



Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Engenharia Aeroespacial

Ergonomia Aplicada a Projeto de Bancada de Simulação de Aeronave Tipo Planador

Autor: Eduardo Aben-Athar de Freitas
Orientador: Prof. PhD Mateus Rodrigues Miranda

Brasília, DF
2021



Eduardo Aben-Athar de Freitas

Ergonomia Aplicada a Projeto de Bancada de Simulação de Aeronave Tipo Planador

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Aeroespacial da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Aeroespacial.

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Prof. PhD Mateus Rodrigues Miranda

Brasília, DF

2021

Eduardo Aben-Athar de Freitas
Ergonomia Aplicada a Projeto de Bancada
de Simulação de Aeronave Tipo Planador/ Eduardo Aben-Athar de Freitas. –
Brasília, DF, 2021-
138 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. PhD Mateus Rodrigues Miranda

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA , 2021.

1. Ergonomia. 2. Simulador. I. Prof. PhD Mateus Rodrigues Miranda. II.
Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Ergonomia Aplicada a
Projeto de Bancada
de Simulação de Aeronave Tipo Planador

CDU 02:141:005.6

Eduardo Aben-Athar de Freitas

Ergonomia Aplicada a Projeto de Bancada de Simulação de Aeronave Tipo Planador

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Aeroespacial da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Aeroespacial.

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 03 de Novembro de 2021:

Prof. PhD Mateus Rodrigues Miranda
Prof. Dr. Mateus Rodrigues Miranda

**Prof. PhD Polliana Candida Oliveira
Martins**
Polliana Cândida Oliveira Martins

**Prof. PhD Sergio Henrique da Silva
Carneiro**
Sergio Henrique da Silva Carneiro

Brasília, DF
2021

Este trabalho é dedicado à minha mãe, Maria do Socorro Freitas, ao meu pai, Sidney Freitas, e aos meus irmãos, André e Davi Freitas, que sempre fizeram e fazem tudo por mim e aspiram por minhas conquistas.

Ao Prof. Dr. Mateus Miranda, que sempre me ajudou nas iniciações científicas e, graças a ele, tive a oportunidade de apresentar uma de minhas iniciações científicas em simpósio internacional de transporte aéreo.

Aos meus amigos, Daniel Rath e Gabriel Bacon, que me acolheram em um dos momentos mais difíceis da minha vida e me fizeram acreditar em um futuro cheio de esperanças.

Ao meu amigo, Victor Ventura, que, graças a ele, eu pude obter mais conhecimentos para realizar o presente trabalho, além de obter novas oportunidades de pesquisa científica.

À minha amiga, Beatriz Andrade, que me incentivou a fazer iniciação científica e a dar continuidade com outros projetos.

Aos meus demais amigos, José Rômulo, Rafael Mascarenhas e Caio Camilo, que me ajudaram no final do curso de graduação.

*“Não vos amoldeis às estruturas deste mundo,
mas transformai-vos pela renovação da mente,
a fim de distinguir qual é a vontade de Deus:
o que é bom, o que Lhe é agradável, o que é perfeito.
(Bíblia Sagrada NVT, Romanos 12, 2)*

Resumo

O presente trabalho fez abordagem em estudos ergonômicos realizados no interior de uma aeronave do tipo planador para futura construção por parte de um projeto de extensão, formado por alunos, da Universidade de Brasília (UnB). A aeronave em questão foi pesquisada e escolhida pelo grupo de estudantes por se apresentar a melhor opção dentre outras pesquisadas. Sua fuselagem foi desenhada com o auxílio de *software* para desenho computacional CATIA V5R21 e inseridos manequins de diferentes posturas, do próprio programa, para realizar as análises ergonômicas. Também foi desenhada uma fuselagem com base em metodologia de escoamento para fins comparativos de análises com o primeiro planador. Por fim, após feitas as análises, encontraram-se alguns problemas de ergonomia no projeto original do planador pesquisado e, com o intuito de propor solução desses problemas e para fins de estudos acadêmicos no âmbito acadêmico, foi realizada uma primeira proposta, em desenho computacional, de uma bancada de simulação do planador escolhido. Após desenhada a bancada, também foram feitas análises com manequins inseridos nela, com os mesmos critérios dos primeiros estudos e dar prosseguimento para projeto de construção da aeronave real.

Palavras-chave: Ergonomia. Simulador de Voo. Projeto. Planador.

Abstract

The present work approached ergonomic studies carried out inside a glider-type aircraft for future construction by an extension project, formed by students, from the University of Brasília (UnB). The aircraft in question was researched and chosen by the group of students because it was the best option among others researched. Its fuselage was designed with the help of CATIA V5R21 computer design software and mannequins of different postures, from the program itself, were inserted to carry out the ergonomic analyses. It was also a merger based runoff methodology for comparative analysis purposes with the first glider. Finally, after performing the analyses, some ergonomic problems were identified in the original project of the researched glider and, in order to propose a solution to these problems and for the purposes of academic studies in the academic sphere, a first proposal was made, in computational design, from a simulation bench of the chosen glider. Once the bench was summarized, analyzes were also carried out with mannequins inserted in it, using the same criteria as in the first studies and proceeding with the construction project of the real aircraft.

Key-words: Ergonomics. Flight Simulator. Project. Glider.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Logotipo da Dragonfly (2017).	19
Figura 2 – Aeroclube do Planalto Central, Formosa (GO) (2018).	20
Figura 3 – Medidas antropométricas. Fontes:(TILLEY, 2005).	24
Figura 4 – Curva de Gauss para estatura. Fonte: (MIRANDA, 2017), adaptado.	25
Figura 5 – Distribuição Gaussiana da população para estatura. Fonte: (IIDA, 2005)	26
Figura 6 – Dimensões antropométricas no <i>cockpit</i> . Fonte: (TILLEY, 2005)	27
Figura 7 – Exemplo de <i>cockpit</i> de planador. Fonte: (FAA, 2013).	28
Figura 8 – Pontuação do braço (RULA). Fonte: (PLUS, 2021), adaptado.	29
Figura 9 – Pontuação do antebraço (RULA). Fonte: (PLUS, 2021), adaptado.	29
Figura 10 – Pontuação do pulso e torção do pulso (RULA). Fonte: (PLUS, 2021), adaptado.	30
Figura 11 – Pontuação do pescoço (RULA). Fonte: (PLUS, 2021), adaptado.	30
Figura 12 – Pontuação do tronco (RULA). Fonte: (PLUS, 2021), adaptado.	31
Figura 13 – Eixos da aeronave. Fonte: (HOMA, 2010).	32
Figura 14 – Kit simples de simulador de voo. Fonte: (LIPAOGAMER, 2018).	34
Figura 15 – Simulador para instrução de voo por instrumentos. Fonte: (WINGS, 2021).	34
Figura 16 – Full Flight Simulator da CAE. Fontes: (CAE, 2021b) e (GRU, 2018).	35
Figura 17 – Mockup de simulação de <i>cockpit</i> de planador (2018).	36
Figura 18 – Motoplanador AEROS AC-21 decolando. Fonte: (AEROS, 2005).	38
Figura 19 – Blueprint do AC-21. Fonte: (ADA, 2007) (2021).	40
Figura 20 – CAD do Motoplanador AC-21 (2021).	41
Figura 21 – Coordenadas dos perfis NACA 0006 e 64-208 (2021).	42
Figura 22 – CAD do Planador NACA (2021).	42
Figura 23 – CAD do assento do AC-21 (2021).	43
Figura 24 – CAD do assento do planador NACA (2021).	44
Figura 25 – <i>Canopies</i> das aeronaves (2021).	45
Figura 26 – Manche dos planadores (2021).	46
Figura 27 – Pedais do planador GROB G103 (2019).	47
Figura 28 – Pedal das aeronaves (2021).	48
Figura 29 – Alavanca do flape (2021).	48
Figura 30 – Tamanho e comprimentos de um instrumento de voo de aeronaves. Fonte: (STRATOMASTER, 2021) (adaptado).	49
Figura 31 – Instrumentos de voo. Fonte: (OLIVEIRA, 2021).	49
Figura 32 – <i>Cockpit</i> do AC-21. Fontes: (AEROS, 2005) e (ADA, 2007).	50
Figura 33 – Painel de instrumentos do AC-21 (2021).	50

Figura 34 – Painel de instrumentos do planador G103 (2018).	51
Figura 35 – Painel de instrumentos do planador comparativo NACA (2021).	51
Figura 36 – Percentis usados no trabalho (2021).	53
Figura 37 – Package dos percentis utilizados (2021).	54
Figura 38 – Espaço interno do AC-21 (2021).	55
Figura 39 – Espaço interno do NACA (2021).	57
Figura 40 – Vista isométrica da bancada de simulação (2021).	58
Figura 41 – Envelope de alcance da aeronave AC-21 (2021).	58
Figura 42 – Envelope de alcance da aeronave NACA (2021).	59
Figura 43 – Configuração de parâmetros do <i>RULA Analysis</i> (2021).	59
Figura 44 – Visões com e sem restrição focal do AC-21 (2021).	62
Figura 45 – Visões do AC-21 (2021).	63
Figura 46 – Vista isométrica da bancada de simulação (2021).	64
Figura 47 – Projeto da Bancada de simulação (2021).	65
Figura 48 – Bases de concreto para elevar a bancada (2021).	66
Figura 49 – Site oficial do Condor Soaring. Fonte: (CONDOR, 2021).	66
Figura 50 – Cockpit de planador do simulador Condor 2 (2021).	67
Figura 51 – Placa BU0836A para simulação. Fonte: (LEOBODNAR, 2021).	67
Figura 52 – <i>Firmwares</i> usados para controle da placa. Fonte: (LEOBODNAR, 2021).	68
Figura 53 – Componentes eletrônicos para integrar ao simulador (2021).	69
Figura 54 – Testes dos componentes eletrônicos (2021).	70
Figura 55 – Tela e projetor de imagem usados para a bancada de simulação (2021).	70
Figura 56 – Exemplo de tela de projeção curva. Fote: APC (2021).	71
Figura 57 – Distância mínima entre tela e olho do piloto (2021).	71
Figura 58 – Manche do simulador (2021).	73
Figura 59 – Montagem do mecanismo do manche (vista frontal) (2021).	73
Figura 60 – Conjunto de pedais do simulador (2021).	74
Figura 61 – Ajuste de posição do pedal (2021).	74
Figura 62 – Comando do flape do simulador (2021).	75
Figura 63 – Monitor de computador preso a um suporte. (2021).	76
Figura 64 – Encosto de cabeça (2021).	77
Figura 65 – Chapa de alumínio para fixar o encosto de cabeça (2021).	77
Figura 66 – Estofado do assento do simulador (2021).	78
Figura 67 – Bancada com os percentis ao lado (2021).	80
Figura 68 – Bancada com os percentis ao lado (2021).	81
Figura 69 – Envelope de alcance dos percentis usados (2021).	83
Figura 70 – Visões dos percentis utilizados (2021).	84
Figura 71 – Ângulos de visão para a tela de projeção (2021).	86
Figura 72 – Desenho técnico da bancada montada (2021).	95

