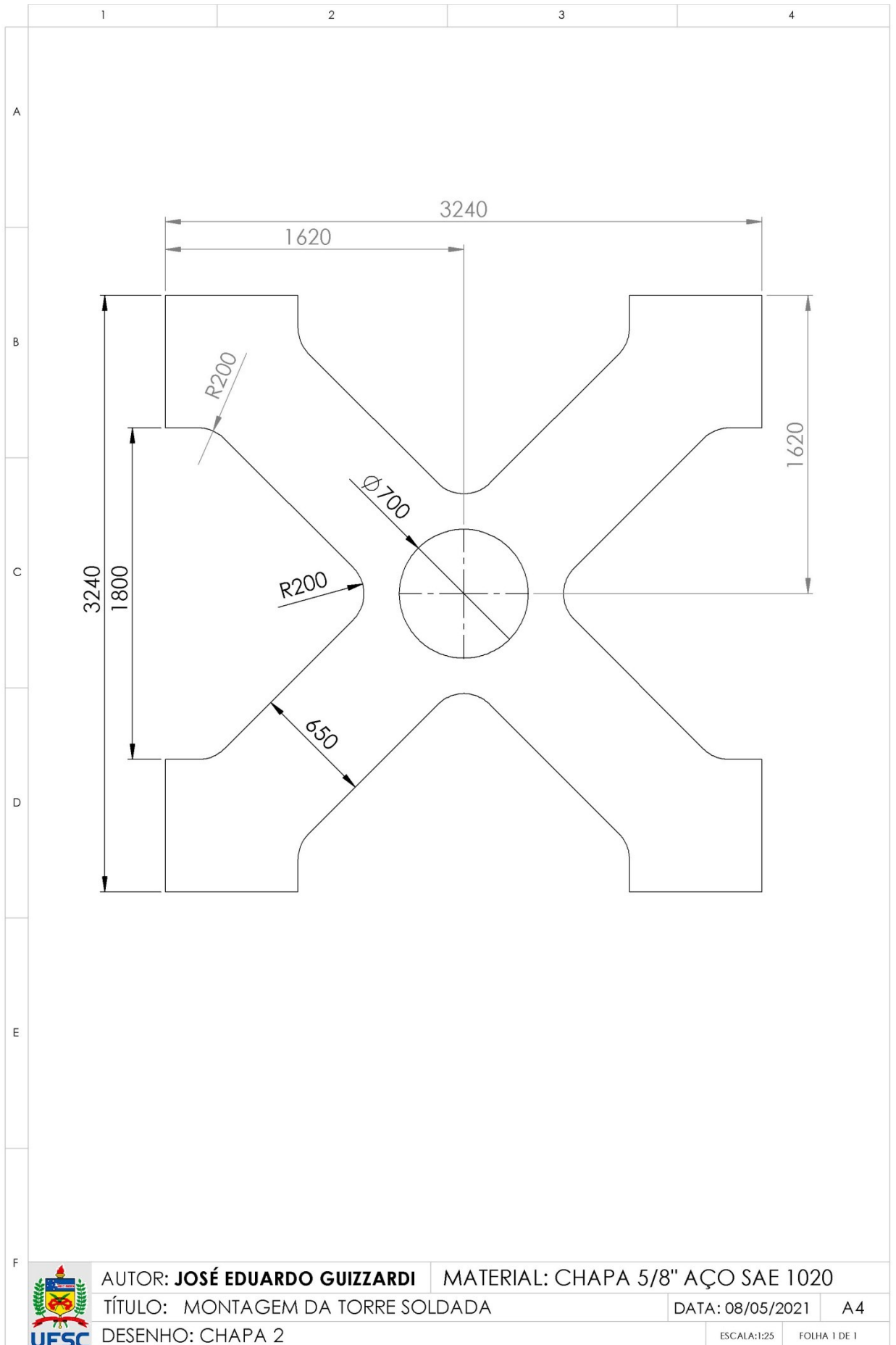


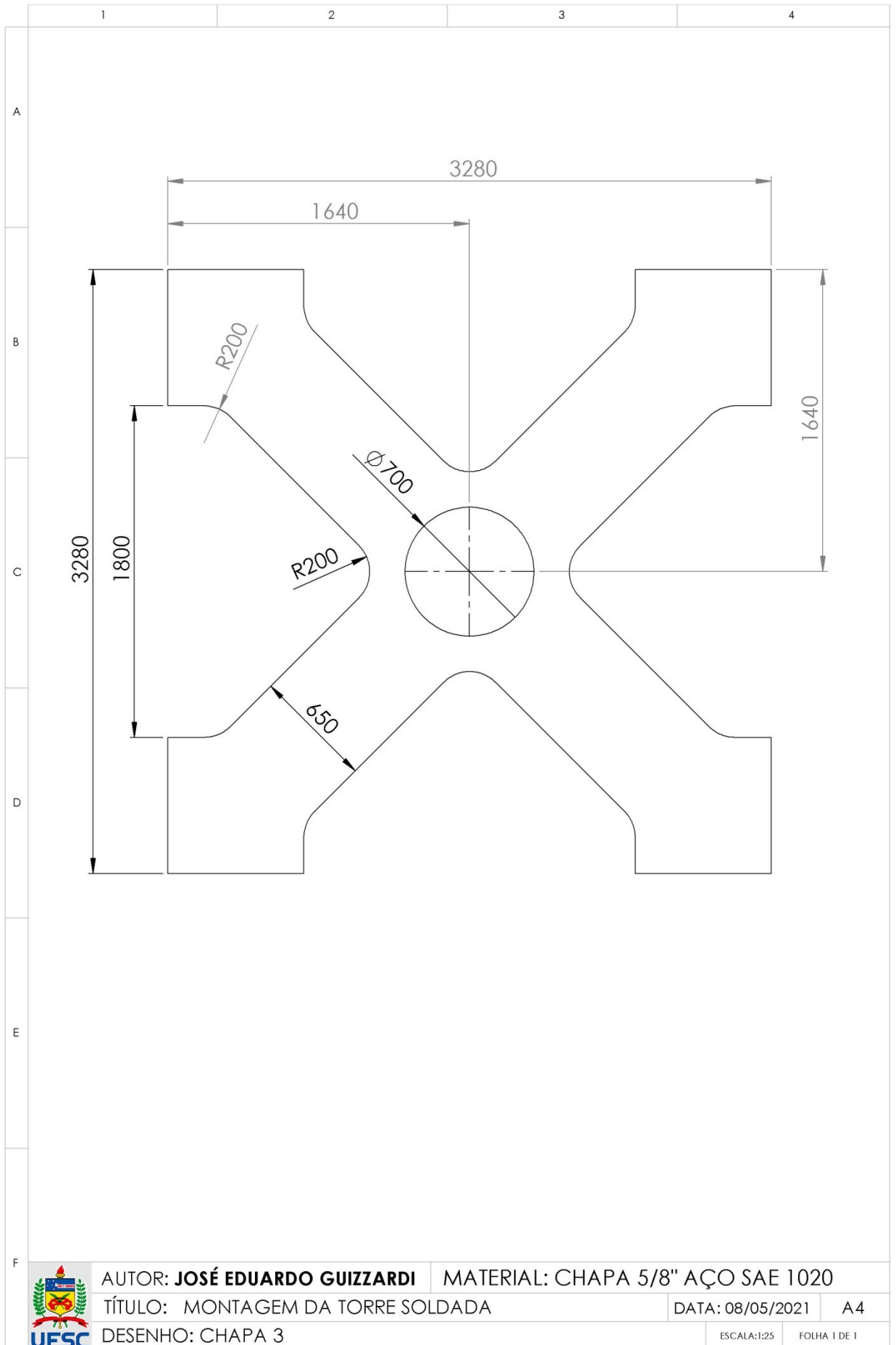




	AUTOR: JOSÉ EDUARDO GUIZZARDI		MATERIAL: AÇO SAE 1020	
	TÍTULO: MONTAGEM DA TORRE SOLDADA		DATA: 08/05/2021	A4
	DESENHO: ENCOSTO DO TUBO 2		ESCALA: 1:5	FOLHA 1 DE 1