Figura 73 – Desenho técnico da bancada explodida (2021).	96
Figura 74 – Desenho técnico do conjunto do manche montado (2021).	97
Figura 75 – Desenho técnico conjunto do manche explodido (2021).	98
Figura 76 – Desenho técnico conjunto do pedal montado (2021).	99
Figura 77 – Desenho técnico conjunto do pedal explodido (2021).	100
Figura 78 – Desenho técnico do conjunto do flape montado (2021).	101
Figura 79 – Desenho técnico do conjunto do flape montado (2021).	102
Figura 80 – Desenho técnico da fuselagem (2021).	103
Figura 81 – Desenho técnico do assento estofado (2021).	104
Figura 82 – Desenho técnico do encosto de cabeça (2021).	105
Figura 83 – Desenho técnico da chapa de alumínio (2021).	106
Figura 84 – Desenho técnico das bases de concreto (2021).	107
Figura 85 – Desenho técnico da alavanca do manche (2021).	108
Figura 86 – Desenho técnico do punho do manche (2021).	109
Figura 87 – Desenho técnico do mancal do manche (2021).	110
Figura 88 – Desenho técnico do rolamento (2021).	111
Figura 89 – Desenho técnico da junta em "U" invertido (2021).	112
Figura 90 – Desenho técnico da base do pedal (2021).	113
Figura 91 – Desenho técnico da pedaleira (2021).	114
Figura 92 – Desenho técnico do mancal do pedal (2021).	115
Figura 93 – Desenho técnico da haste controladora do pedal (2021).	116
Figura 94 – Desenho técnico da trava de posição do conjunto pedal (2021).	117
Figura 95 – Desenho técnico da alavanca de flape (2021).	118
Figura 96 – Desenho técnico do suporte do flape (2021).	119
Figura 97 – Desenho técnico do pinhão do controle do flape (2021).	120
Figura 98 – Desenho técnico da cremalheira do controle do flape (2021).	121
Figura 99 – Desenho técnico do suporte da tela de projeção (2021).	122
Figura 100 – Questionário subjetivo de simulação ergonômica em bancada de simulação de voo (2021).	124
Figura 101 – Questionário subjetivo de simulação ergonômica em bancada de simulação de voo (2021).	125
Figura 102 – Questionário subjetivo de simulação ergonômica em bancada de simulação de voo (2021).	126
Figura 103 – Questionário subjetivo de simulação ergonômica em bancada de simulação de voo (2021).	127
Figura 104 – Questionário subjetivo de simulação ergonômica em bancada de simulação de voo (2021).	128
Figura 105 – Questionário subjetivo de simulação ergonômica em bancada de simulação de voo (2021).	129

Figura 106–Motoplanador AC-21. Fonte: (AEROS, 2005).	132
Figura 107–Blueprint AC-21. Fonte: (ADA, 2007).	133
Figura 108–Tabela A do RULA. Fonte: (PLUS, 2021) adaptado.	134
Figura 109–Tabela B do RULA. Fonte: (PLUS, 2021) adaptado.	135
Figura 110–Tabela de Pontuação final do RULA. Fonte: (PLUS, 2021) adaptado.	135
Figura 111–Distribuição Percentual para as diferentes medidas antropométricas e IMC na atmosfera (n = 960). Fonte: (ANAC, 2009).	136
Figura 112–Distribuição percentual para as larguras, alturas e comprimento. Fonte: (ANAC, 2009).	136
Figura 113–Cotas do percentil em pé. Fonte: (TILLEY, 2005).	137
Figura 114–Cotas do percentil sentado. Fonte: (TILLEY, 2005).	138

Lista de tabelas

Tabela 1 – Pontuação RULA. Fonte: (CATIADOC, 2021b) adaptado.	29
Tabela 2 – Classificação dos Níveis de risco musculoesquelético. Fonte: (PLUS, 2021), adaptado.	31
Tabela 3 – Tabela de características do AC-21. Fonte: (ADA, 2007).	39
Tabela 4 – Resultado RULA da aeronave AC-21 (2021).	60
Tabela 5 – Resultado RULA da aeronave NACA (2021).	60
Tabela 6 – Distâncias de projeção (16:9). Fonte: (CONTABILISTA, 2021).	72
Tabela 7 – Lista preliminar de materiais.	79
Tabela 8 – Ângulos de visão dos percentis	85
Tabela 9 – Resultado RULA do percentil 95% masculino - Flape vs Manche (2021).	87
Tabela 10 – Resultado RULA do percentil 95% feminino - Flape vs Manche (2021).	87
Tabela 11 – Resultado RULA do percentil 20% feminino - Flape vs Manche (2021).	88
Tabela 12 – Tabela de preços estimados dos materiais.	130
Tabela 13 – Medidas do corpo: posição em pé (medidas em mm).	137
Tabela 14 – Medidas do corpo: posição sentada (medidas em mm).	138

Lista de abreviaturas e siglas

FAA	Federal Aviation Administration (Administração Federal de Aviação)
PPL	Piloto de Planador
APC	Aeroclube do Planalto Central
UnB	Universidade de Brasília
FGA	Faculdade do Gama
ECT	Encontro de Ciência e Tecnologia
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
RBAC	Regulamentos Brasileiros da Aviação Civil
ABERGO	Associação Brasileira de Ergonomia
DEP	Design Eye Point (Posição do Olho)
SRP	Seat Reference Point (Referência do posicionamento do assento)
IFR	Instrument Flight Rules (Regras de Voo Por Instrumentos)
FCC	Full Flight Simulator (Simulador de Voo Completo)
CAD	Computer-Aided Design (Desenho Assistido por Computador)
CAE	Computer-Aided Engineering (Engenharia Assistido por Computador)
SAE	Society of Automotive Engineers
APR	Aerospace Recommend Practice
PLA	Poliácido Láctico
PVC	Policloreto de Vinila
EPS	Poliestireno Expandido
VNE	Velocidade Nunca Exceder
ASI	Air Speed Indicator (Velocímetro)
ALT	Altimeter (Altímetro)

VSI	Vertical Speed Indicator (Variômetro)
PSI	Pounds Per Square Inch (Libra por Polegada Quadrada)
NACA	National Advisory Committee for Aeronautics
NASA	National Aeronautics and Space Administration
DULV	Associação Alemã de Voo Ultraleve
P95M	Percentil Masculino 95%
P95F	Percentil Feminino 95%
P20F	Percentil Feminino 20%

Sumário

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Objetivos do Trabalho	18
1.1.1	Gerais	18
1.1.2	Específicos	19
1.2	Motivação e Justificativa	19
1.3	Aspectos Metodológicos	21
1.4	Organização e Divisão do trabalho	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1	Ergonomia do Produto	23
2.1.1	Antropometria	24
2.1.2	Percentis	25
2.1.3	Package	26
2.1.4	Método RULA — <i>Rapid Upper Limb Assessment</i>	28
2.2	Controles de voo	31
2.3	Categorias de Simuladores	33
2.3.1	Simple	33
2.3.2	Professional	34
2.3.3	<i>Full Flight Simulator</i>	35
2.4	Mock up de simulação	35
3	MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1	Concepção de Projeto	38
3.1.1	Características do Planador Conceito	38
3.1.2	Fuselagens	40
3.1.2.1	AC-21	40
3.1.2.2	NACA	41
3.1.3	Assento	43
3.1.3.1	AC-21	43
3.1.3.2	NACA	44
3.1.4	Canopy	45
3.1.5	Comandos	46
3.1.5.1	Manche	46
3.1.5.2	Pedal	47
3.1.5.3	Alavanca de Flape	48
3.1.6	Instrumentos	49

3.1.7	Painel de Instrumentos	50
3.1.7.1	AC-21	50
3.1.7.2	NACA	51
4	PACKAGE DA CABINE	53
4.1	Percentis Usados	53
4.2	Package	54
4.3	Integração com Modelo CAD	54
4.3.1	AC-21	55
4.3.2	NACA	56
4.4	Estudos Ergonômicos	57
4.4.1	Envelope de Alcance	58
4.5	Análise RULA — <i>Rapid Upper Limb Assessment</i>	59
4.6	Visão	61
4.6.1	AC-21	61
4.6.2	NACA	62
5	PROPOSTA DE PROJETO DE SIMULADOR	64
5.1	Bancada de Simulação	64
5.2	Software Embarcado	66
5.3	Eletrônica Embarcada	67
5.4	Tela de projeção	70
5.5	Controles de voo	72
5.5.1	Manche	72
5.5.2	Pedais	74
5.5.3	Flape	75
5.6	Painel de instrumentos	76
5.7	Assento	77
5.8	Estimativas Preliminares	78
5.8.1	Materiais Preliminares	78
6	INTEGRAÇÃO DO SIMULADOR COM PACKAGE	80
6.1	Percentis Utilizados e Package	80
6.2	Integração com Bancada de Simulação	81
6.2.1	Envelope de Alcance	83
6.2.2	Campo de Visão	83
6.3	Validação da bancada de simulação	86
7	CONCLUSÕES	89

	REFERÊNCIAS	90
	APÊNDICES	93
	APÊNDICE A – DESENHOS TÉCNICOS	94
	APÊNDICE B – QUESTIONÁRIO DE VALIDAÇÃO ERGONÔMICA DA BANCADA DE SIMULAÇÃO DE VOO	123
	APÊNDICE C – CUSTOS ESTIMADOS	130
	ANEXOS	131
	ANEXO A – FOTOS DA AERONAVE AEROS AC-21	132
	ANEXO B – BLUEPRINT DO AC-21	133
	ANEXO C – TABELAS RULA	134
C.1	Tabela A	134
C.2	Tabela B	135
C.3	Tabela de Pontuação Final	135
	ANEXO D – TABELA ANTROPOMÉTRICA DA POPULAÇÃO BRA- SILEIRA	136
	ANEXO E – COTAS ANTROPOMÉTRICAS - POSIÇÃO EM PÉ .	137
	ANEXO F – COTAS ANTROPOMÉTRICAS - POSIÇÃO SENTADO	138

1 Introdução

Desde os primórdios, o homem sempre teve o sonho de voar, tentar imitar o movimento dos pássaros e se mover no ar. Entretanto, somente no ano de 1853 o primeiro planador foi inventado pelo inglês Sir George Cayley (1773–1857) e, em 1891, os primeiros voos planados bem-sucedidos foram realizados pelo alemão Otto Lilienthal (1848–1896), conhecido como o Rei do Planador. Desde então, o voo a vela — como também é conhecido — foi amplamente estudado no começo do século XX para otimizar os comandos da aeronave e aprender mais sobre o voo. O uso de planadores vem sido amplamente usado, tanto para fins militares, quanto para treinamentos e para uso desportivo e recreativo por pilotos de planadores (FAA, 2013).