AUTOR: **JOSÉ EDUARDO GUIZZARDI**

MATERIAL: CHAPA 5/8" AÇO SAE 1020

TÍTULO: MONTAGEM DA TORRE SOLDADA

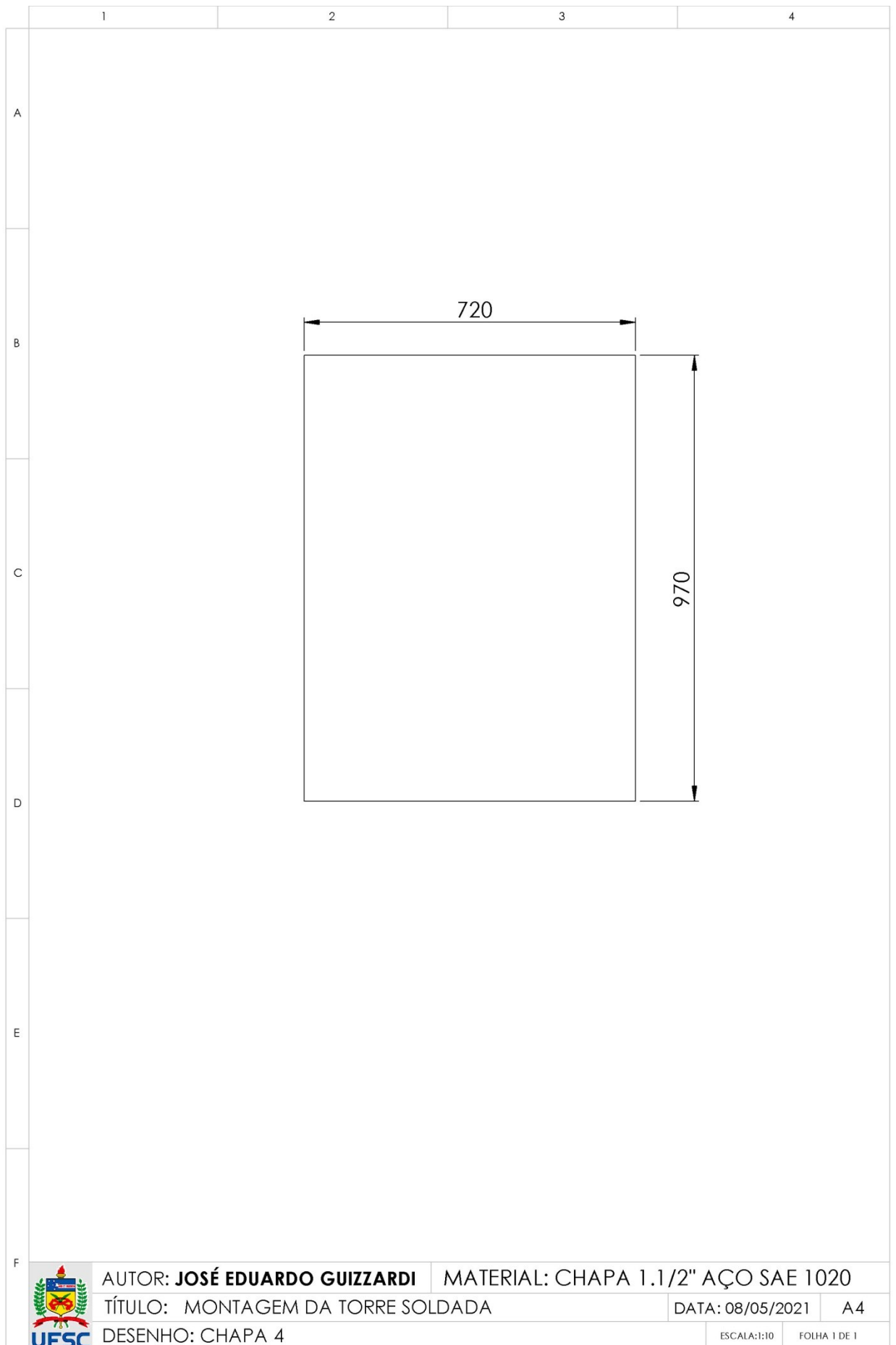
DATA: 08/05/2021

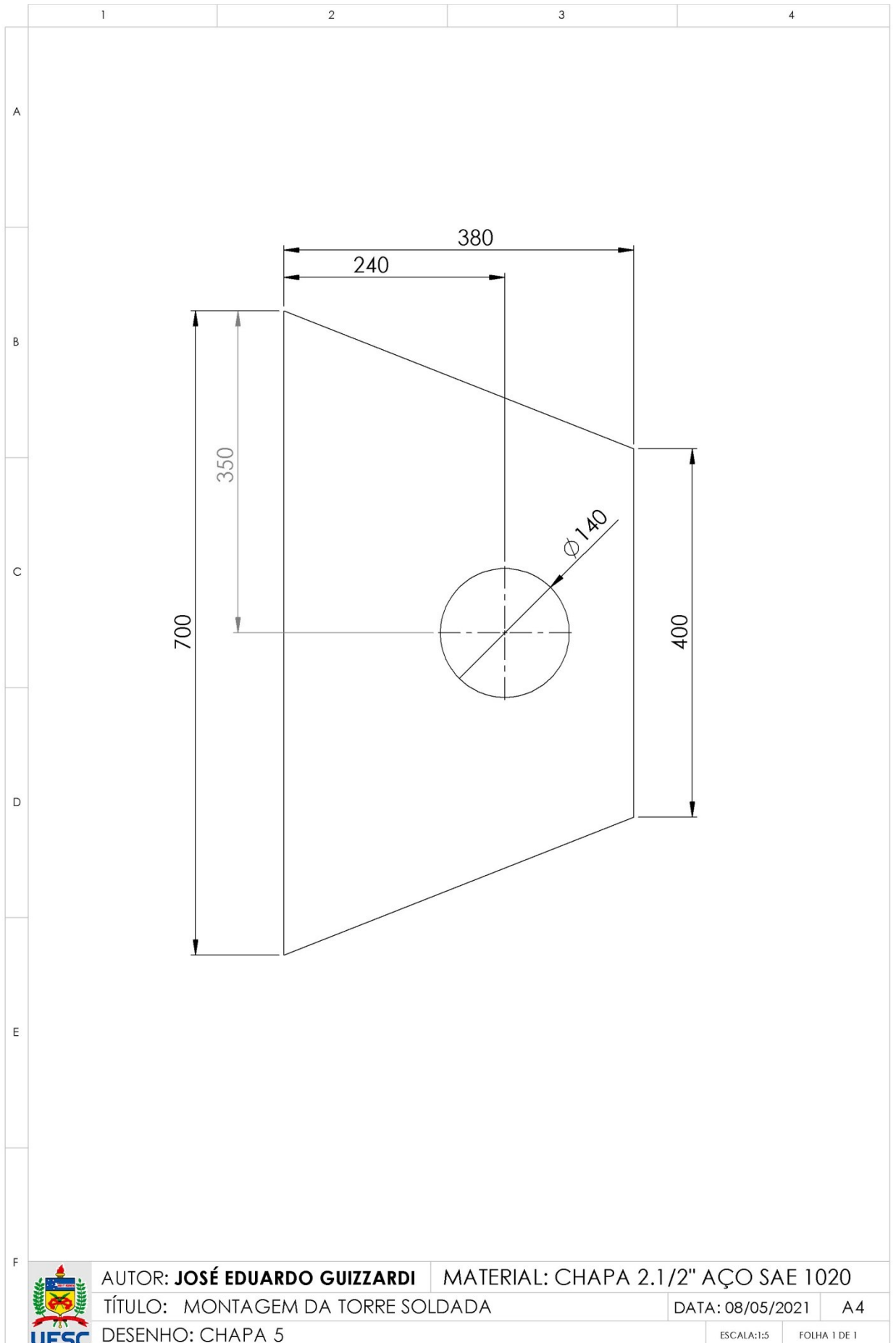
A4

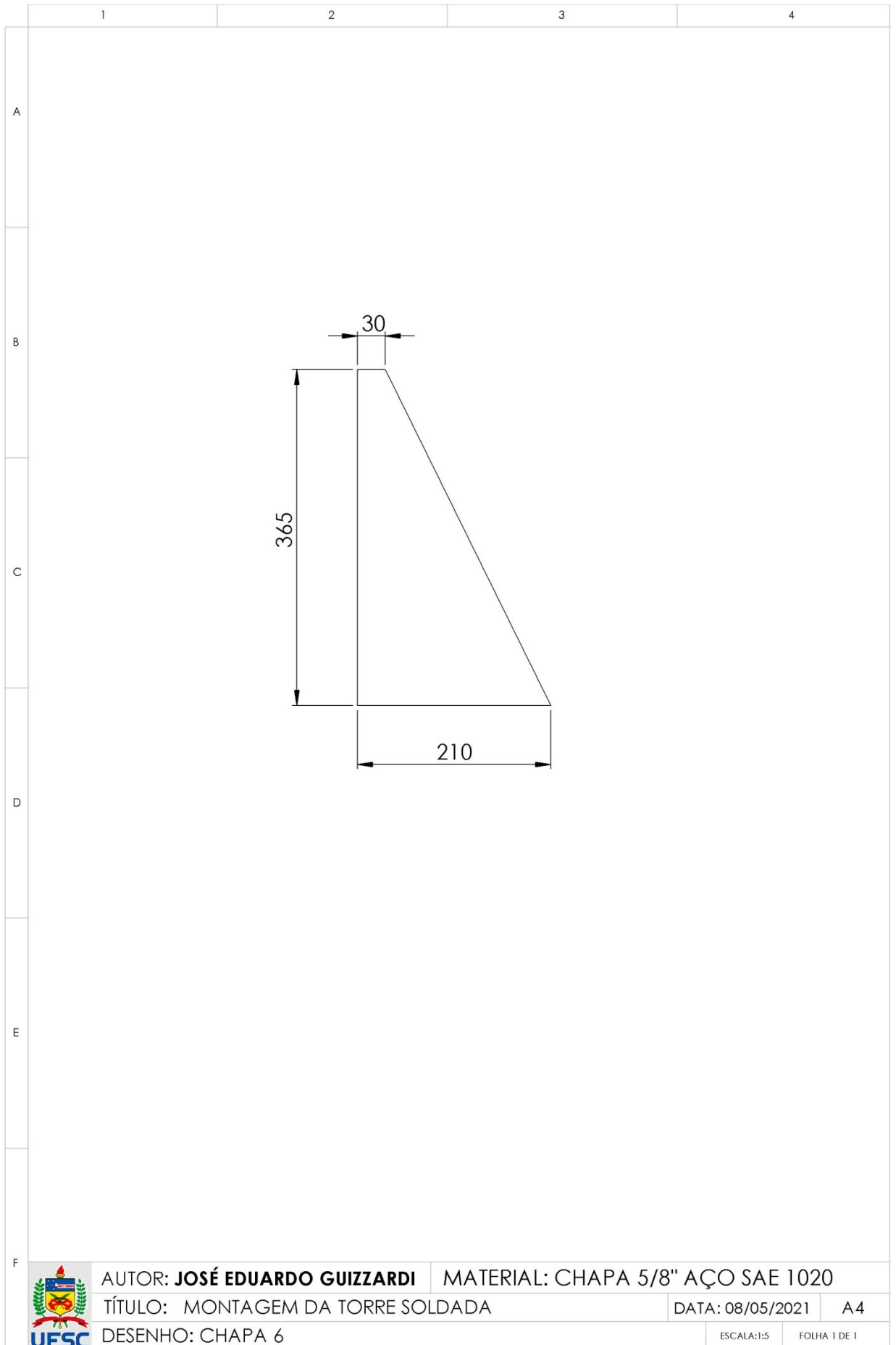
DESENHO: CHAPA 3

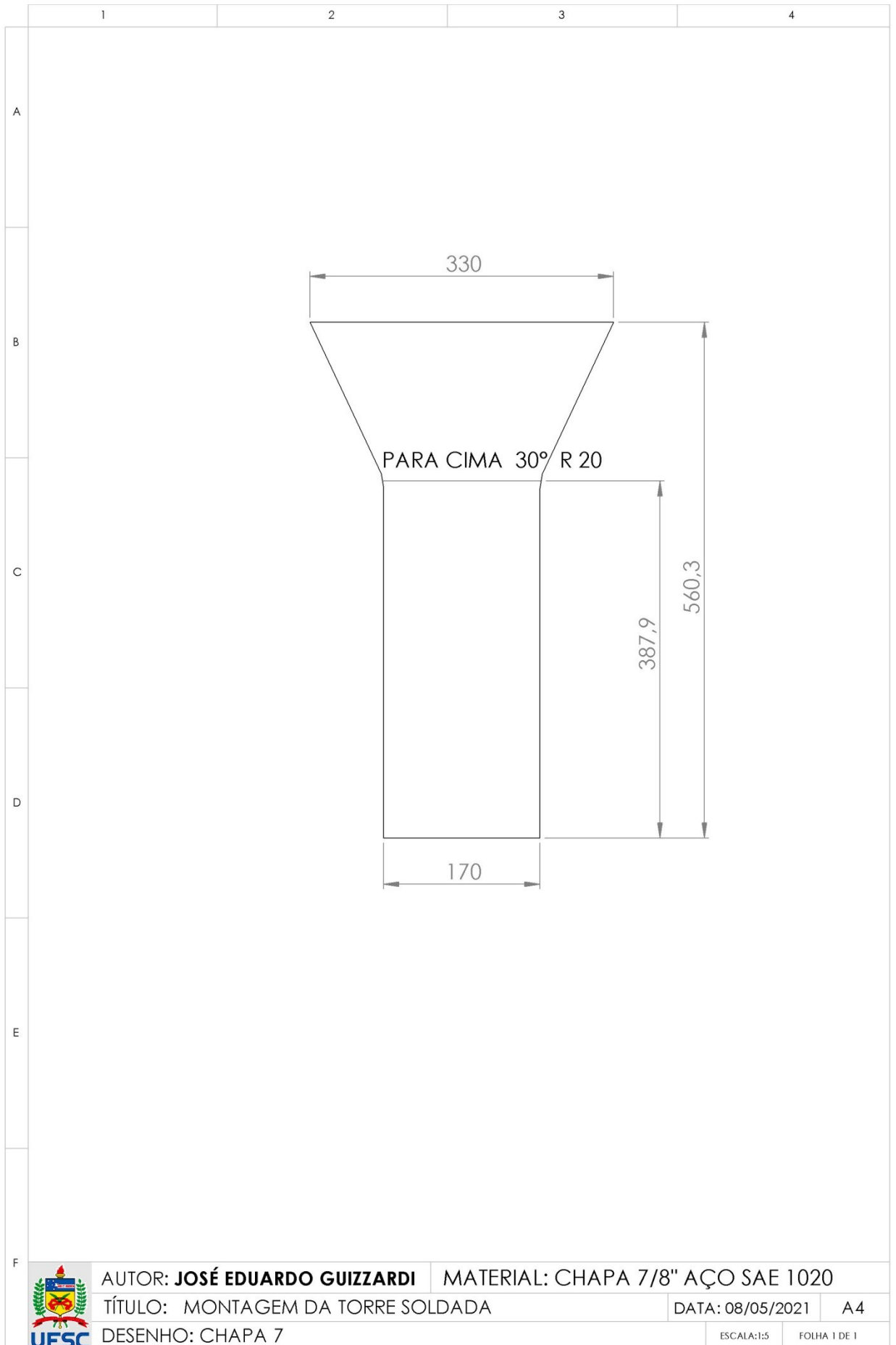
ESCALA:1:25

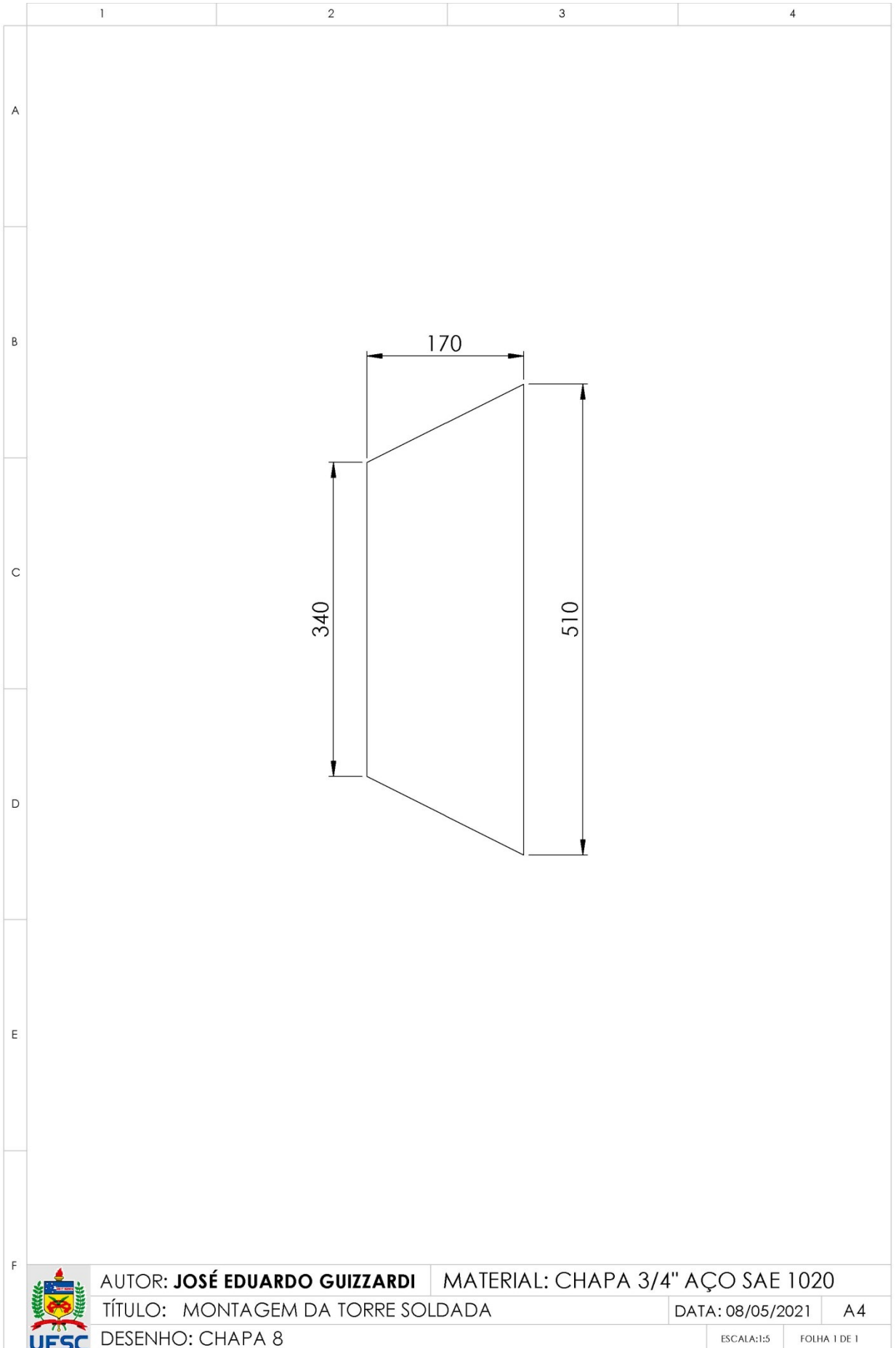
FOLHA 1 DE 1











AUTOR: **JOSÉ EDUARDO GUIZZARDI**

MATERIAL: CHAPA 3/4" AÇO SAE 1020

TÍTULO: MONTAGEM DA TORRE SOLDADA

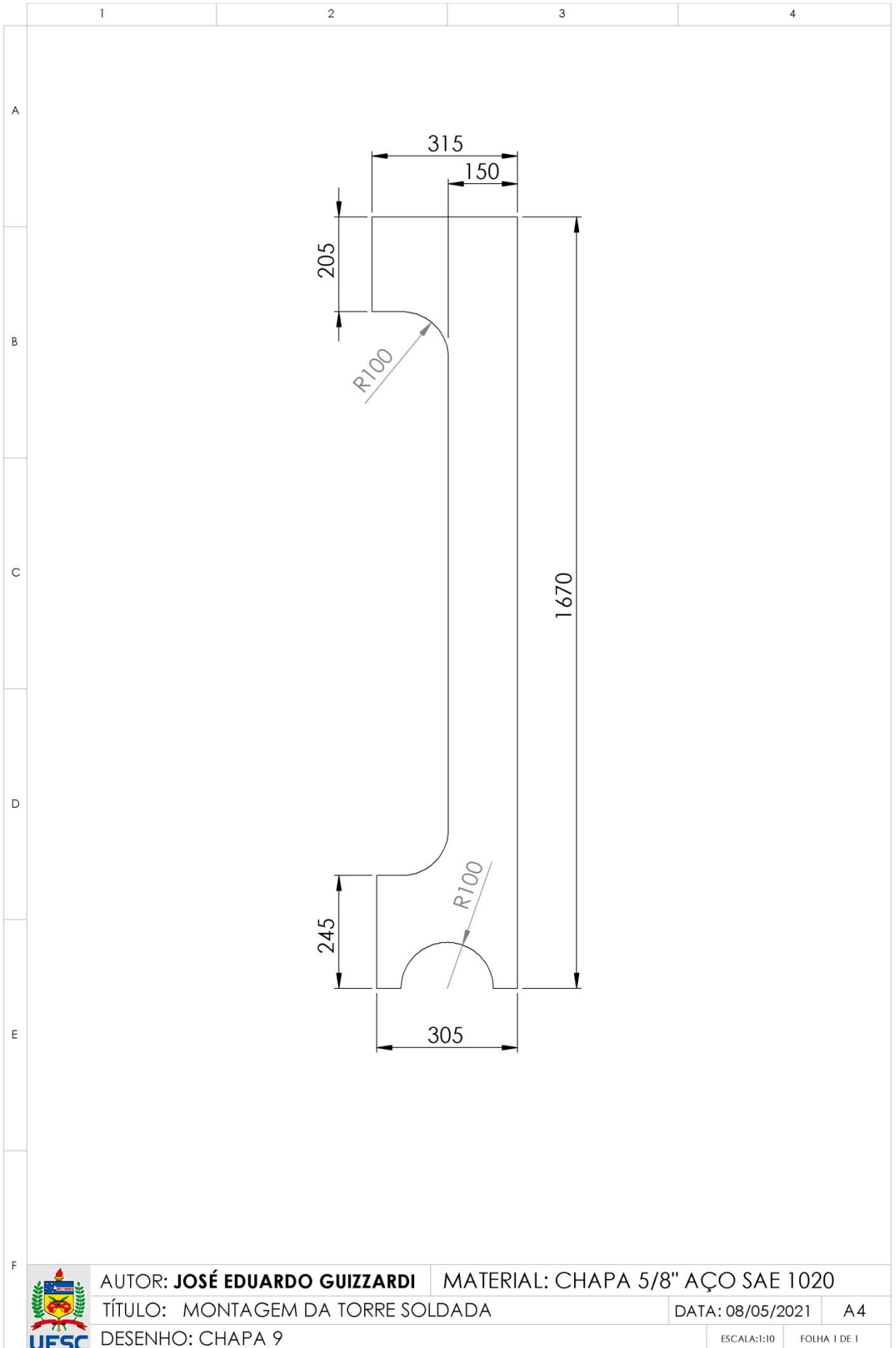
DATA: 08/05/2021

A4

DESENHO: CHAPA 8

ESCALA:1:5

FOLHA 1 DE 1



AUTOR: **JOSÉ EDUARDO GUIZZARDI**

MATERIAL: CHAPA 5/8" AÇO SAE 1020

TÍTULO: MONTAGEM DA TORRE SOLDADA

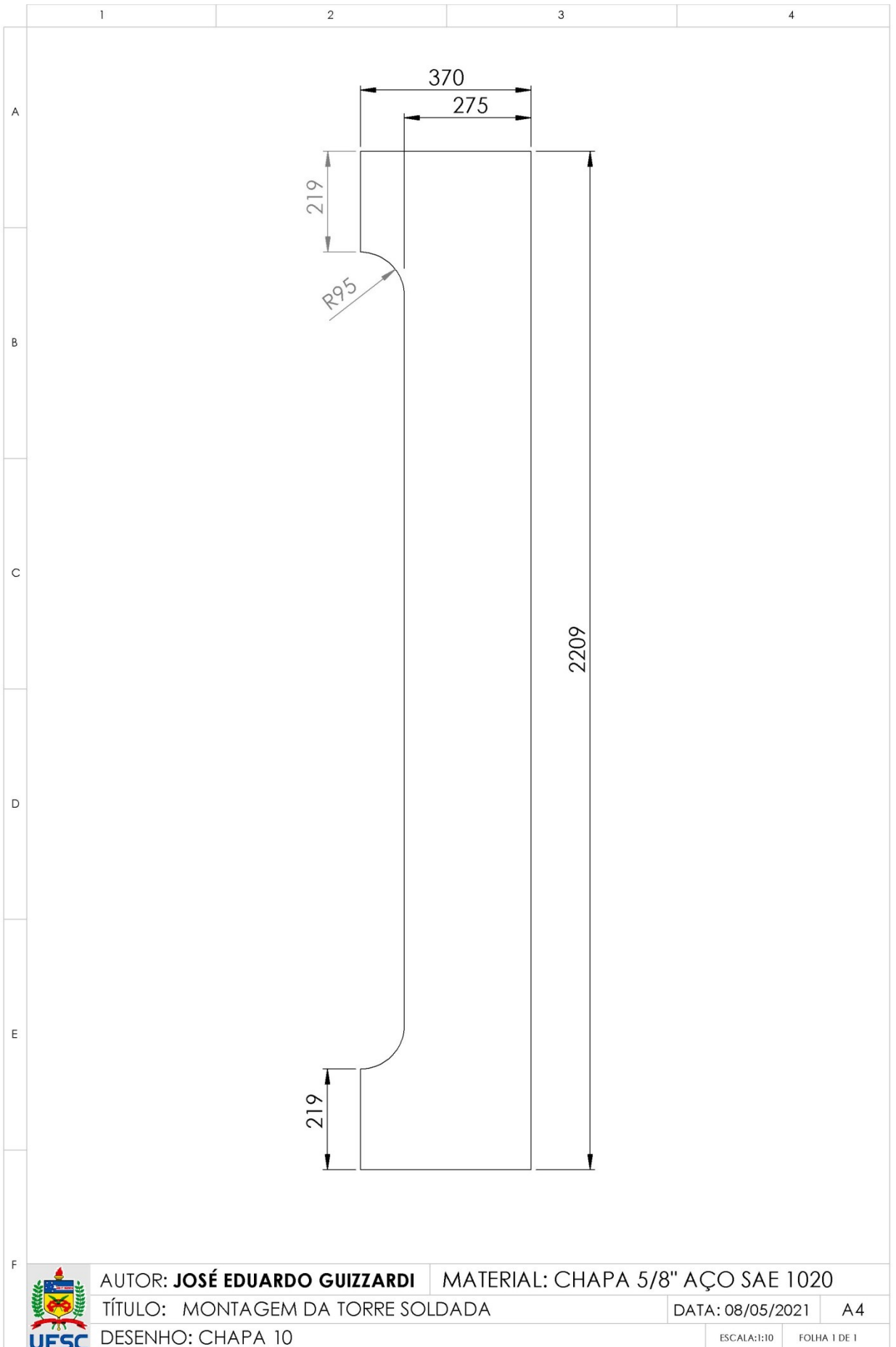
DATA: 08/05/2021

A4

DESENHO: CHAPA 9

ESCALA:1:10

FOLHA 1 DE 1



AUTOR: **JOSÉ EDUARDO GUIZZARDI** MATERIAL: CHAPA 5/8" AÇO SAE 1020

TÍTULO: MONTAGEM DA TORRE SOLDADA

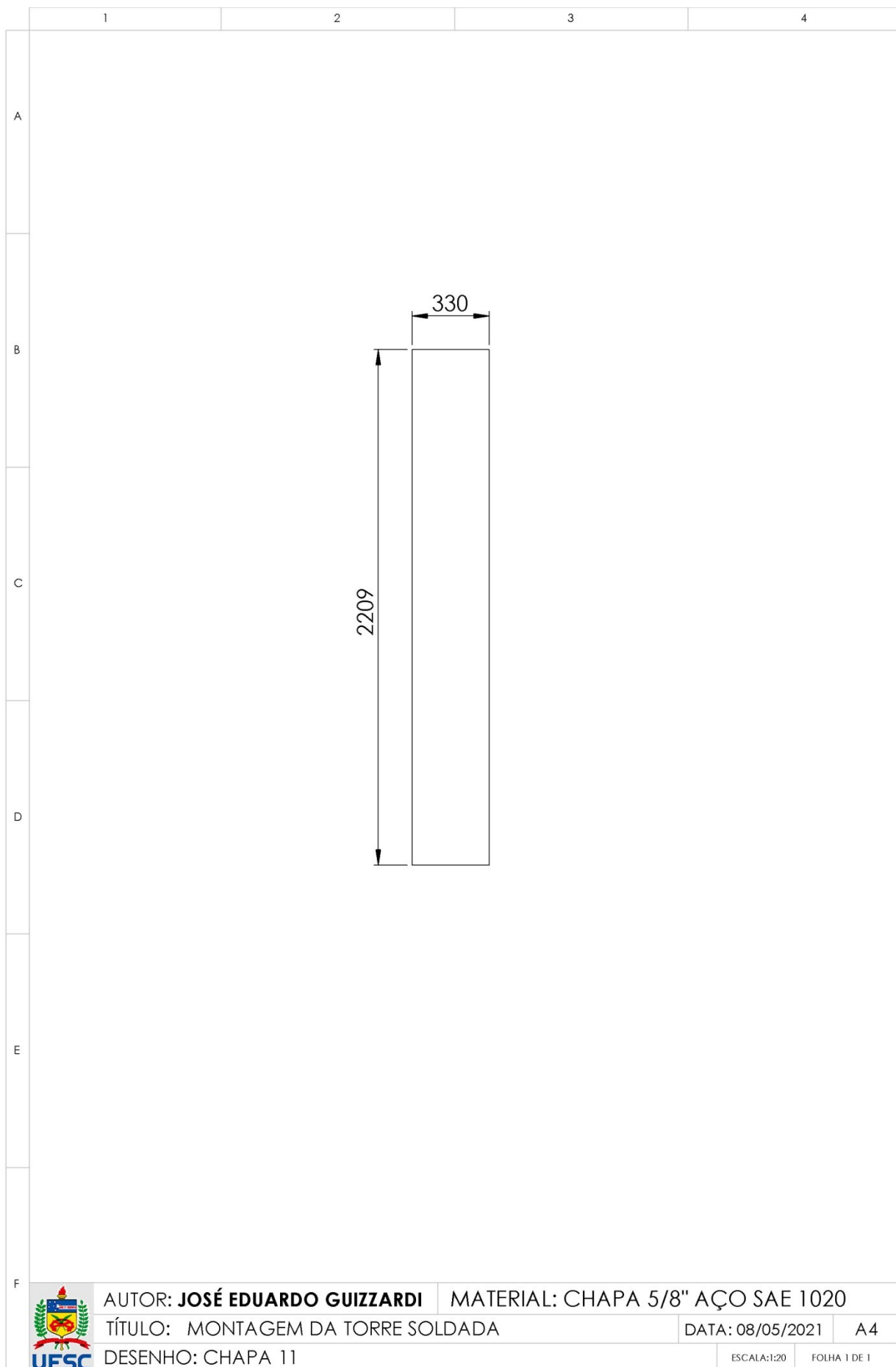
DATA: 08/05/2021

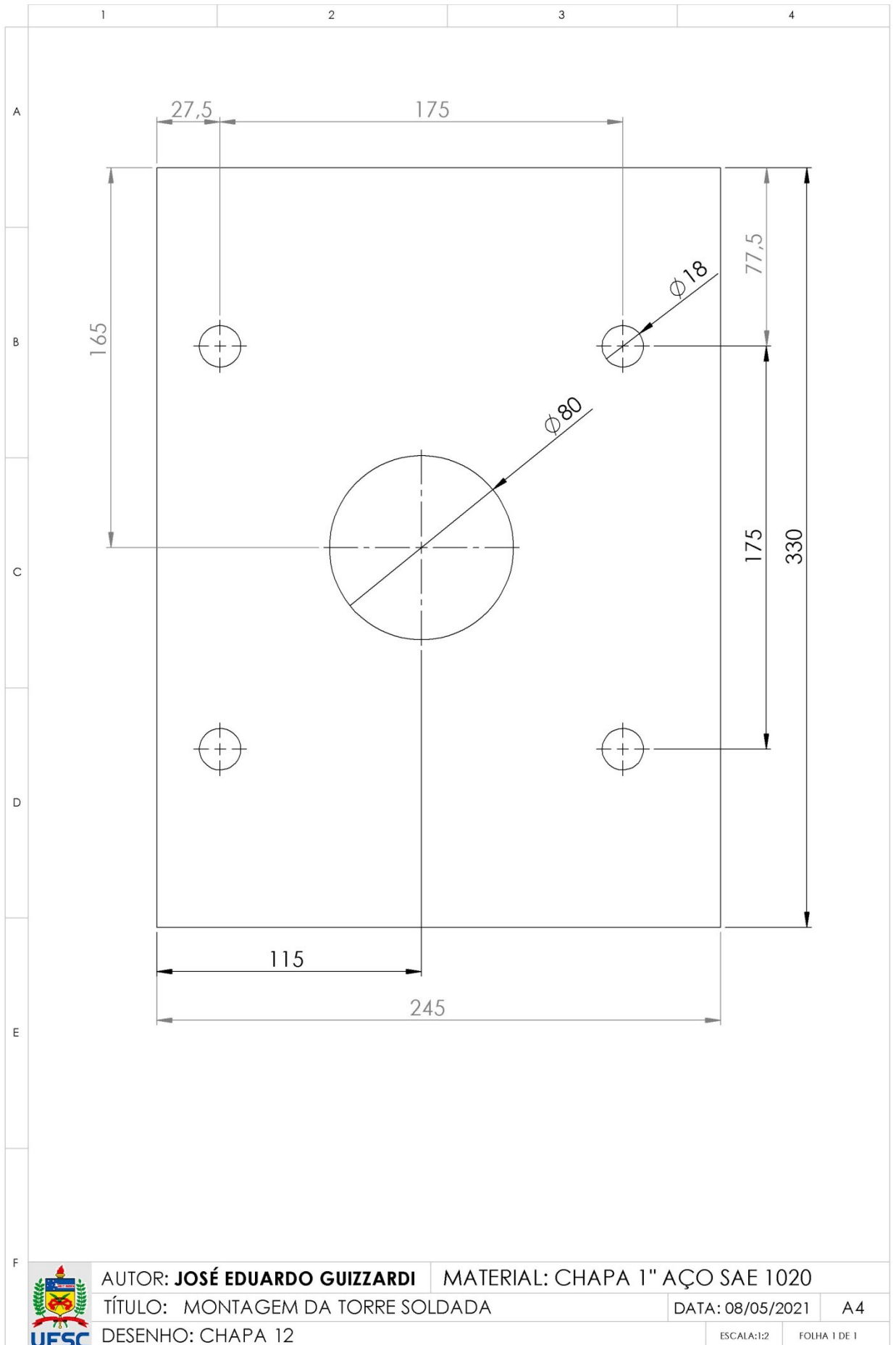
A4

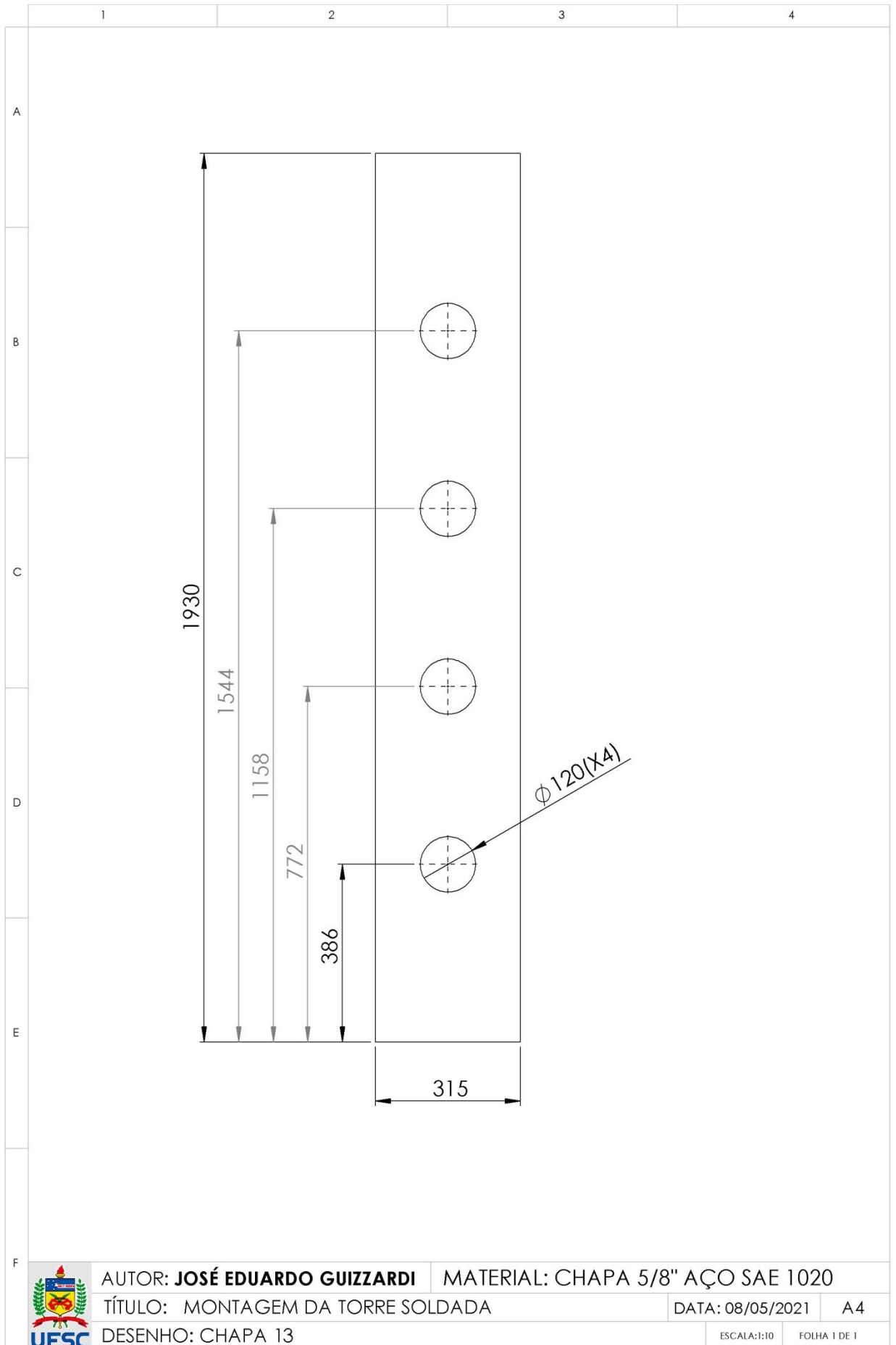
DESENHO: CHAPA 10

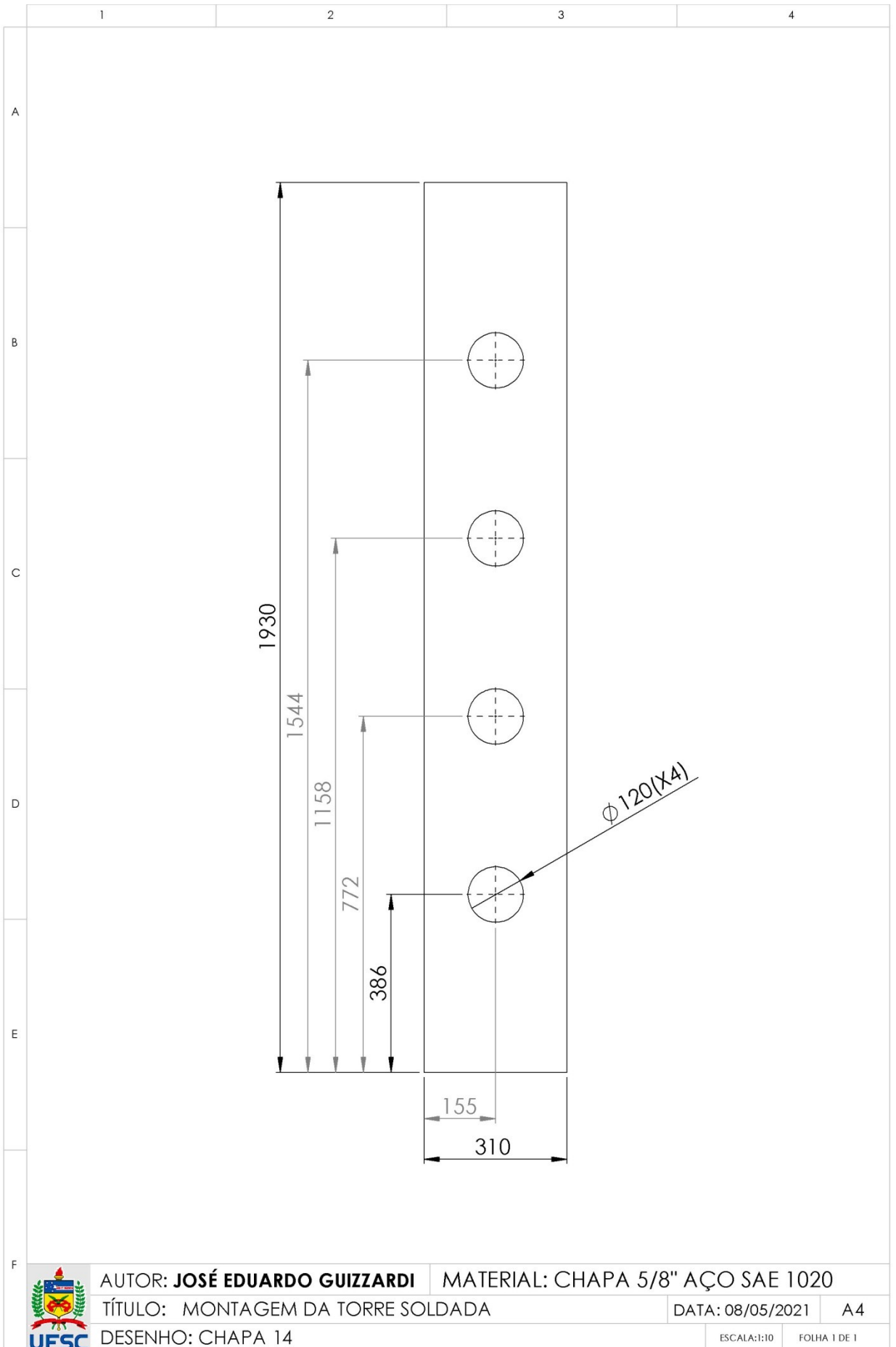
ESCALA:1:10

FOLHA 1 DE 1









AUTOR: **JOSÉ EDUARDO GUIZZARDI**

MATERIAL: CHAPA 5/8" AÇO SAE 1020

TÍTULO: MONTAGEM DA TORRE SOLDADA

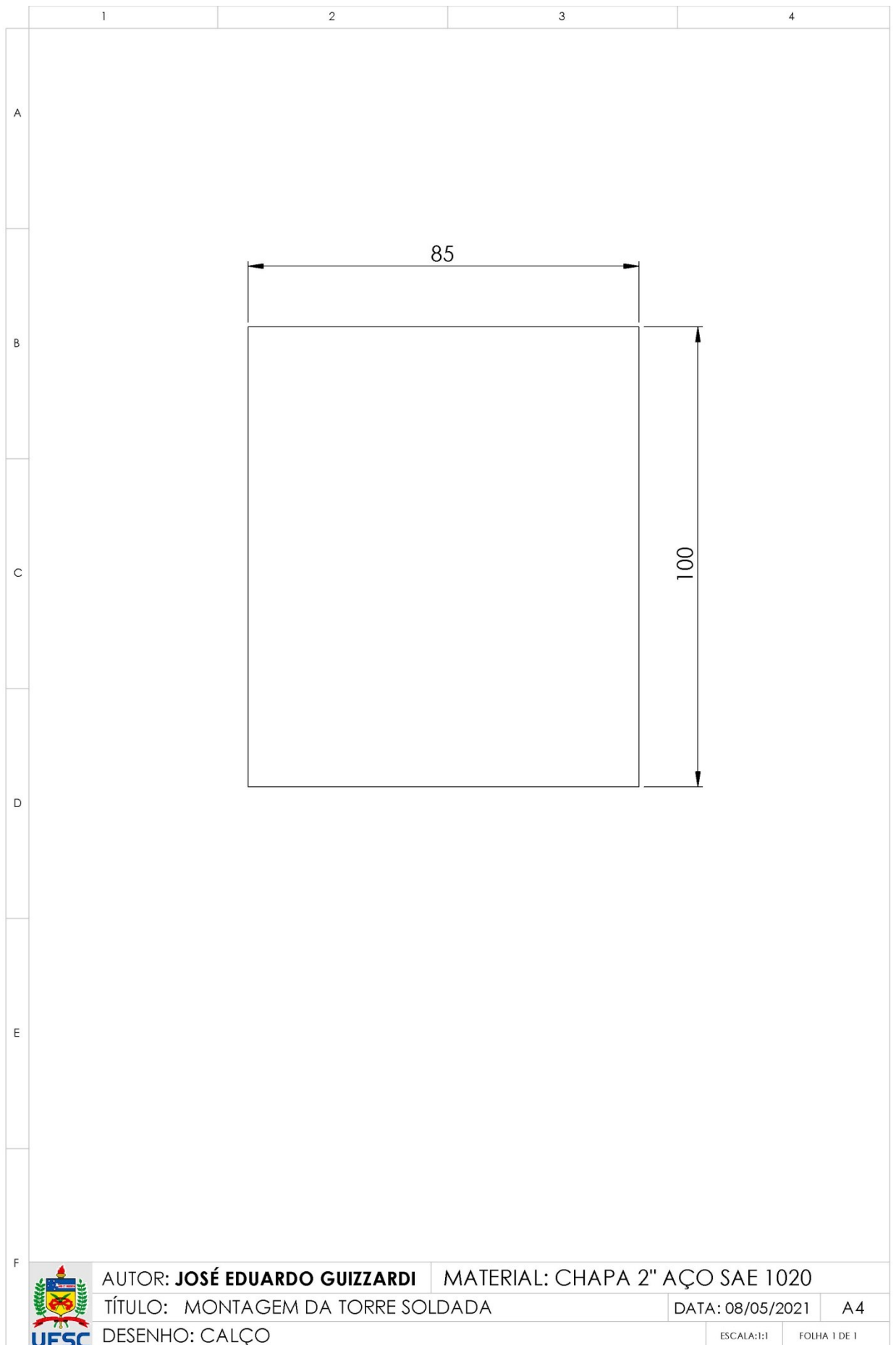
DATA: 08/05/2021

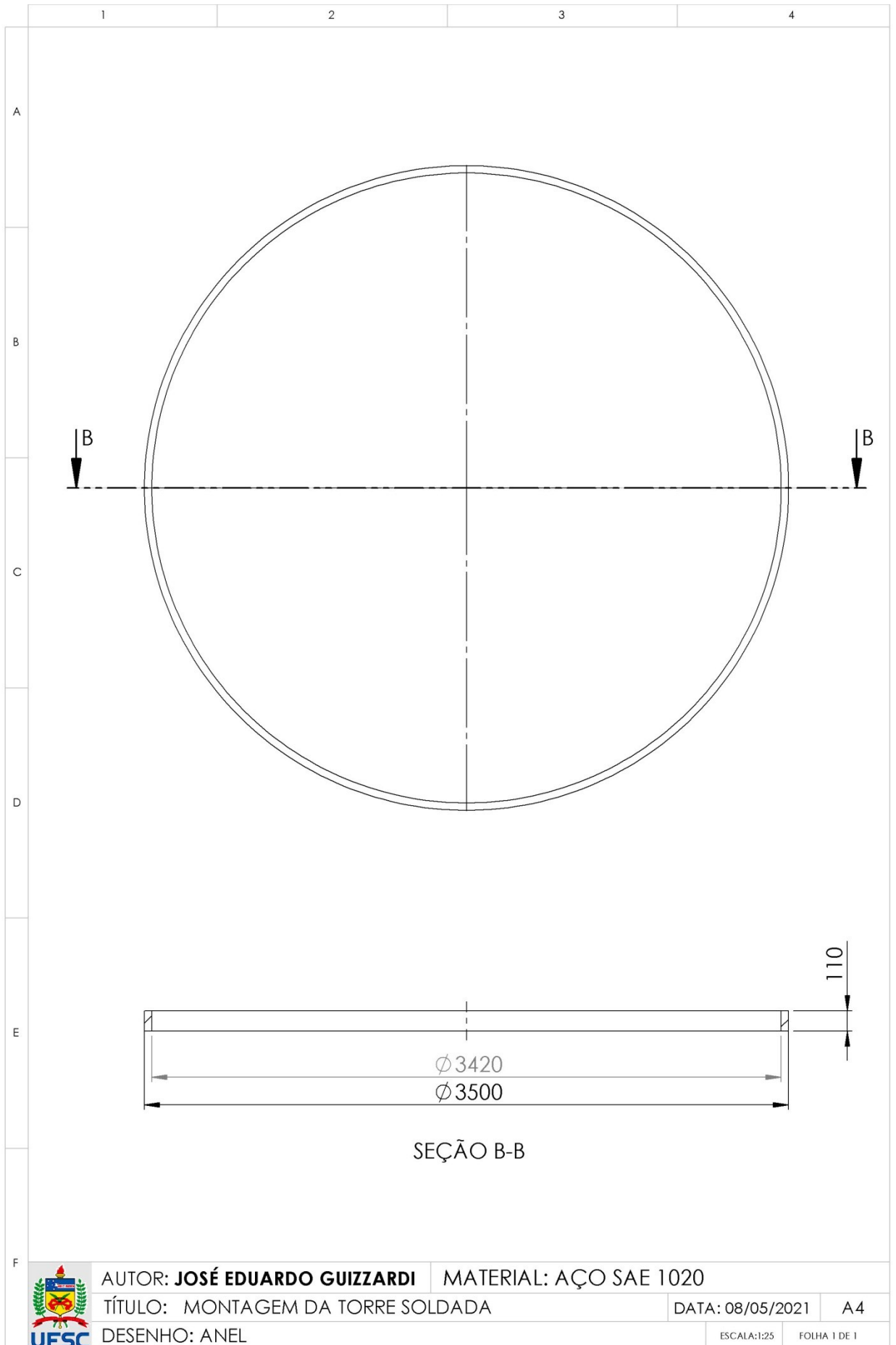
A4

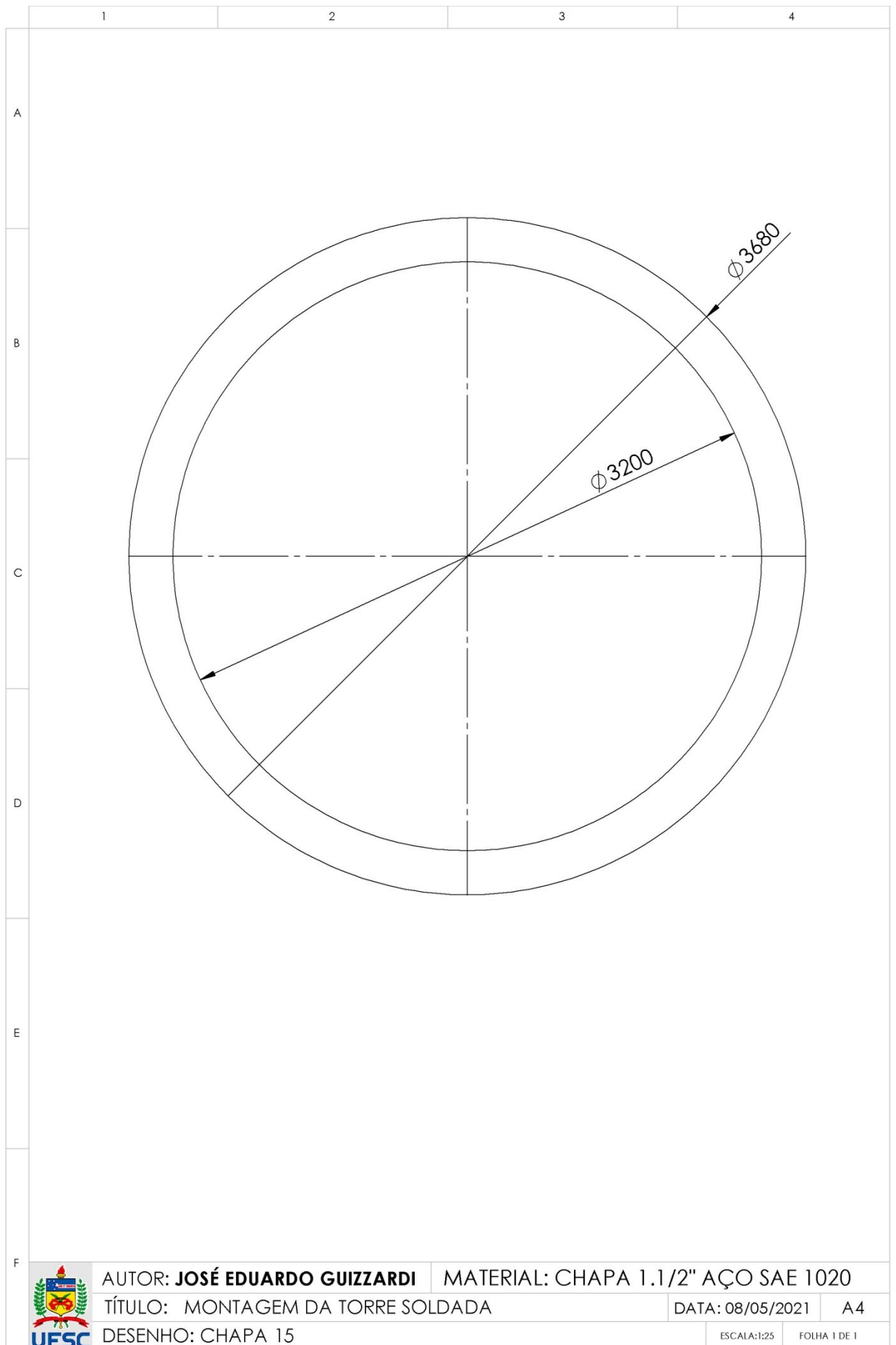
DESENHO: CHAPA 14

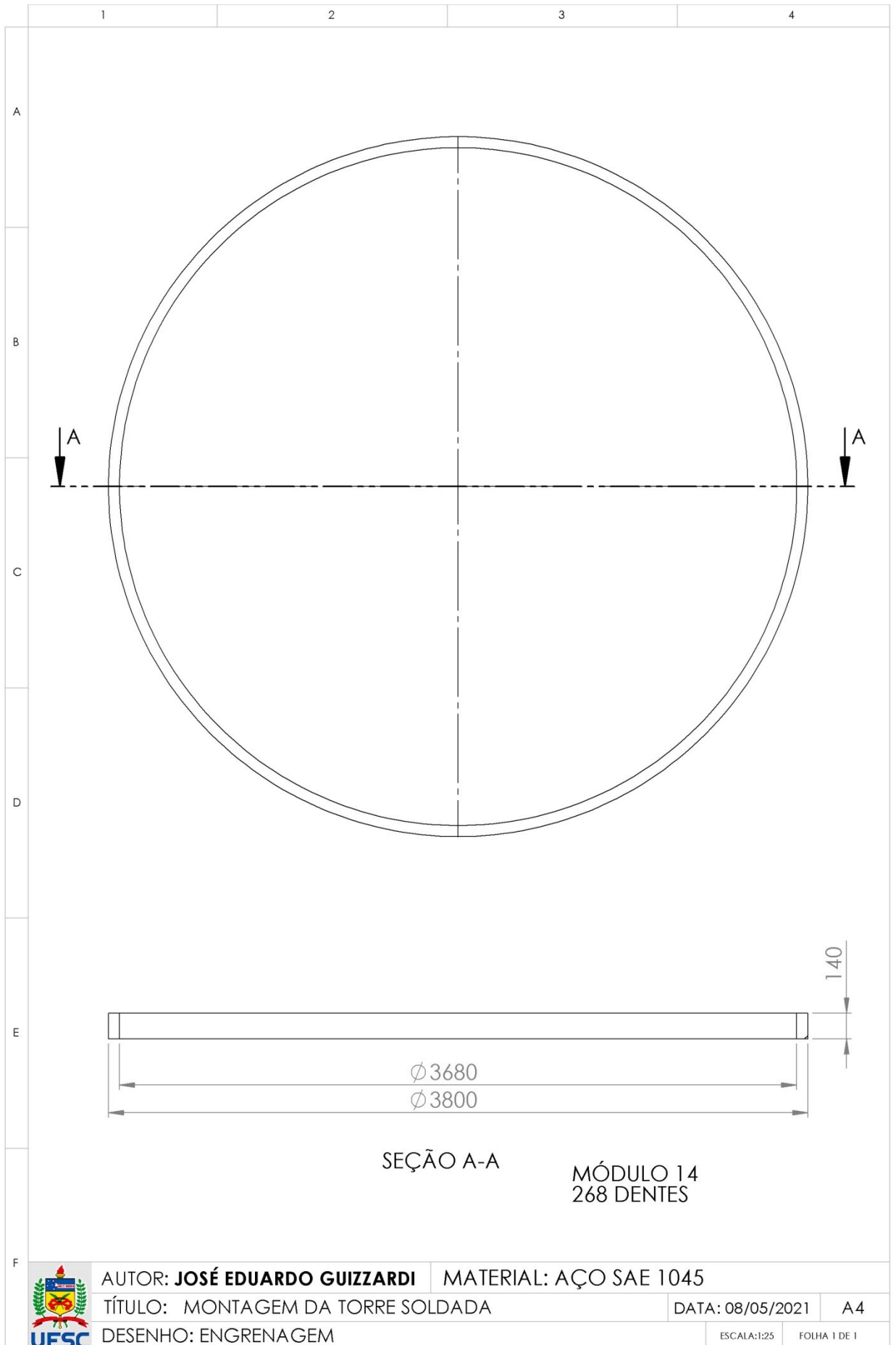
ESCALA:1:10

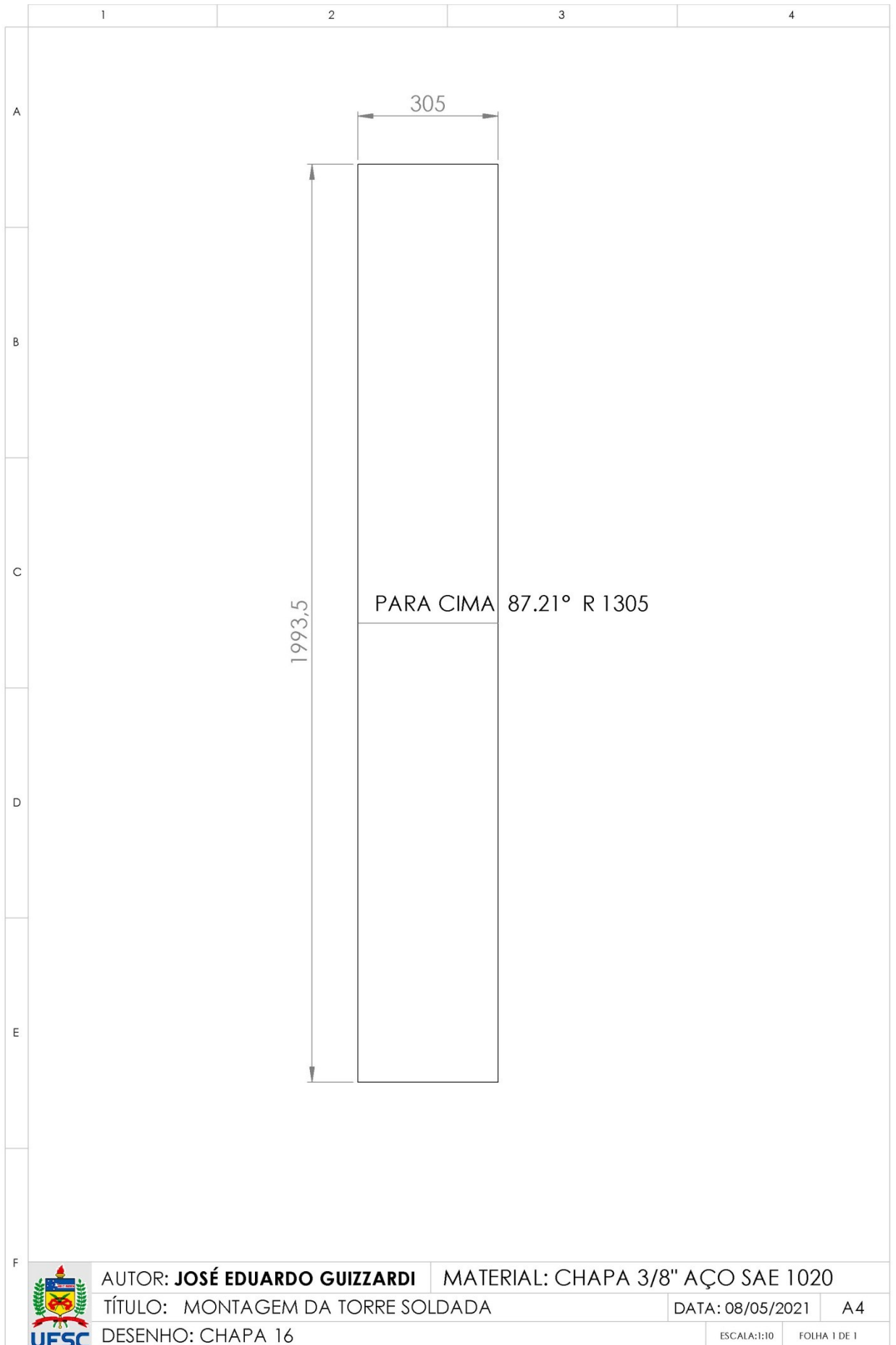
FOLHA 1 DE 1





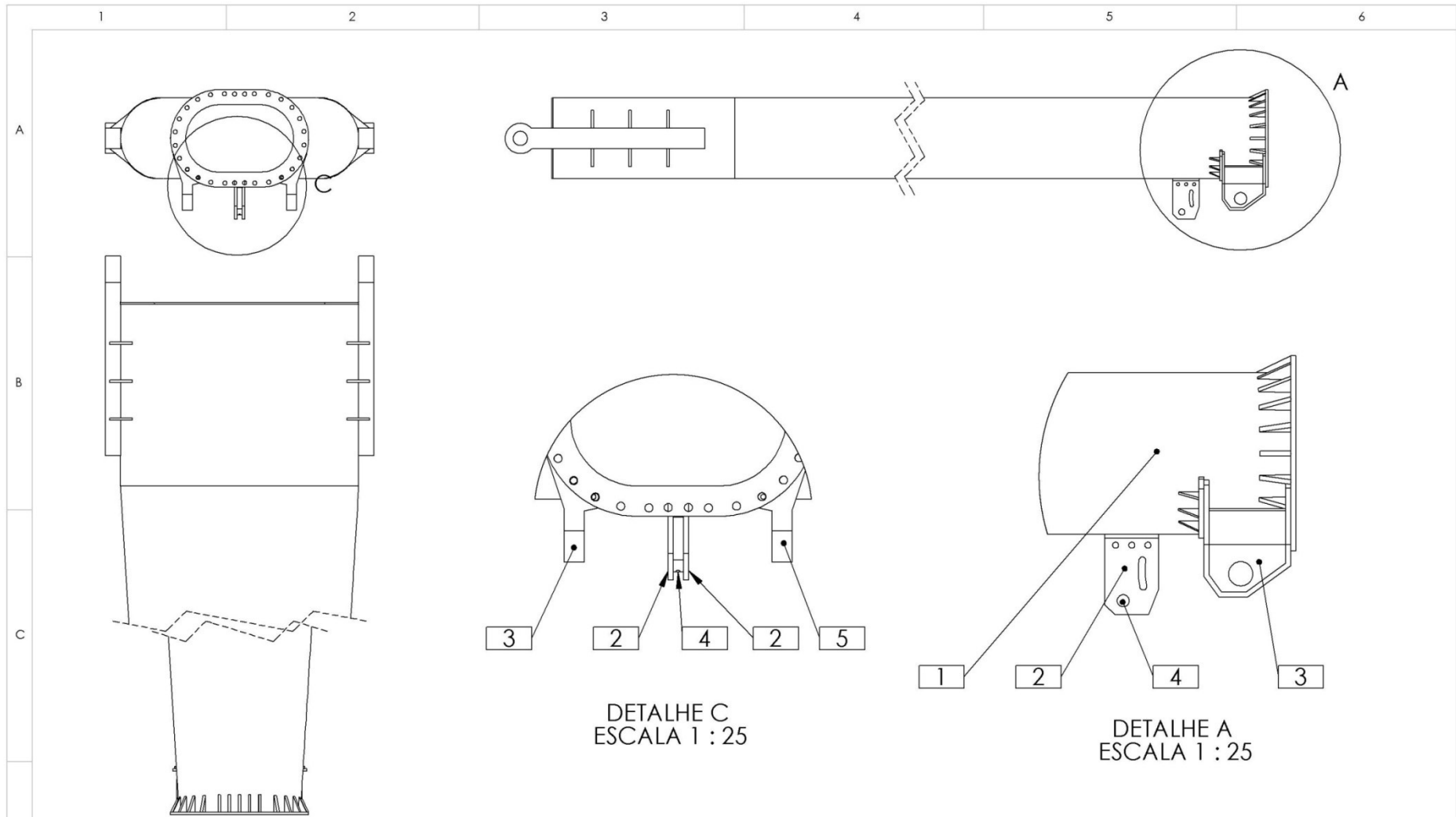






ANEXO II

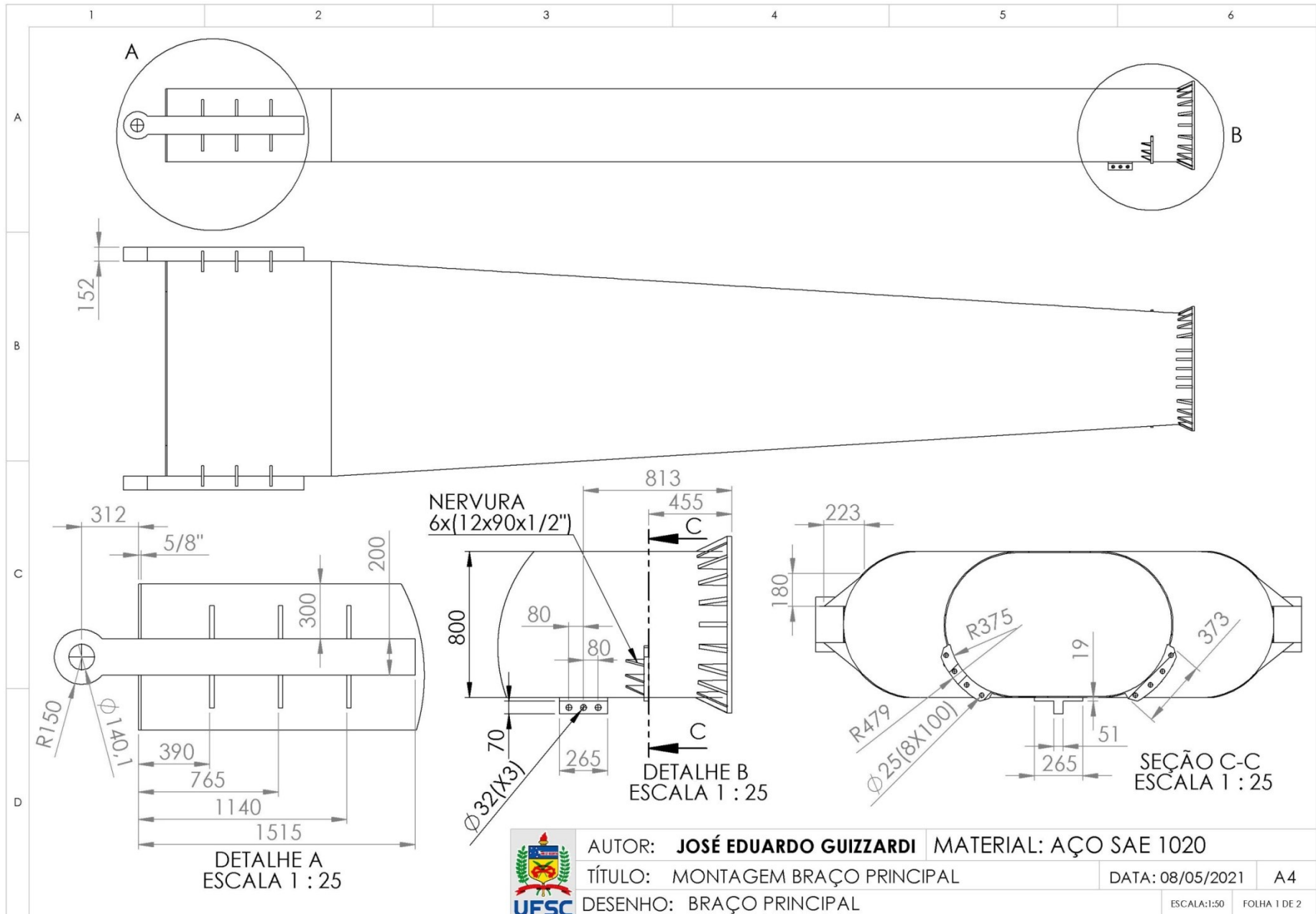
BRAÇO PRINCIPAL



ITEM	DESCRIÇÃO	QTD.
1	BRAÇO PRINCIPAL	1
2	CHAPA GUIA	2
3	SUPOORTE DE APOIO 1	1
4	PINO DE AJUSTE	1
5	SUPOORTE DE APOIO 2	1



AUTOR: **JOSÉ EDUARDO GUIZZARDI** MONTAGEM
 TÍTULO: MONTAGEM BRAÇO PRINCIPAL DATA: 08/05/2021 A4
 DESENHO: BRAÇO PRINCIPAL ESCALA:1:50 FOLHA 1 DE 1



AUTOR: **JOSÉ EDUARDO GUIZZARDI** MATERIAL: AÇO SAE 1020

TÍTULO: MONTAGEM BRAÇO PRINCIPAL

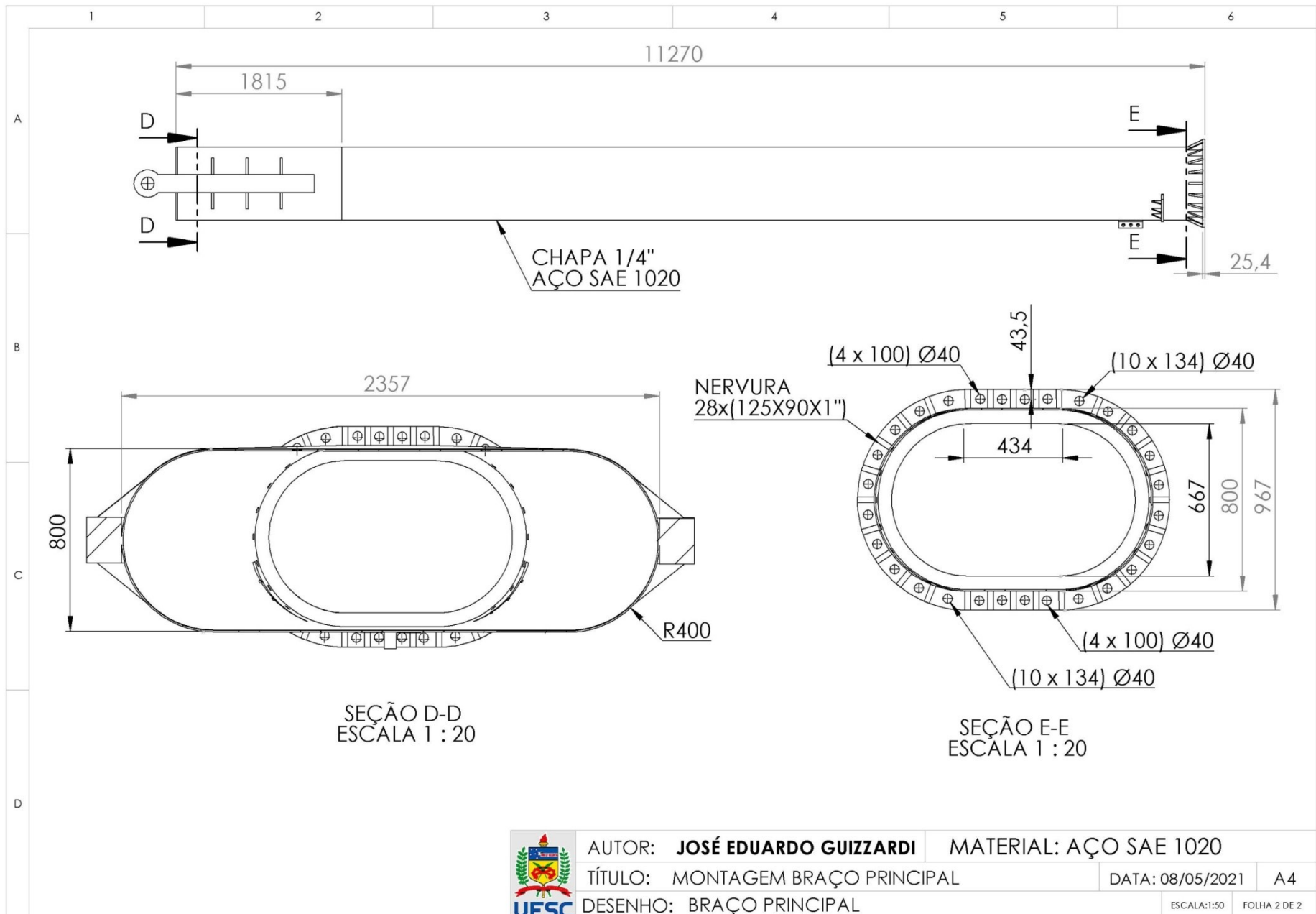
DATA: 08/05/2021

A4

DESENHO: BRAÇO PRINCIPAL

ESCALA:1:50

FOLHA 1 DE 2



AUTOR: **JOSÉ EDUARDO GUIZZARDI**

MATERIAL: AÇO SAE 1020

TÍTULO: MONTAGEM BRAÇO PRINCIPAL

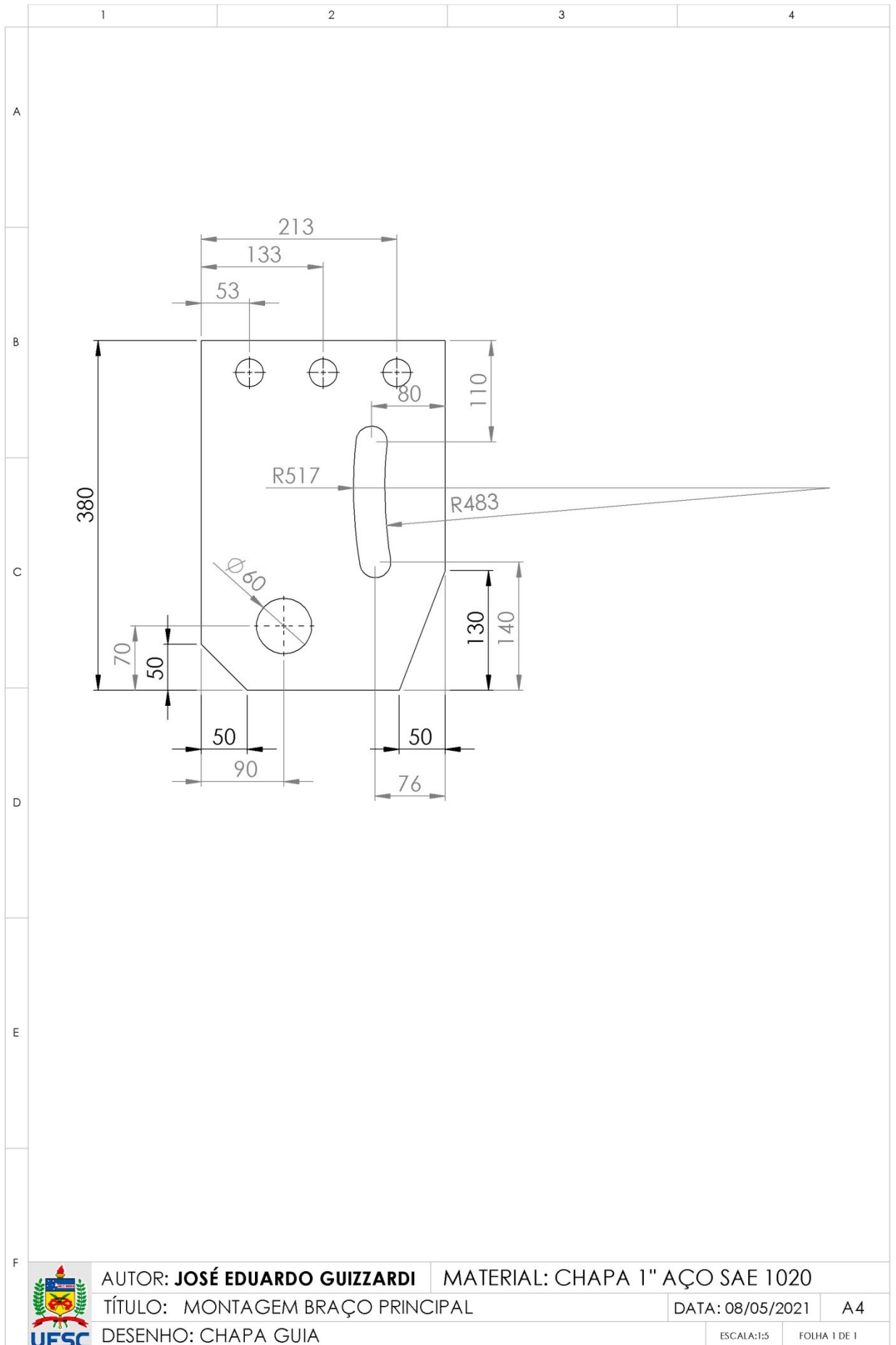
DATA: 08/05/2021

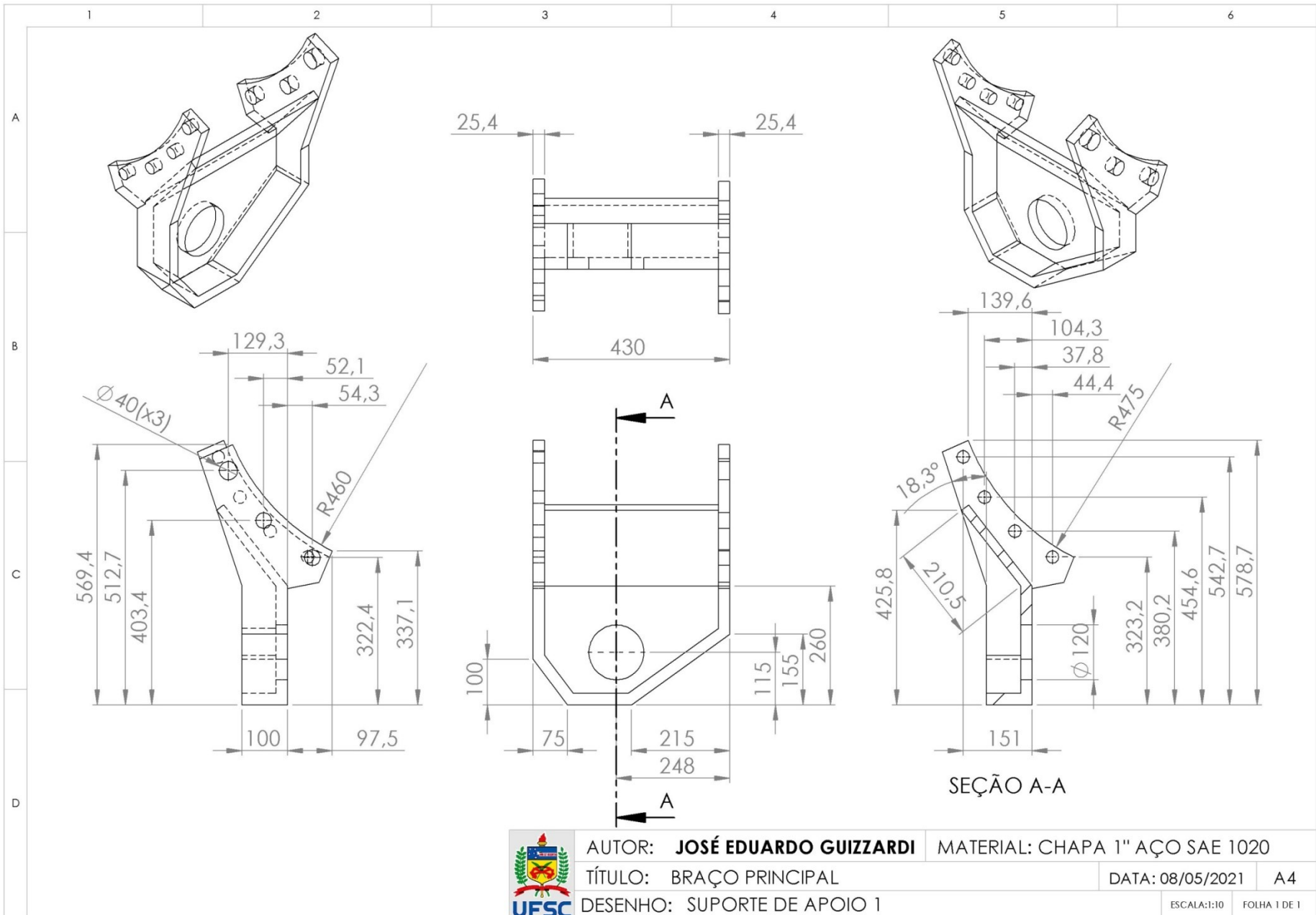
A4

DESENHO: BRAÇO PRINCIPAL

ESCALA: 1:50

FOLHA 2 DE 2





AUTOR: **JOSÉ EDUARDO GUIZZARDI**

MATERIAL: CHAPA 1" AÇO SAE 1020

TÍTULO: BRAÇO PRINCIPAL

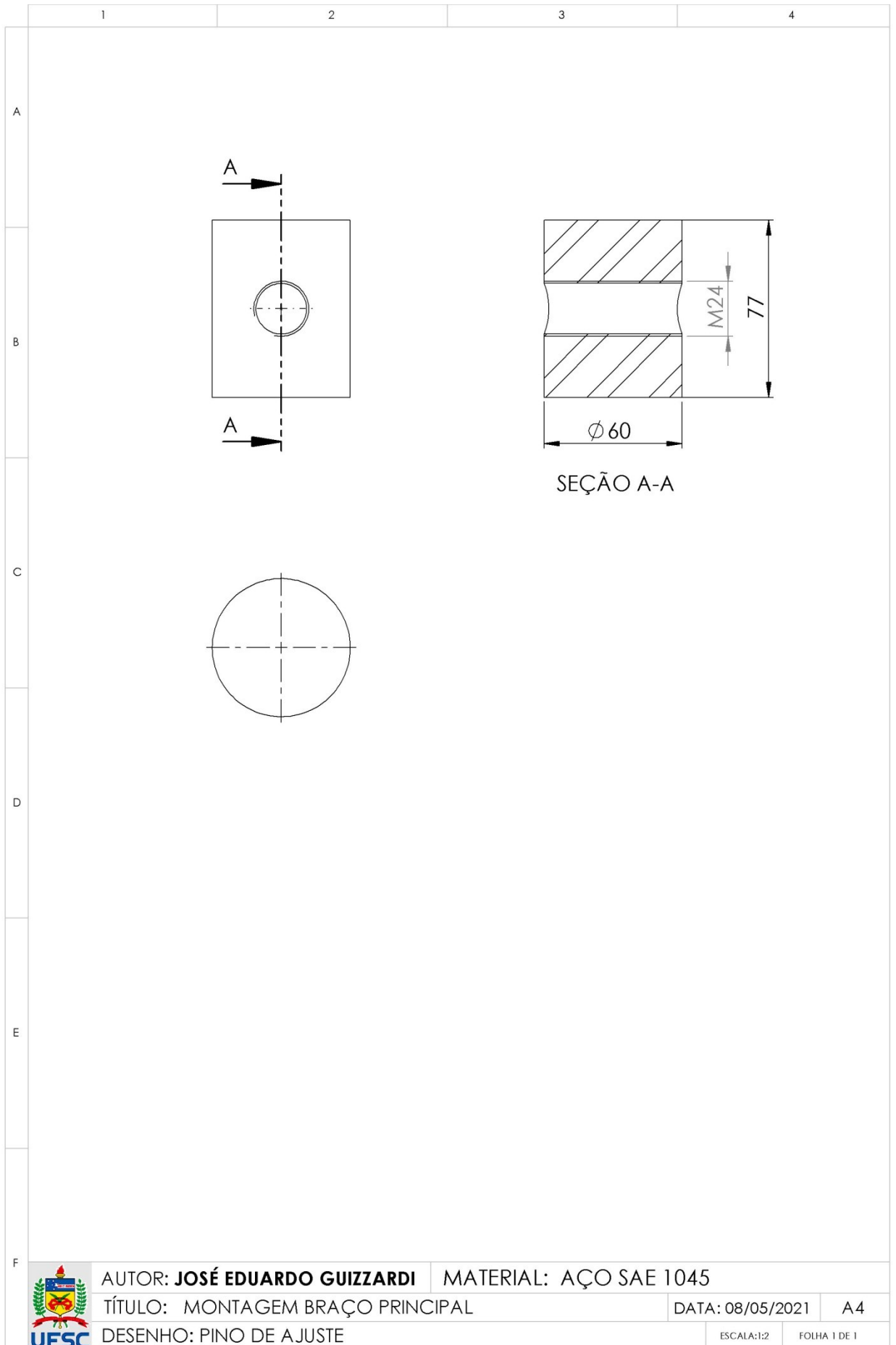
DATA: 08/05/2021

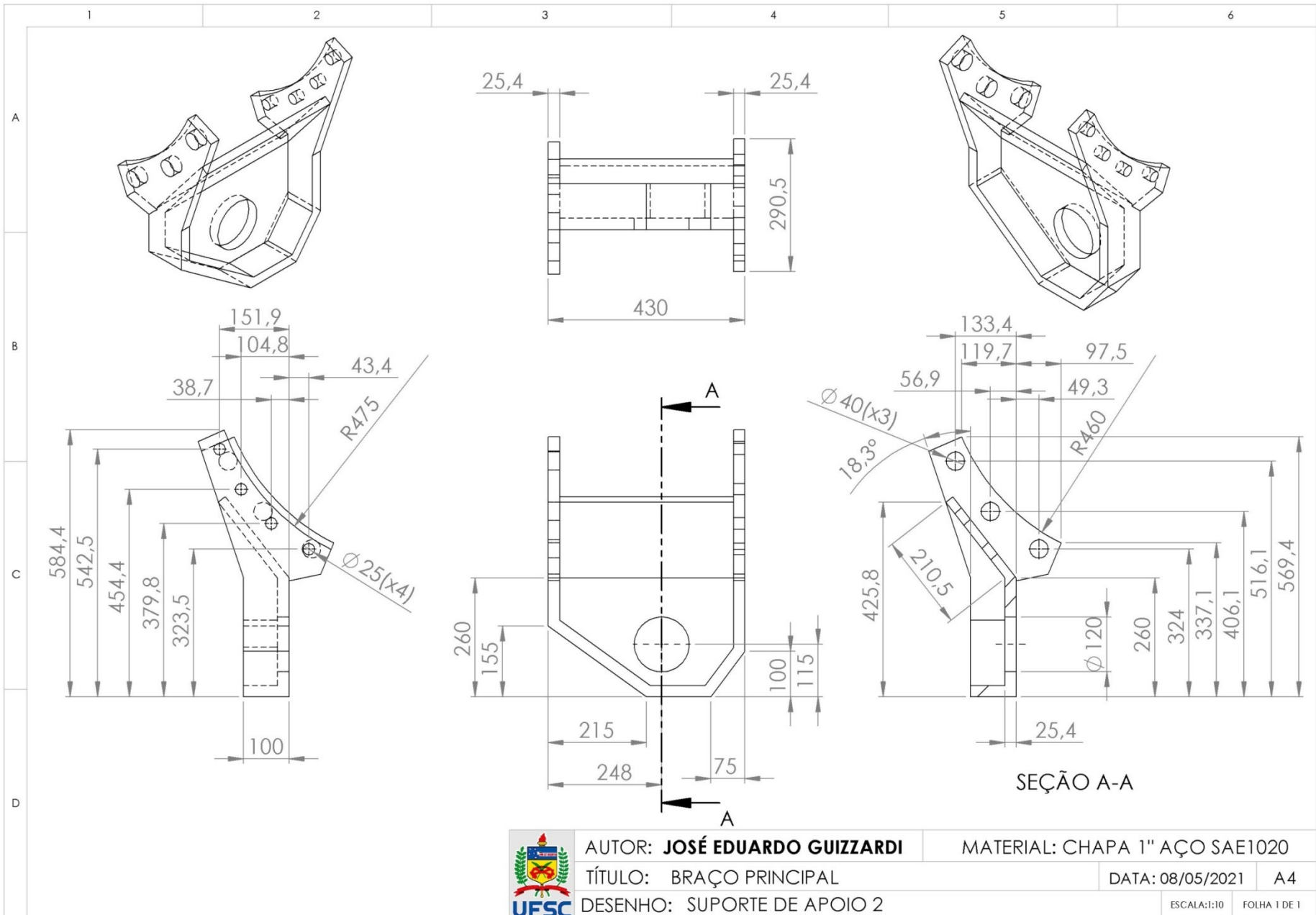
A4

DESENHO: SUPORTE DE APOIO 1

ESCALA:1:10

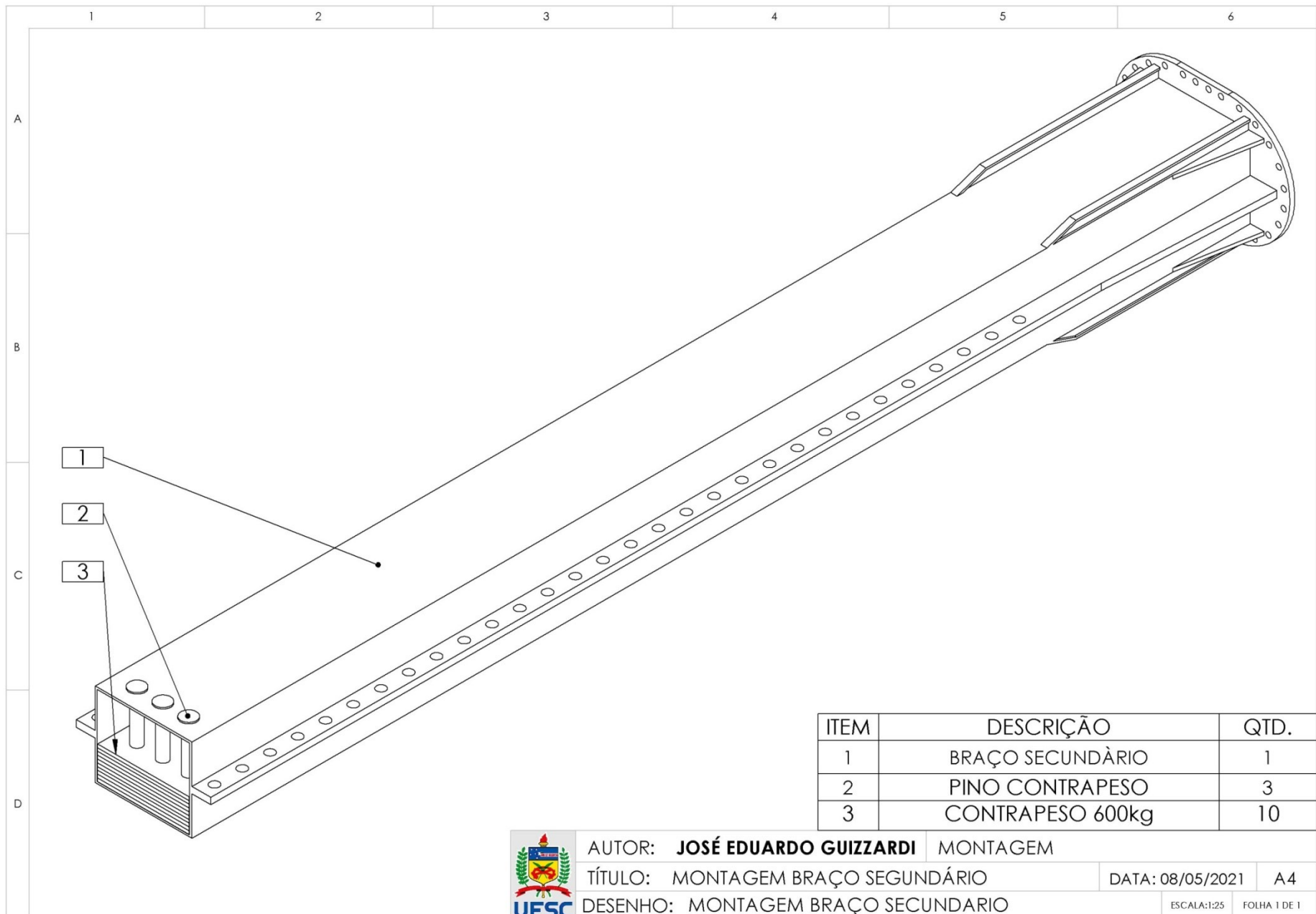
FOLHA 1 DE 1





ANEXO III

BRAÇO SECUNDÁRIO



ITEM	DESCRIÇÃO	QTD.
1	BRAÇO SECUNDÁRIO	1
2	PINO CONTRAPESO	3
3	CONTRAPESO 600kg	10



AUTOR: **JOSÉ EDUARDO GUIZZARDI** MONTAGEM

TÍTULO: MONTAGEM BRAÇO SECUNDÁRIO

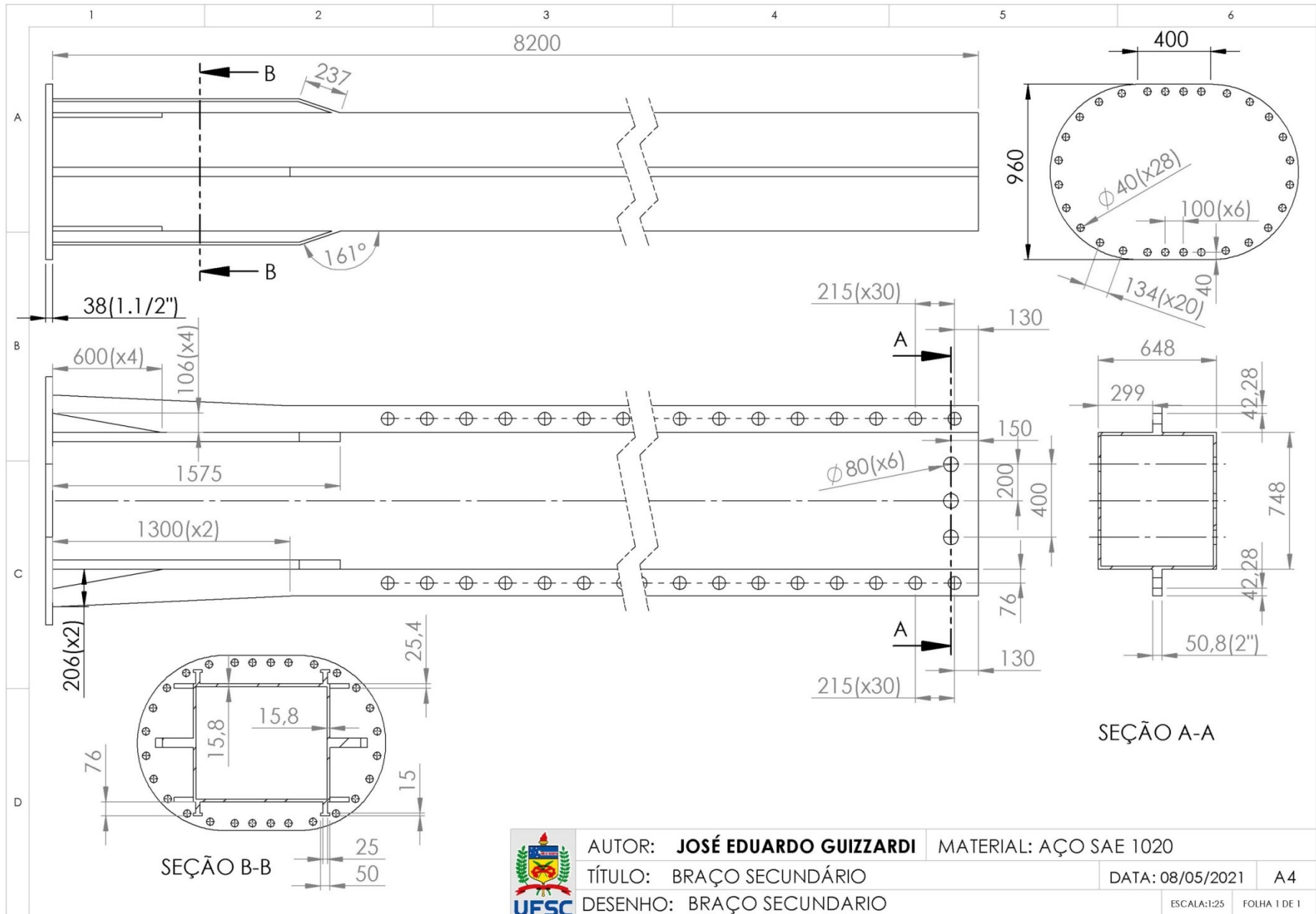
DATA: 08/05/2021

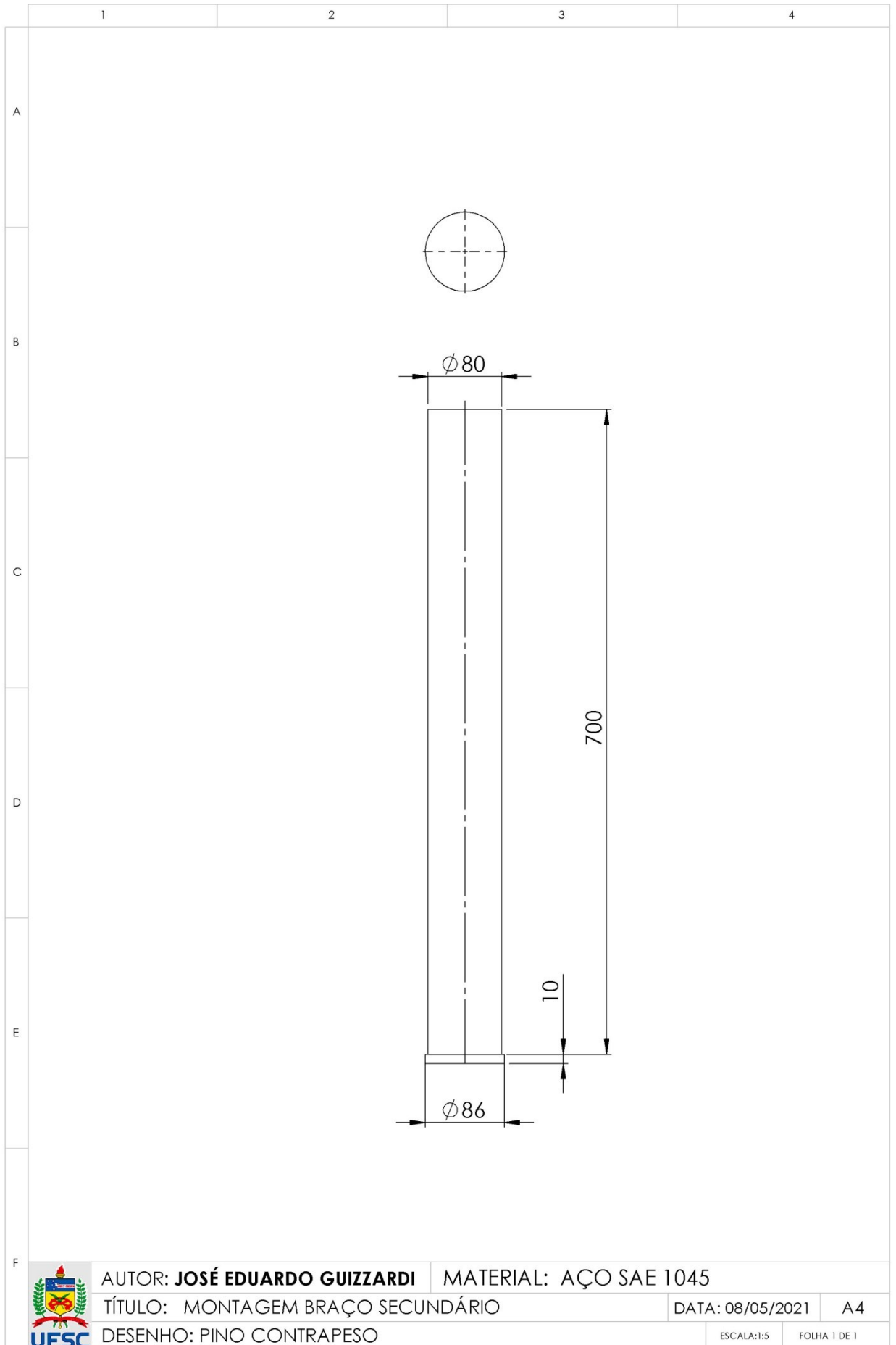
A4

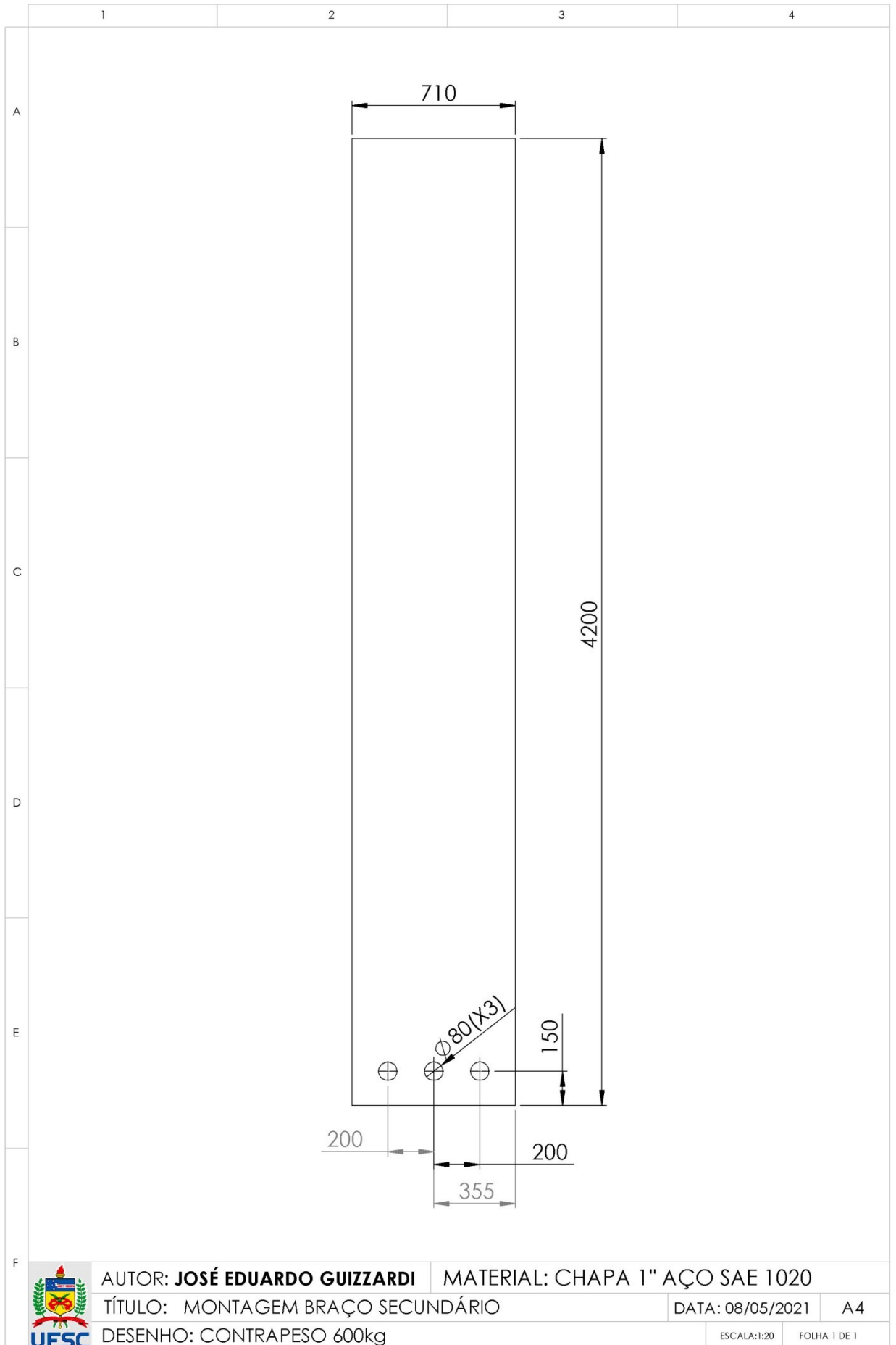
DESENHO: MONTAGEM BRAÇO SECUNDARIO

ESCALA: 1:25

FOLHA 1 DE 1

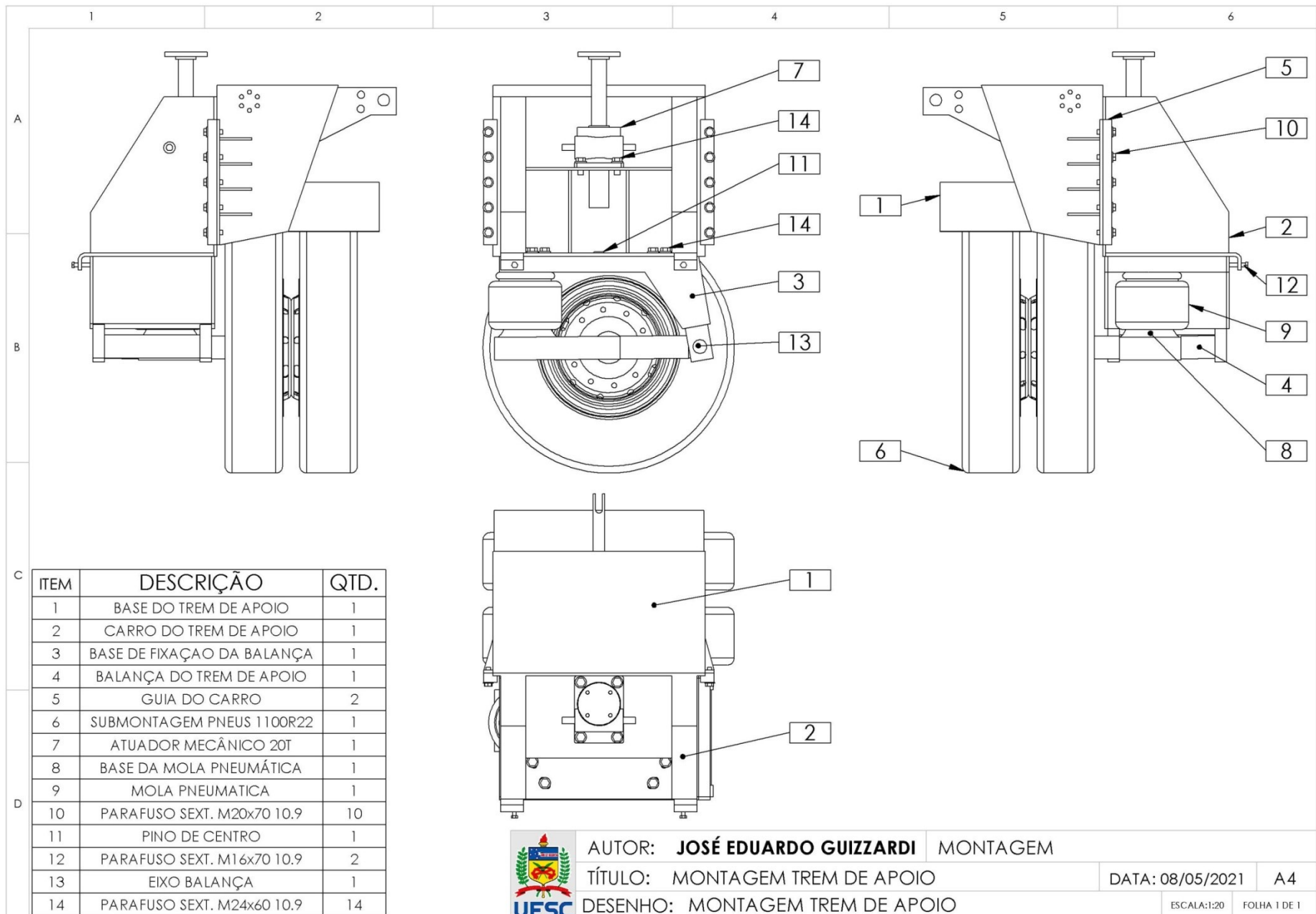


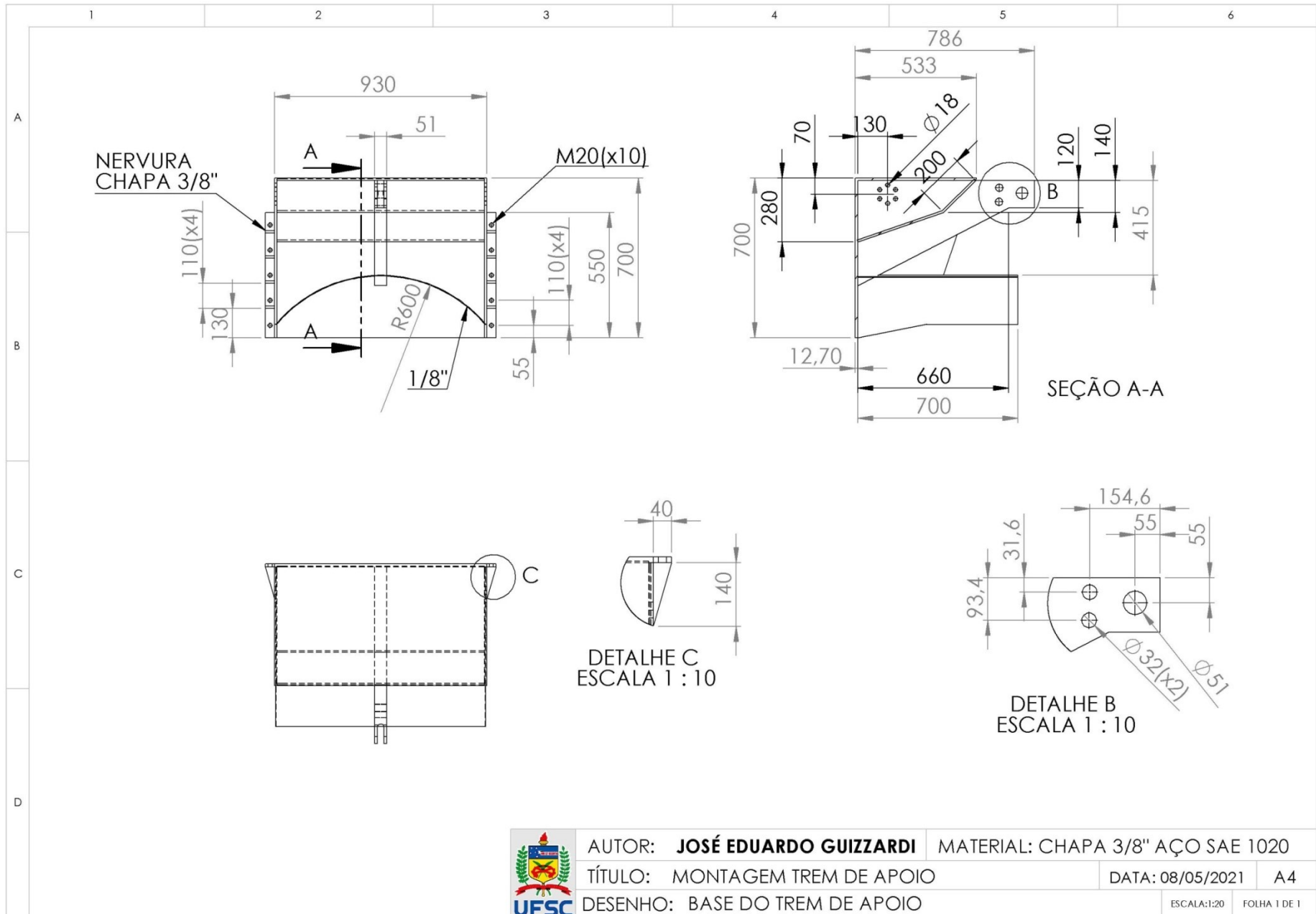




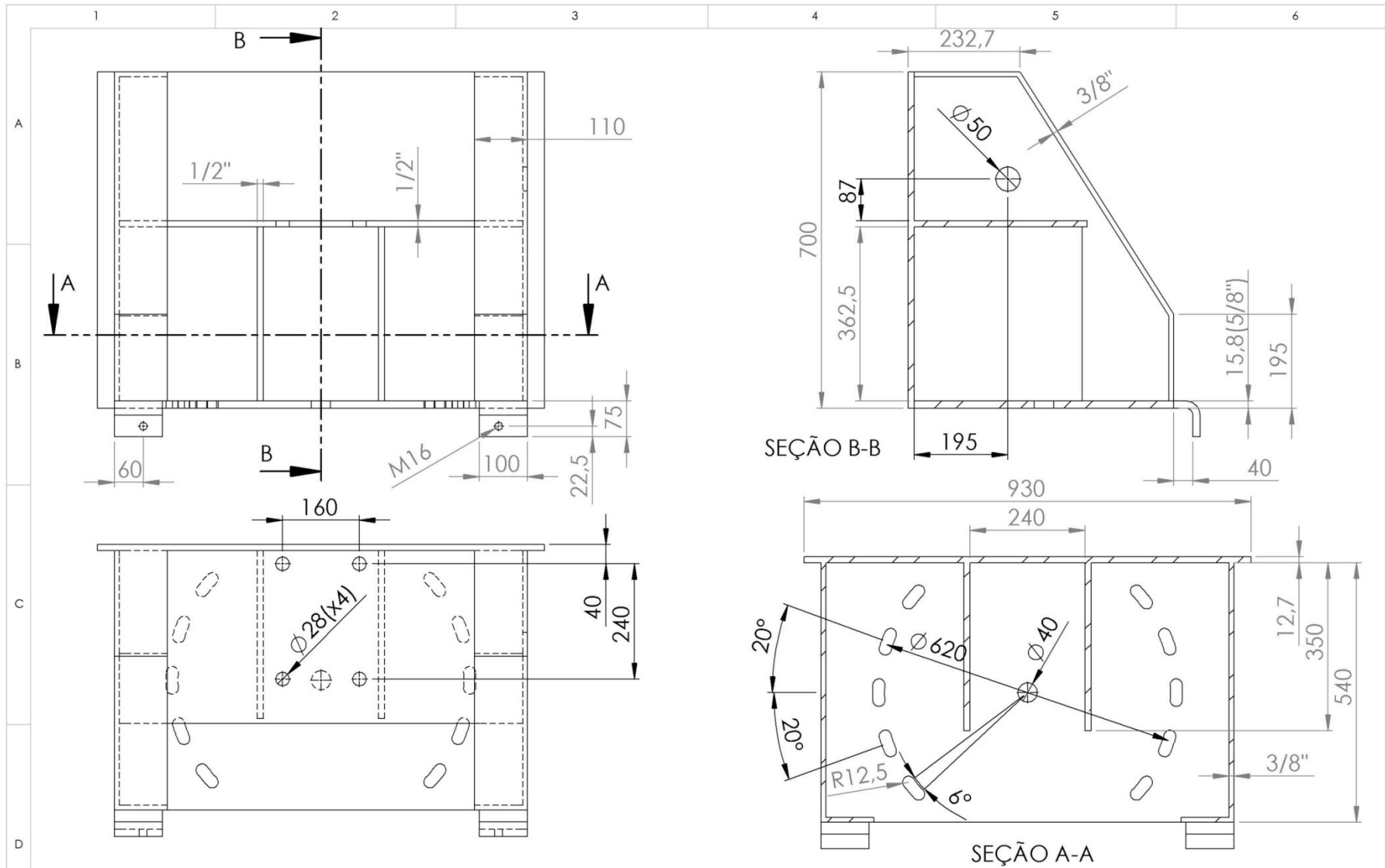
ANEXO IV

TREM DE APOIO





AUTOR: JOSÉ EDUARDO GUIZZARDI	MATERIAL: CHAPA 3/8" AÇO SAE 1020
TÍTULO: MONTAGEM TREM DE APOIO	DATA: 08/05/2021
DESENHO: BASE DO TREM DE APOIO	A4
ESCALA: 1:20	FOLHA 1 DE 1