Segundo a *Federal Aviation Administration* (Administração Federal de Aviação, em inglês), órgão regulador da aviação civil dos Estados Unidos, um planador é uma aeronave mais pesada que o ar, capaz de se manter em voo através da reação dinâmica do ar contra suas asas e cujo voo não depende de motorização própria. A aeronave voa através de forças naturais da atmosfera, como térmicas e orográficas para ganhar altitude. Para decolar, o planador é rebocado por um avião de pequeno porte, ambos ligados por um cabo. O planador decola primeiro devido à alta envergadura, mas deve voar na mesma altitude que o avião rebocador e não comprometer o cabo. Assim que ambos chegam a determinada altitude, o piloto do planador solta o cabo e faz curva à esquerda e o avião (com cabo preso) à direita e, então, o planador está livre para planar (FAA, 2013).

Para o aluno de Piloto de Planador (PPL) possa pilotar a aeronave, ele precisa se sentir confortável no *cockpit* (também chamado cabine do piloto). Por esta razão que existem os estudos ergonômicos de *cockpit* de aeronaves e a simulação de voo, o ato responsável por treinar pilotos a realizarem procedimentos normais e de emergência em voo. Com base nos dados anteriores que melhorias foram sugeridas e uma bancada de simulação foi projetada para fins acadêmicos da Universidade de Brasília (UnB).

1.1 Objetivos do Trabalho

1.1.1 Gerais

O trabalho consiste em projetar uma bancada de simulação de voo *low-cost* (baixo custo) de *cockpit* de planador, e analisar e validar seus aspectos ergonômicos. A bancada deverá simular um ambiente onde o piloto efetuará manobras de voo e poder ser treinado para realizar procedimentos antes de realizar um voo real para garantir sua segurança (FREITAS, 2019).

1.1.2 Específicos

- Implementar evolução de projeto para o *cockpit* do simulador de voo;
- Selecionar, através de pesquisa de mercado, materiais de construção com melhor relação custo-benefício;
- Implementar parte do *software* e parte do *hardware* para simulação de comandos reais de um planador;
- Analisar o campo de alcance dos pilotos posicionados no simulador;
- Analisar campo visual dos pilotos inseridos no *cockpit* de simulação;
- Analisar conforto da posição dos pilotos no assento da aeronave através do método *Rapid Upper Limb Assessment* (RULA);
- Definir componentes necessários para compor o interior do *cockpit* do simulador;
- Validar virtualmente as análises realizadas por uso de ferramenta computacional;
- Propor um primeiro desenho em CAD um *cockpit* de uma bancada de simulação de aeronave do tipo planador;

1.2 Motivação e Justificativa

A Faculdade do Gama (FGA) é um dos *Campus* da UnB composto pelos cursos das engenharias: aeroespacial, automotiva, *software*, eletrônica e energia. No *campus* existem as equipes de competição e estudos das suas respectivas engenharias, um destes grupos é a Dragonfly. Esta não é uma equipe de competição, mas sim uma equipe de alunos com foco em pesquisas sobre aviação experimental.



Figura 1 – Logotipo da Dragonfly (2017).

Por fim, em 2020, a Dragonfly passou a ter reconhecimento oficial da UnB como projeto de extensão e coordenado pelo Professor (PhD) Mateus Miranda, junto a outros professores adjuntos para auxiliarem no projeto da primeira aeronave. Um dos professores já construiu uma aeronave motorizada para a UnB, portanto possui experiência no campo de projeto e motorização que serão de grande auxílio aos membros da equipe.

O autor entrou na Dragonfly e permaneceu como membro entre os anos de 2017 e 2020, exercendo atividades administrativas, técnicas e de projeto de aeronaves. Em 2018, um professor da UnB foi procurado por um dos membros para pedir auxílio a respeito de projeto de aeronaves para a construção de aeronave motorizada da UnB. Este professor sugeriu à equipe, no entanto, que projetasse um motoplanador, pois iria desenvolver a capacidade de pesquisa dos membros.

Ainda no mesmo ano, a equipe pôde visitar, com o auxílio do Professor procurado pelos membros, o Aeroclube do Planalto Central (ACP), localizado no município de Formosa (GO), a 86 quilômetros de Brasília. A equipe pôde aprender um pouco mais sobre essas aeronaves, além de alguns membros também realizarem voos panorâmicos em planadores reais.



(a) Hangar

(b) Pista de pouso

Figura 2 – Aeroclube do Planalto Central, Formosa (GO) (2018).

Não somente visita técnica, mas o autor também obteve a oportunidade de realizar estágio supervisionado no APC no primeiro semestre de 2021, de maneira remota. O aeroclube possui o objetivo de construir uma bancada de simulação para treinar PPL's (pilotos de planadores) e capacitar novos alunos com procedimentos normais e de emergências de voo antes de realizarem voos reais.

O autor permaneceu com a função de desenvolver em desenho computacional (CAD) um *layout* e uma bancada de simulação para a instituição. Além disso, um dos coordenadores do projeto do simulador emprestou seus componentes eletrônicos e uma licença de *software* de simulação de voo para o autor poder testá-los e o aeroclube poder implementá-los ao simulador. A bancada será construída e alojada em uma sala da ins-

tituição, localizada no próprio hangar. Os conhecimentos adquiridos foram aproveitados para compor o atual trabalho de conclusão de curso.

1.3 Aspectos Metodológicos

A metodologia utilizada para a realização da pesquisa proposta é um estudo prático experimental, dividido em quatro etapas. Na primeira etapa foram definidos e elaboradas as posições dos pilotos (posteriormente denominadas *packages*) que determinam a amplitude de aplicação da bancada.

Com o auxílio da Dragonfly, foram pesquisadas aeronaves do tipo planador para futura construção de uma aeronave real. Uma aeronave encontrada, de origem europeia, chamou a atenção da equipe e servir de inspiração para o desenvolvimento, projeto e construção de seu primeiro motoplanador.

O estudo foi dividido em quatro etapas: elaboração de posições do corpo humano no posto de trabalho e validação. Não se utilizou nenhum método prático no desenvolvimento do trabalho, mas apenas computacional.

A primeira etapa consistiu-se em modelar as posições do corpo para determinar a amplitude e dimensionamento interno do planador e seu real tamanho. Já a segunda etapa, a validação, foi responsável por validar seus posicionamentos na bancada.

A terceira etapa, com os estudos feitos na etapa anterior, consistiu em desenvolver uma bancada de simulação em CAD aplicando as sugestões de melhorias da aeronave. A quarta e última etapa foi fazer um novo estudo ergonômico do simulador, nas mesmas condições impostas no primeiro estudo, mas junto às melhorias adotadas.

Para realizar o trabalho, o autor adquiriu conhecimentos e auxílio do Aeroclube do Planalto Central (APC), no município de Formosa-GO, para a execução do relatório e desenhos técnicos. Também, não somente com o auxílio do aeroclube, também buscaram-se referências externas de como integrar os movimentos de uma aeronave a uma bancada de simulação para o desenvolvimento de um simulador de voo para a Dragonfly, que irá construir uma bancada, não somente para fins acadêmicos, mas também para os membros adquirirem capacidade de pilotar um planador real.

1.4 Organização e Divisão do trabalho

Todo o trabalho foi dividido em sete capítulos, cada um integrando e compondo o documento. O primeiro capítulo, sendo este presente, aborda uma breve introdução a respeito de planadores e sobre a necessidade de treinar pilotos, além da motivação justificativa que tornaram este trabalho possível.

O segundo capítulo aborda a teoria embasada para realizar o trabalho, explicando os conceitos de ergonomia e suas aplicações, a respeito de controles de voo e onde estão localizados e como controlar uma aeronave, sobre as diferentes categorias de simuladores de voo e suas aplicações e, por fim, sobre o ambiente de simulação (*Mock up*) e como ele é integrado à ergonomia e ao local de trabalho.

O terceiro capítulo contém a metodologia abordada de forma detalhada e as informações a respeito dos desenhos computacionais de duas fuselagens de planador e de peças e comandos que compõem seus *cockpits*, como manche, pedal, painel de instrumentos e comando do flape, tudo desenvolvido em CAD no programa CATIA V5R21. Todos os comandos são explicados, quais suas funcionalidades e como são alocados no interior da aeronave.

No quarto capítulo estão expostos os estudos iniciais de ergonomia do produto envolvendo ambas aeronaves do trabalho. Colocaram-se três manequins, pré posicionados, de diferentes estaturas para poder realizar as análises ergonômicas pertinentes ao trabalho. São analisados os aspectos referentes ao espaço interno dos *cockpits* das aeronaves, sobre o alcance dos membros na aeronave, sobre os campos de visão tanto internos quanto externos da aeronave e sobre os níveis de conforto nos *cockpits*.

O quinto capítulo, a partir da coleta de dados do capítulo anterior, será apresentado uma proposta de bancada de simulação envolvendo o planador conceito definido pela Dragonfly, com as melhorias sugeridas e com os comandos funcionais com o auxílio de *software* e *hardware* embarcados ao simulador de voo.

No sexto e penúltimo capítulo, estão apresentados os novos estudos ergonômicos. Os aspectos foram os mesmos abordados no quinto capítulo, porém com as melhorias implementadas ao simulador.

Por fim, fez-se um pensamento conclusivo do trabalho realizado, expondo as dificuldades e facilidades que o autor obteve com o desenvolvimento do projeto. Logo após, pode-se encontrar os apêndices, que contém os desenhos técnicos das peças do projeto, uma tabela de custos estimados para a construção da bancada de simulação, e os arquivos em anexo, contendo informações referentes à média das medidas da população brasileira.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Ergonomia do Produto

Os primeiros estudos ergonômicos começaram logo após o término da Segunda Guerra Mundial (1939–1945), como consequência da interdisciplinaridade ainda no período da guerra (IIDA, 2005). Define-se como ergonomia como sendo o estudo das interações das pessoas de como elas se comportam e interagem diante de um local de trabalho, de sua adaptação e suas atividades num determinado ambiente. A ergonomia possui uma ampla visão de como acontece a interação homem-máquina-ambiente, ou seja, entre esses três elos para se poder projetar o trabalho que possa ser executado, preservando a saúde, segurança e satisfação do trabalhador (IIDA, 2005).

A Associação Internacional de Ergonomia (IEA) define a ergonomia como sinônimo de Fatores Humanos, sendo estes aplicados às interações com outras pessoas e sistemas de gerenciamento de trabalho como sendo (ABERGO, 2012):

"A Ergonomia (ou Fatores Humanos) é uma disciplina científica relacionada ao entendimento das interações entre os seres humanos e outros elementos ou sistemas, e à aplicação de teorias, princípios, dados e métodos a projetos de modo a otimizar o bem-estar humano e o desempenho global do sistema."