AUTOR: **JOSÉ EDUARDO GUIZZARDI** MATERIAL: AÇO SAE 1020

TÍTULO: MONTAGEM TREM DE APOIO

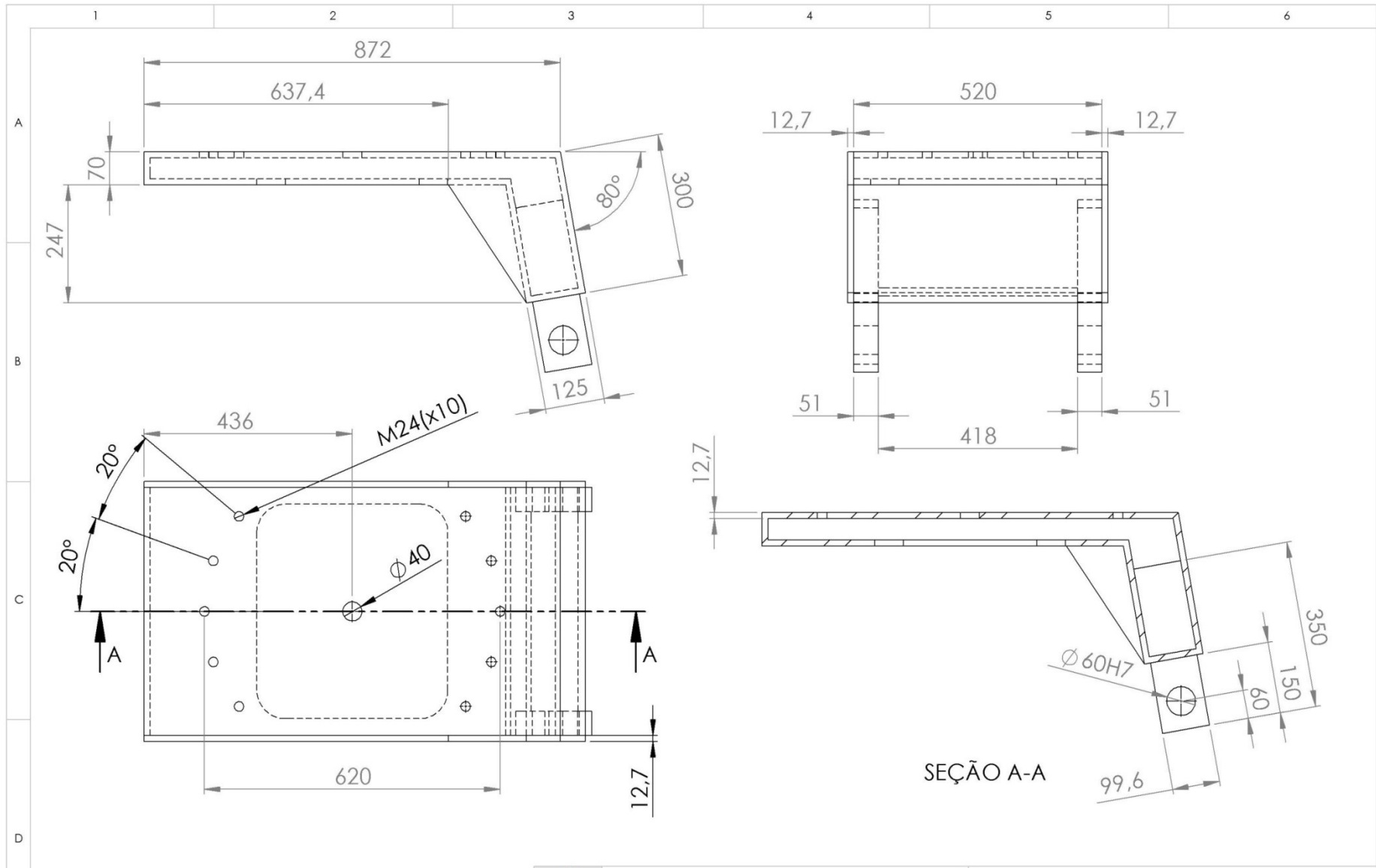
DATA: 08/05/2021

A4

DESENHO: CARRO DO TREM DE APOIO

ESCALA:1:10

FOLHA 1 DE 1



AUTOR: **JOSÉ EDUARDO GUIZZARDI** MATERIAL: AÇO SAE 1020

TÍTULO: MONTAGEM TREM DE APOIO

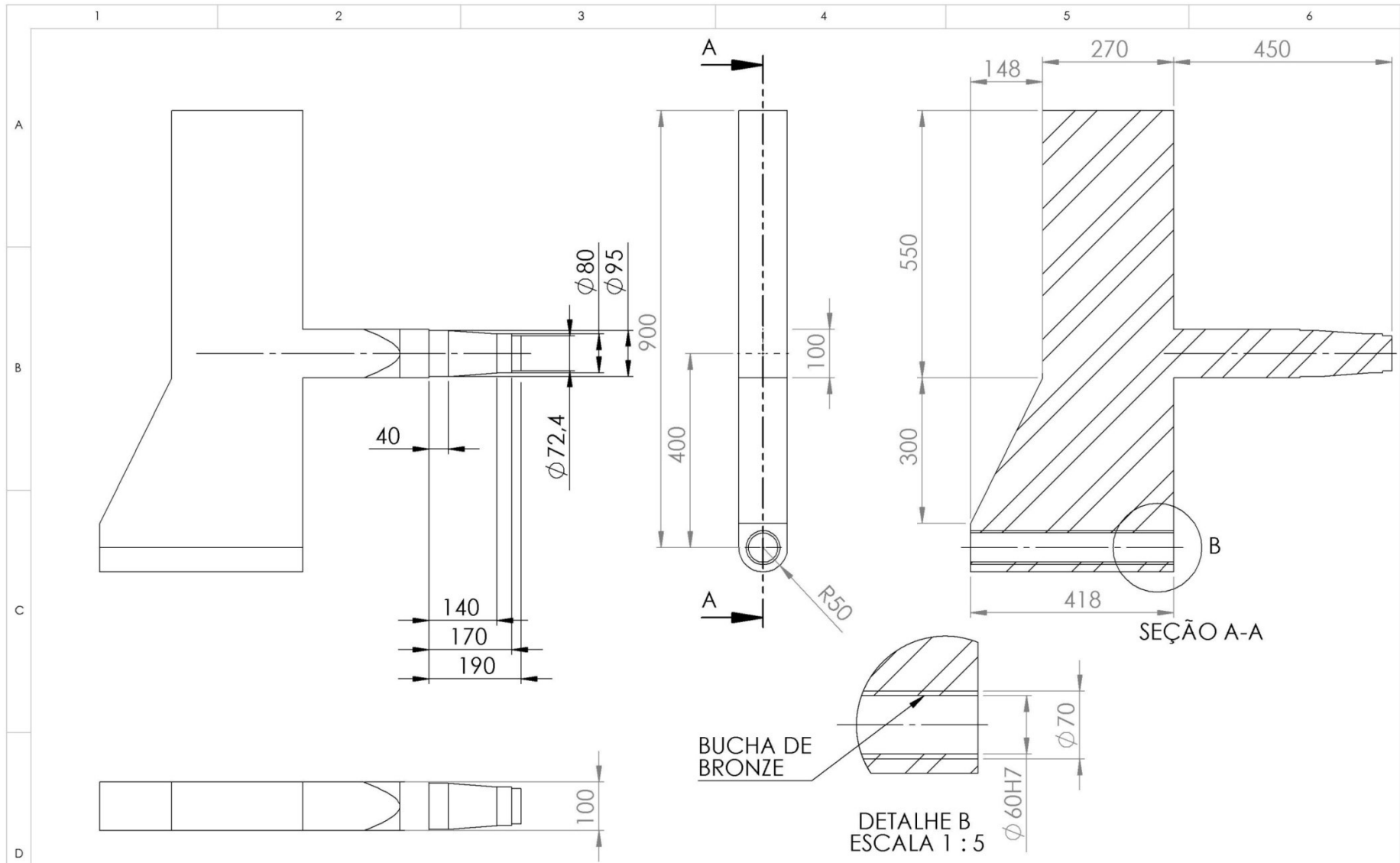
DATA: 08/05/2021

A4

DESENHO: BASE DE FIXAÇÃO DA BALANÇA

ESCALA:1:10

FOLHA 1 DE 1



AUTOR: **JOSÉ EDUARDO GUIZZARDI** MATERIAL: AÇO SAE 1020

TÍTULO: MONTAGEM TREM DE APOIO

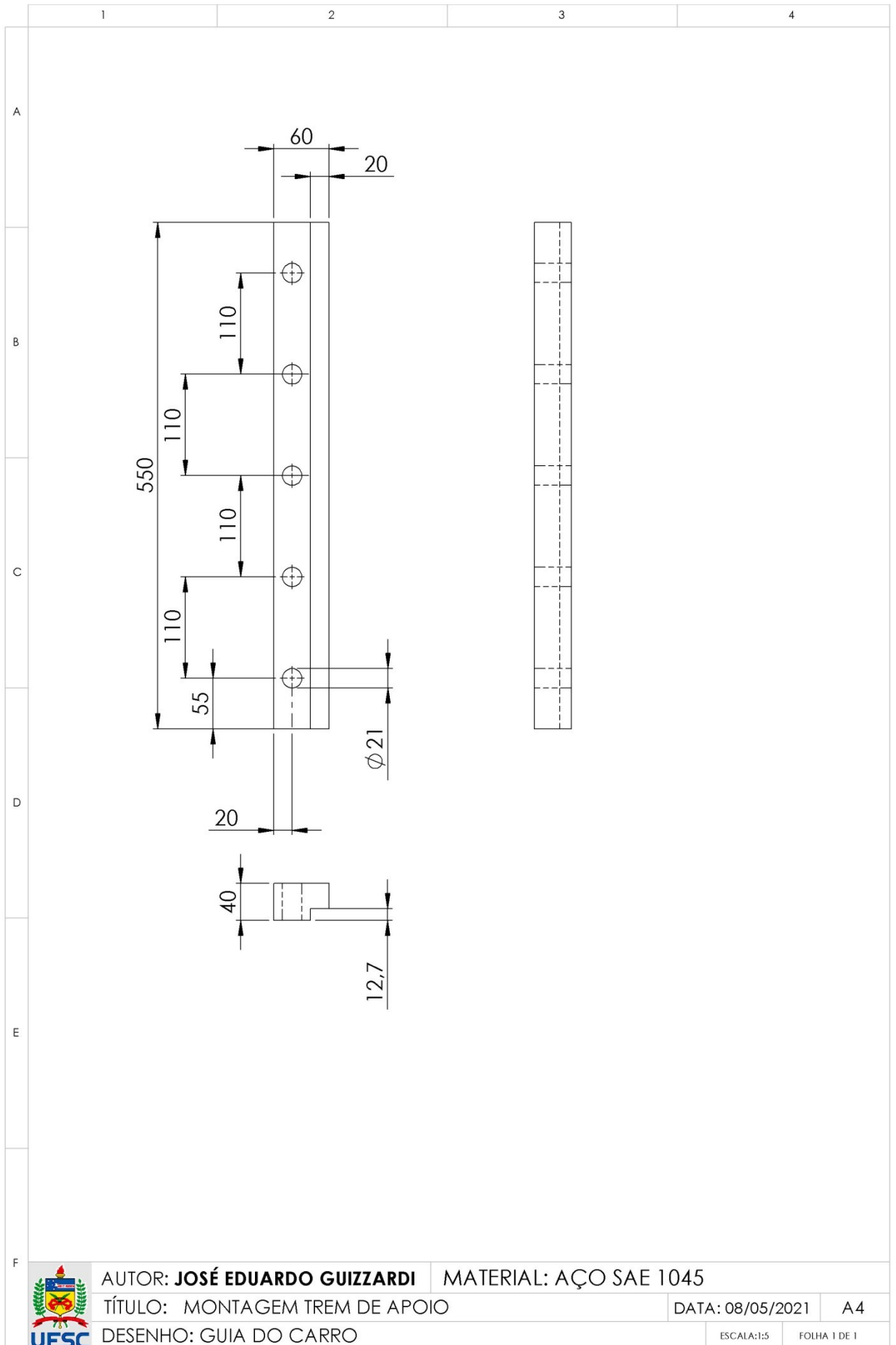
DATA: 08/05/2021

A4

DESENHO: BALANÇA DO TREM DE APOIO

ESCALA: 1:10

FOLHA 1 DE 1



AUTOR: **JOSÉ EDUARDO GUIZZARDI**

MATERIAL: AÇO SAE 1045

TÍTULO: MONTAGEM TREM DE APOIO

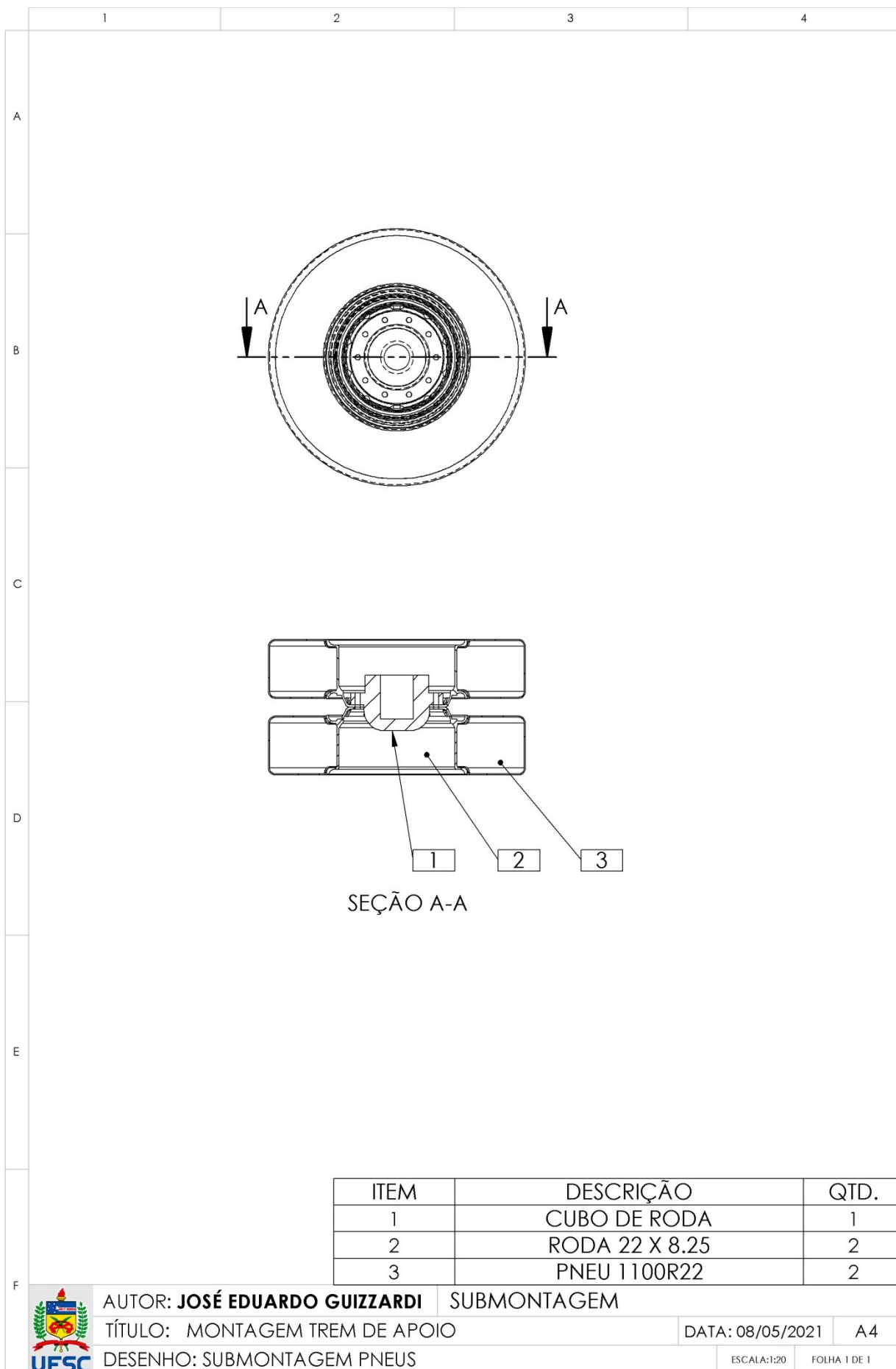
DATA: 08/05/2021

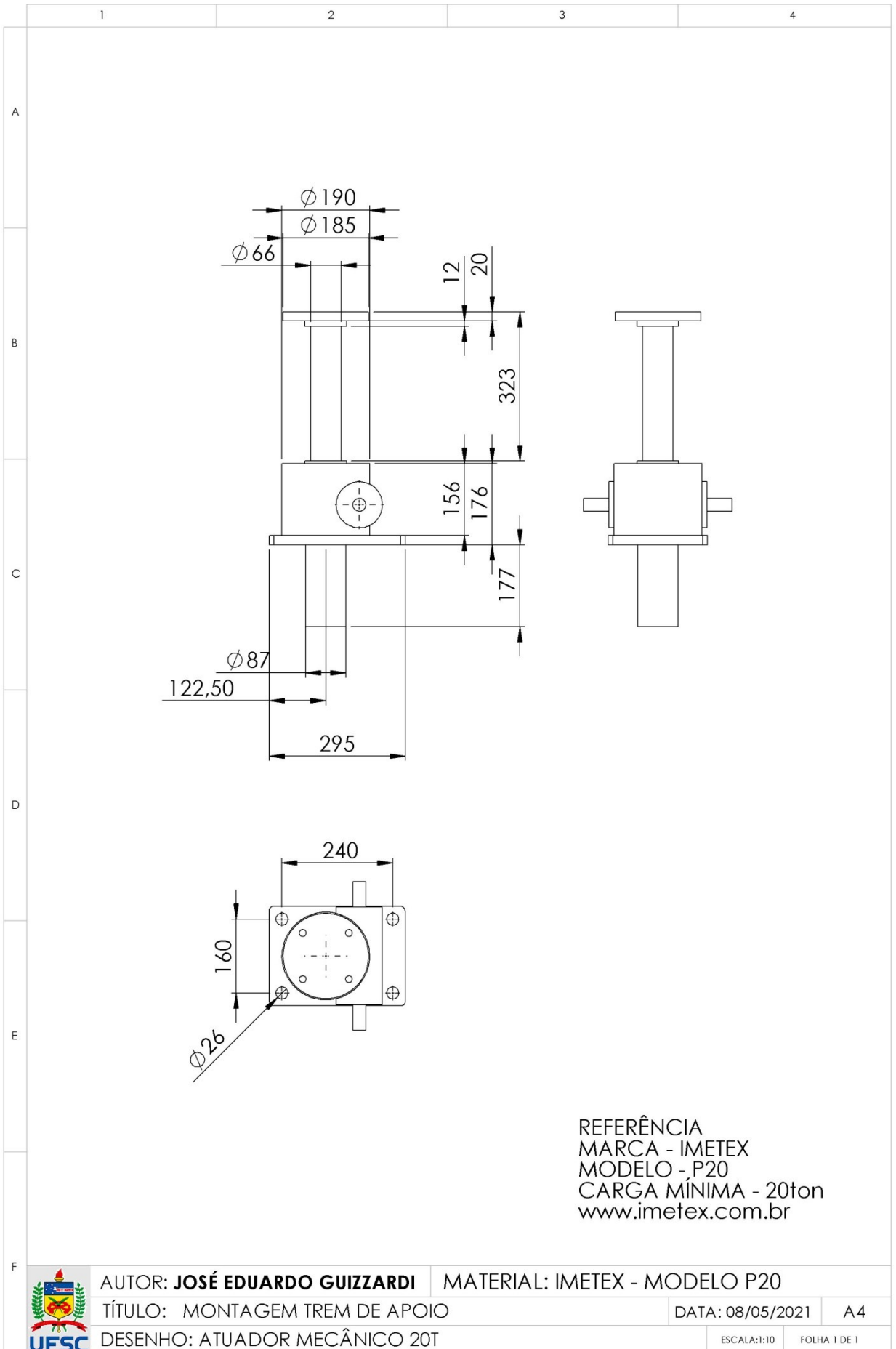
A4

DESENHO: GUIA DO CARRO

ESCALA:1:5

FOLHA 1 DE 1





AUTOR: **JOSÉ EDUARDO GUIZZARDI**

MATERIAL: IMETEX - MODELO P20

TÍTULO: MONTAGEM TREM DE APOIO

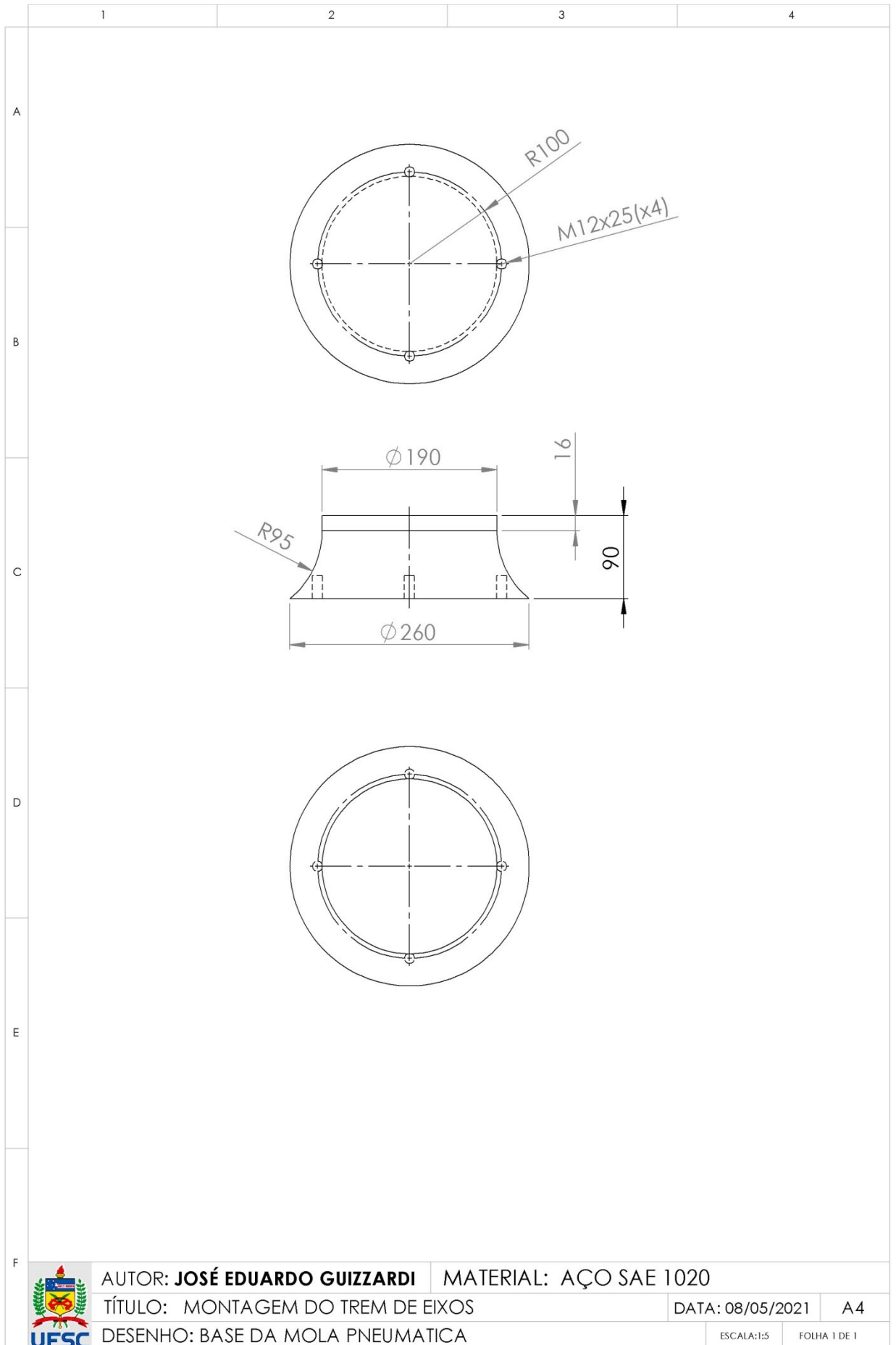
DATA: 08/05/2021

A4

DESENHO: ATUADOR MECÂNICO 20T

ESCALA:1:10

FOLHA 1 DE 1



Código

Código

Code

556 0 2 8505

A

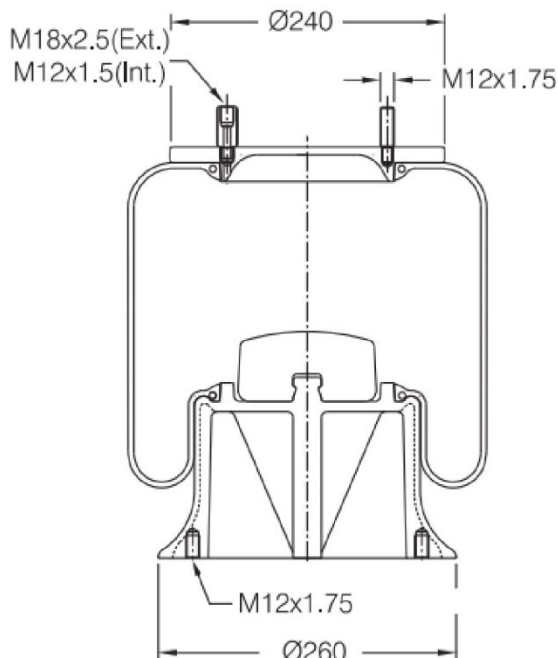
B

C

D

E

F

**Tampa Superior**

Tapa superior

Upper bead plate

5002

Base

Base

Piston

5054

Batente

Tope

Internal Bumper

5003

Kit de Serviço

Kits de Servicio

Service Assemblies

-

Altura máxima

Altura máxima

Max. Height

465 mm

Altura mínima

Altura mínima

Min. Height

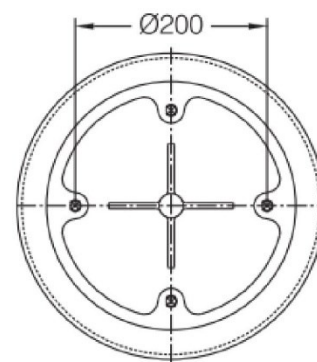
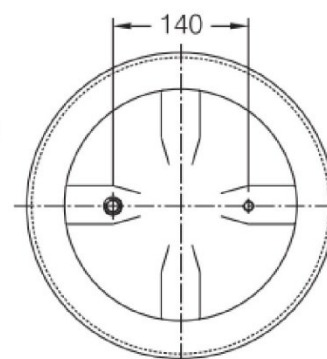
205 mm

Diâmetro máximo

Diâmetro máximo

Max. Diameter

Ø 320 mm

**REFERÊNCIA:**

CONTINENTAL (2015),
Catálogo de Aplicações
de Molas Pneumáticas.
Catálogo Brasil, pág.
79. Disponível em
www.contitech.com.

AUTOR: **JOSÉ EDUARDO GUIZZARDI**

MATERIAL: MOLTA PNEUMATICA CONTINENTAL

TÍTULO: MONTAGEM TREM DE EIXOS

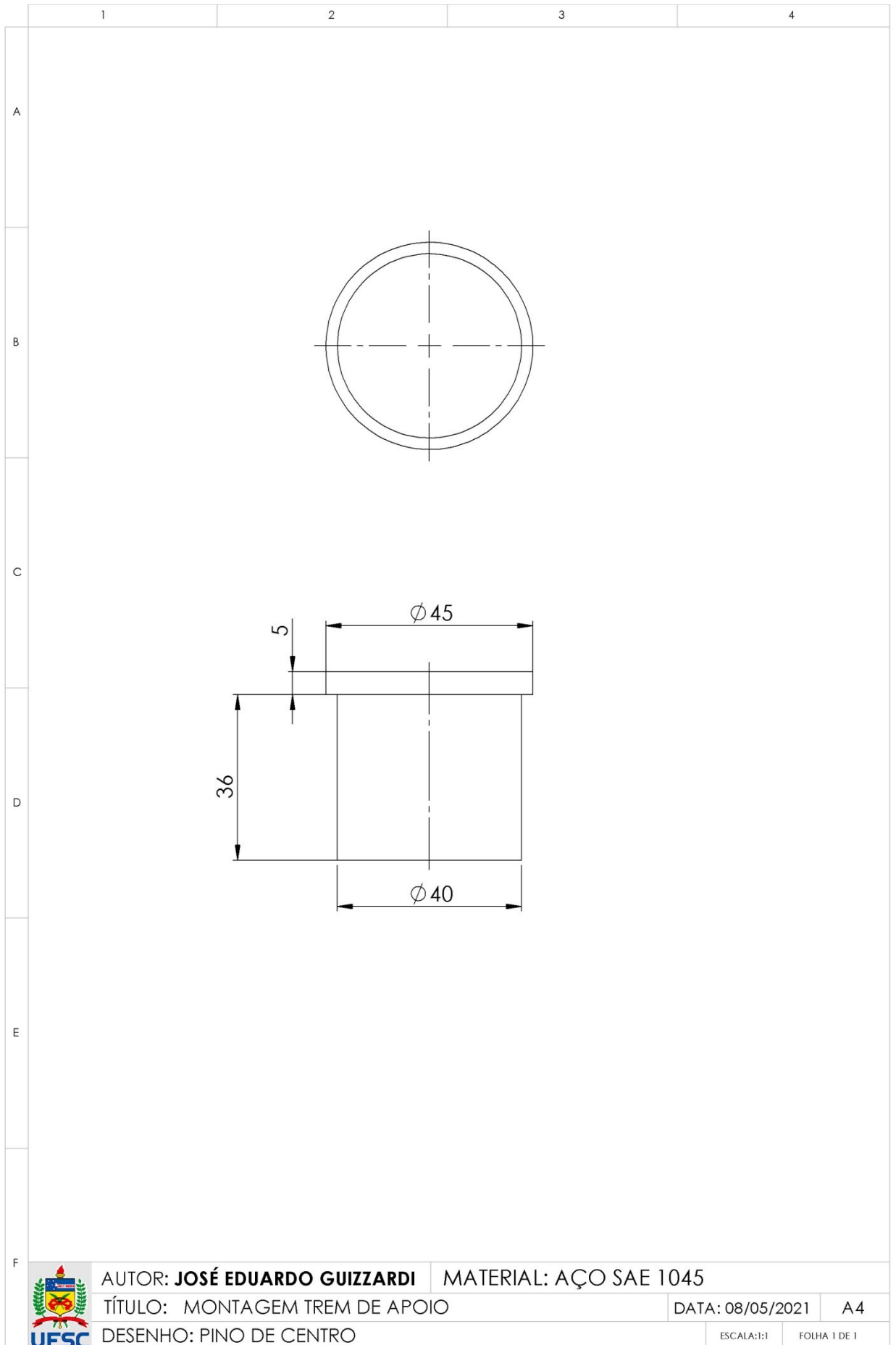
DATA: 08/05/2021

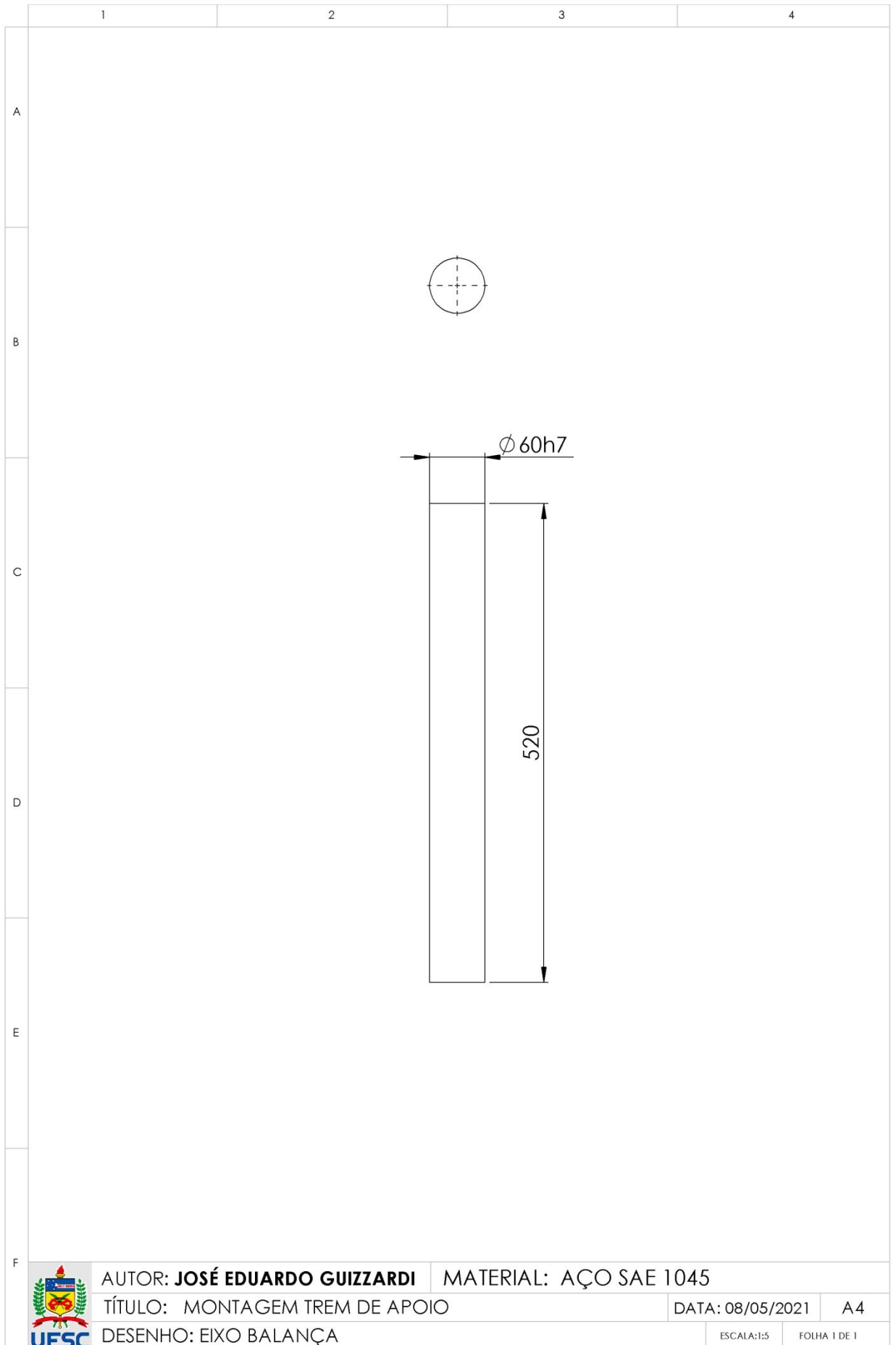
A4

DESENHO: MOLTA PNEUMATICA

ESCALA:1:10

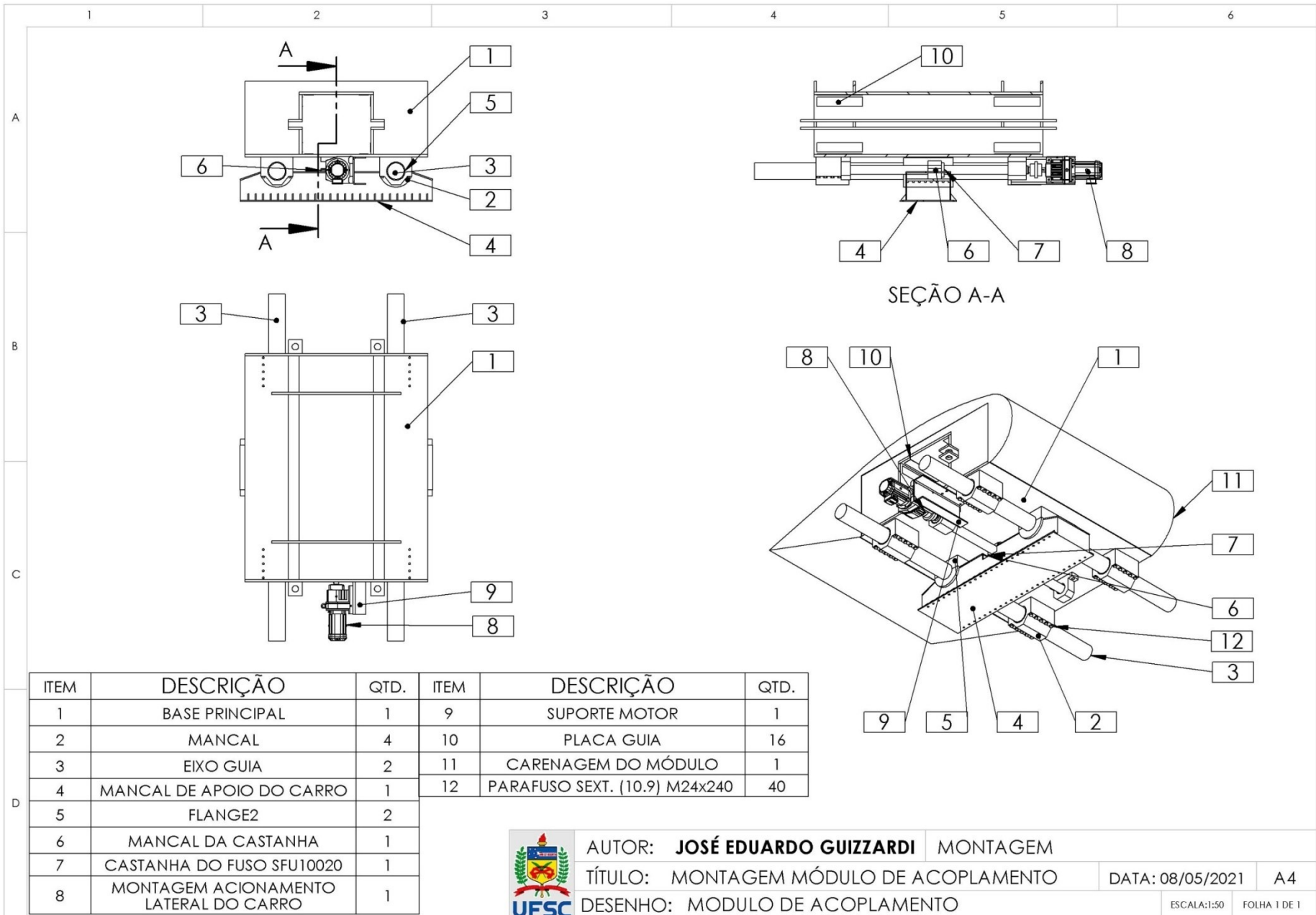
FOLHA 1 DE 1





ANEXO V

MÓDULO DE ACOPLAMENTO E
TREM DE EIXOS



ITEM	DESCRIÇÃO	QTD.	ITEM	DESCRIÇÃO	QTD.
1	BASE PRINCIPAL	1	9	SUPORE MOTOR	1
2	MANCAL	4	10	PLACA GUIA	16
3	EIXO GUIA	2	11	CARENAGEM DO MÓDULO	1
4	MANCAL DE APOIO DO CARRO	1	12	PARAFUSO SEXT. (10.9) M24x240	40
5	FLANGE2	2			
6	MANCAL DA CASTANHA	1			
7	CASTANHA DO FUSO SFU10020	1			
8	MONTAGEM ACIONAMENTO LATERAL DO CARRO	1			



AUTOR: **JOSÉ EDUARDO GUIZZARDI** MONTAGEM

TÍTULO: MONTAGEM MÓDULO DE ACOPLAMENTO

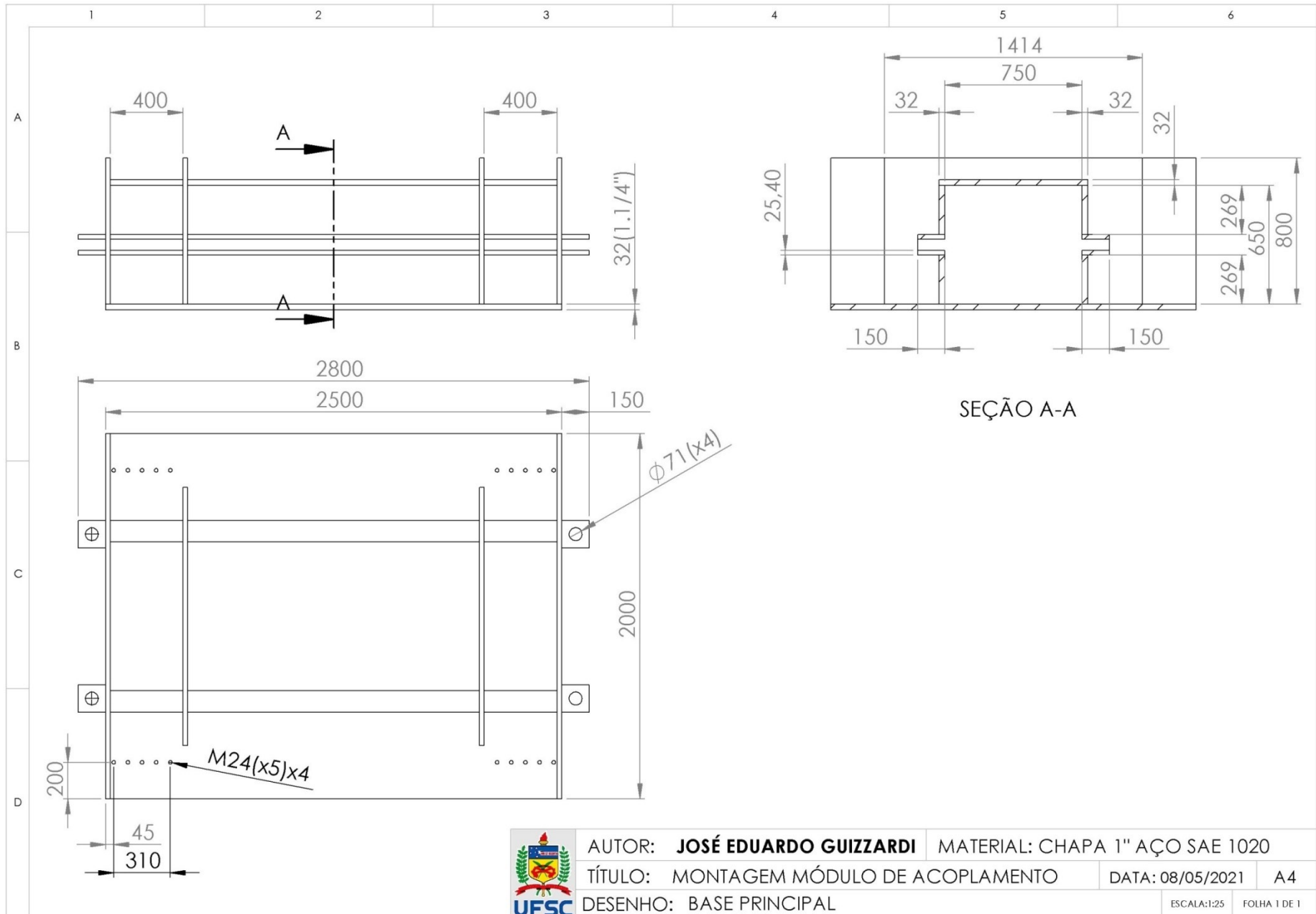
DATA: 08/05/2021

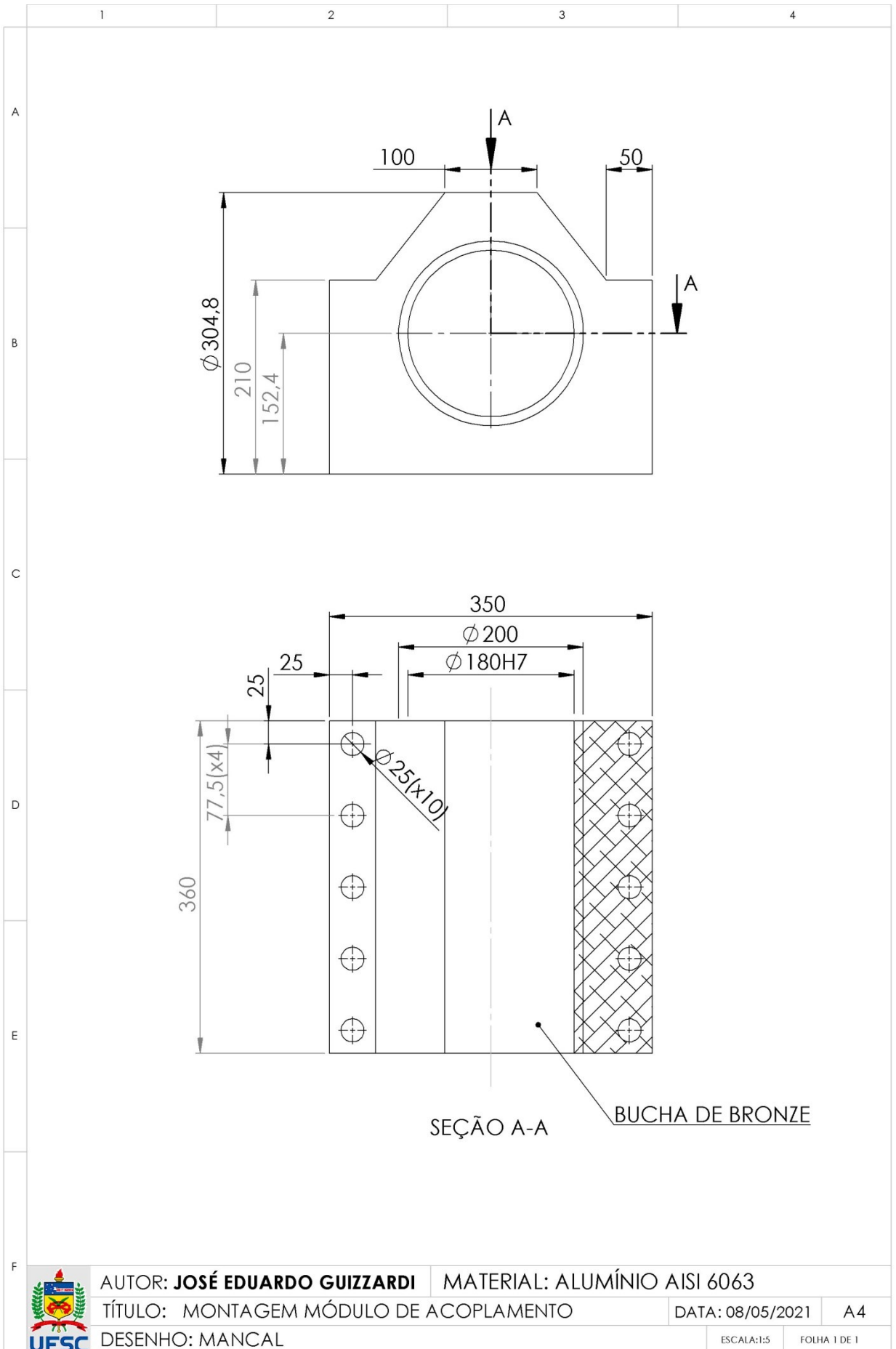
A4

DESENHO: MODULO DE ACOPLAMENTO

ESCALA:1:50

FOLHA 1 DE 1





AUTOR: **JOSÉ EDUARDO GUIZZARDI**

MATERIAL: ALUMÍNIO AISI 6063

TÍTULO: MONTAGEM MÓDULO DE ACOPLAMENTO

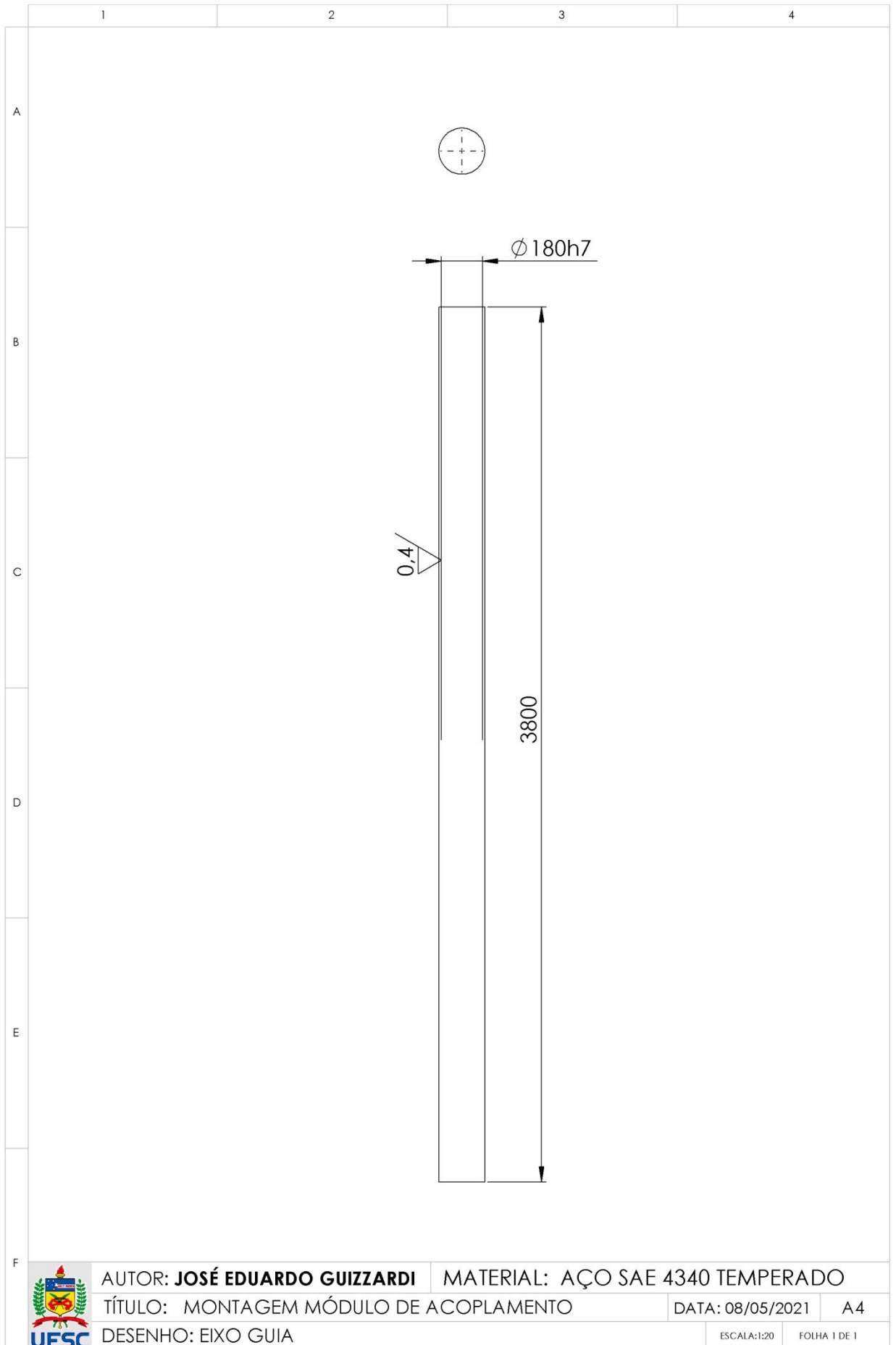
DATA: 08/05/2021

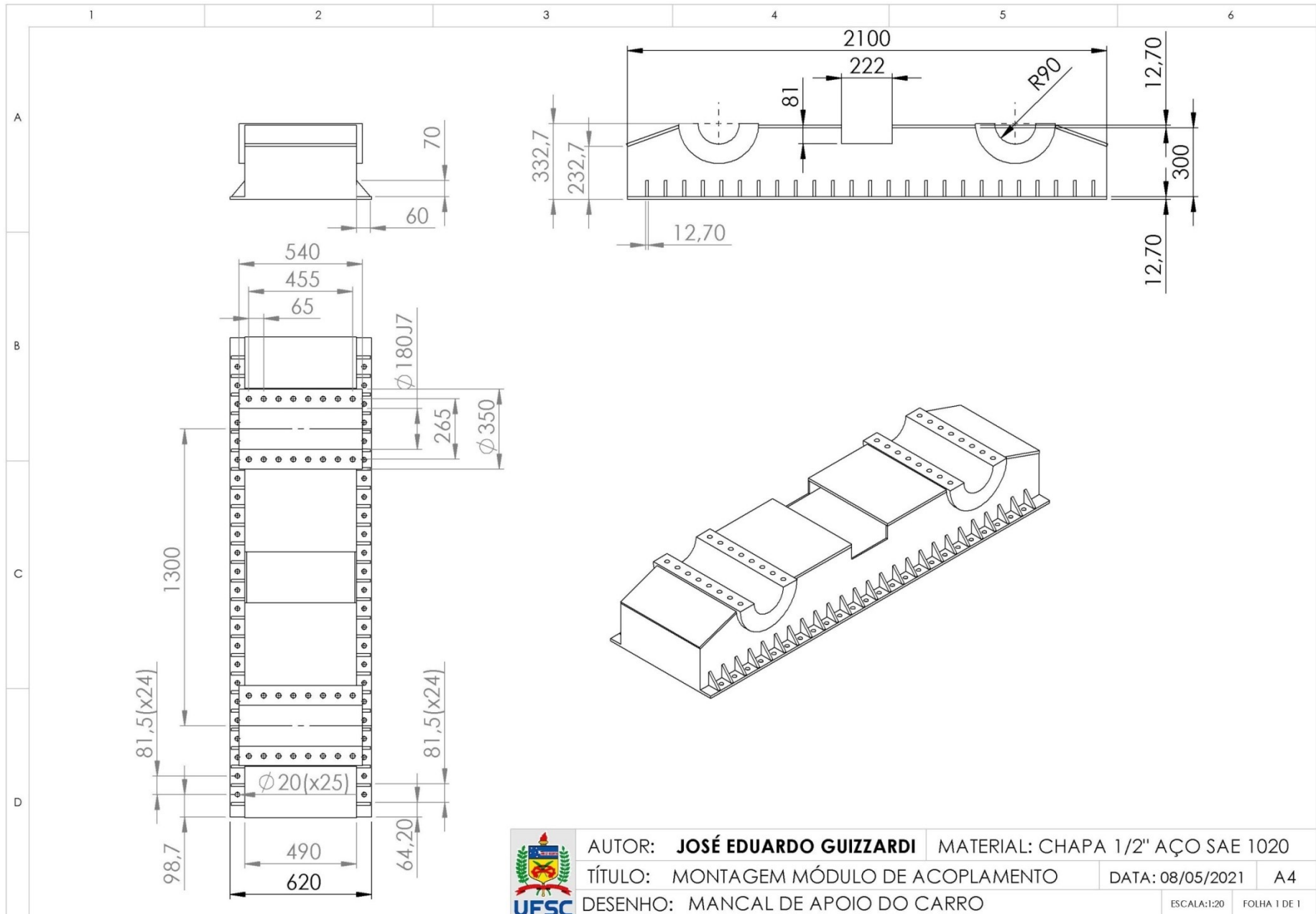
A4

DESENHO: MANCAL

ESCALA:1:5

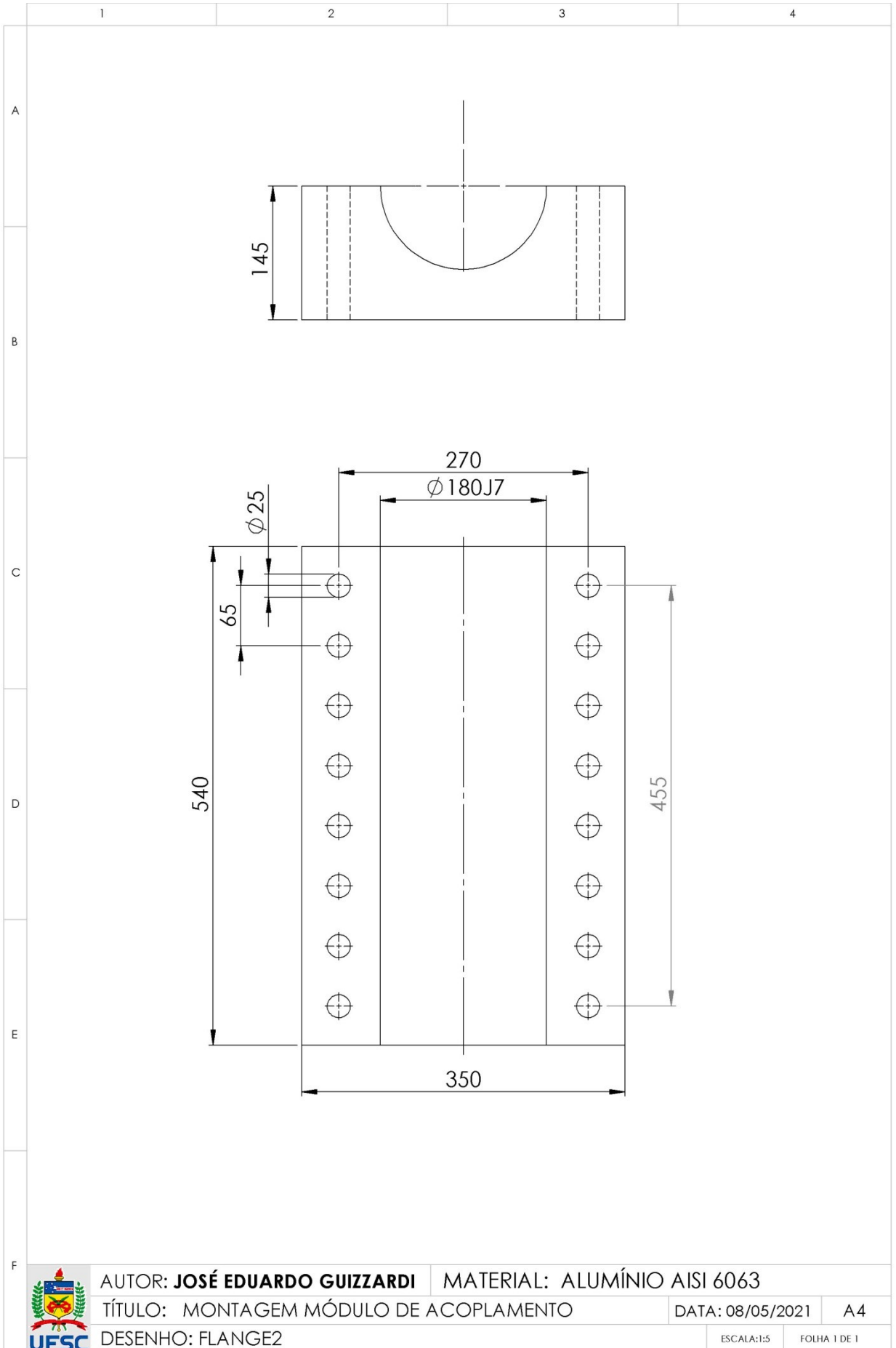
FOLHA 1 DE 1





AUTOR: JOSÉ EDUARDO GUIZZARDI	MATERIAL: CHAPA 1/2" AÇO SAE 1020
TÍTULO: MONTAGEM MÓDULO DE ACOPLAMENTO	DATA: 08/05/2021
DESENHO: MANCAL DE APOIO DO CARRO	A4