No Brasil, para auxiliar os estudos e pesquisas ergonômicas, além de divulgar seus resultados e contribuir para as boas práticas de ergonomia nos locais de trabalho, existe a Associação Brasileira de Ergonomia (ABERGO). Existem outras definições no âmbito internacional para o que é ergonomia, portanto, segue abaixo a definição adotada pela ABERGO (IIDA, 2005):

"Entende-se por Ergonomia o estudo das interações das pessoas com a tecnologia, a organização e o ambiente, objetivando intervenções e projetos que visem melhorar, de forma integrada e não-dissociada, a segurança, o conforto, o bem-estar e a eficácia das atividades humanas."

A ergonomia possui o objetivo de identificar possíveis posições de desconforto do corpo humano diante de sua interação com a máquina e com o ambiente, de modo a melhorar o posto de trabalho em que está envolvida. Ela também objetiva, através de estudos e testes, reduzir a fadiga, o estresse, erros e acidentes de trabalho (IIDA, 2005) para prevenir possíveis lesões ou dores musculares.

Sua aplicabilidade abrange diversas áreas de trabalho, desde o campo agropecuário até a operação nos diversos meios de transporte. Inicialmente a ergonomia era limitada aos meios militar e aeroespacial, entretanto, com o passar do tempo, os estudos atingiram o campo da agricultura, da vida cotidiana, no setor de serviços, indústria e construção civil (IIDA, 2005).

Como dito anteriormente, a ergonomia no meio aeroespacial já era aplicada no período pós-guerra, logo não é novidade seu uso para estudar e melhorar as condições de trabalho da tripulação de uma aeronave, por exemplo. Portanto, o presente trabalho se trata dos mesmos estudos feitos, mas com aplicação em planadores.

2.1.1 Antropometria

Na ergonomia, a antropometria se refere às medidas e diferentes formas do corpo humano e seus membros. Essas medidas variam de pessoa para pessoa e de região para região. Para o caso das medidas brasileiras, há escassez de informação das medidas dos membros, por isso, os comprimentos mais próximos, comparadas a de outros povos, se assemelha às medidas francesas (MIRANDA, 2017), o que, portanto, será usada como referência para o trabalho.

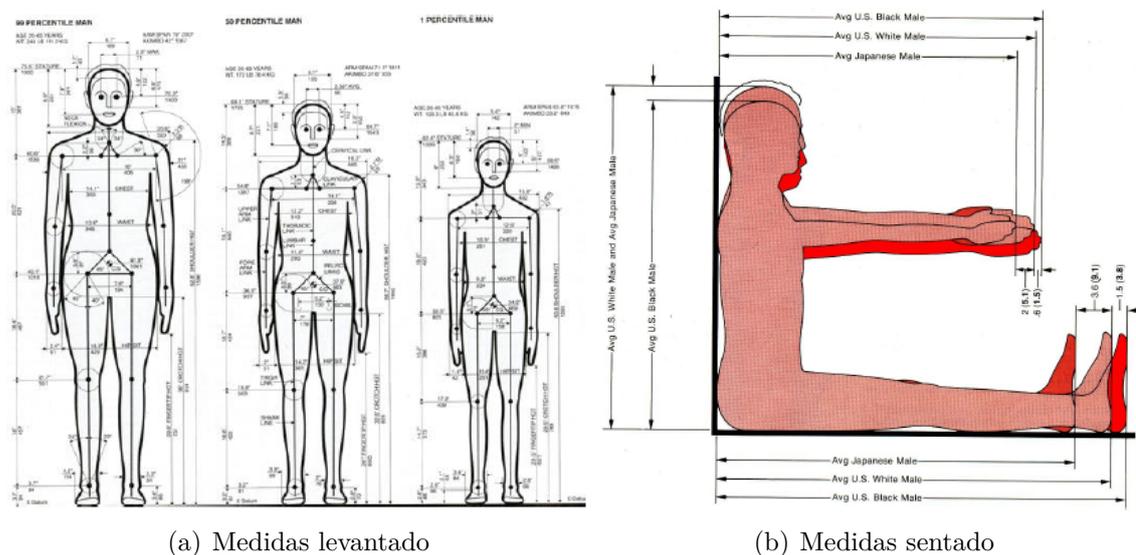


Figura 3 – Medidas antropométricas. Fontes:(TILLEY, 2005).

Como mostrado na fig. 3, não há um padrão globalmente definido, pois as medidas de cada membro do corpo variam de indivíduo para indivíduo de acordo com gênero, idade e estatura. Por essa razão que se faz uma amostragem da população para estimar a melhor postura no local de trabalho. Com as amostras coletadas, a partir dessas, é possível dimensionar o posto de trabalho da melhor forma ao trabalhador.

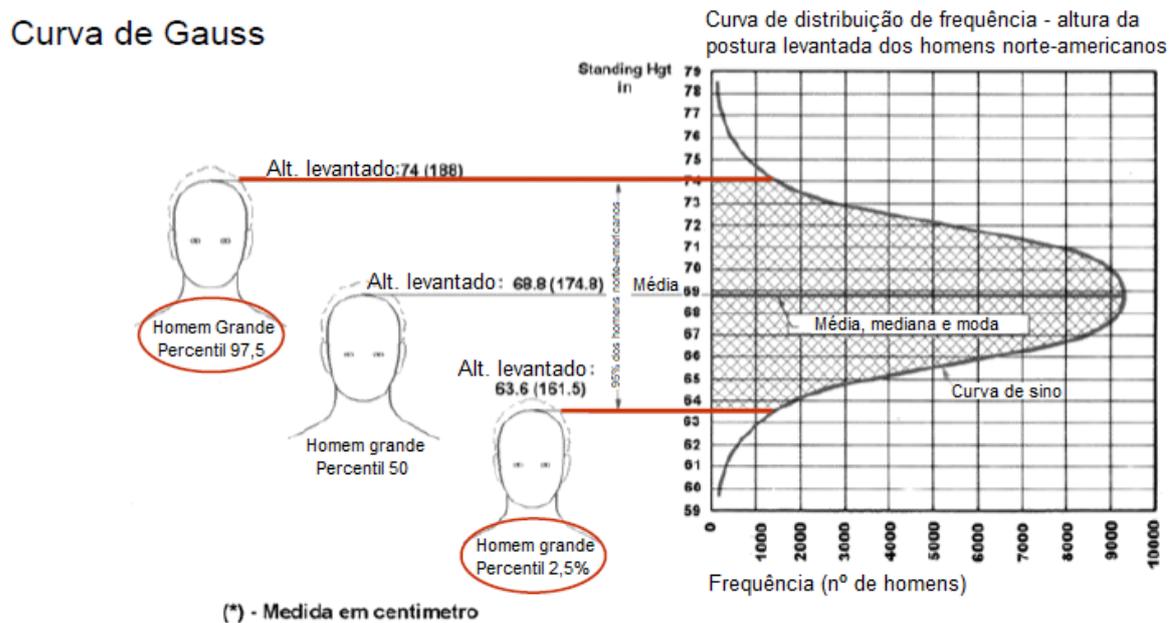


Figura 4 – Curva de Gauss para estatura. Fonte: (MIRANDA, 2017), adaptado.

No meio aeronáutico, cada centímetro e/ou cada quilograma adicionada ou retirada pode fazer grande diferença no projeto de uma aeronave, seja ela de passageiros ou de uso pessoal, o que pode comprometer seu desempenho e podendo até causar um acidente devido a uma resposta tardia (MIRANDA, 2014). Por isso que um espaço interno de uma aeronave é pensado para acomodar um operador tripulante de modo seguro, confortável e funcional em simultâneo, dado que o piloto pode fazer um procedimento de emergência ou outro procedimento anormal de voo e ele não tem tempo de pensar no conforto próprio, mas sim na própria vida e de outras pessoas.

2.1.2 Percentis

Os percentis são dados estatísticos agrupados em grupos a partir da coleta dos resultados da curva normal de amostragem antropométrica. Como os dados são divididos em %, então as medidas são divididas num total de cem grupos, sendo cada um representado por uma porcentagem como mostrado na figura 4. Os tamanhos dos percentis são definidos considerando medidas iguais ou inferiores a esse mesmo percentil, logo, 100-x% possuem medidas superiores a esse percentil (MIRANDA, 2014).

Para qualquer projeto onde uma pessoa deve ser inserida para interagir com uma máquina ou no seu local de trabalho, percentis de uma pessoa são usados para definir suas dimensões. Geralmente, são definidos os extremos dos percentis, como os valores de 95% e de 5%, não os medianos, pois é se testando os valores extremos de percentis da população que se testa um posto de trabalho para acomodar maior parte das pessoas dessa população (MIRANDA, 2014).

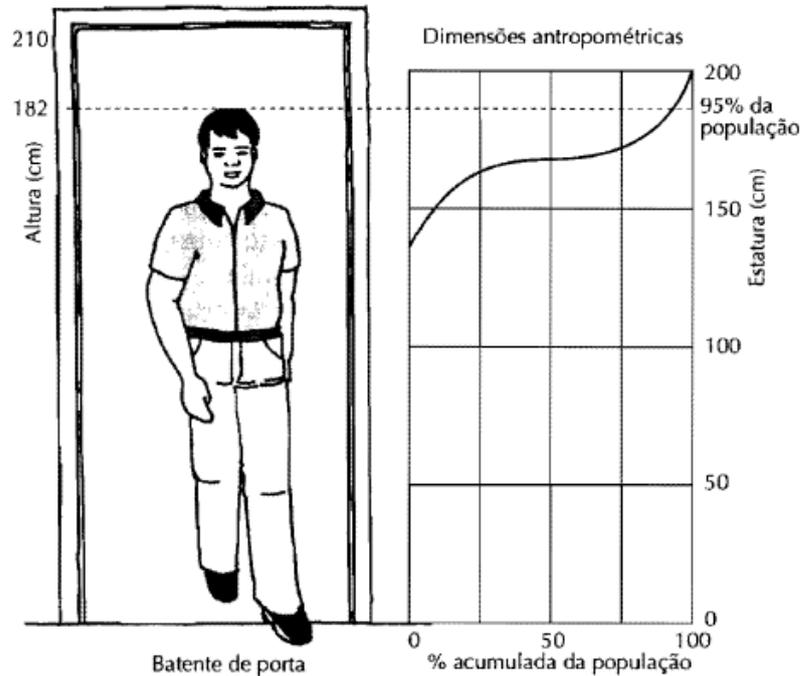


Figura 5 – Distribuição Gaussiana da população para estatura. Fonte: (IIDA, 2005)

Para fins de projeto ergonômico do vigente trabalho, considerar-se-ão os percentis de 95% masculino e outro feminino, pois a preocupação de uma aeronave não é acomodar pessoas com percentis menores — estes, por sua vez, podem ser ajustados tanto pelo próprio assento quanto acrescentando suportes para as costas —, mas sim pessoas de alta estatura devido às limitações de espaço das aeronaves (EFA, 2021).