ESCALA: 1:20 FOLHA 1 DE 1



AUTOR: **JOSÉ EDUARDO GUIZZARDI**

MATERIAL: ALUMÍNIO AISI 6063

TÍTULO: MONTAGEM MÓDULO DE ACOPLAMENTO

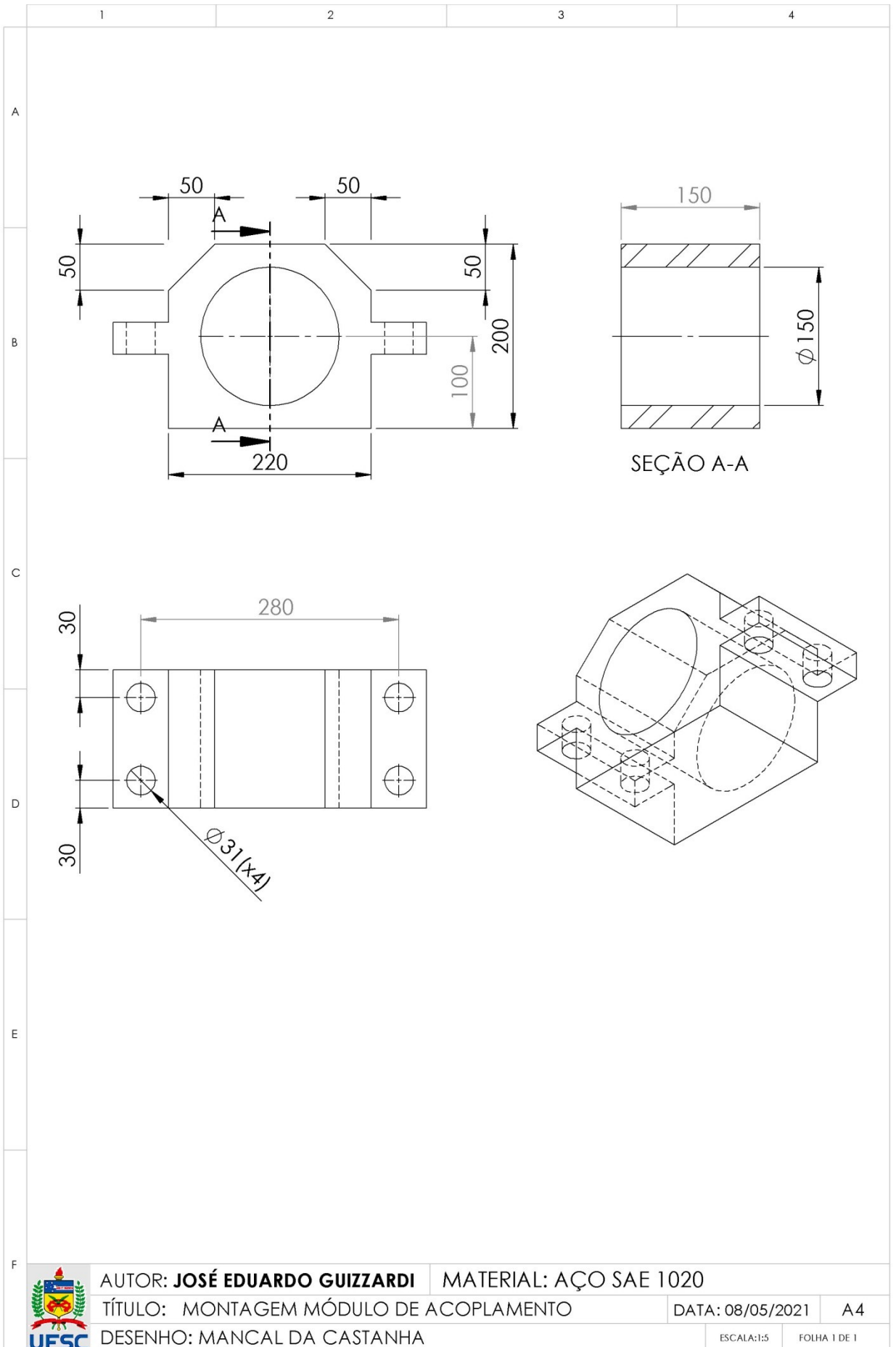
DATA: 08/05/2021

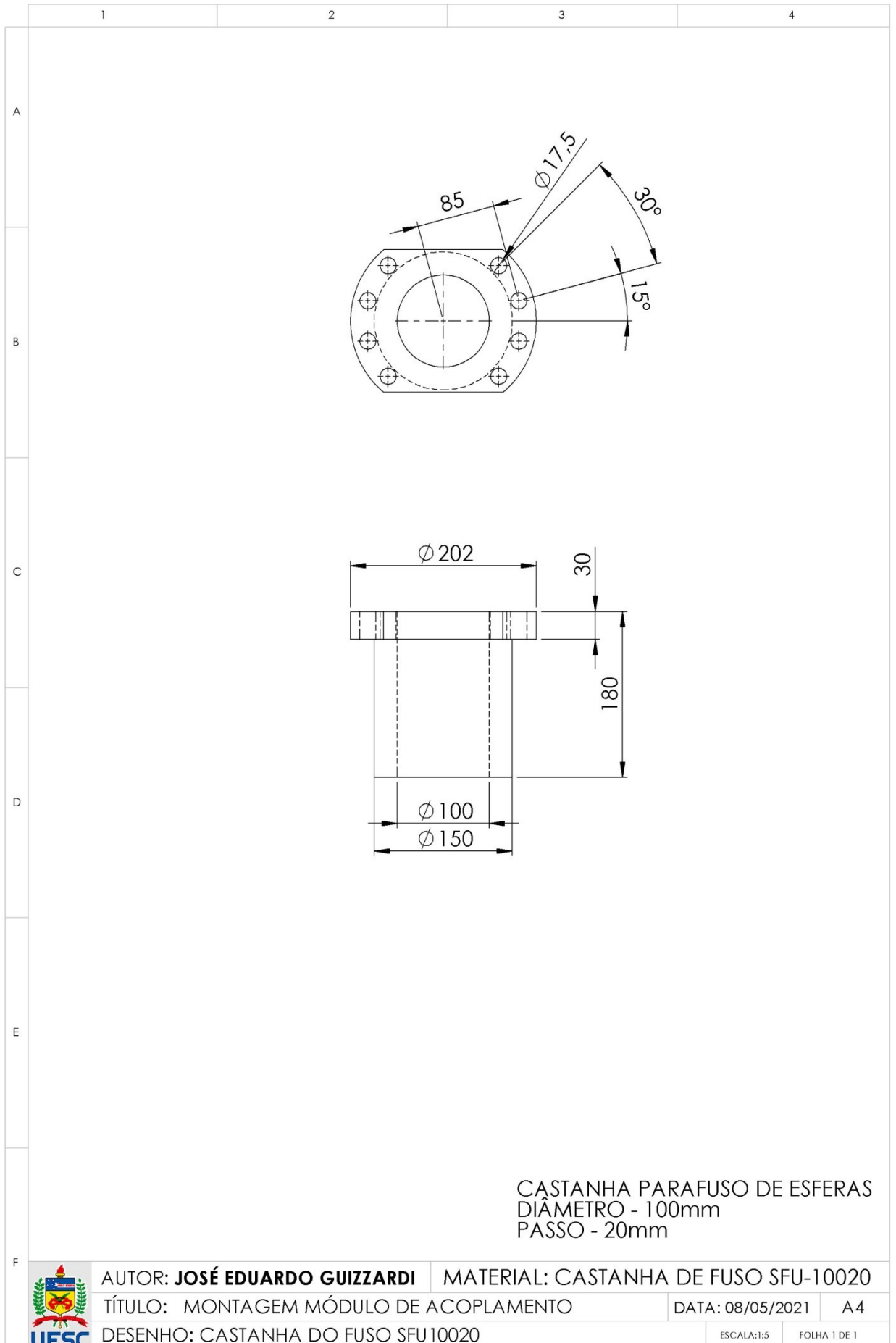
A4

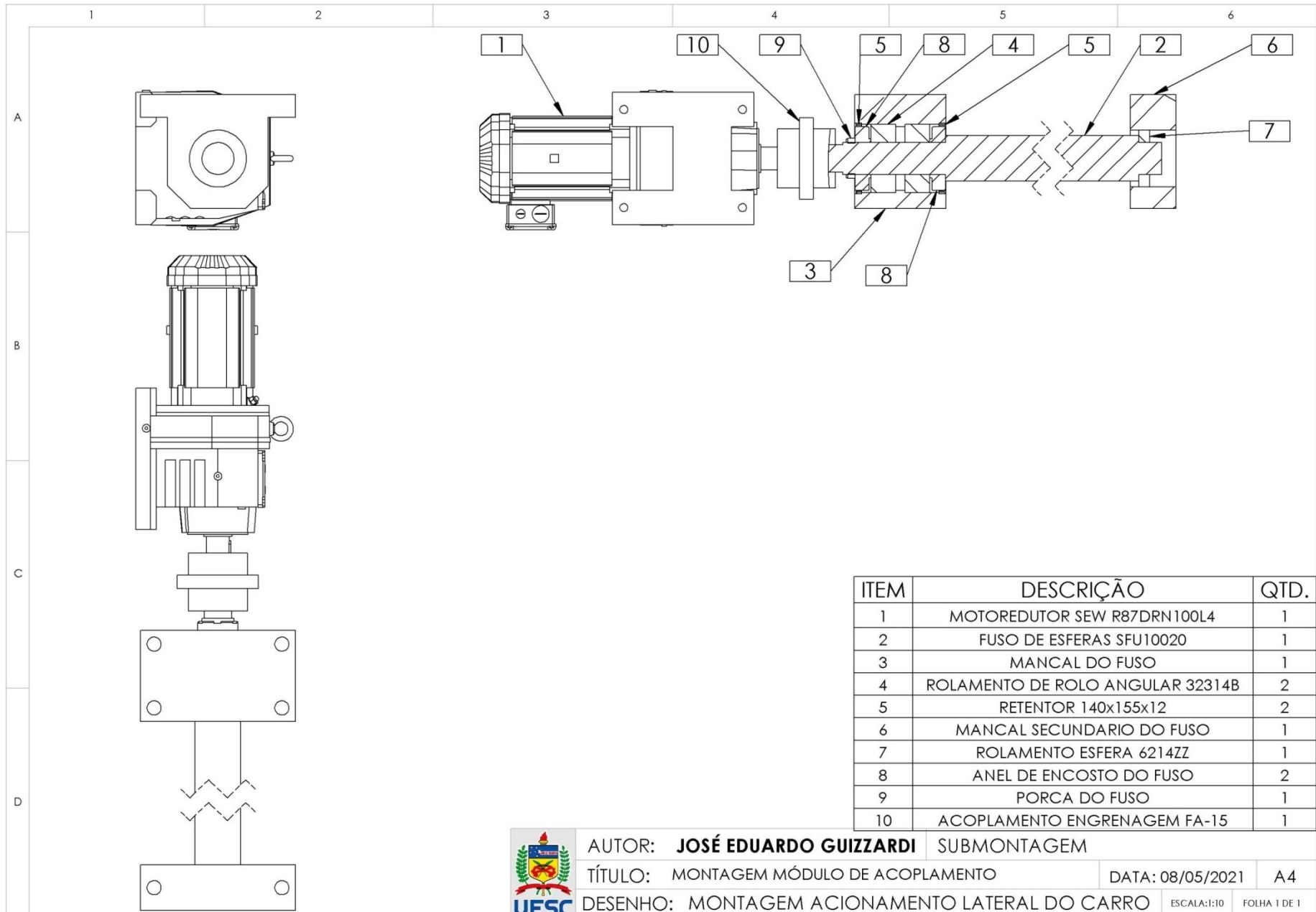
DESENHO: FLANGE2

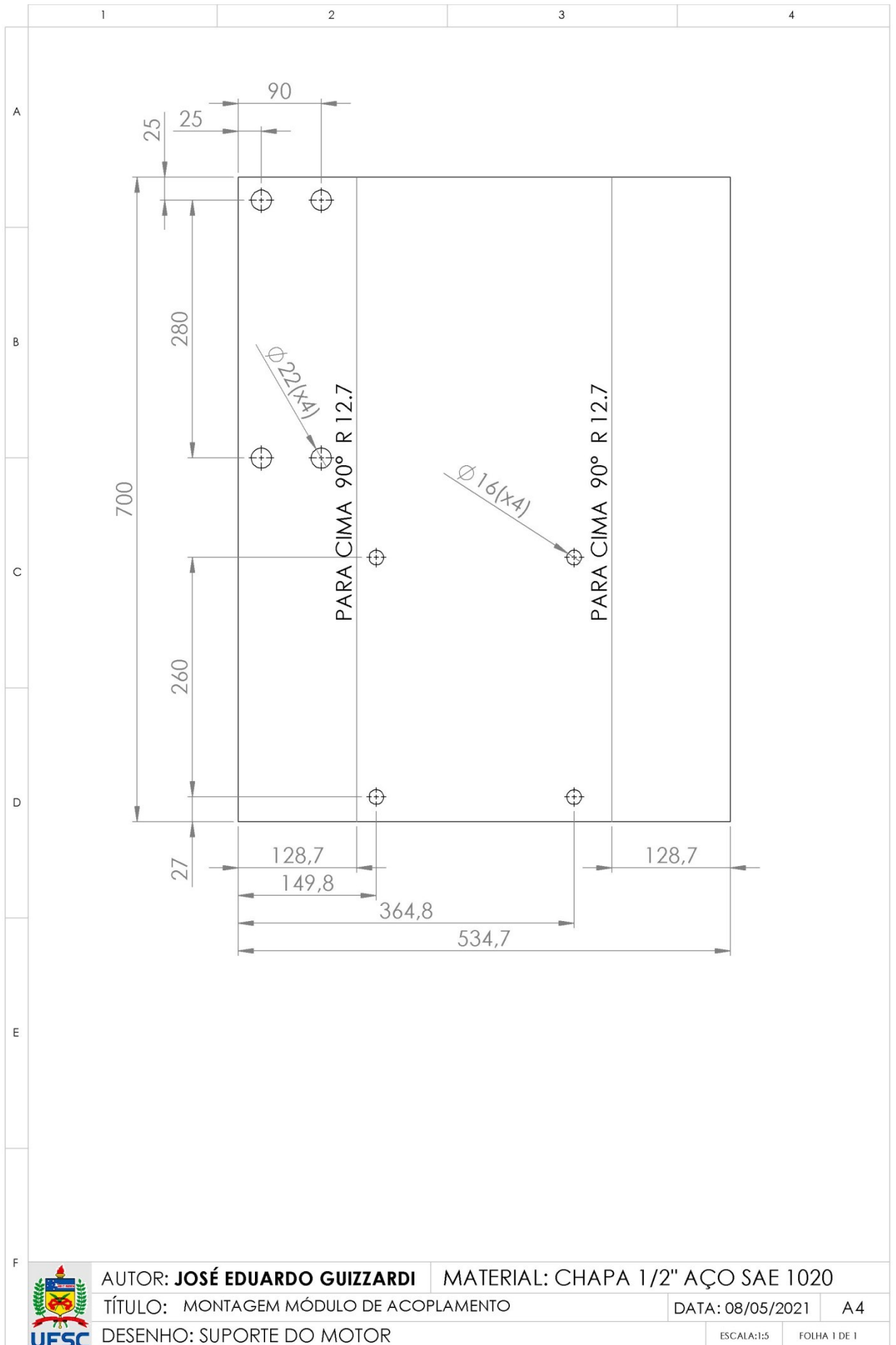
ESCALA:1:5

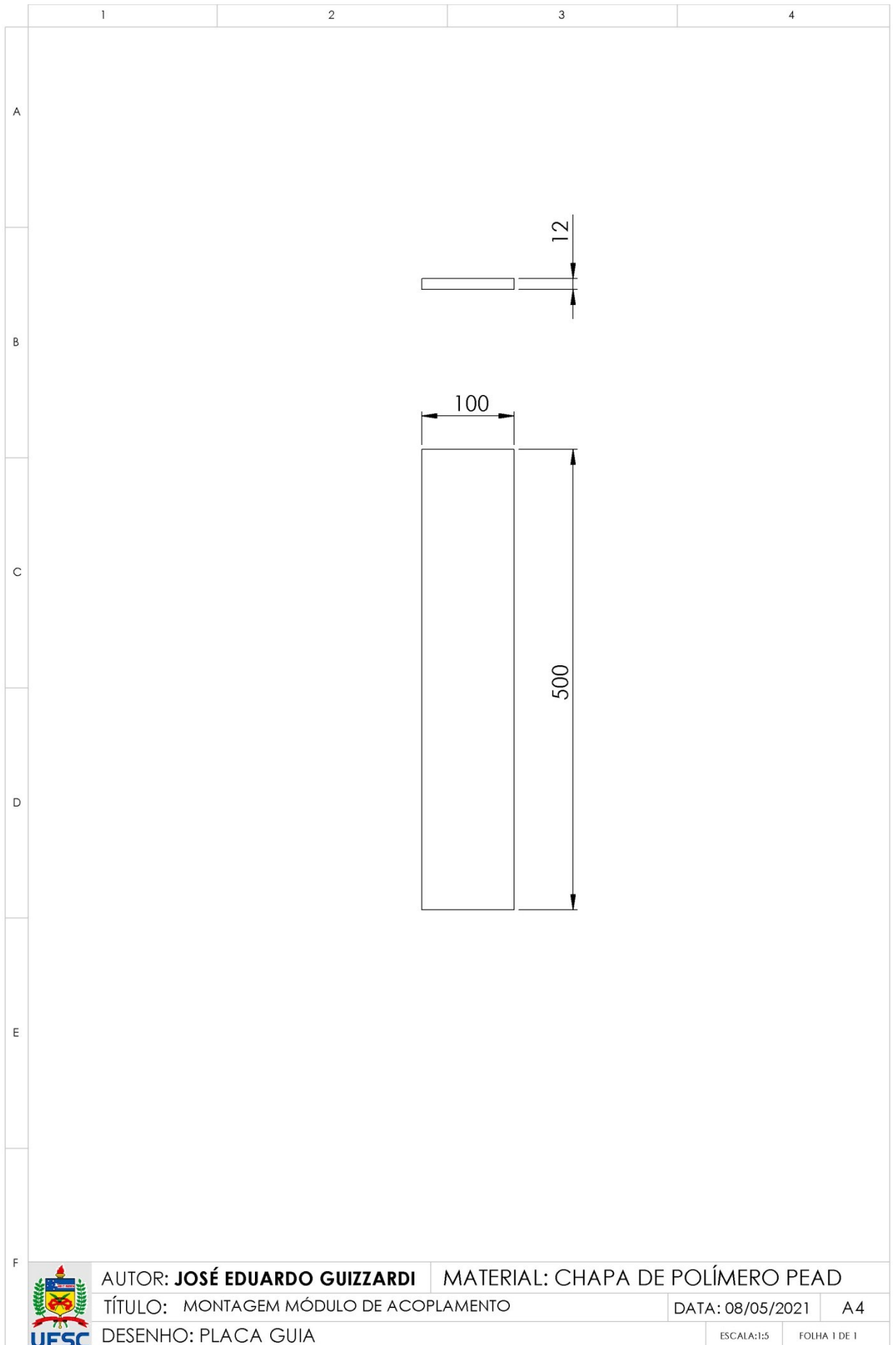
FOLHA 1 DE 1

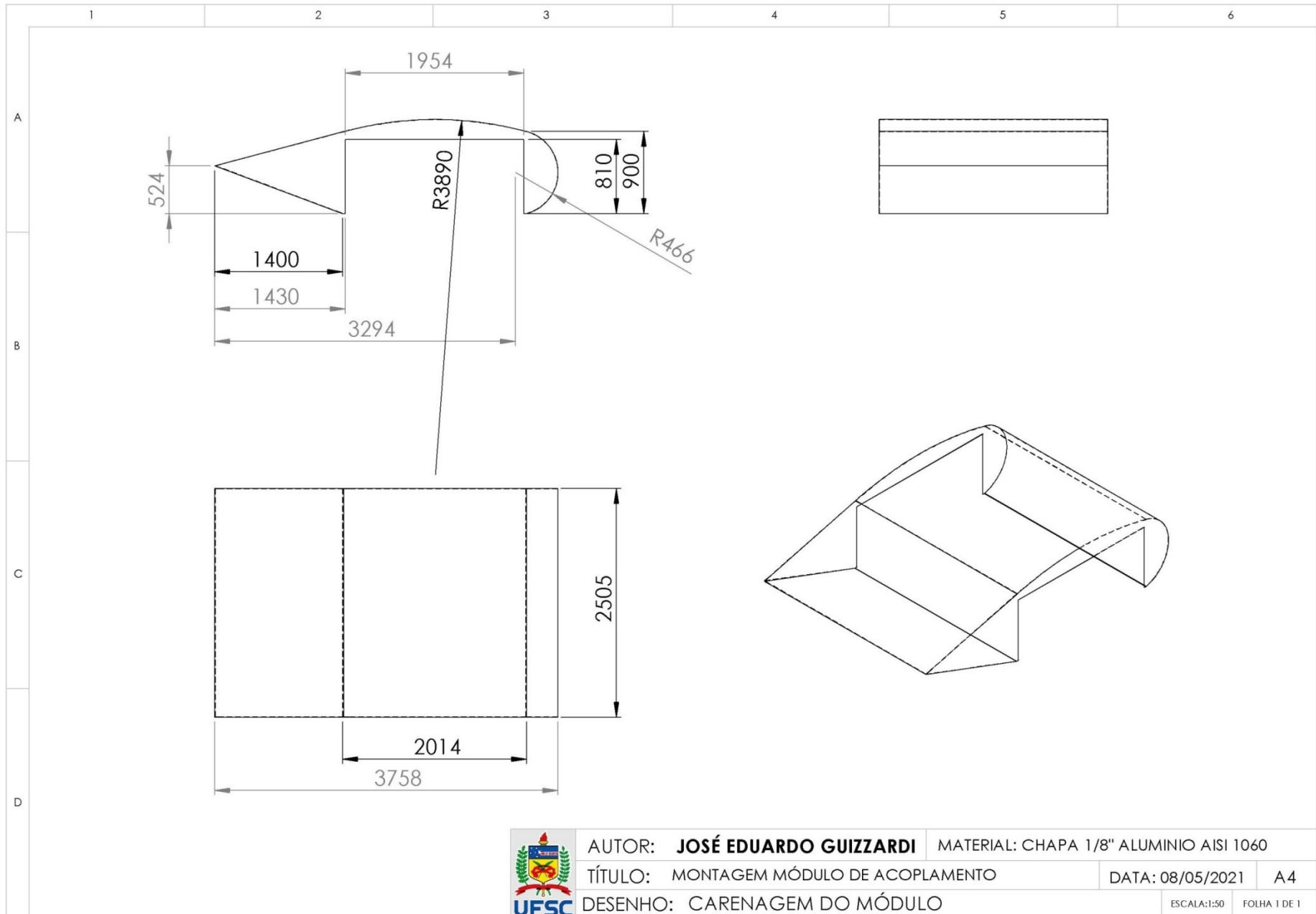












AUTOR: **JOSÉ EDUARDO GUIZZARDI**

MATERIAL: CHAPA 1/8" ALUMINIO AISI 1060

TÍTULO: MONTAGEM MÓDULO DE ACOPLAMENTO

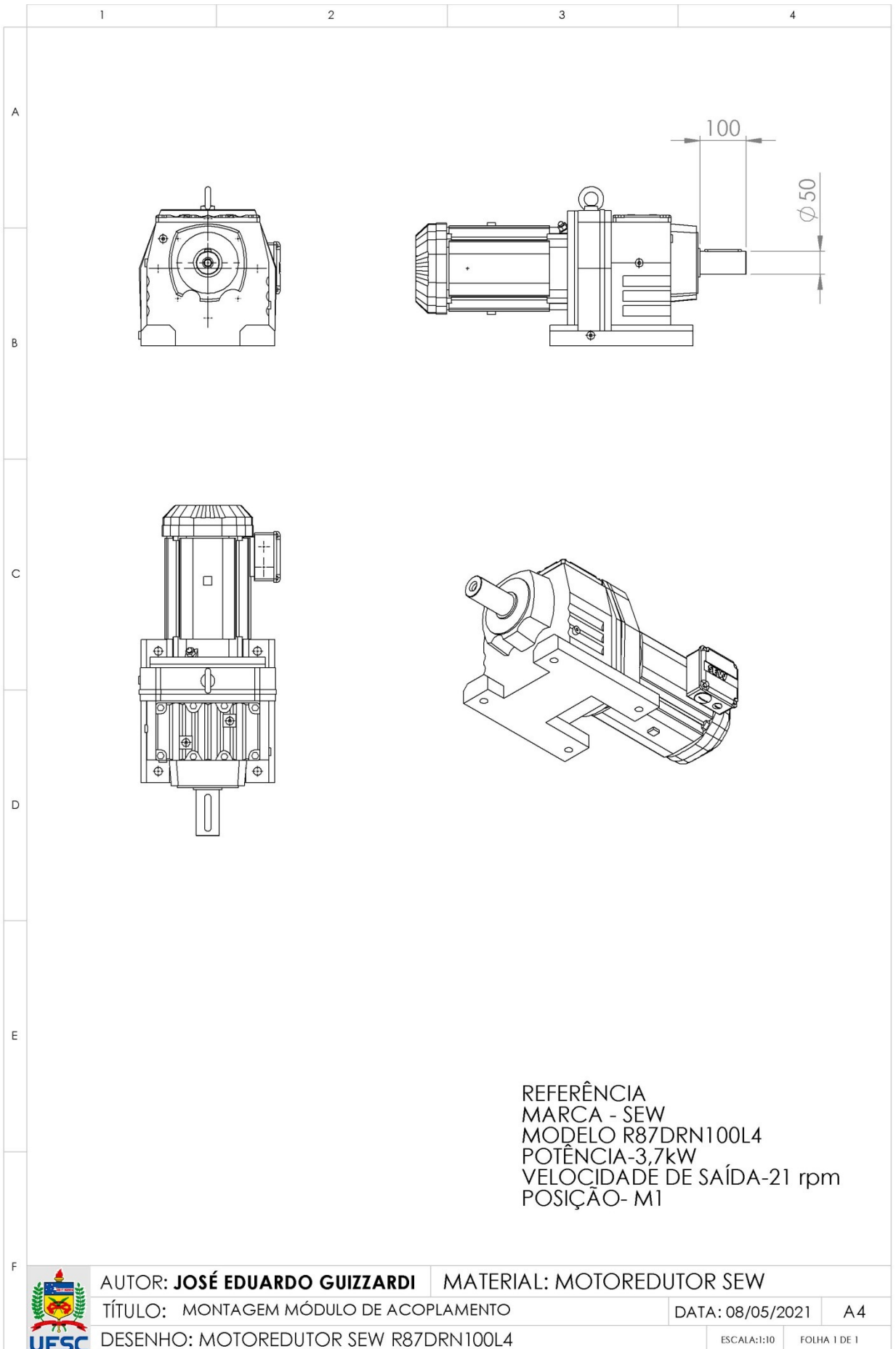
DATA: 08/05/2021

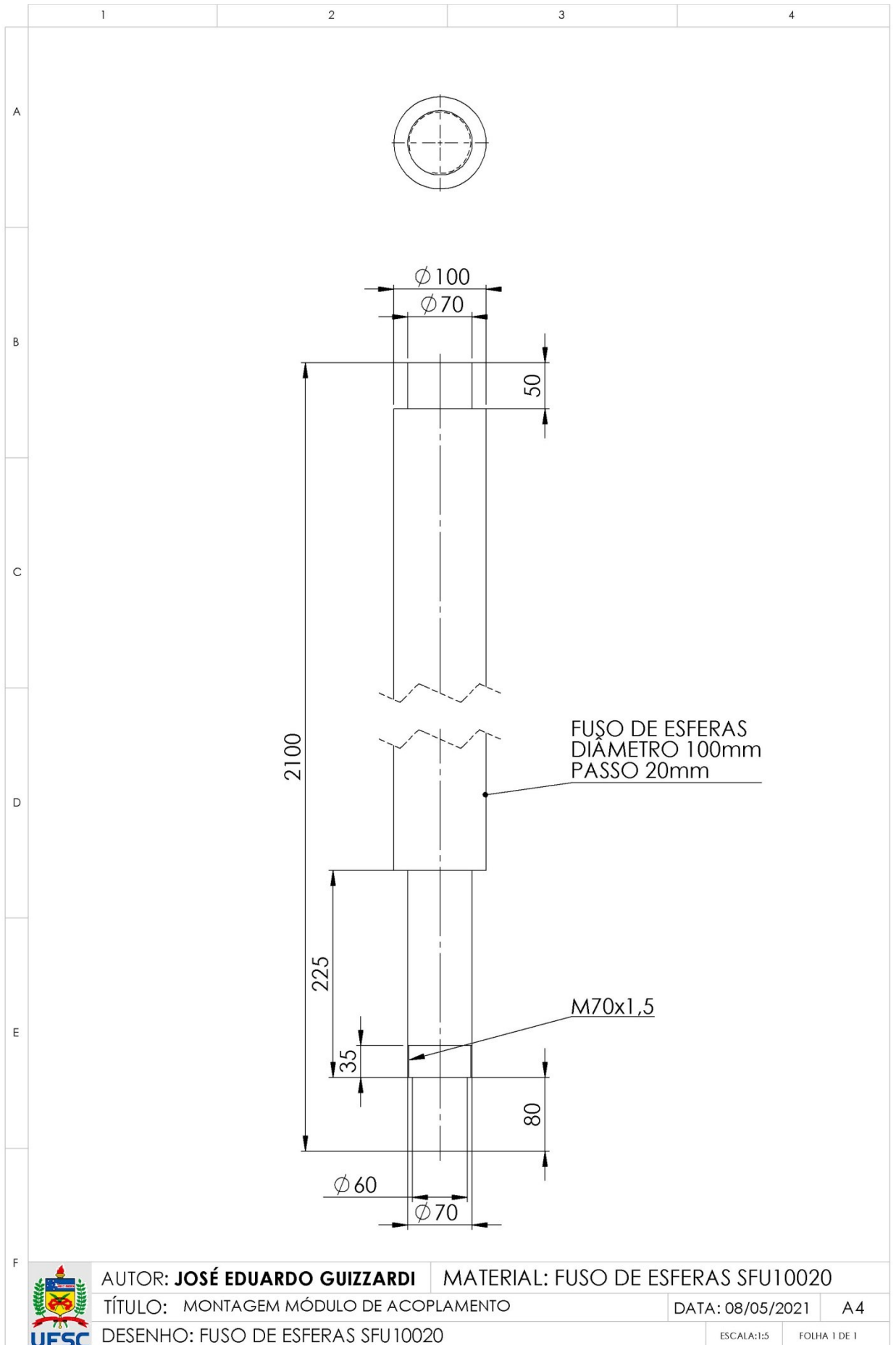
A4

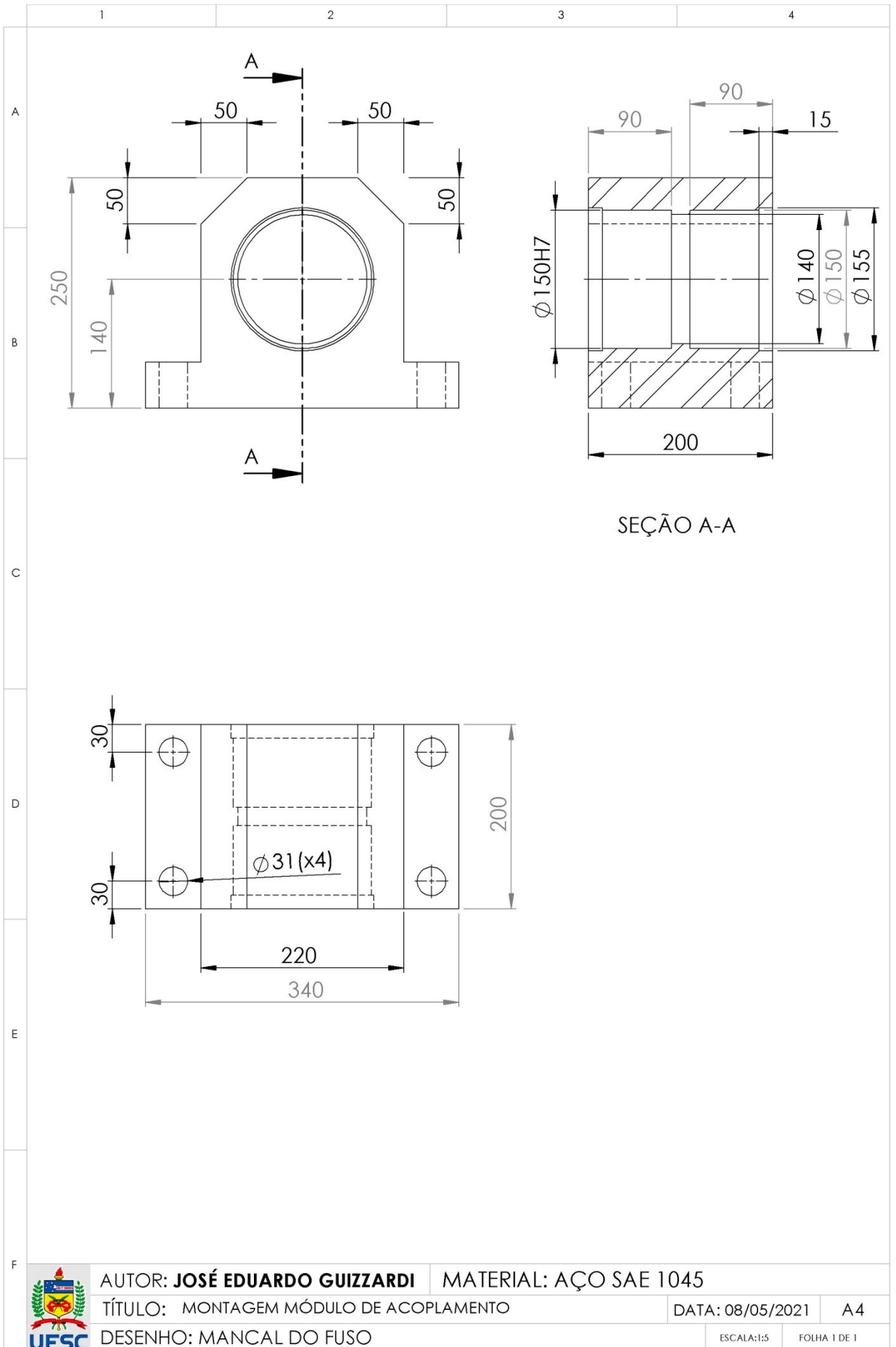
DESENHO: CARENAGEM DO MÓDULO

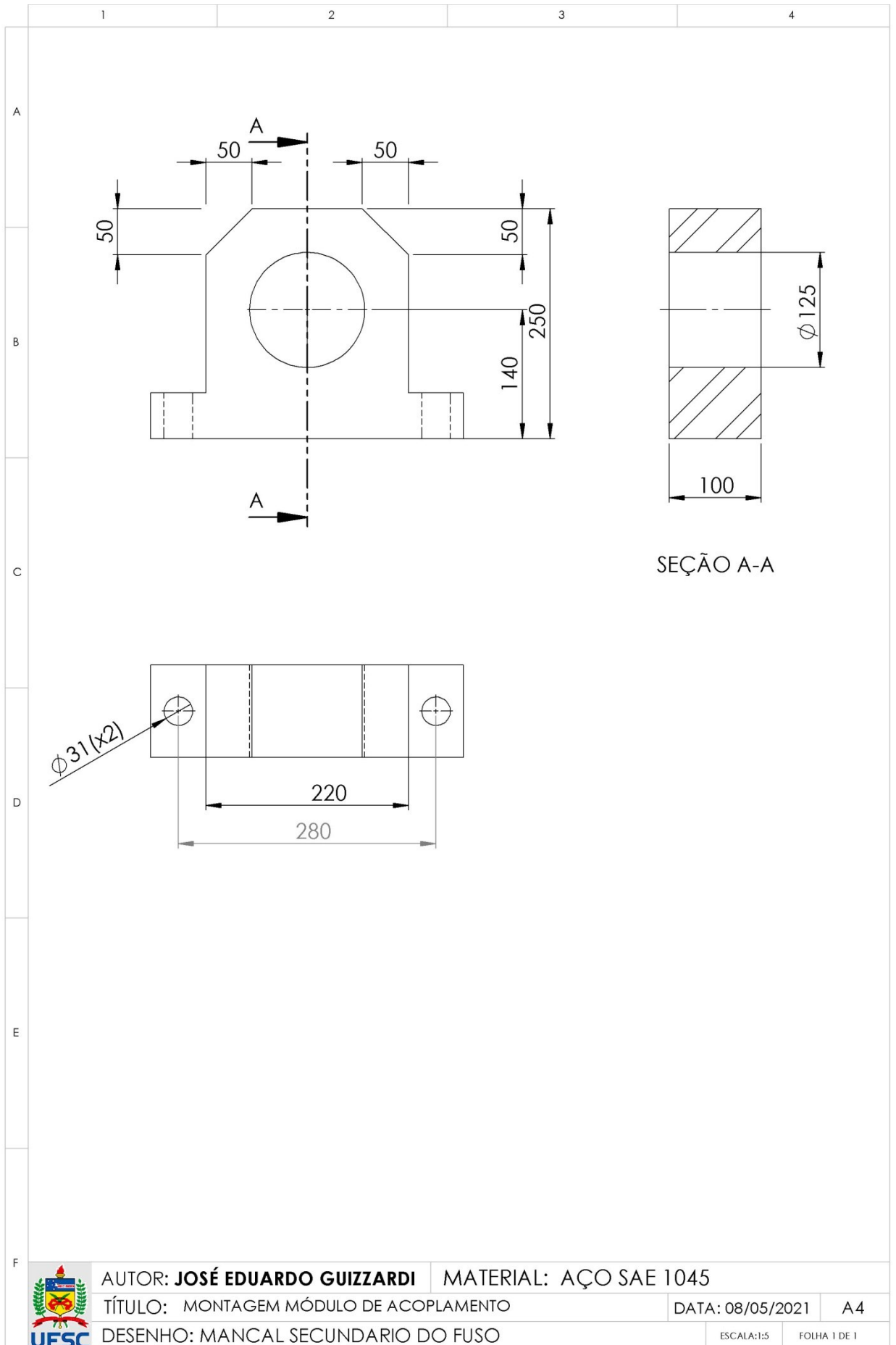
ESCALA:1:50

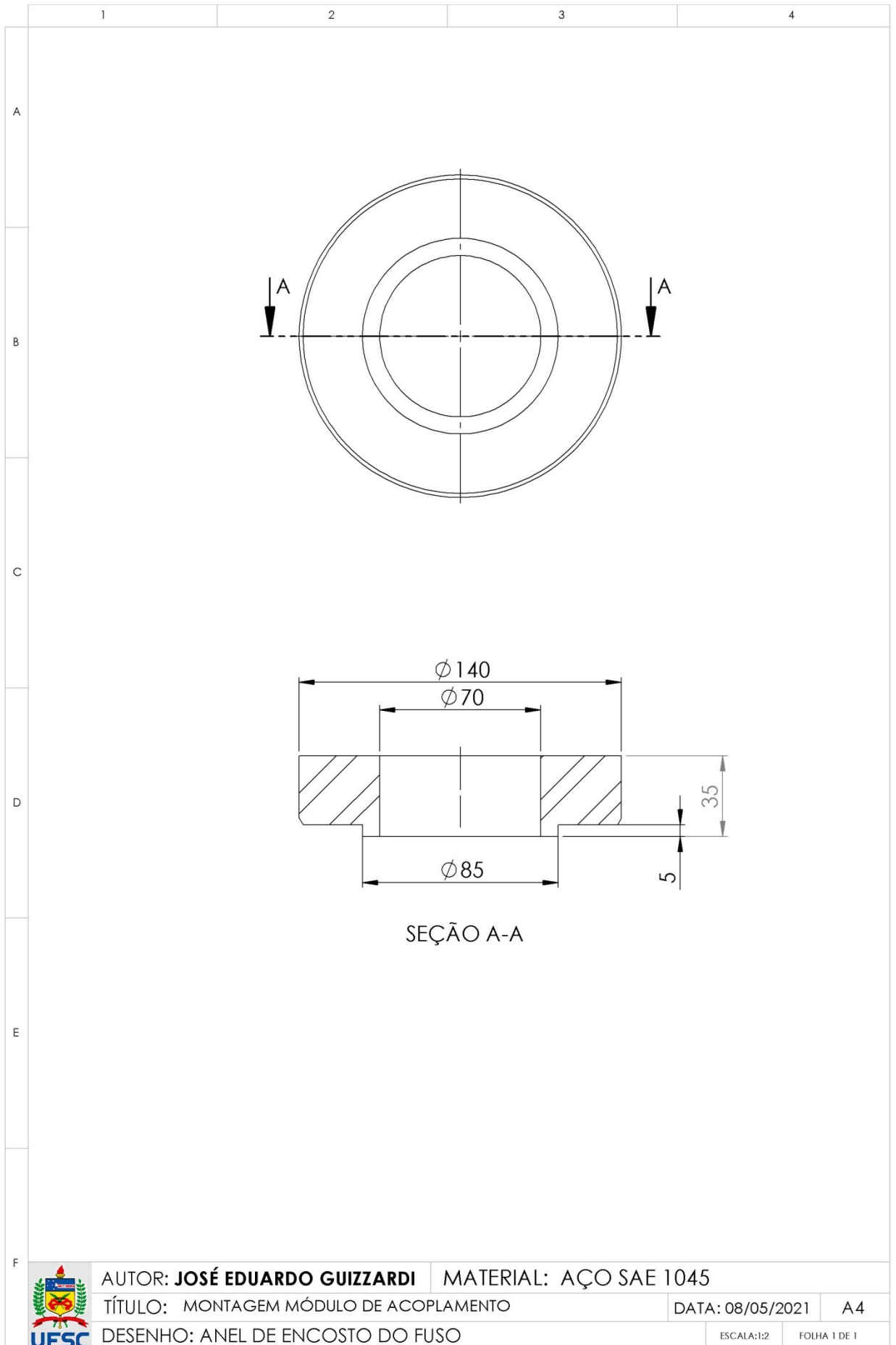
FOLHA 1 DE 1

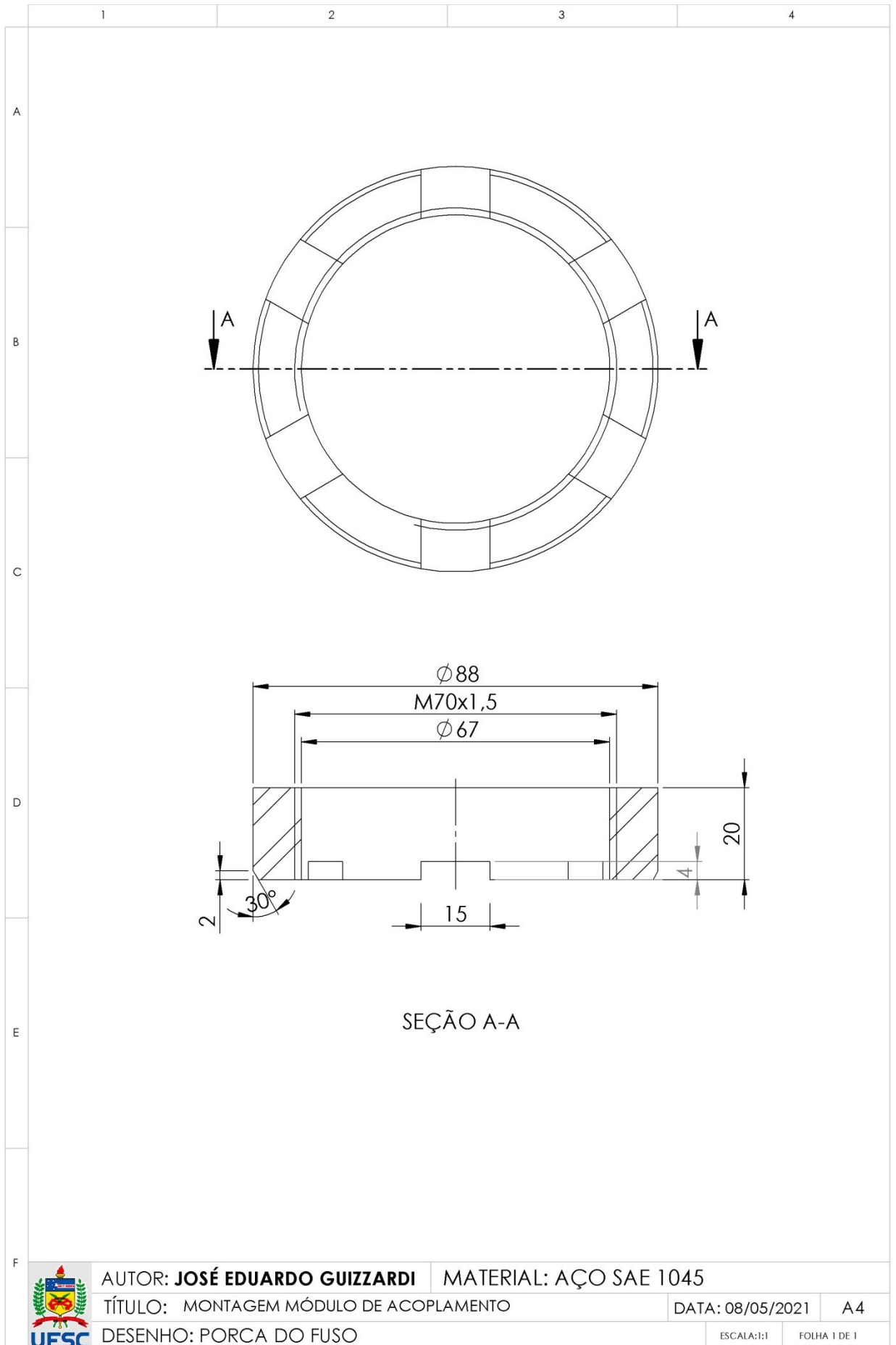


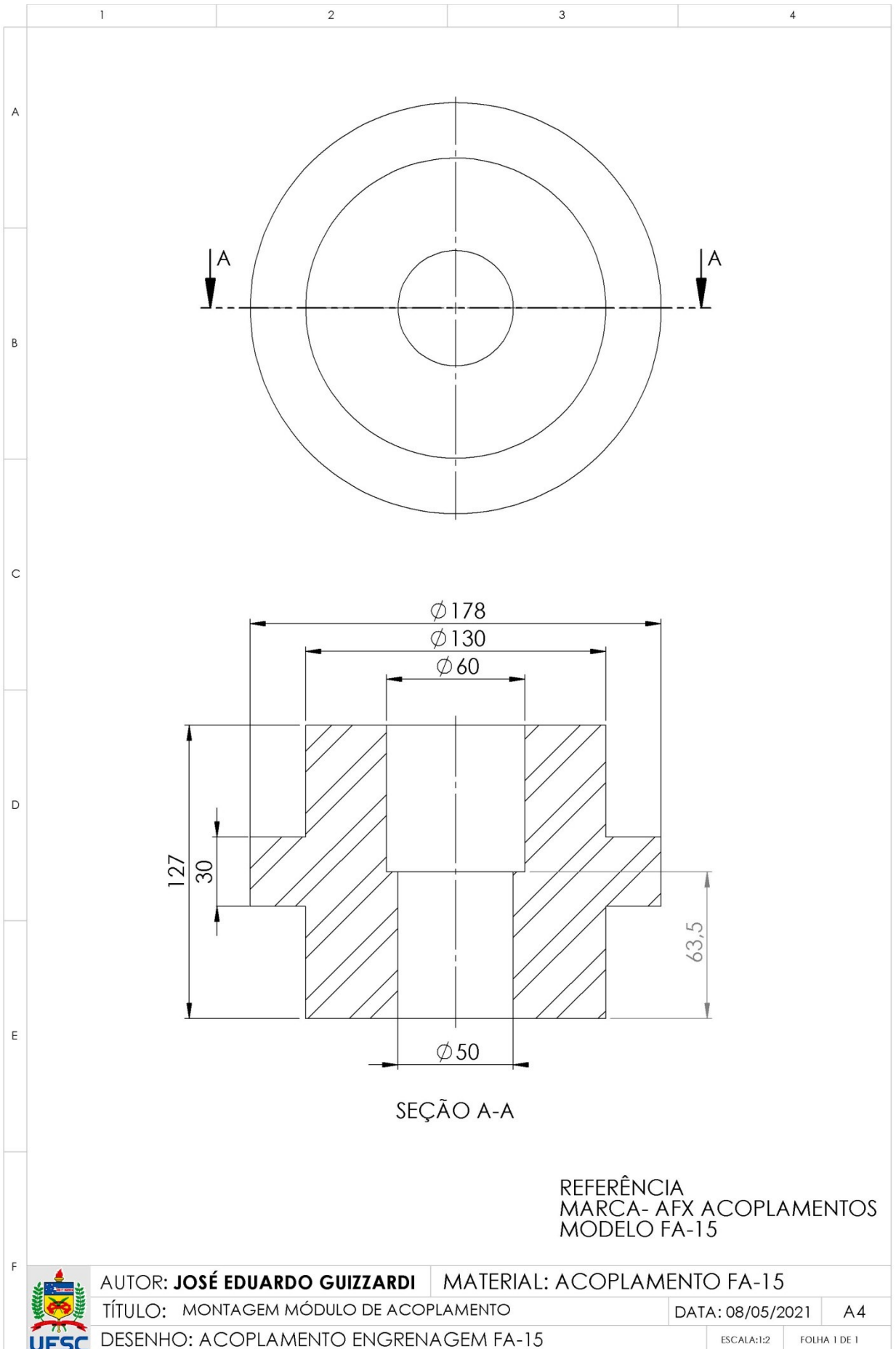












REFERÊNCIA
MARCA- AFX ACOPLAMENTOS
MODELO FA-15



AUTOR: **JOSÉ EDUARDO GUIZZARDI**

MATERIAL: ACOPLAMENTO FA-15

TÍTULO: MONTAGEM MÓDULO DE ACOPLAMENTO

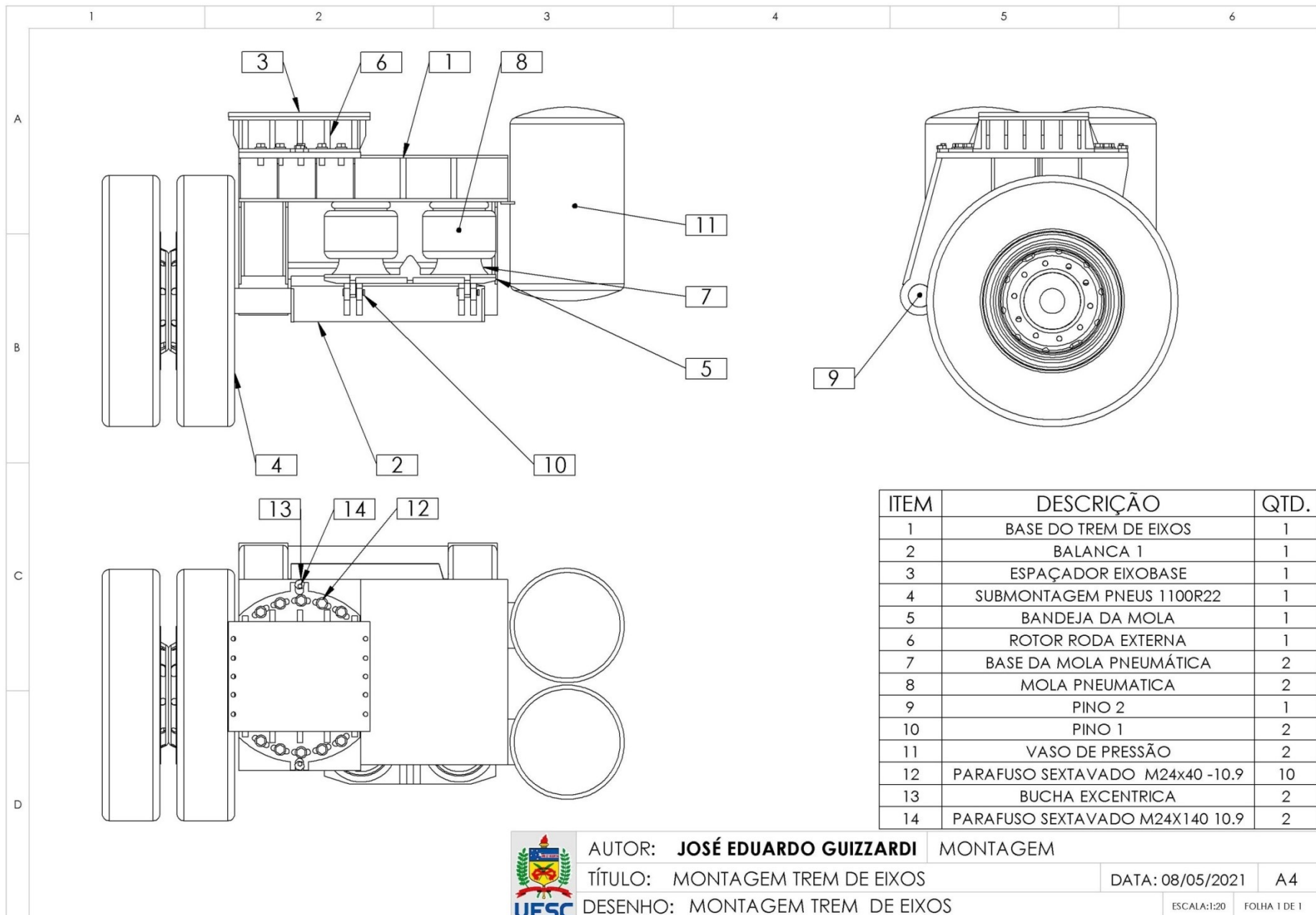
DATA: 08/05/2021

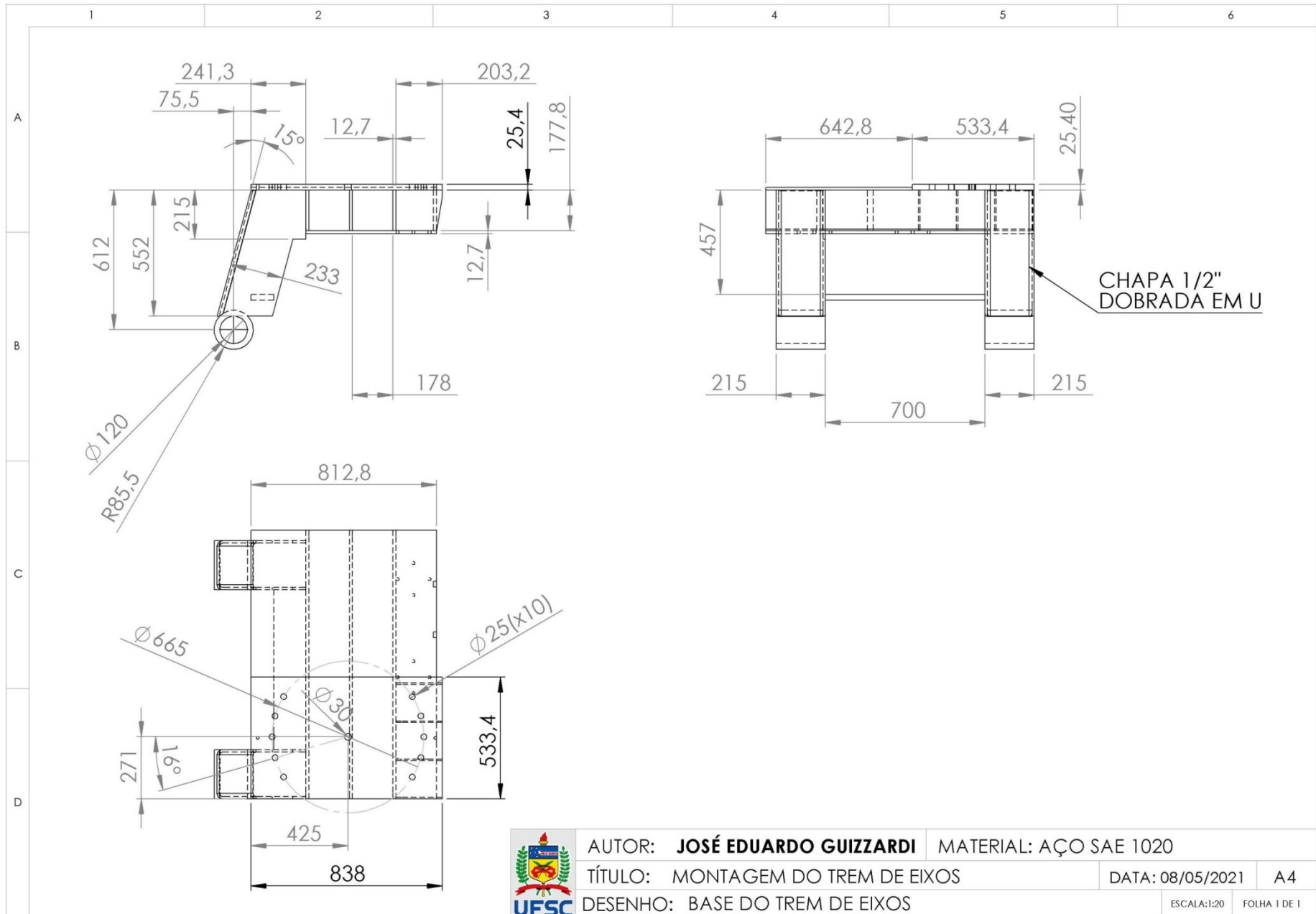
A4

DESENHO: ACOPLAMENTO ENGRENAGEM FA-15

ESCALA:1:2

FOLHA 1 DE 1





AUTOR: **JOSÉ EDUARDO GUIZZARDI** MATERIAL: AÇO SAE 1020

TÍTULO: MONTAGEM DO TREM DE EIXOS

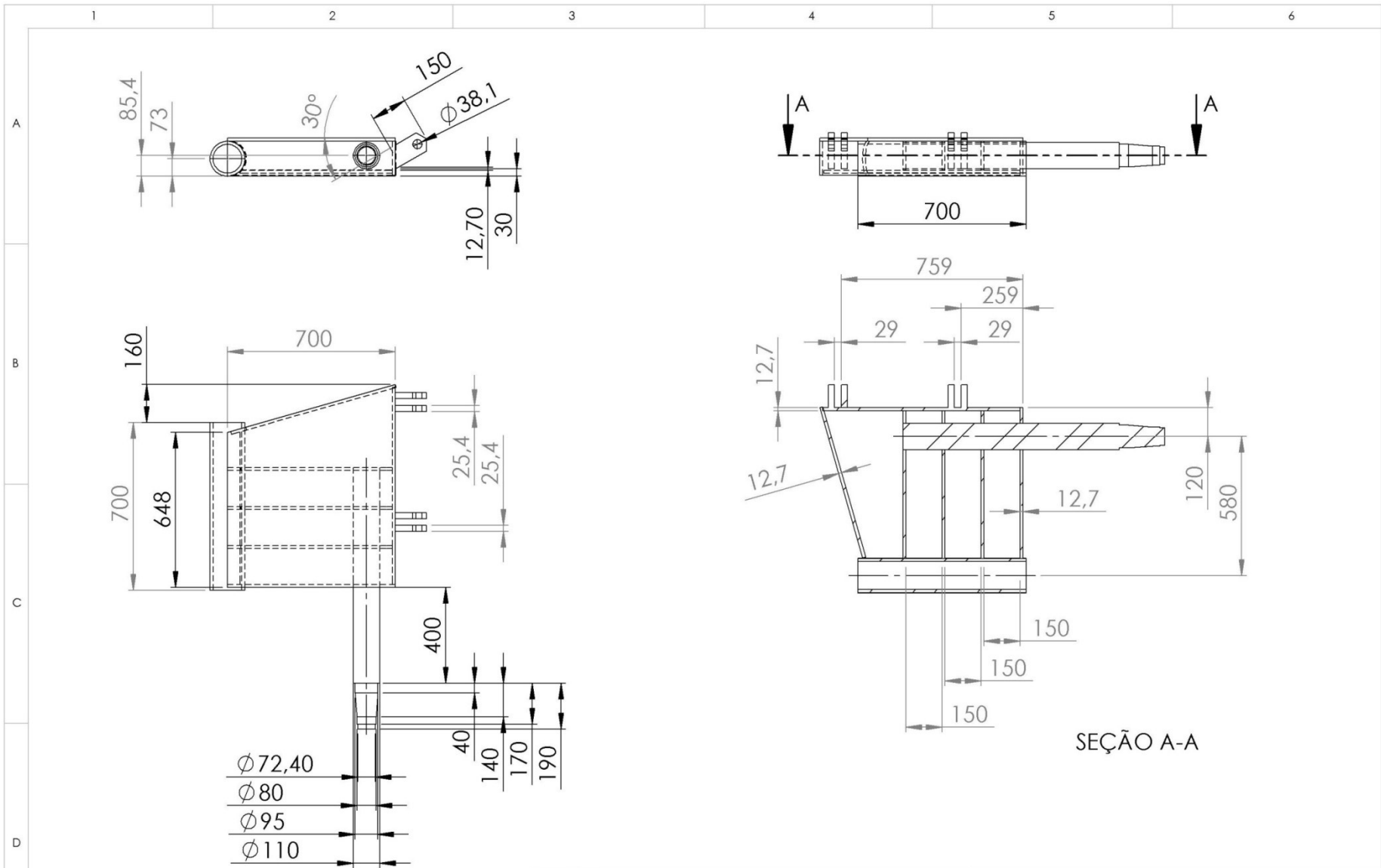
DATA: 08/05/2021

A4

DESENHO: BASE DO TREM DE EIXOS

ESCALA: 1:20

FOLHA 1 DE 1



AUTOR: **JOSÉ EDUARDO GUIZZARDI** MATERIAL: AÇO SAE 1020

TÍTULO: MONTAGEM DO TREM DE EIXOS

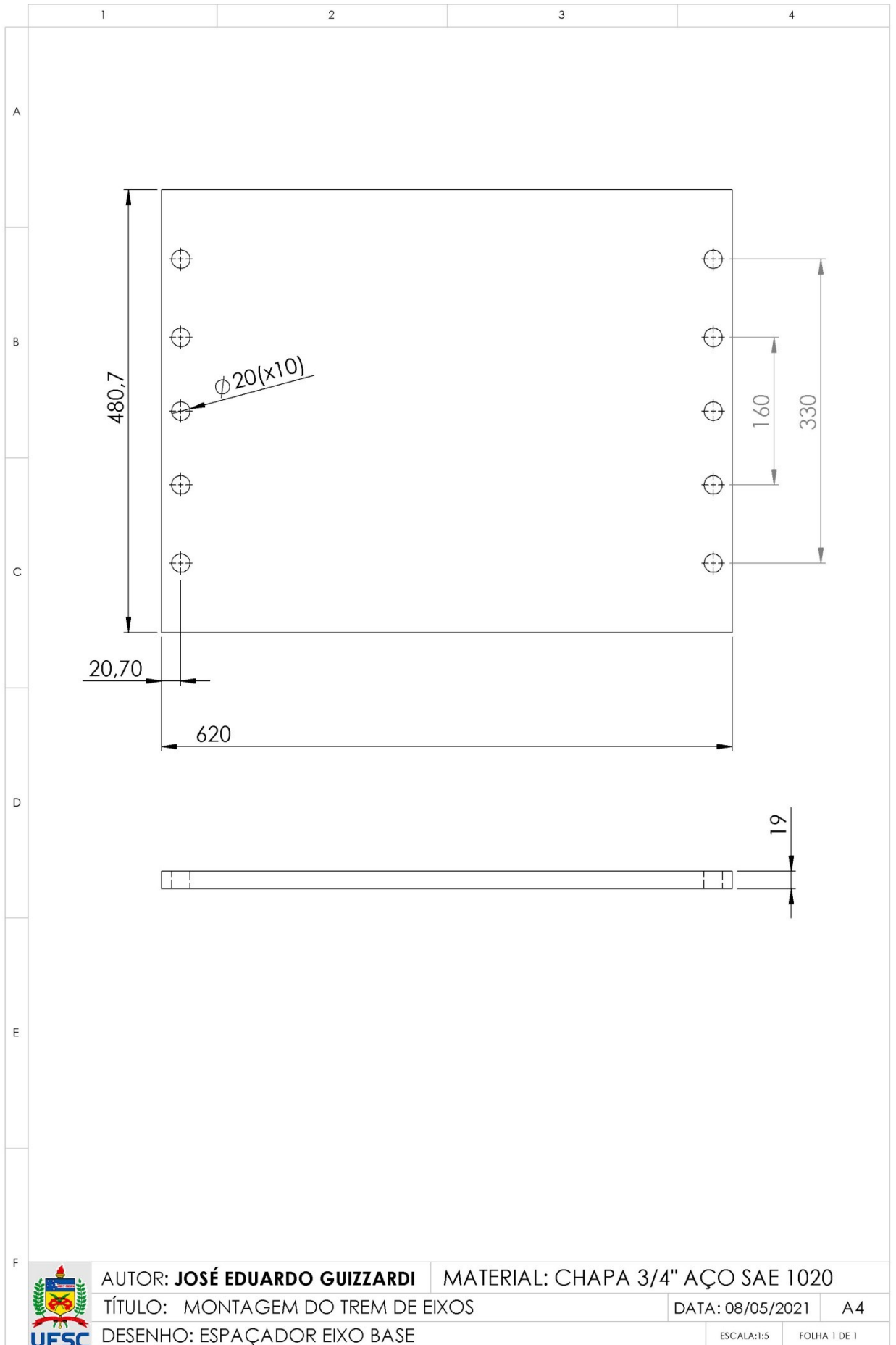
DATA: 08/05/2021

A4

DESENHO: BALANCA 1

ESCALA: 1:20

FOLHA 1 DE 1



AUTOR: **JOSÉ EDUARDO GUIZZARDI**

MATERIAL: CHAPA 3/4" AÇO SAE 1020

TÍTULO: MONTAGEM DO TREM DE EIXOS

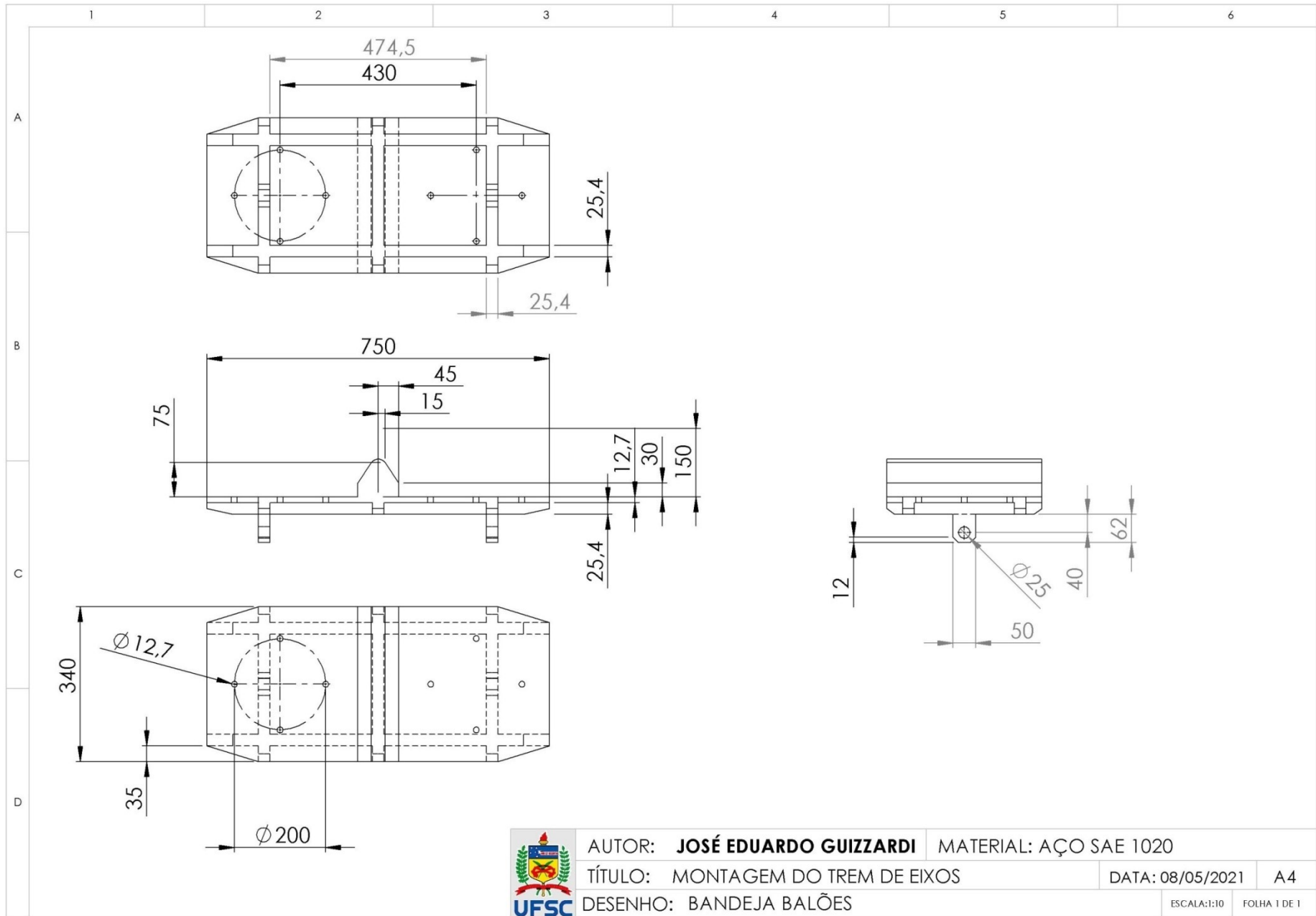
DATA: 08/05/2021

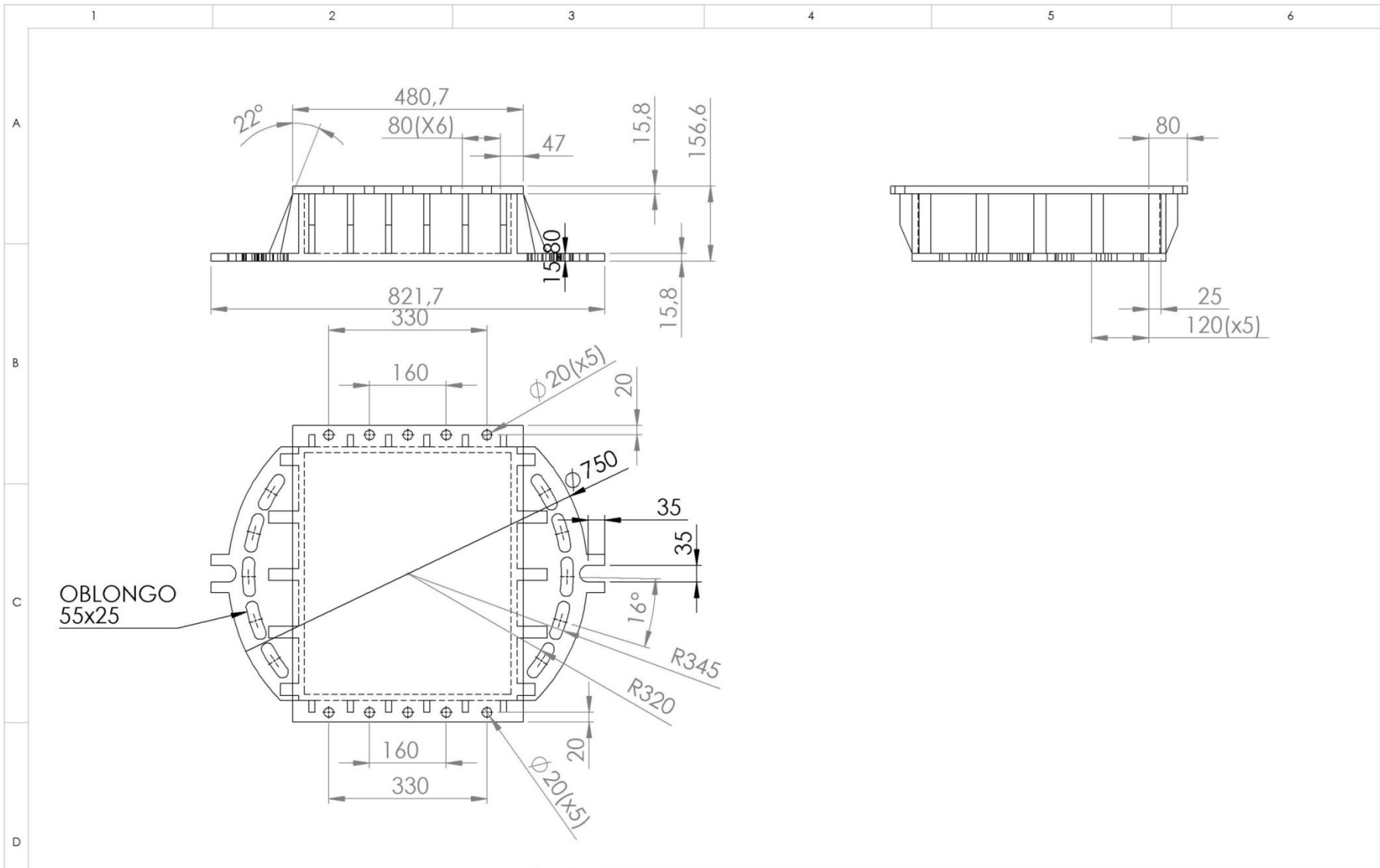
A4

DESENHO: ESPAÇADOR EIXO BASE

ESCALA:1:5

FOLHA 1 DE 1





AUTOR: **JOSÉ EDUARDO GUIZZARDI** MATERIAL: AÇO SAE 1020

TÍTULO: MONTAGEM DO TREM DE EIXOS

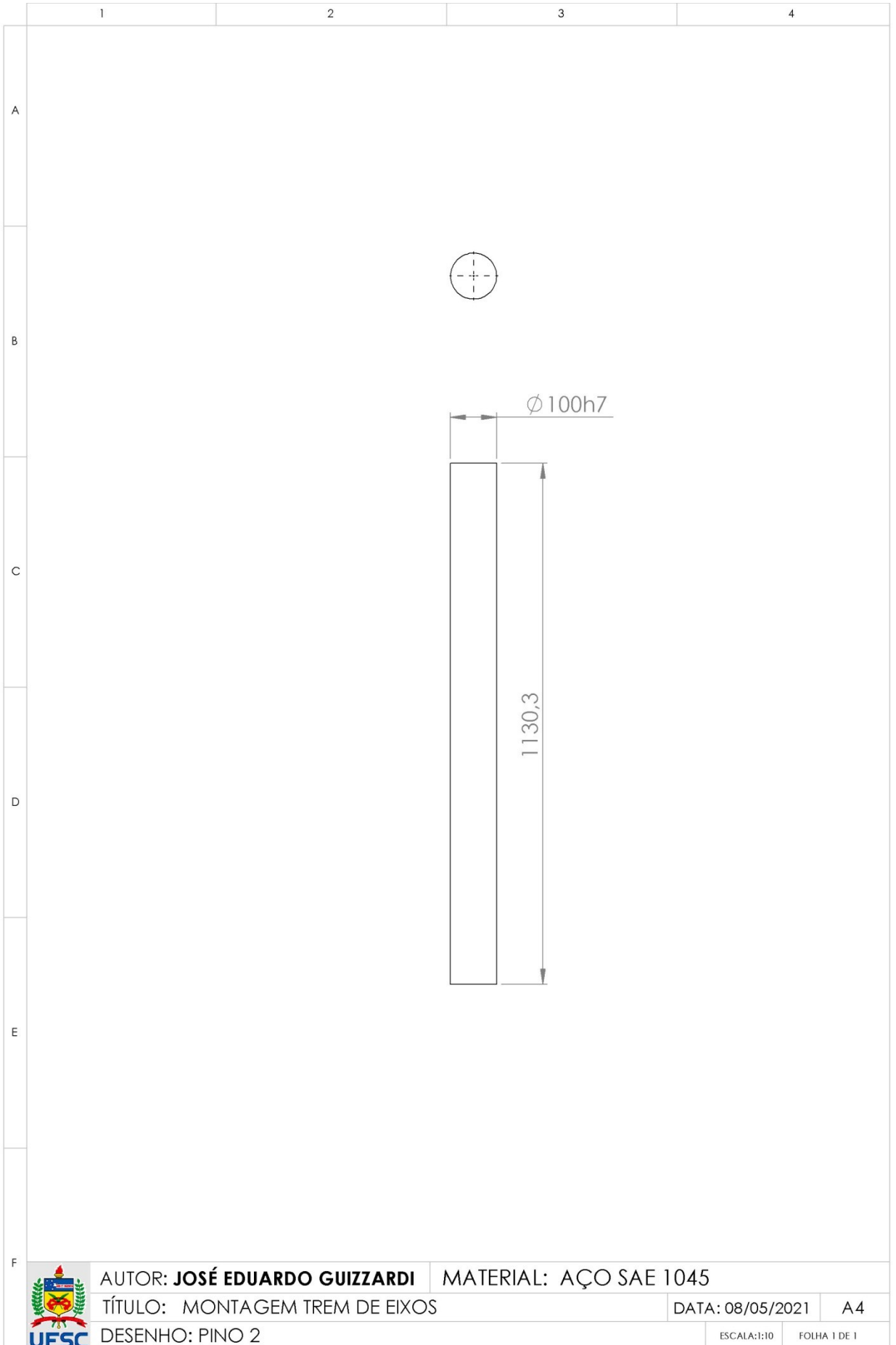
DATA: 08/05/2021

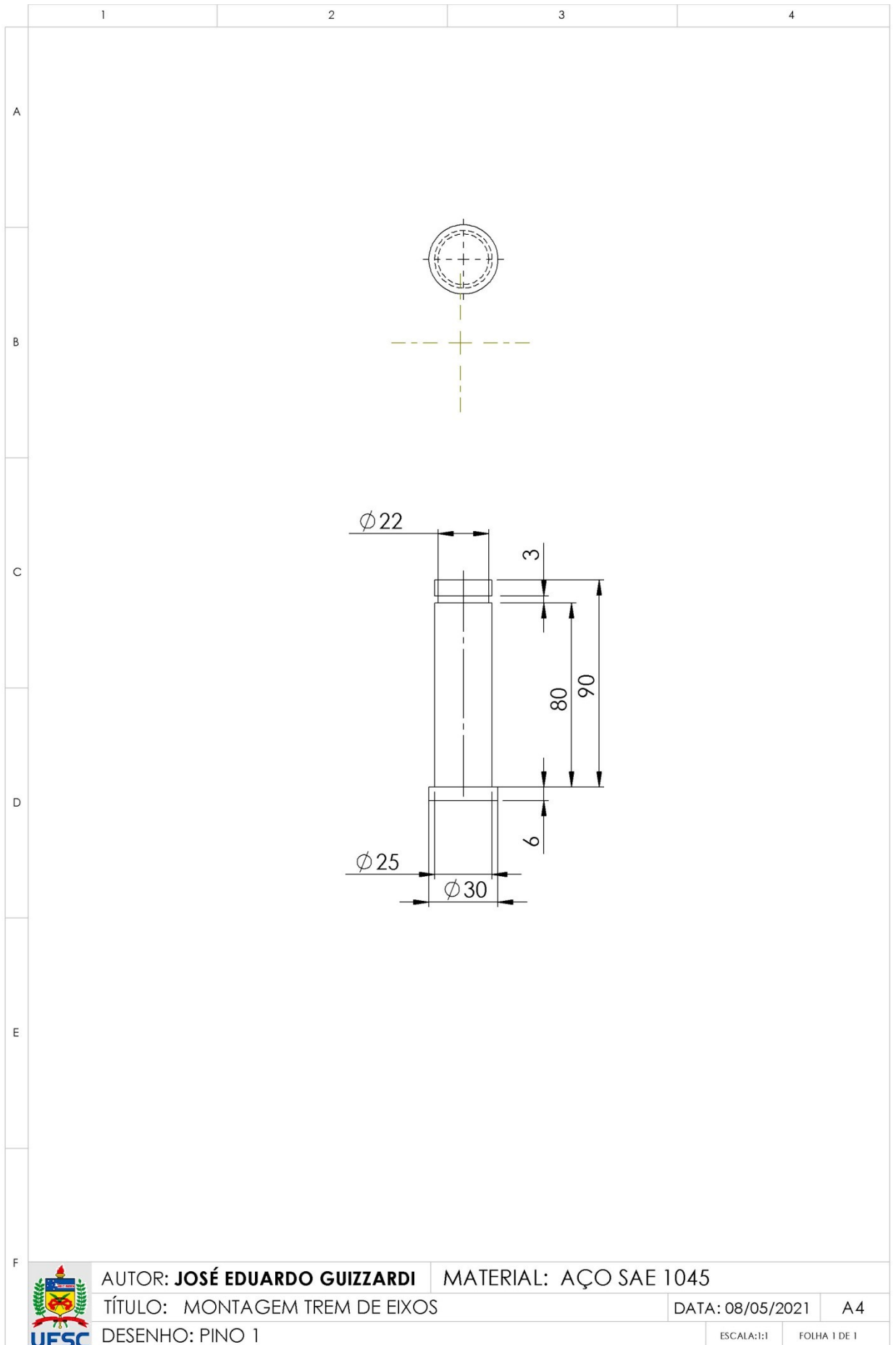
A4

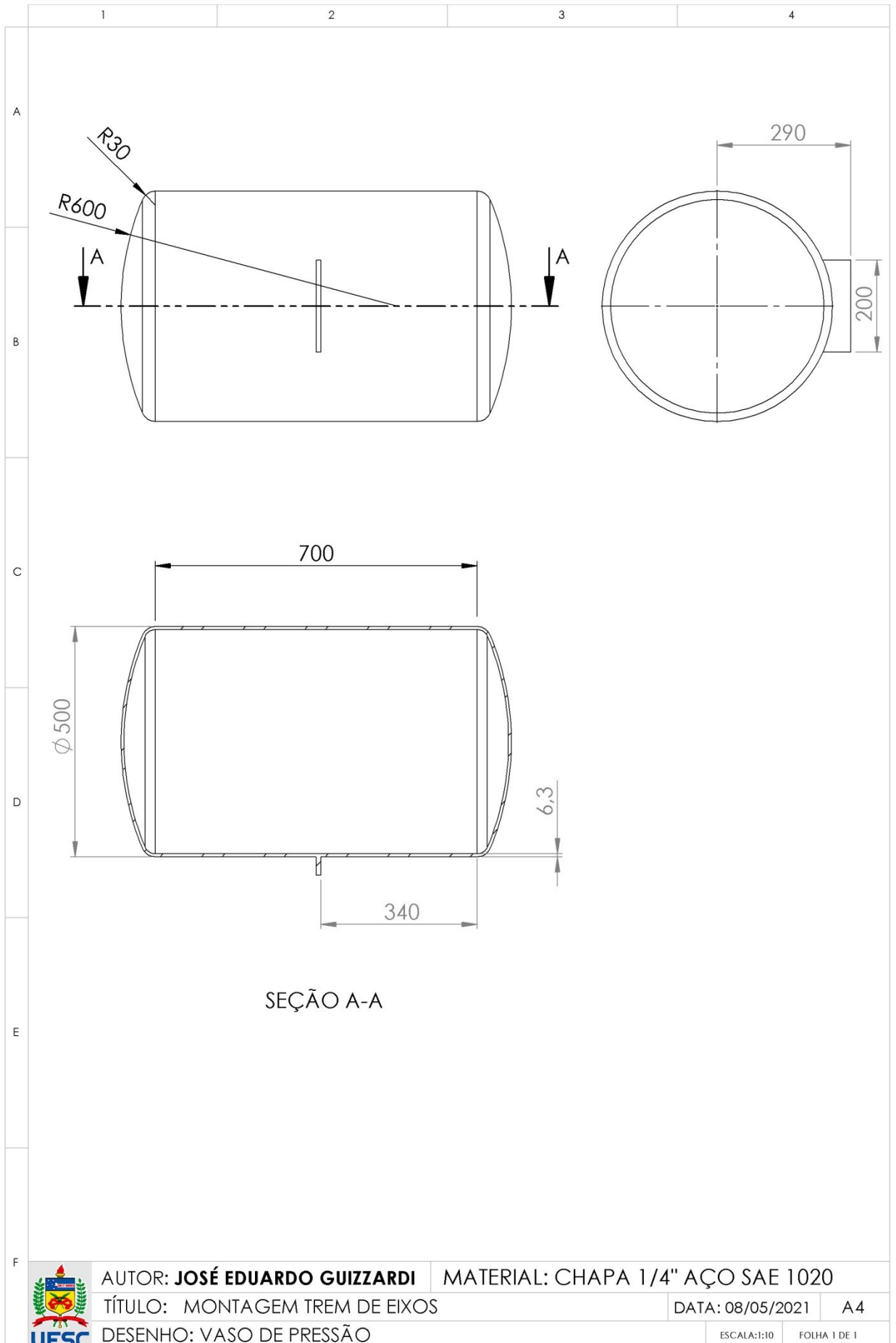
DESENHO: ROTOR RODA EXTERNA

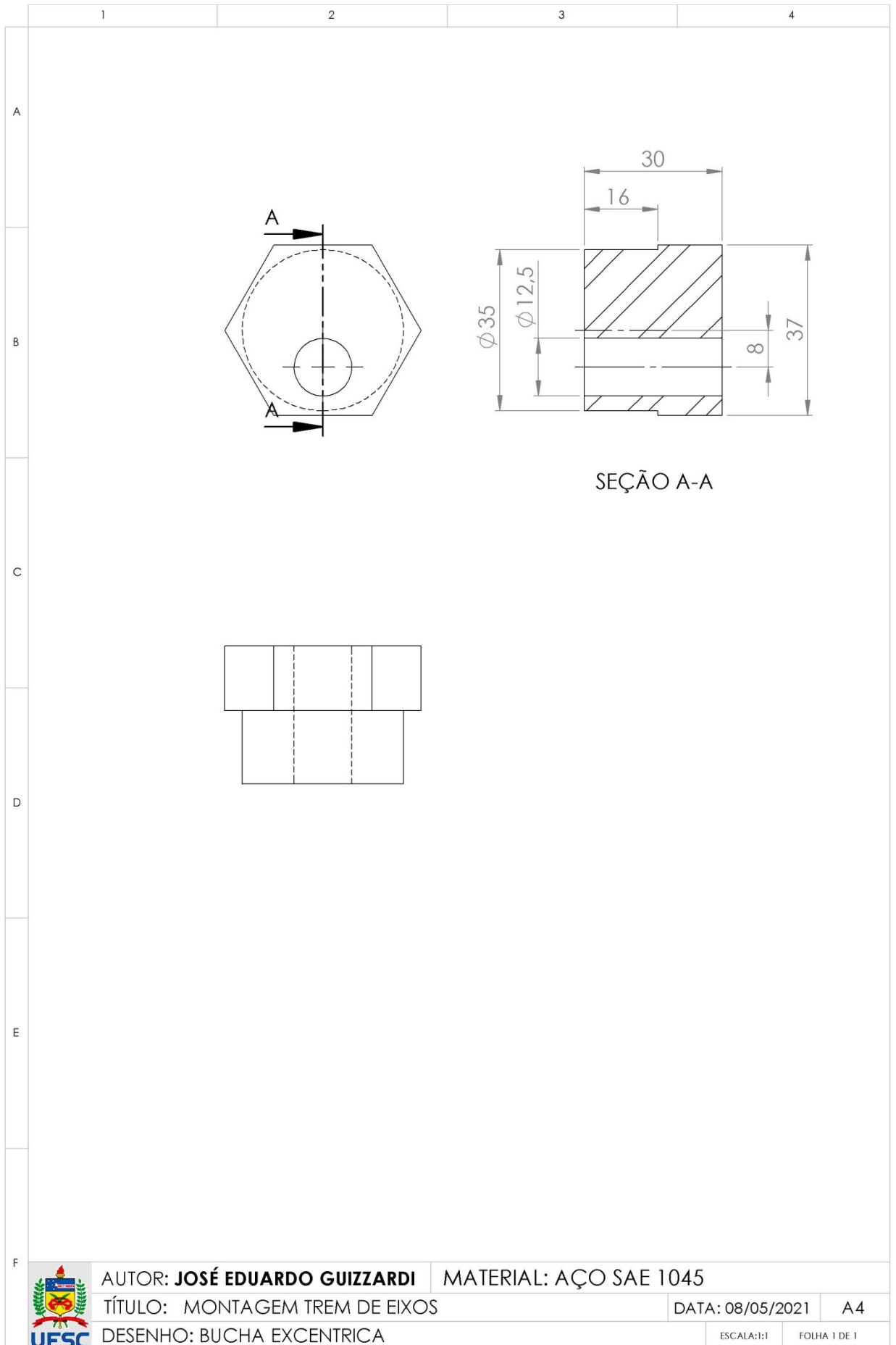
ESCALA: 1:10

FOLHA 1 DE 1



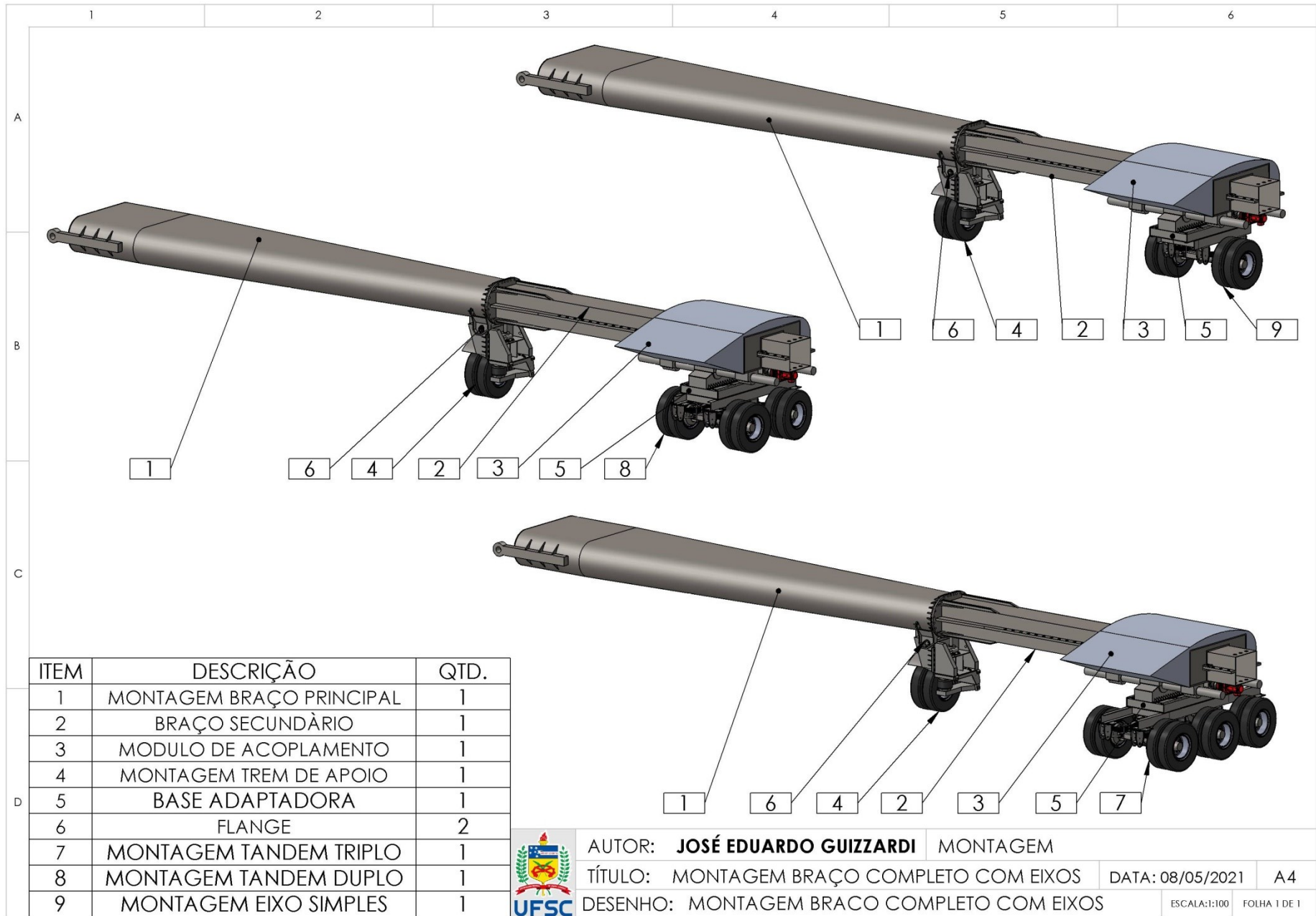






ANEXO VI

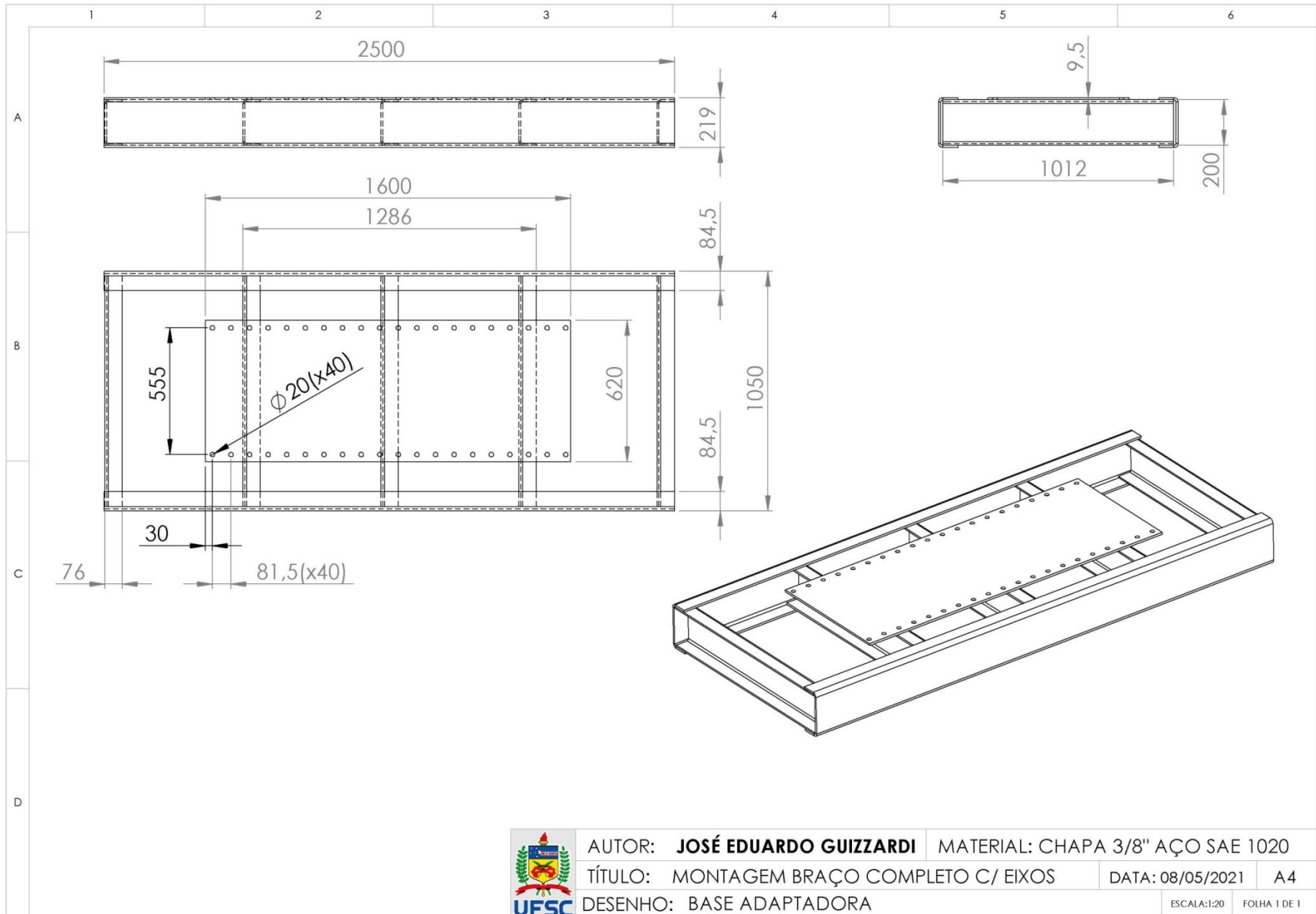
SISTEMA DE ACOPLAMENTO DE
EIXOS INTEIROS



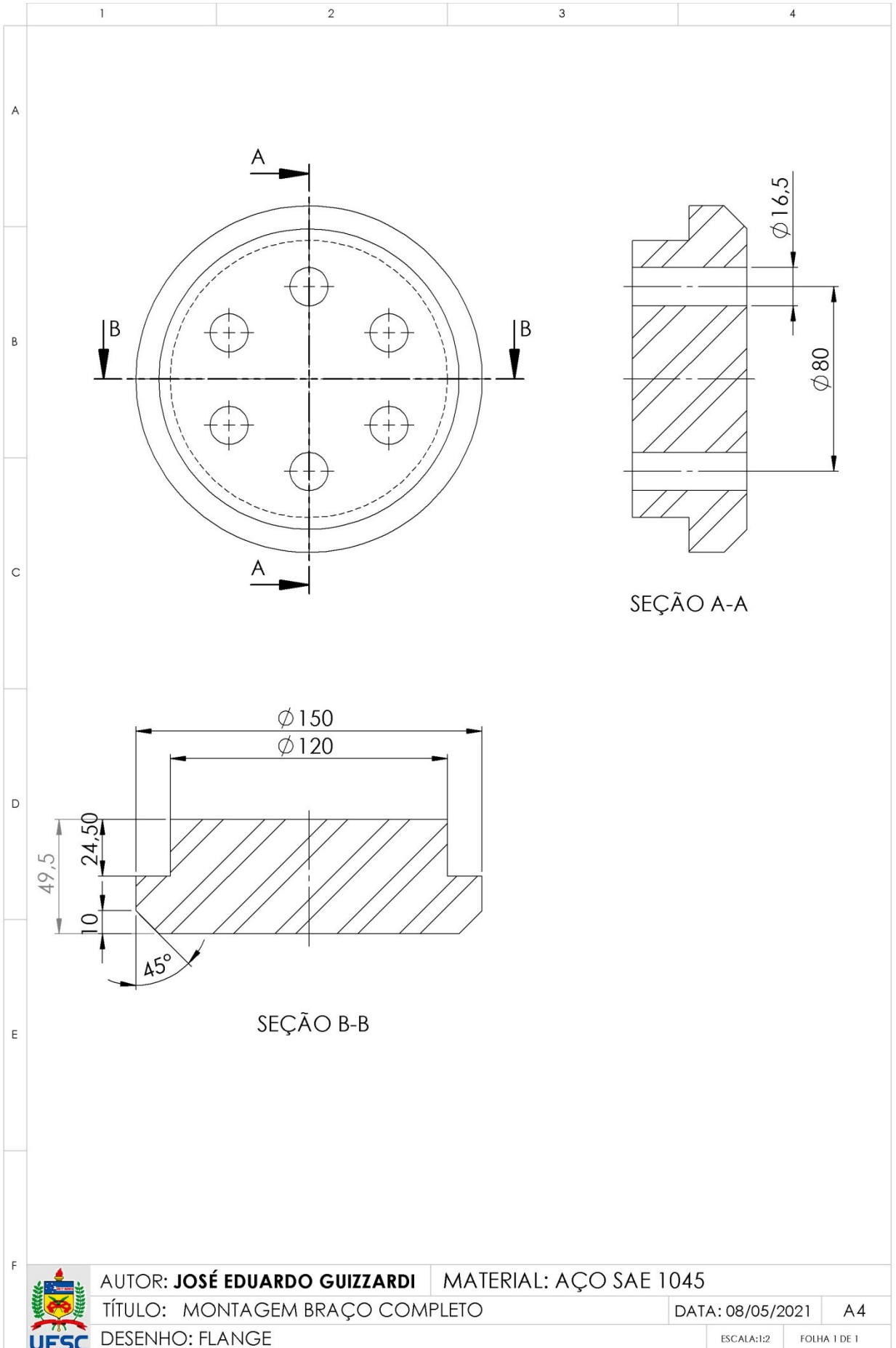
ITEM	DESCRIÇÃO	QTD.
1	MONTAGEM BRAÇO PRINCIPAL	1
2	BRAÇO SECUNDÁRIO	1
3	MODULO DE ACOPLAMENTO	1
4	MONTAGEM TREM DE APOIO	1
5	BASE ADAPTADORA	1
6	FLANGE	2
7	MONTAGEM TANDEM TRIPLO	1
8	MONTAGEM TANDEM DUPLO	1
9	MONTAGEM EIXO SIMPLES	1



AUTOR: **JOSÉ EDUARDO GUIZZARDI** MONTAGEM
 TÍTULO: MONTAGEM BRAÇO COMPLETO COM EIXOS DATA: 08/05/2021 A4
 DESENHO: MONTAGEM BRACO COMPLETO COM EIXOS ESCALA:1:100 FOLHA 1 DE 1



AUTOR: **JOSÉ EDUARDO GUIZZARDI** MATERIAL: CHAPA 3/8" AÇO SAE 1020
 TÍTULO: MONTAGEM BRAÇO COMPLETO C/ EIXOS DATA: 08/05/2021 A4
 DESENHO: BASE ADAPTADORA ESCALA: 1:20 FOLHA 1 DE 1



AUTOR: **JOSÉ EDUARDO GUIZZARDI**

MATERIAL: AÇO SAE 1045

TÍTULO: MONTAGEM BRAÇO COMPLETO

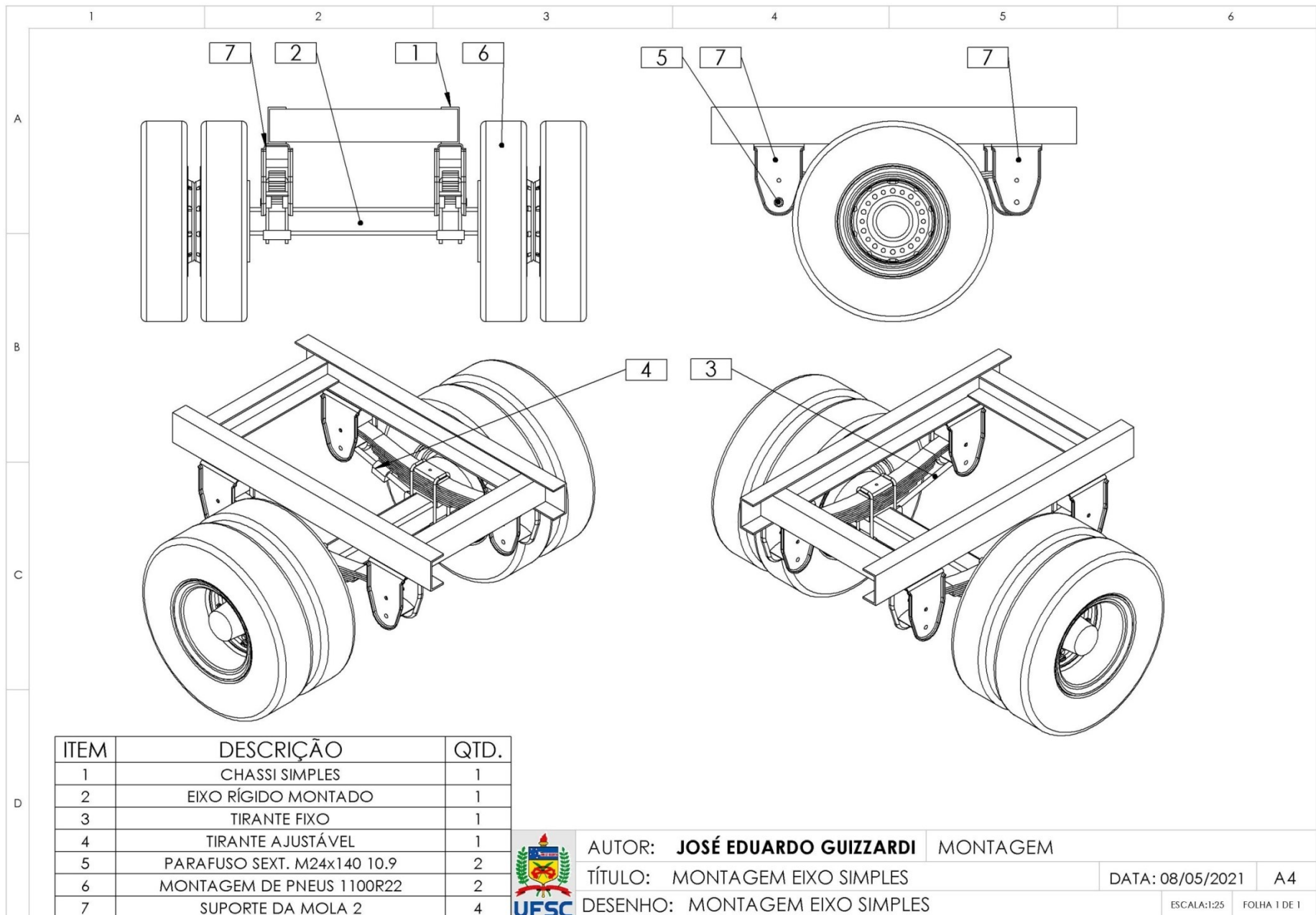
DATA: 08/05/2021

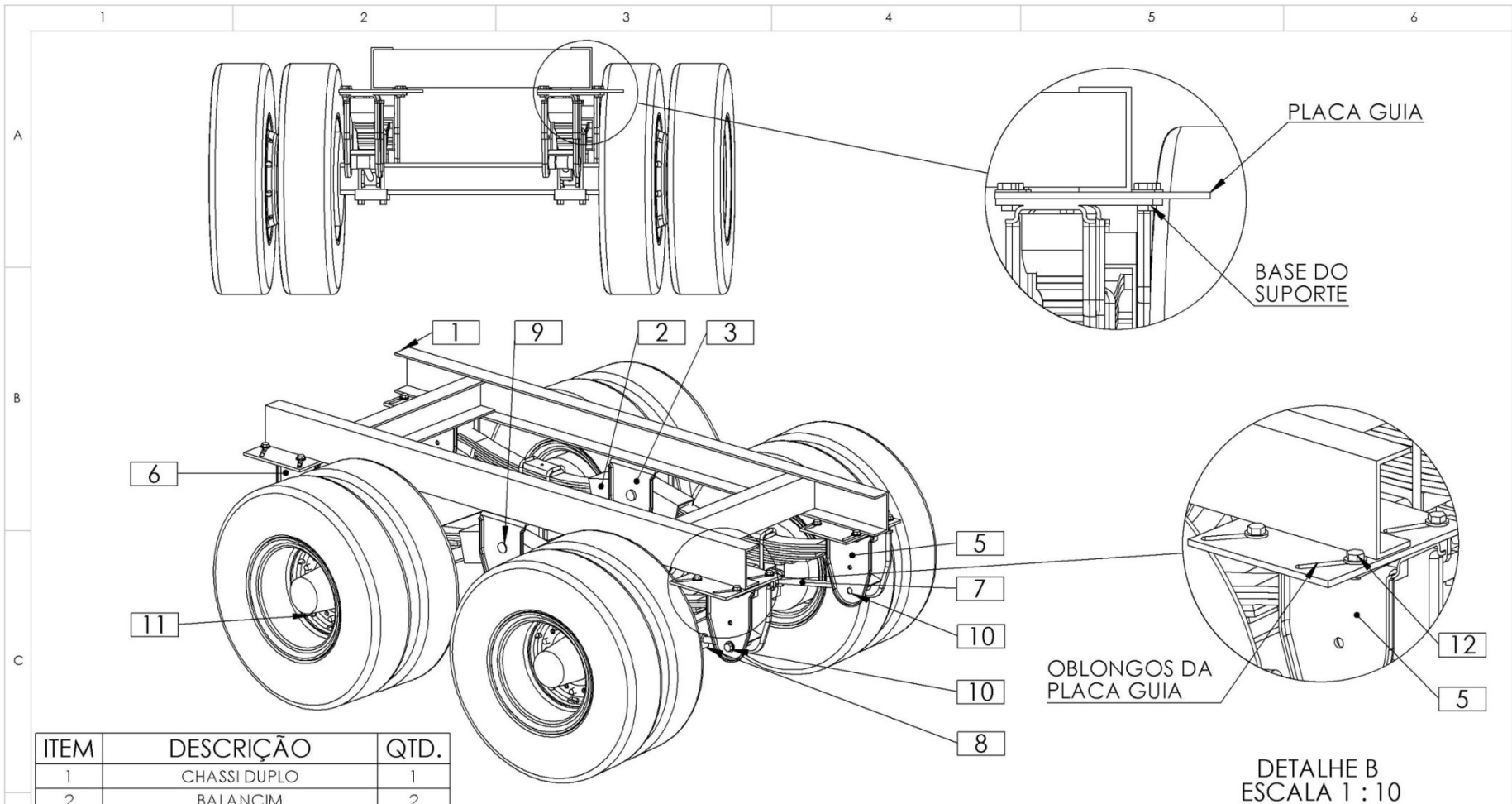
A4

DESENHO: FLANGE

ESCALA:1:2

FOLHA 1 DE 1





ITEM	DESCRIÇÃO	QTD.
1	CHASSI DUPLO	1
2	BALANCIM	2
3	SUPORTE DO BALANCIM	2
4	EIXO RÍGIDO MONTADO	2
5	SUPORTE DA MOLA 1	2
6	SUPORTE DA MOLA 2	2
7	TIRANTE FIXO	2
8	TIRANTE AJUSTÁVEL	2
9	PINO DO BALANCIM	2
10	PARAFUSO SEXT. M24x140 10.9	6
11	MONTAGEM DE PNEUS 1100R22	4
12	PARAFUSO SEXT. M20x35 10.9	16