2.1.3 Package

Um *package* é a fase do projeto onde ocorre o posicionamento do corpo humano dentro de um veículo. Seu estudo é fundamental para que o tripulante possa alcançar os instrumentos e botões sem se esforçar desnecessariamente.

Em um *package*, para fins de estudos e posicionamentos para pilotagem de aeronaves, o parâmetro utilizado para estudos ergonômicos é a Posição do Olho (*Design Eye Point*, DEP, em inglês), no caso, na posição média entre ambos os olhos do operador, de acordo com a *Society of Automotive Engineers — Aerospace Recommended Practice* (SAE — APR), ou *SAE Aerospace*, como também é chamada (SAE, 2003). Também, conforme a *SAE Aerospace*, o DEP deve estar em concomitância com o posicionamento do assento (*Seat Reference Position*, SRP), sendo que o DEP é o mais importante.

Para aviação civil, a prioridade para o piloto é que ele tenha visão interna privilegiada (MIRANDA, 2017), visto que o piloto deve cumprir uma série de procedimentos para conduzir a aeronave, tanto no solo quanto em voo, de forma segura.

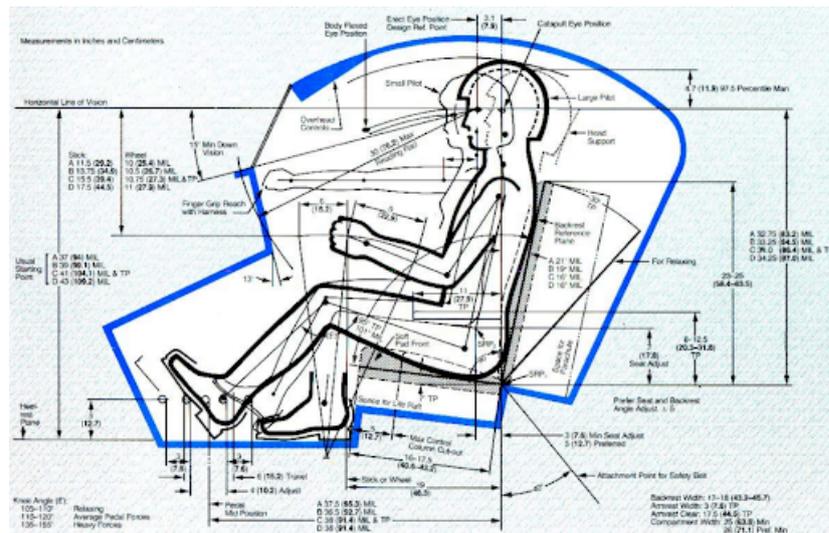


Figura 6 – Dimensões antropométricas no *cockpit*. Fonte: (TILLEY, 2005)

Também com o *package* de *cockpit* é importante estudar diferentes alcances que o piloto tem quando posicionado no assento e com os cintos atados. Estes diferentes alcances dos instrumentos são divididos em zonas, conforme o piloto estende seus braços ou não no espaço interno (SAE, 2003):

- **ZONA I:** Controles alcançados com cinto atado e travado, e os membros não muito esticados;
- **ZONA II:** Controles alcançados com cinto atado e travado, e os membros totalmente estendidos;
- **ZONA III:** Demais controles.

Um *cockpit* de uma aeronave (comumente chamado cabine do piloto) é o local onde ficam localizados o assento do piloto, os comandos de voo e os instrumentos de voo para a boa condução da aeronave. Em questão de estudos ergonômicos, para o *cockpit*, os aspectos mais relevantes de estudar são (SAE, 2003):

- Design centrado no usuário;
- Posição do olho (*Design Eye Point*, DEP);
- *Seat Reference Position* (SRP);
- Visibilidade externa e interna;
- Acesso aos comandos de voo;
- Ajustes para diferentes percentis.

A maioria dos *cockpits* aeronáuticos possuem como comando principal o manche — existem aeronaves tripuladas sem manche — que, diferente dos carros, pode ser puxado ou empurrado. Para a limitação de seu movimento e, como o trabalho se encaixa na aviação civil, a norma (SAE, 2003) (4101) será a referência utilizada para os estudos no *cockpit*.



Figura 7 – Exemplo de *cockpit* de planador. Fonte: (FAA, 2013).

Um *cockpit* de planador é mais simples do que os de aviões, visto que os planadores não possuem motorização própria, o que explica a presença de poucos instrumentos no painel, além do fato de o voo ser estritamente visual. Entretanto, no caso deste projeto, o planador será motorizado, mas sem muitos acréscimos de instrumentos, pois a operação do motor é apenas para decolagem da aeronave.

2.1.4 Método RULA — *Rapid Upper Limb Assessment*

Este método, criado pela Universidade de Nottingham, no Instituto de Ergonomia Ocupacional (CATIADOC, 2021a), consiste em pontuar e avaliar a postura dos membros superiores e inferiores do corpo humano em relação ao local de trabalho que a pessoa está inserida. Sua tradução significa "Avaliação Rápida dos Membros Superiores", pois, originalmente, consistia em avaliar apenas os membros superiores do corpo durante o trabalho. Porém, com o tempo, também houve a necessidade de se avaliar os membros inferiores, ficando apenas o nome mantido.

Esta avaliação é importante para evitar o risco de dores musculoesqueléticas do trabalhador, garantindo sua segurança (CATIADOC, 2021b). Cada postura é enquadrada numa faixa de ângulos dependendo das posturas dos membros do corpo e, para cada membro, existe uma pontuação específica que depende da postura do membro anteriormente avaliado. A pontuação de n.º 1 é a que representa o menor risco, enquanto a de n.º 6 representa maior risco. A pontuação de cada membro é mostrada na tabela 1 abaixo:

Tabela 1 – Pontuação RULA. Fonte: (CATIADOC, 2021b) adaptado.

Membro do corpo	Pontuação	Cor da pontuação					
		1	2	3	4	5	6
Braço	1 a 6	1	2	3	4	5	6
Antebraço	1 a 3	1	2	3	4	5	6
Pulso	1 a 4	1	2	3	4	5	6
Torção Pulso	1 a 2	1	2	3	4	5	6
Pescoço	1 a 6	1	2	3	4	5	6
Tronco	1 a 6	1	2	3	4	5	6
Pernas	1 a 2	1	2	3	4	5	6

Para realizar a pontuação, o método divide o corpo em duas seções, denominadas A e B. A primeira seção (A) pontua os seguintes membros do corpo: braço, antebraço, pulso e torção do pulso. Já segunda seção (B) pontua: pescoço, tronco e pernas. A pontuação membro a membro é feita nesta ordem, pois uma influenciará na outra. As pontuações são feitas segundo as tabelas A (Anexo C.1) e B (Anexo C.2) para então, se saber a pontuação final na terceira tabela (Anexo C.3).

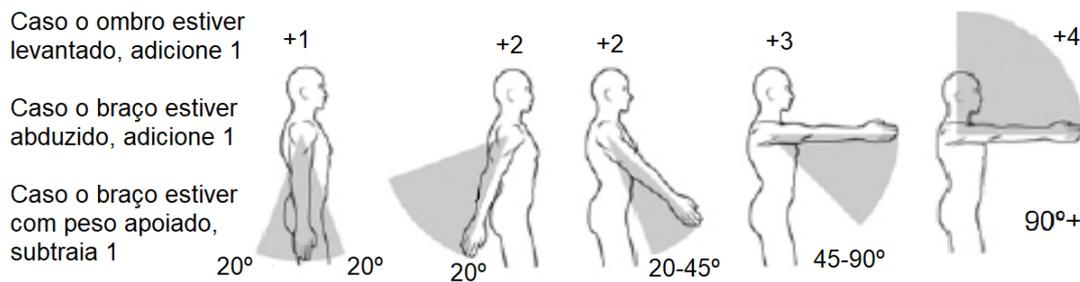


Figura 8 – Pontuação do braço (RULA). Fonte: (PLUS, 2021), adaptado.

Primeiro, pontua-se ambos os braços da pessoa segundo a figura 8 acima. O desenho hachurado em cinza mostra a região de movimento do membro seguida de seus ângulos limites. Acima da cabeça do manequim está representada a pontuação a ser seguida. Nota-se, no lado esquerdo dos manequins, que também existem outros critérios de pontuação, caso o braço esteja posicionado de outra forma que não esteja mostrada

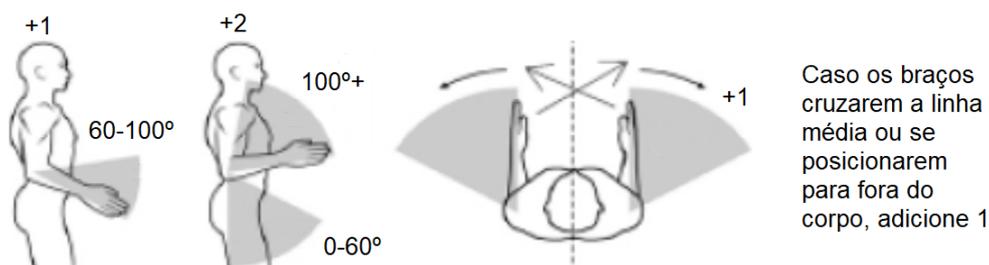


Figura 9 – Pontuação do antebraço (RULA). Fonte: (PLUS, 2021), adaptado.

A segunda parte a ser pontuada é o antebraço (esquerdo e direito). Também pode-se notar, pela figura 9, as áreas hachuradas de movimento do membro, além de ser mostrado, no terceiro manequim (da esquerda para a direita) que está ilustrada a linha média da pessoa. Nota-se também que existem uma especificação de pontuação caso os braços estejam cruzados.

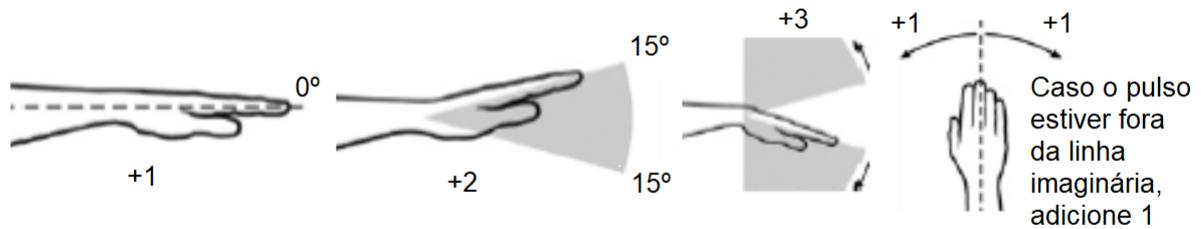


Figura 10 – Pontuação do pulso e torção do pulso (RULA). Fonte: (PLUS, 2021), adaptado.

O terceiro e último membro avaliado da seção A é o pulso e sua torção, como mostrado na figura 10. Também é possível ver a linha média do braço, tanto na vista lateral quanto na superior da mão, além de seu critério de torção lateral.

Estas são as partes do corpo avaliadas na Seção A, que será usada como critério para os membros da seção B, também conforme a ordem dita anteriormente e mostrada a seguir.

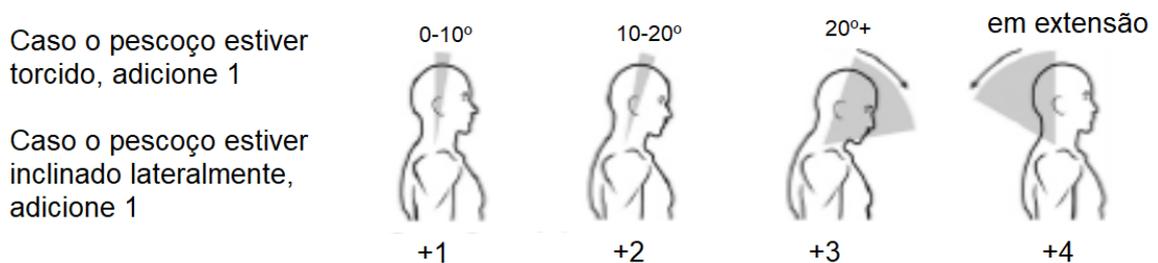


Figura 11 – Pontuação do pescoço (RULA). Fonte: (PLUS, 2021), adaptado.

O primeiro membro da seção B é o pescoço. Na figura 11 acima, abaixo dos manequins estão mostradas as pontuações segundo as posturas mostradas, enquanto acima da cabeça estão mostrados os ângulos das posições, mostrados de forma mais clara pelas áreas hachuradas. Também estão expostos, no lado esquerdo dos manequins, os critérios de pontuação diferentes dos mostrados na figura.

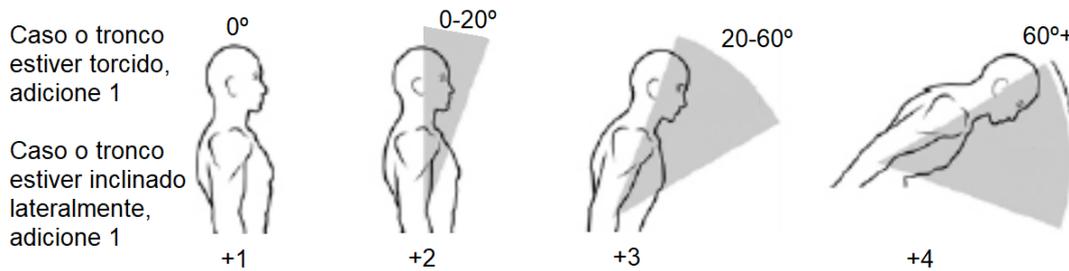


Figura 12 – Pontuação do tronco (RULA). Fonte: (PLUS, 2021), adaptado.

A segunda parte do corpo é o troco, onde são mostradas as pontuações abaixo do corpo e os ângulos de inclinação acima da cabeça, conforme mostrados na figura 12. Por fim, o último membro avaliado são as pernas. A avaliação desses últimos membros considera se elas estão ou não apoiadas. Caso as pernas estejam apoiadas, a pontuação será +1, caso contrário, pontuação +2.

Outros dois fatores que também são considerados para o cálculo da pontuação *RULA* são referentes à frequência que o corpo exerce uma atividade específica, ou se o corpo está de forma estática, e também se a pessoa está exercendo força ou carregando alguma peça com certa massa.

Após todas as pontuações de ambas as seções e feita a avaliação na última tabela, as medidas a serem tomadas são mostrados conforme mostrado na tabela 2 abaixo:

Tabela 2 – Classificação dos Níveis de risco musculoesquelético. Fonte: (PLUS, 2021), adaptado.

Nível	Grau	Ação a ser tomada
1 a 2	Sem risco	Não precisa mudar
3 a 4	Baixo risco	pode ser que mude
5 a 6	Médio risco	investigar mudar logo
6 ou mais	Alto risco	Mudar de imediato

As medidas mostradas servem para prevenir que lesões musculoesqueléticas ocorram devido ao mau posicionamento dos membros.

2.2 Controles de voo

As aeronaves se movimentam ao longo dos três eixos imaginários ao longo de sua estrutura, atravessando seu Centro de Gravidade — local onde todas as forças são concentradas —, sendo esses eixos: longitudinal, linha imaginária que atravessa toda a fuselagem; o eixo lateral, que passa pela envergadura da asa, ou seja, de uma ponta de asa à outra; e o eixo vertical, que atravessa a fuselagem de baixo para cima (HOMA, 2010). Os controles para este trabalho de conclusão de curso serão abordados mais à

frente e serão de suma importância para compor os resultados encontrados, devido ao uso constante do piloto.

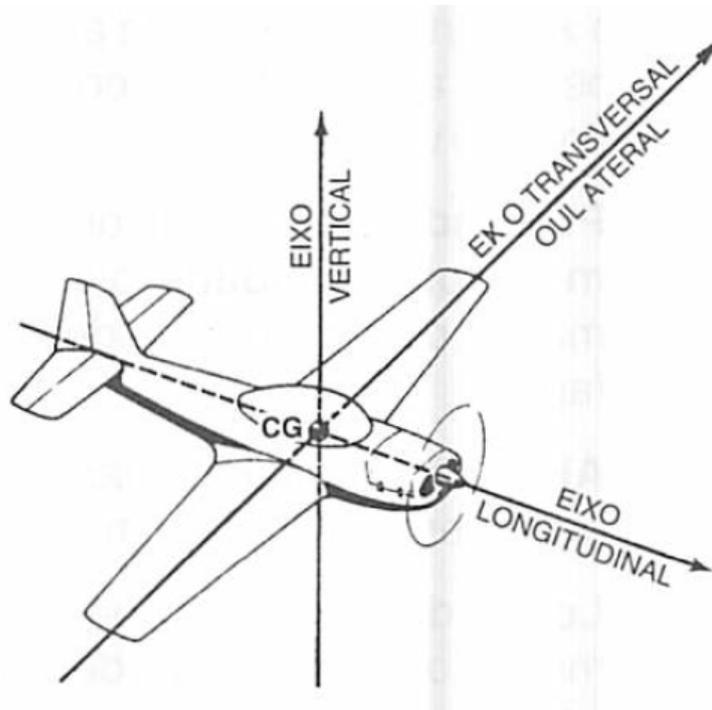


Figura 13 – Eixos da aeronave. Fonte: (HOMA, 2010).

Para controlar uma aeronave, tanto no solo e quanto em voo, os pilotos possuem à sua disposição dois controles fundamentais: o manche e o par de pedais, para movimentarem as superfícies de controle em voo.

Um manche é um comando de voo que controla as superfícies primárias de controle como o profundor (movimento de cabrar e picar a aeronave, que se faz empurrando e puxando o manche, respectivamente) e o aileron (movimento de rolamento, movimentando o manche para esquerda e direita). Existem duas categorias de manches utilizadas, sendo elas:

- **Volante:** este manche se assemelha ao volante usado em automóveis e outros veículos terrestres. Para realizar o movimento de cabrar e picar, basta empurrar ou puxar o manche. Para o movimento de rolamento, o piloto deve girar o manche no sentido desejado. Esse é o manche mais utilizado nos aviões civis.
- **Bastão:** este manche é um comando em forma de bastão, uma alavanca fixada no assoalho da aeronave e similar a um "joystick" dos vídeo-jogos. Para efetuar o rolamento, o piloto deve empurrar o bastão para o lado desejado da curva. É o manche mais utilizado na aviação militar e desportiva.

Já o par de pedais, controlados pelos pés do piloto, movimentam o leme de direção, movimentando assim, o eixo vertical da aeronave. Os pedais também controlam aviões pequenos no solo durante a fase de taxiamento (guiar o avião até a pista de decolagem ou para o hangar). Mas, no caso de planadores, eles não taxiam devido à ausência de motorização própria, tendo de ser empurrados manualmente ou com auxílio de um veículo terrestre próprio de aeródromo até a pista de pouso, ou rebocado de volta ao hangar da mesma forma.

Para atingir as superfícies de controle externas diretamente do *cockpit*, estes são ligados por cabos de aço ou por hastes, a depender do projeto, percorrendo toda a estrutura interna com auxílio de polias e roldanas para não comprometer o desgaste interno da fuselagem, além de evitar que os comandos travem internamente e a aeronave perca o controle em voo.

Além dos controles principais de uma aeronave, a maioria delas também possuem controles de dispositivos hipersustentadores como os flapes e os freios aerodinâmicos, também conhecidos como *speedbrakes* ou *spoilers*. Os flapes e os freios aerodinâmicos são utilizados para aumentar a sustentação da aeronave em baixa velocidade e para diminuir sua velocidade, respectivamente, tanto em voo quanto na hora do pouso. Em planadores, ambos são controlados por uma haste de aço (cada comando com sua haste própria) onde o piloto a puxa para trás para ser acionado mecanicamente.

2.3 Categorias de Simuladores

Um simulador de voo é um conjunto de sistemas mecânicos e com *softwares* e *hardwares* embarcados para imitar um voo

A simulação de voo é uma medida de imitar um voo real, contudo em ambiente fechado e com o uso de computadores com programas de simulação embutido. O desenvolvimento de um simulador é de grande valia, se tratando de projeto de engenharia, já que envolve todas as fases do ciclo de vida de um projeto como: concepção, projeto, ensaio e produção (FREITAS, 2019). Na aviação e em estudos para ser piloto civil, um simulador permite uma primeira imersão prática do aluno piloto, além de priorizar sua segurança antes de iniciar seu treinamento em uma aeronave real (JUNIOR, 2015).

Existem, basicamente, três categorias de simuladores e para seus devidos usos, como mostrado a seguir.

2.3.1 Simples

Como o próprio nome já diz, trata-se de um simulador para fins recreativos. Quando se trata de um simulador de voo, entusiastas da aviação compram manches (ou

joysticks, dependendo da aeronave apenas para diversão, sem nenhuma intenção de treinamento sério para ser tornarem pilotos.



Figura 14 – Kit simples de simulador de voo. Fonte: (LIPAOGAMER, 2018).

Um simulador simples não requer muitos recursos para imitar um voo, mas necessitam de uma capacidade alta de processamento de vídeo para serem executados nos computadores domésticos. Os simuladores domésticos podem ser do mais simples, com o uso de teclados para realizarem o papel dos comandos, ou mais sofisticados, com a possibilidade de comprar mais equipamentos e tornar a simulação mais real possível.

2.3.2 Profissional

São simuladores que possuem equipamentos avançados e imitam as posições e funcionalidades de uma aeronave real. São usados para treinamento de pilotos quanto aos procedimentos a serem seguidos em ordem, tanto normais quanto de emergência.