AUTOR: **JOSÉ EDUARDO GUIZZARDI** MONTAGEM

TÍTULO: MONTAGEM TANDEM DUPLO

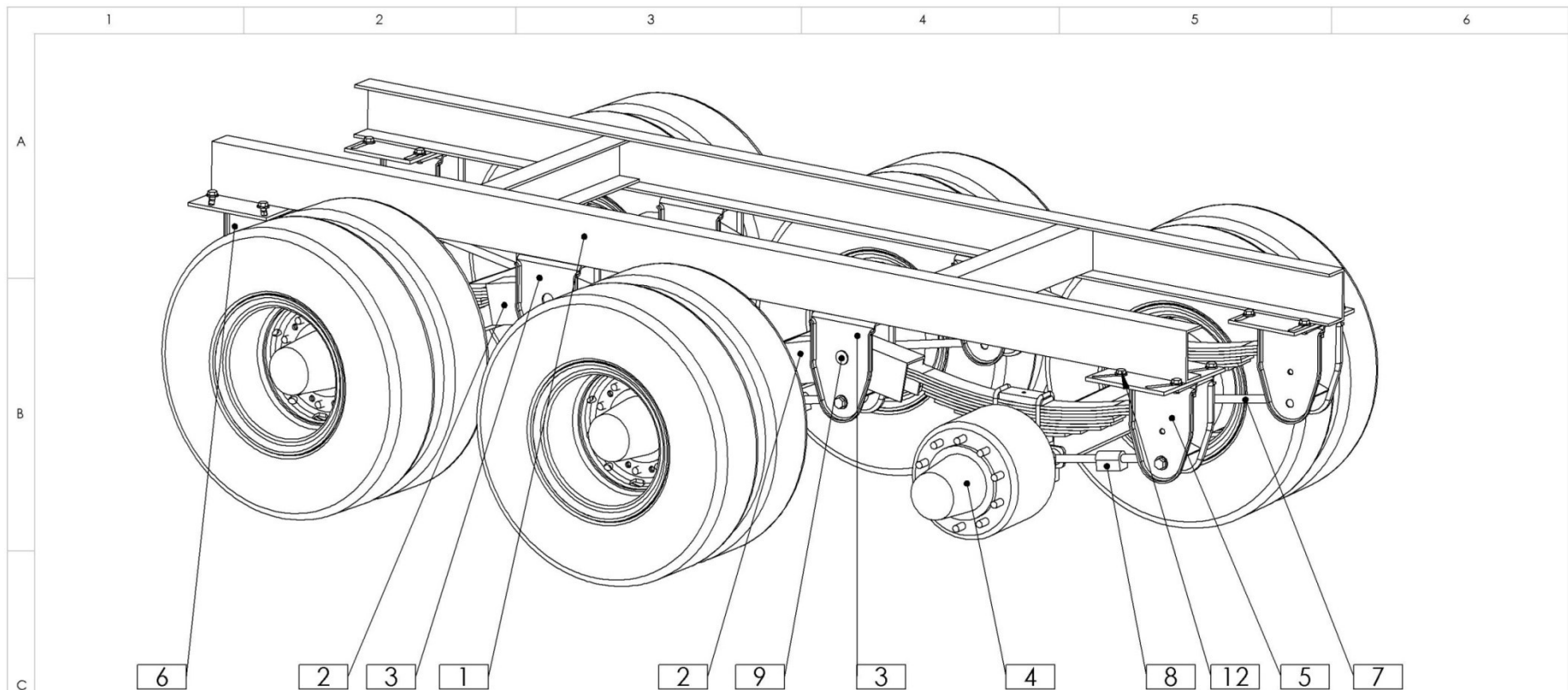
DATA: 08/05/2021

A4

DESENHO: MONTAGEM TANDEM DUPLO

ESCALA:1:25

FOLHA 1 DE 1



ITEM	DESCRIÇÃO	QTD.
1	CHASSI TRIPLO	1
2	BALANCIM	4
3	SUORTE DO BALANCIM	4
4	EIXO RÍGIDO MONTADO	3
5	SUORTE DA MOLA 1	2
6	SUORTE DA MOLA 2	2
7	TIRANTE FIXO	3
8	TIRANTE AJUSTÁVEL	3
9	PINO DO BALANCIM	2
10	PARAFUSO SEXT. M24x140 10.9	6
11	MONTAGEM DE PNEUS 1100R22	6
12	PARAFUSO SEXT. M20x35 10.9	16



AUTOR: **JOSÉ EDUARDO GUIZZARDI** MONTAGEM

TÍTULO: MONTAGEM TANDEM TRIPLO

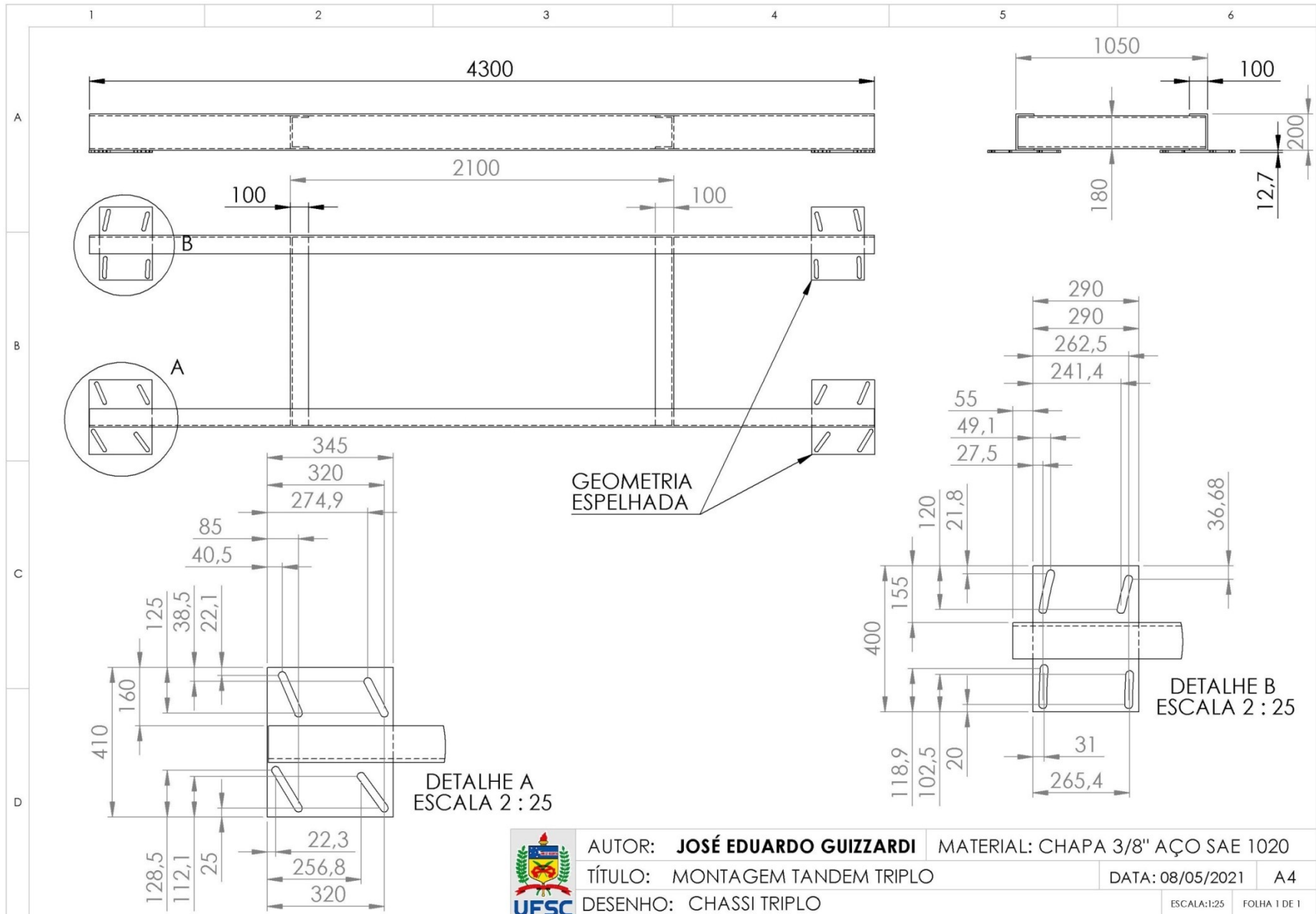
DATA: 08/05/2021

A4

DESENHO: MONTAGEM TANDEM TRIPLO

ESCALA:1:25

FOLHA 1 DE 1

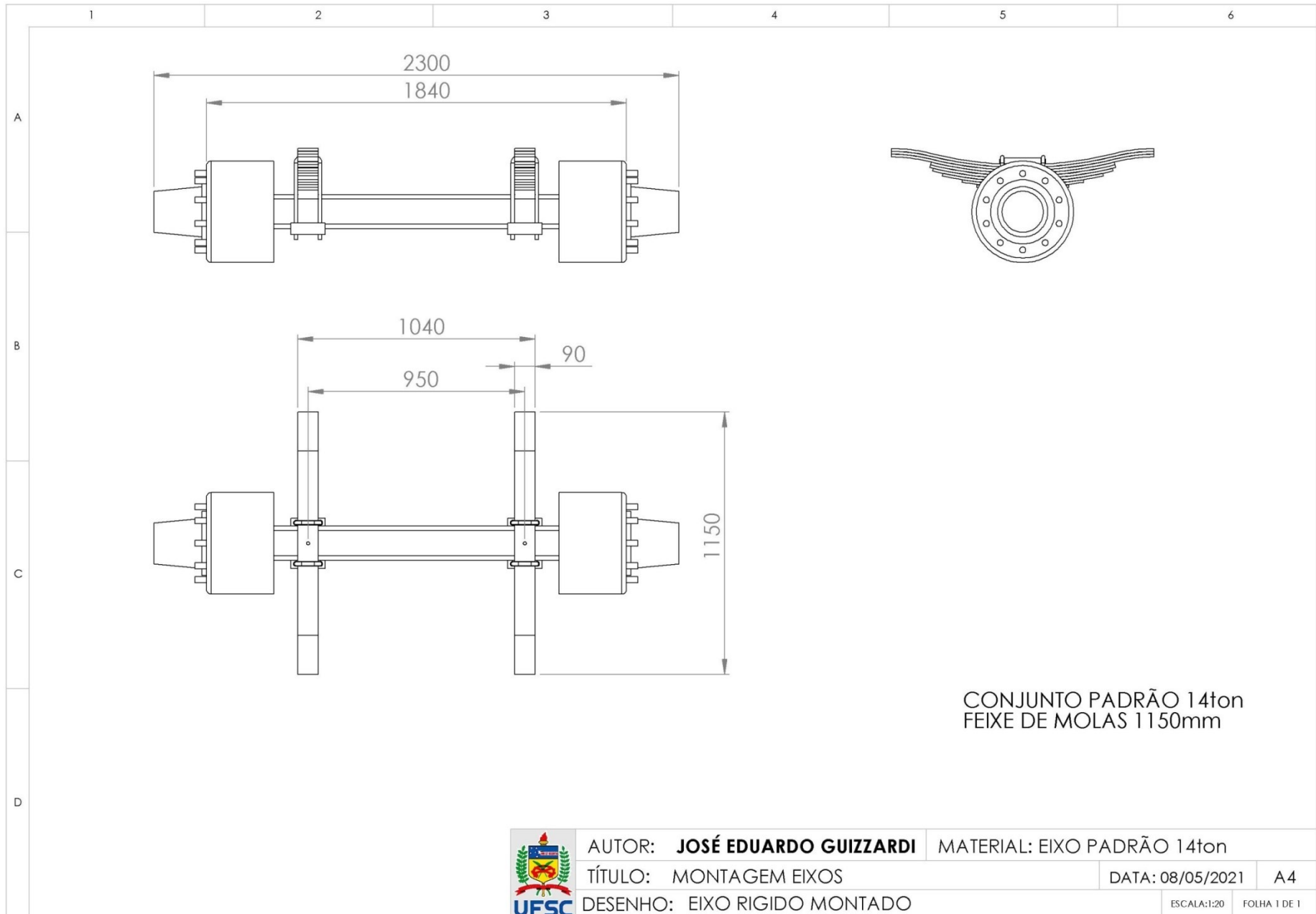


AUTOR: **JOSÉ EDUARDO GUIZZARDI**
 TÍTULO: MONTAGEM TANDEM TRIPLO
 DESENHO: CHASSI TRIPLO

MATERIAL: CHAPA 3/8" AÇO SAE 1020

DATA: 08/05/2021 A4

ESCALA: 1:25 FOLHA 1 DE 1



AUTOR: **JOSÉ EDUARDO GUIZZARDI**

MATERIAL: EIXO PADRÃO 14ton

TÍTULO: MONTAGEM EIXOS

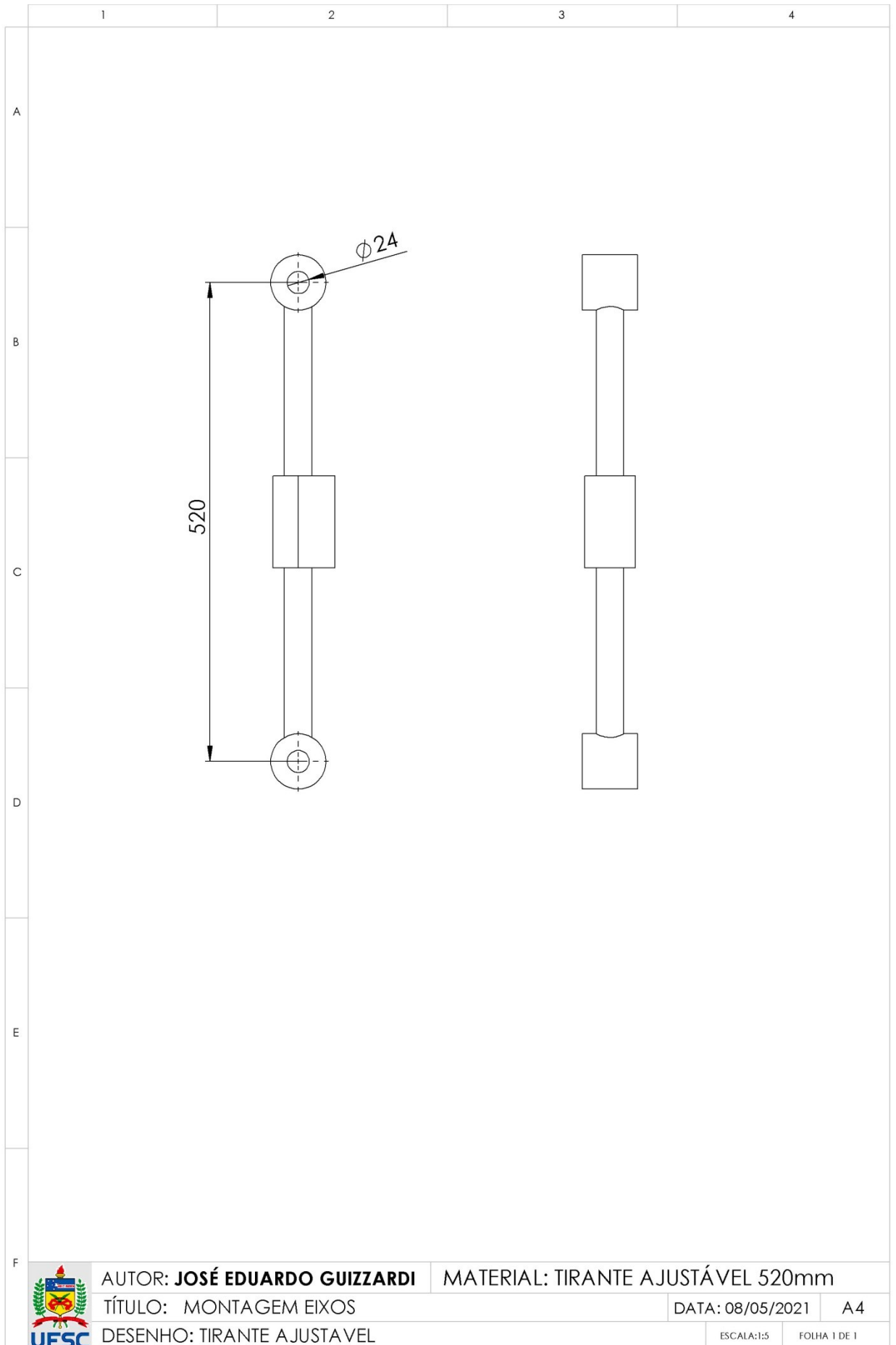
DATA: 08/05/2021

A4

DESENHO: EIXO RIGIDO MONTADO

ESCALA:1:20

FOLHA 1 DE 1

AUTOR: **JOSÉ EDUARDO GUIZZARDI**

MATERIAL: TIRANTE AJUSTÁVEL 520mm

TÍTULO: MONTAGEM EIXOS

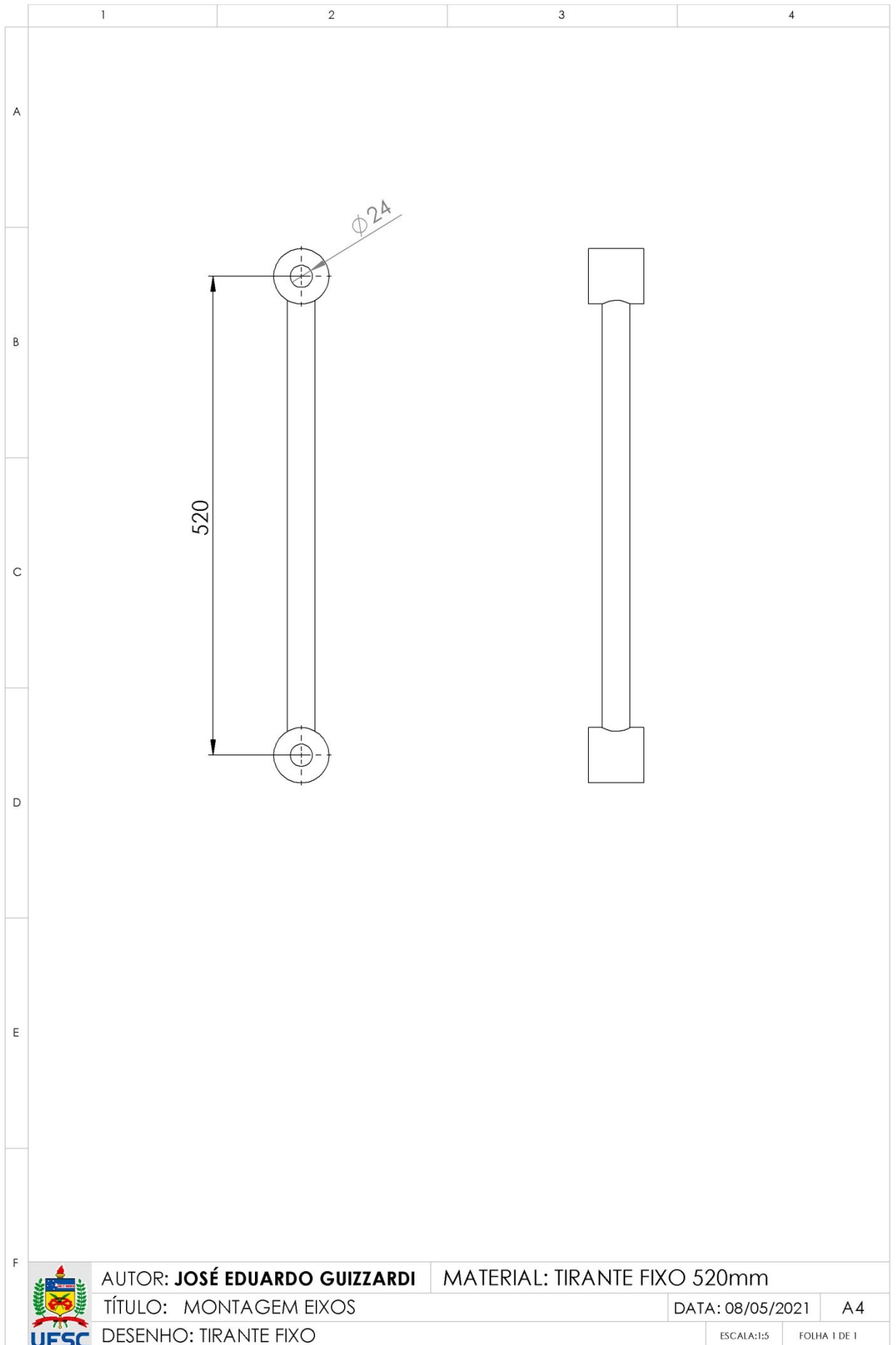
DATA: 08/05/2021

A4

DESENHO: TIRANTE AJUSTAVEL

ESCALA:1:5

FOLHA 1 DE 1

AUTOR: **JOSÉ EDUARDO GUIZZARDI**

MATERIAL: TIRANTE FIXO 520mm

TÍTULO: MONTAGEM EIXOS

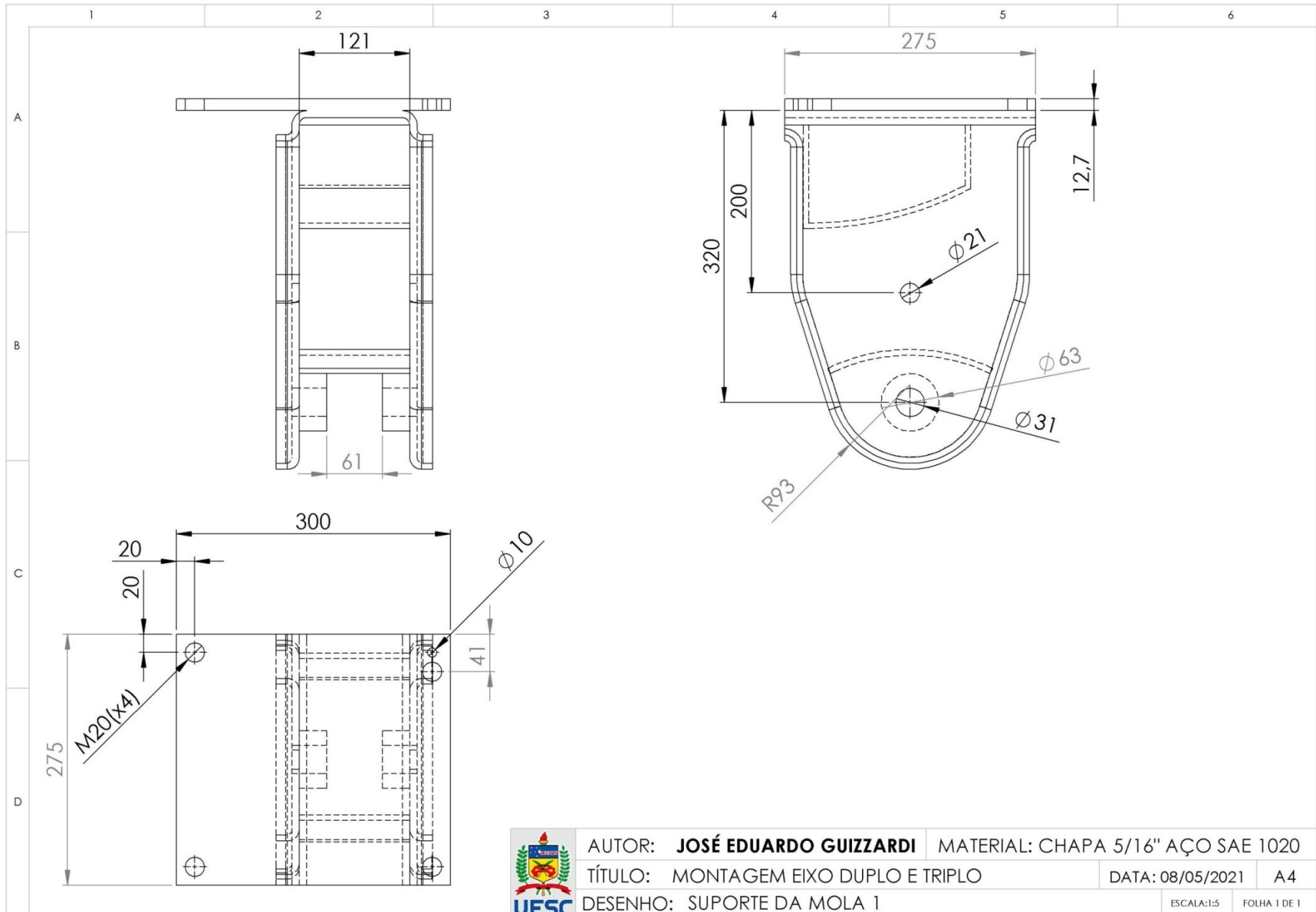
DATA: 08/05/2021

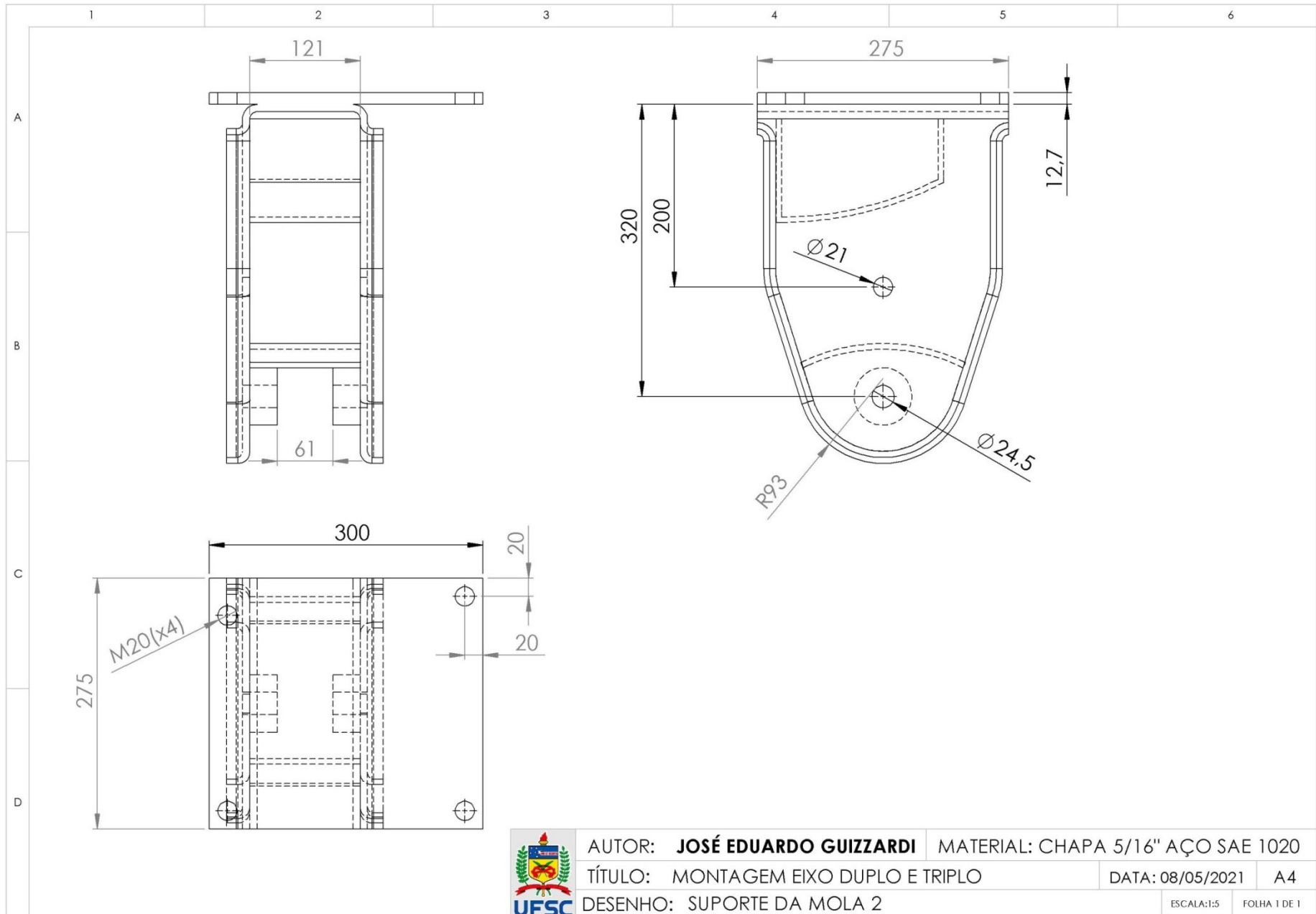
A4

DESENHO: TIRANTE FIXO

ESCALA:1:5

FOLHA 1 DE 1





AUTOR: **JOSÉ EDUARDO GUIZZARDI** MATERIAL: CHAPA 5/16" AÇO SAE 1020

TÍTULO: MONTAGEM EIXO DUPLO E TRIPLO

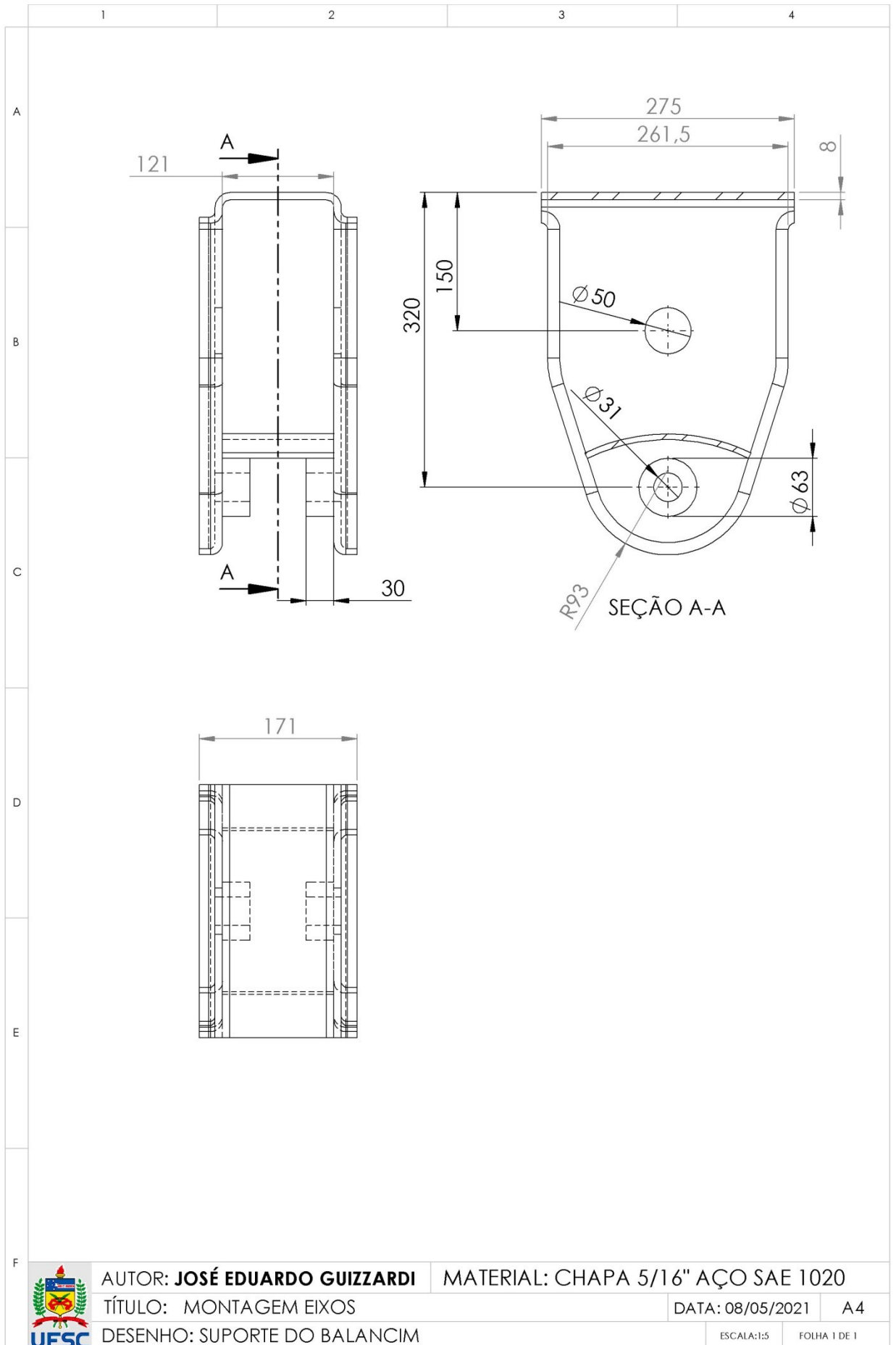
DATA: 08/05/2021

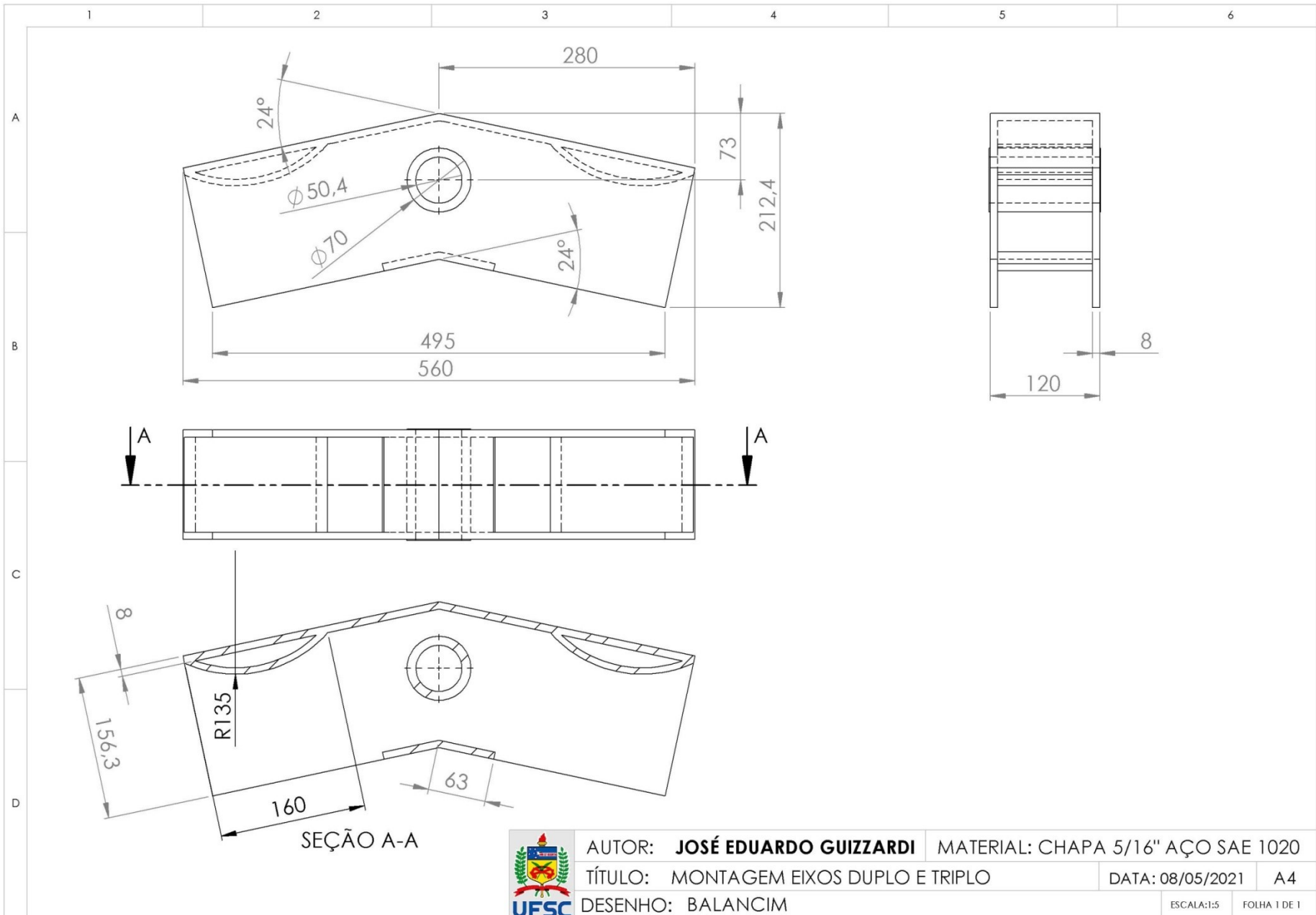
A4

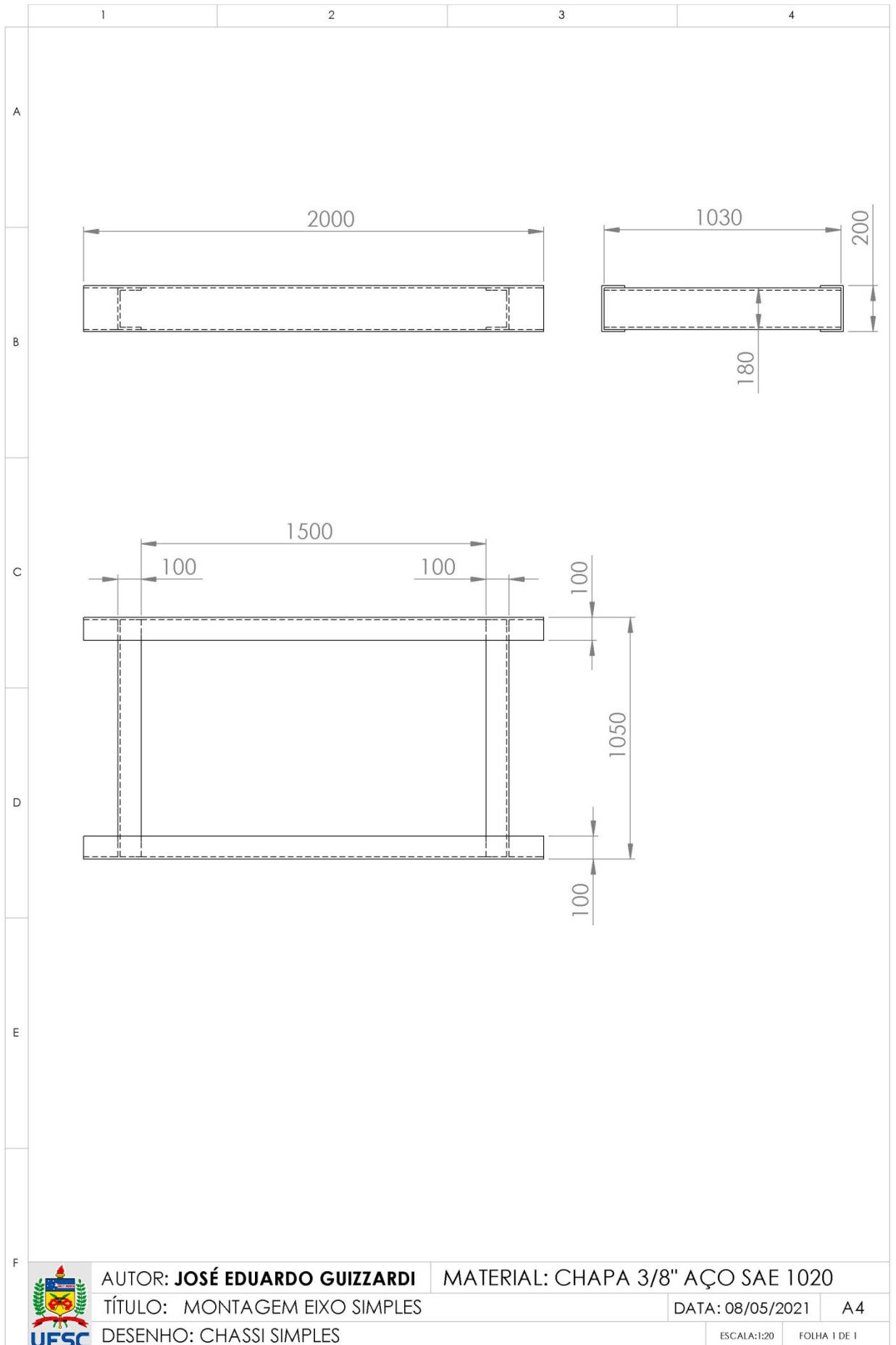
DESENHO: SUPORTE DA MOLA 2

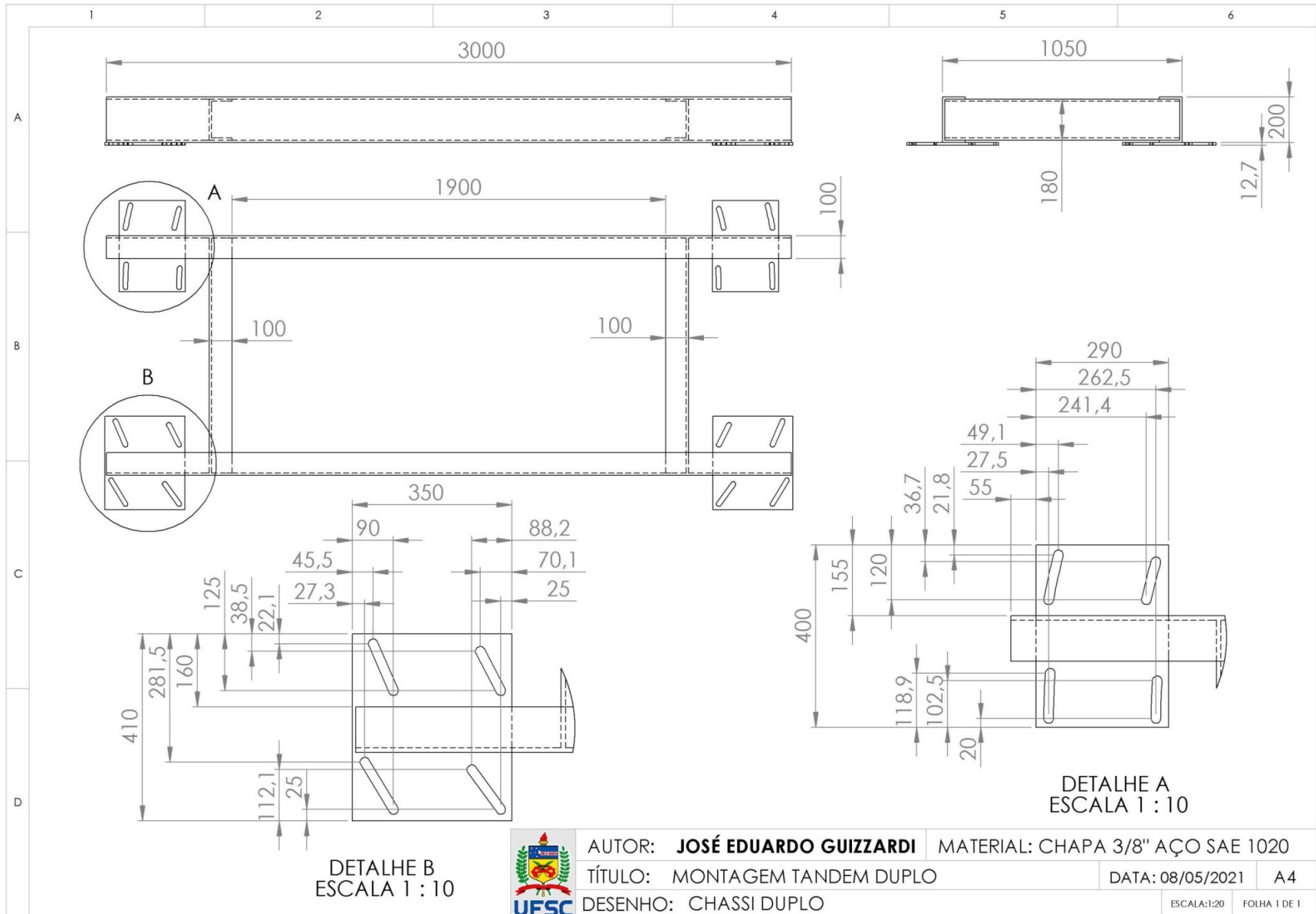
ESCALA:1:5

FOLHA 1 DE 1









DETALHE B
ESCALA 1 : 10

DETALHE A
ESCALA 1 : 10



AUTOR: JOSÉ EDUARDO GUIZZARDI	MATERIAL: CHAPA 3/8" AÇO SAE 1020
TÍTULO: MONTAGEM TANDEM DUPLO	DATA: 08/05/2021
DESENHO: CHASSI DUPLO	A4