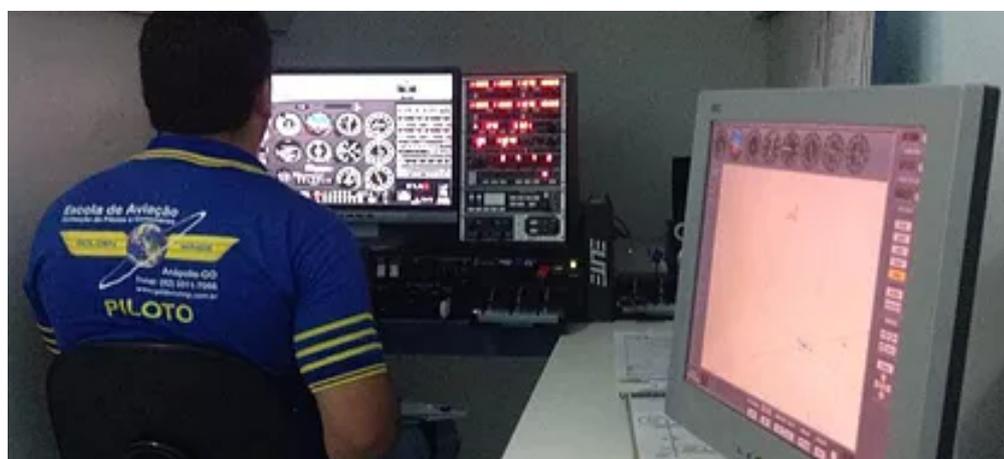


Figura 15 – Simulador para instrução de voo por instrumentos. Fonte: (WINGS, 2021).

Estes simuladores são usados em escolas de aviação principalmente para treinamentos de voo por instrumentos (IFR) e devem ser homologados pela ANAC cumprindo os requisitos mínimos exigidos (ANAC, 2020).

2.3.3 Full Flight Simulator

um simulador do tipo *Full Flight Simulator* (FFC), também conhecido por *Full Motion* é um simulador que imita o ambiente de uma aeronave real e seus reais movimentos, e contém todos os instrumentos que uma aeronave de médio e grande porte necessitam.

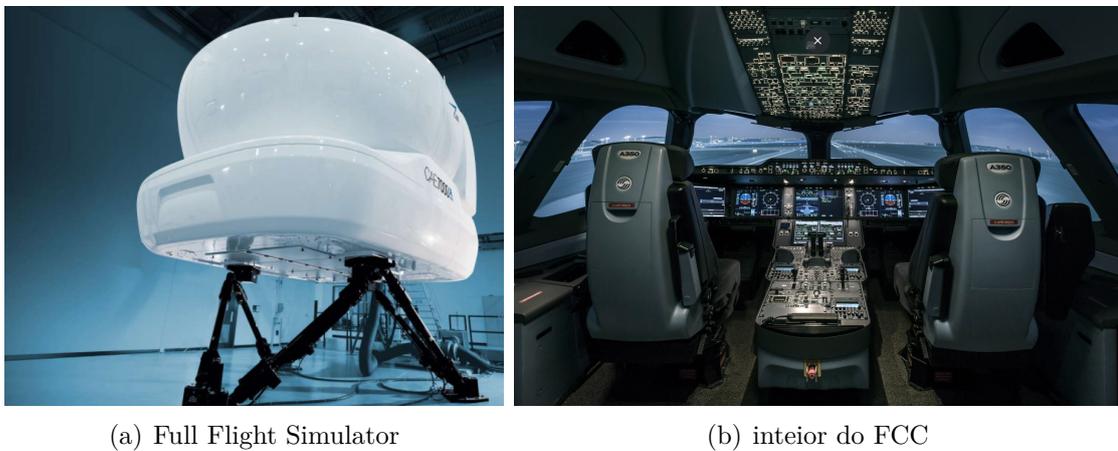


Figura 16 – Full Flight Simulator da CAE. Fontes: (CAE, 2021b) e (GRU, 2018).

Este simulador é usado para treinar e aperfeiçoar os procedimentos de voo de pilotos que desejam ou já ingressaram em companhias aéreas e precisam revalidar suas carteiras de habilitações técnicas para continuarem na profissão de piloto de linha aérea, pilotando aeronaves de passageiros como Boeing 737 ou Airbus 320 (CAE, 2021a).

2.4 Mock up de simulação

Um *mock up* é um lugar que imita um espaço de trabalho, em termos ergonômicos, para otimizar e melhorar a real construção desse posto de trabalho no futuro. É um espaço, em tamanho real, onde as pessoas podem interagir com o ambiente, imitando uma real situação de atividades realizadas com maquinário onde os operadores deverão ficar para poderem sugerir críticas e melhorias. O *mock up* é construído de materiais simples, como madeira, papelão e similares com a intenção de o operador dizer se algo precisa ser ajustado ou não (ERGOS, 2016).



(a) Vista lateral

(b) vista isométrica

Figura 17 – Mockup de simulação de *cockpit* de planador (2018).

As figuras 17 (a) e (b) acima representam um método de construção chamado "*quick and dirty mock up*" (sujo e rápido em inglês) de um planador *biplace* frente e trás usado para instrução. Este método consiste em montar uma bancada de trabalho com materiais simples (madeira, isopor, aço) e de fácil manuseio com a intenção de construir uma bancada em pouco tempo e com poucos recursos. Este modelo é útil para coletar dados importantes, pois é possível coletar dados que não seriam possíveis com um *mock up* 2D, além de ser amplamente utilizado na indústria e design de projetos. Entretanto, esse método não é o produto final de um projeto e possui limitações, onde dados específicos só poderiam ser estudados com um *mock up* mais avançado (SMITH, 2000).

3 Materiais e Métodos

Junto à Dragonfly, foram realizadas pesquisas sobre quais normas regem a construção de aeronaves experimentais no Brasil e sobre outras aeronaves usadas como referências para concepção de seu primeiro projeto. No decorrer das pesquisas, a equipe descobriu que, para construir e voar um motoplanador, ela precisará seguir os regulamentos da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). O principal desafio imposto pelos Regulamentos Brasileiros de Aviação Civil (RBAC) — órgão de regulamentos da ANAC — é que uma aeronave não pode ultrapassar 200 quilogramas (kg) de peso vazio para aeronaves motorizadas ou 80 kg para aeronaves não-motorizadas. Caso ultrapasse, ela deverá ser homologada para obter o certificado de aeronavegabilidade (ANAC, 2018).

Além de pesquisas, a Dragonfly teve a oportunidade de visitar o Aeroclube do Planalto Central, localizado no município de Formosa (GO). Os membros puderam aprender mais sobre o mundo do voo a vela, além de alguns membros poderem voar em planadores reais da instituição.

Ciente das regras, a equipe encontrou um motoplanador que lhes chamou a atenção: a aeronave AEROS AC-21, de origem ucraniana e sucessora do projeto ALATUS M-12 (AEROLA, 2008). Este motoplanador possui peso vazio inferior a 200 kg, portanto a Dragonfly adotou esta aeronave como Planador conceito de seus estudos. Entretanto, não foi possível coletar dados suficientes a respeito do *cockpit* do AC-21, então o manual da aeronave ALATUS foi utilizado como referência para se obter ideia de como se apresenta o *cockpit*.

Logo em seguida, foram feitas revisões bibliográficas a respeito de ergonomia do produto, em específico em relação às normas SAE Aerospace para desenvolvimento do *cockpit* de aeronaves (SAE, 2003).

O trabalho foi realizado com o auxílio da ferramenta computacional CATIA V5 R21, *software* específico para desenho assistido por computador e análise ergonômica, além de ser adotado pela Boeing, Airbus e Bombardier (RATE, 2010).

Com base nos parâmetros estabelecidos pelas normas vigentes, o desenvolvimento em CAD do planador foi possível graças ao apoio da Dragonfly e o *cockpit* foi desenhado com base em fotografias registradas pelos desenvolvedores da aeronave (Anexo A). Após desenhado o interior do planador, três manequins de tamanhos diferentes, do próprio *software* CATIA, foram inseridos ao *cockpit* e as análises ergonômicas foram, enfim, realizadas.

Em concomitante com o estágio supervisionado realizado, o autor fez uma consultoria ao Aeroclube do Planalto Central (APC), localizado no município de Formosa (GO), para aprender mais a respeito de simulador de voo para planadores. O APC possui um projeto de construção de bancada de simulação para treinar pilotos de planadores a realizarem procedimentos normais e de emergências durante um voo a vela, logo, o apoio da instituição foi de grande valia para desenvolver um projeto de bancada de simulação para a UnB.

Além da consultoria feita no aeroclube, também foram pesquisadas ideias de projeto de simuladores de voo caseiros, porém estes para fins exclusivamente recreativos, mas que serviram de base para a concepção de comandos e mecanismos para a criação da bancada de simulação.

Com base no apoio do aeroclube e com base em projetos de comandos de aeronaves, uma bancada de simulação foi projetada e desenhada, também no CATIA, e melhorias sugeridas foram implementadas no trabalho para a concepção do simulador de voo.

3.1 Concepção de Projeto

3.1.1 Características do Planador Conceito

O planador AEROS AC-21 é um motoplanador (ou planador autolançável) de origem ucraniana desenvolvido entre os anos de 2000 a 2005, sendo uma evolução do seu antecessor AL-12 (hoje chamado Alatus) (AEROS, 2005).



Figura 18 – Motoplanador AEROS AC-21 decolando. Fonte: (AEROS, 2005).

O motoplanador possui a versão não motorizada e foi concebido para voo livre, se enquadrando na categoria *microlift*. O planador é uma fusão entre duas firmas no mesmo ano e do mesmo país de origem: AEROS e AEROLA. A partir do ano de 2006, foi decidido,

a partir do AL-12, que melhorias deveriam ser feitas para melhorar as condições de voo da aeronave (AEROS, 2005). As melhorias propostas foram:

- Atender aos requisitos da DULV and DAeC para aeronaves leves;
- melhorar motorização da aeronave;
- melhorar a aerodinâmica da fuselagem e acomodar a hélice dentro da fuselagem.

Todos os requisitos foram atendidos, tanto que a estrutura da longarina de asa ficou 25% mais resistente, suporta cargas G negativas (-2G), motorização foi melhorada para ser usado 75% da potência e o comportamento em voo da aeronave foi semelhante a de projetos anteriores e com pouco arrasto, além do canopy ser mais transparente, dando mais visibilidade ao piloto.

A tabela abaixo mostra todas as especificações da aeronave: comprimentos, performance de voo e pesos suportados.

Tabela 3 – Tabela de características do AC-21. Fonte: (ADA, 2007).

Performance	
Razão L/D	27
Mínima razão de descida	0,6 (m/s)
Velocidade de estol	47–52 (km/h)
Velocidade máxima (VNE)	168 (km/h)
Motorização	Hirth F33 de 28 HP
Razão de subida	2,5 (m/s)
Especificações	
Tripulação	1 piloto
Comprimento	6,6 (m)
Altura	2,15 (m)
Envergadura	13,36 (m)
Área da asa	13,45 (m ²)
Materiais Estruturais	Compósitos de Fibra de vidro e carbono
Pesos	
Peso vazio	144 (kg)
Peso máximo de decolagem	264 (kg)
Peso estimado do piloto	60–110 (kg)

A aeronave é construída de fibras de vidro e carbono, materiais leves e resistentes. Também se nota que a asa é entelada, além de resistente, o que diminui consideravelmente o peso vazio do motoplanador, ao contrário de planadores convencionais.

3.1.2 Fuselagens

Ambos os modelos computacionais das fuselagens foram desenhados pelos membros da Dragonfly e cedidas ao autor para poder refiná-las. As fuselagens foram importadas de modos diferentes, sendo o primeiro planador (Aeros AC-21) importado diretamente em formato de superfície, enquanto o segundo planador (Comparativo NACA) foi desenhado importando-se suas coordenadas e a superfície desenhadas ao redor delas.

Em ambos os planadores, desenharam-se os componentes internos para auxiliarem o piloto durante o voo e poder conduzir a aeronave, tais como manche, pedal, controle de flape, painel de instrumentos e encosto de cabeça, que serão detalhados posteriormente.

3.1.2.1 AC-21

A fuselagem do planador AC-21 foi desenhada diretamente do *software* aberto *OpenVSP*, criado pela Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço (NASA). A superfície foi importada buscando-se como base fotos de três vistas do planador e com suas dimensões pré-estabelecidas como mostrado nas figuras 19 (a), (b), (c) e (d) abaixo. As ilustrações só possuem a parte externa da aeronave, sem nenhum dos componentes incluídos ou outro detalhe interno. O desenho encontra-se em Anexo B.

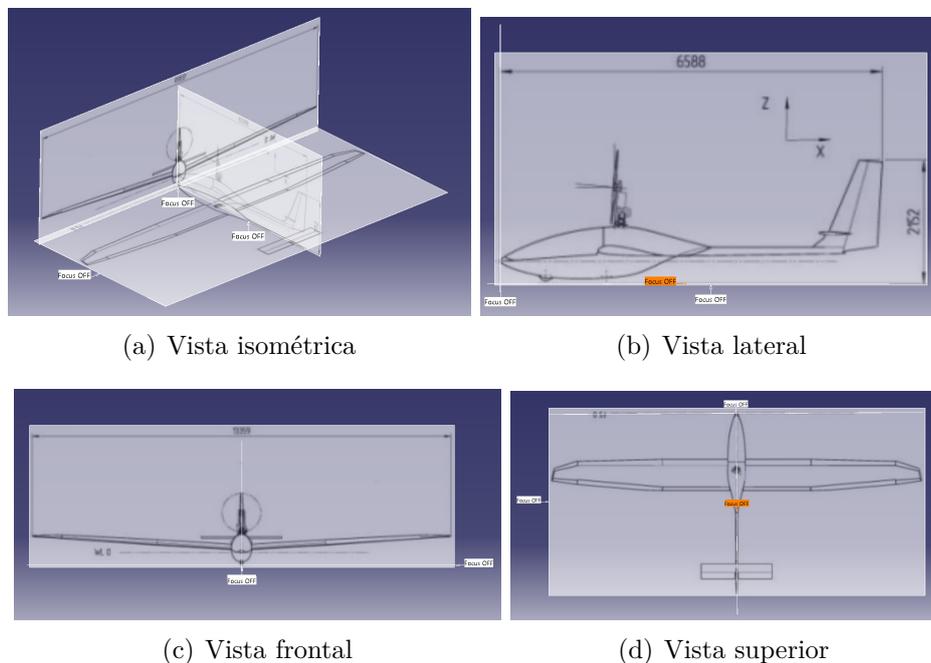


Figura 19 – Blueprint do AC-21. Fonte: (ADA, 2007) (2021).

Após a importação, cortes nas asas e na empennagem foram realizados para as superfícies, inicialmente separadas, serem integradas e formarem uma só superfície e obter um corpo sólido do planador. Por fim, o planador foi desenhado com as partes sólidas.

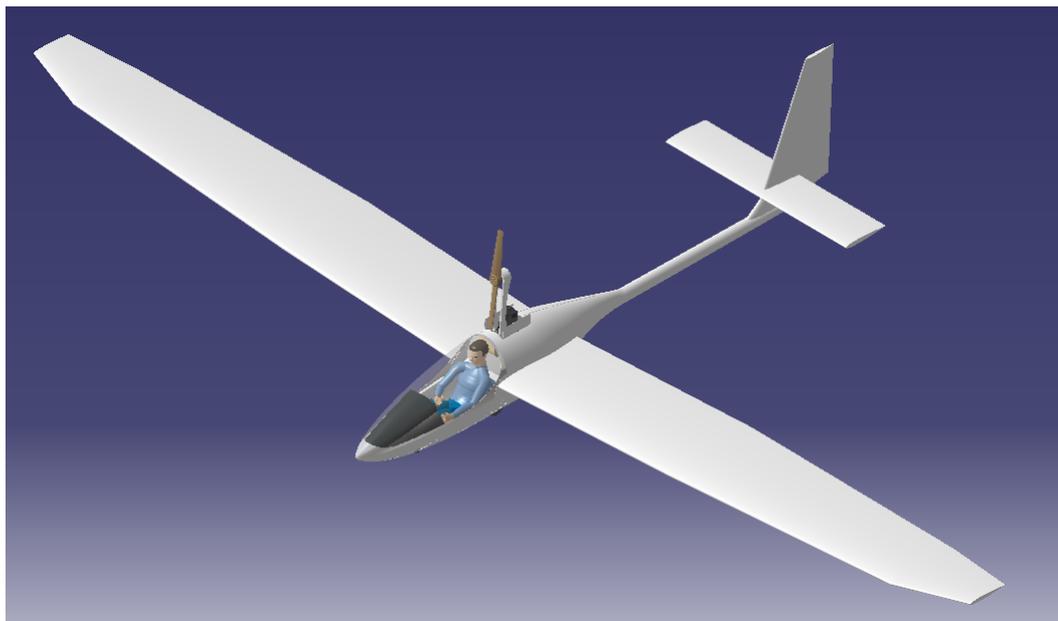


Figura 20 – CAD do Motoplanador AC-21 (2021).

No AC-21 foram incluídas as partes como motor, hélice, haste de apoio da hélice e trens de pouso — principal e bequilha dianteira. Para o atual trabalho, não há interesse em detalhar esses componentes, mas apenas para se obter ideia de seus tamanhos e para estudos futuros.

3.1.2.2 NACA

A fuselagem NACA, também desenhada com o auxílio da Dragonfly, é uma fusão de dois perfis aerodinâmicos. São os aerofólios NACA 0006 para as laterais e NACA 64-208 para extradorso e intradorso da fuselagem. Essa fuselagem foi desenhada conforme o método de Galvão para corpos com pouco arrasto aerodinâmico (GALVÃO, 1968) e que serve de base de comparação para a Dragonfly poder diversificar entre outras fuselagens para seu futuro projeto e construção.

Para desenhá-la, suas coordenadas foram cedidas em arquivo .txt e copiadas para GSD Excel para o Catia. Antes de importar as coordenadas para o Catia, algumas modificações tiveram de ser feitas no Excel: o ponto (.) teve de ser substituído por vírgula (,), pois essa é a leitura de número decimal no Catia. Além disso, houve a necessidade de separar por espaços maiores as componentes "x", "y" e "z" de cada coordenada e separá-las em três colunas de células, pois as três componentes estavam em uma única célula e o Excel não saberia interpretá-las separadamente. Por fim, com a função *Macros*, pôde-se exportar as coordenadas para o Catia com linhas que acompanham a fuselagem e visualizá-las em CAD mostrado abaixo. O arquivo (uma pasta interna e Excel do Catia) plotou as coordenadas, desenhou as linhas de cavernas e linhas que acompanham a fuselagem da aeronave e desenhou a superfície.

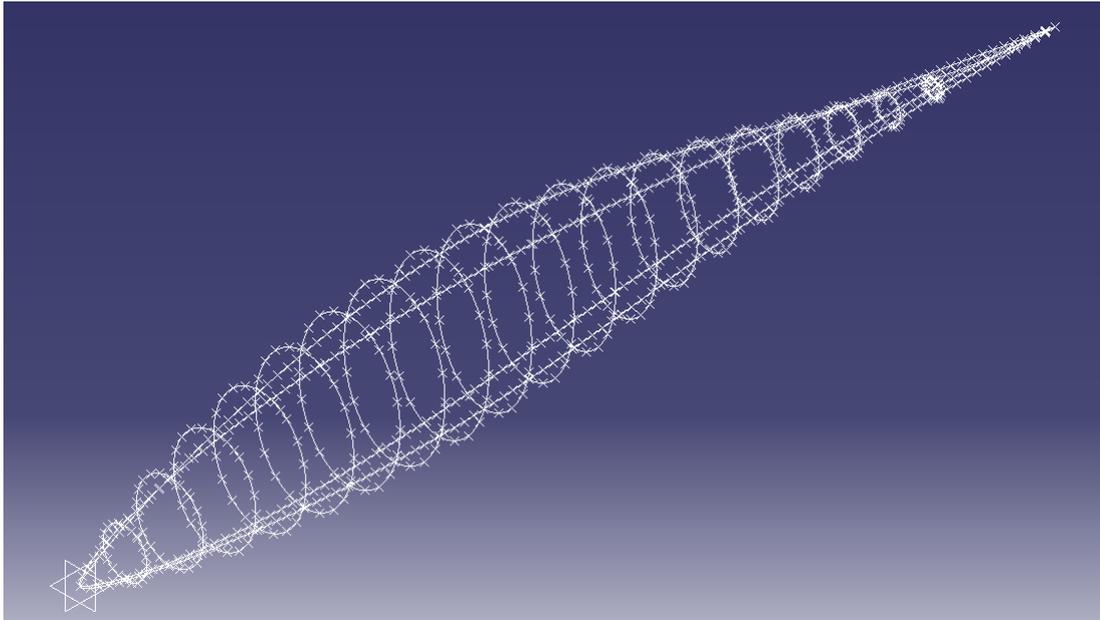


Figura 21 – Coordenadas dos perfis NACA 0006 e 64-208 (2021).

Como se pode ver na figura 21, existem cavernas ao longo das "longarinas" (os perfis NACA), aproveitadas para desenhar a superfície da fuselagem. Após desenhada a superfície, o interior da superfície foi aproveitado para desenhar seus componentes e inseri-los junto ao piloto para posterior estudo ergonômico e análise de como esses componentes se encaixam no *cockpit*.

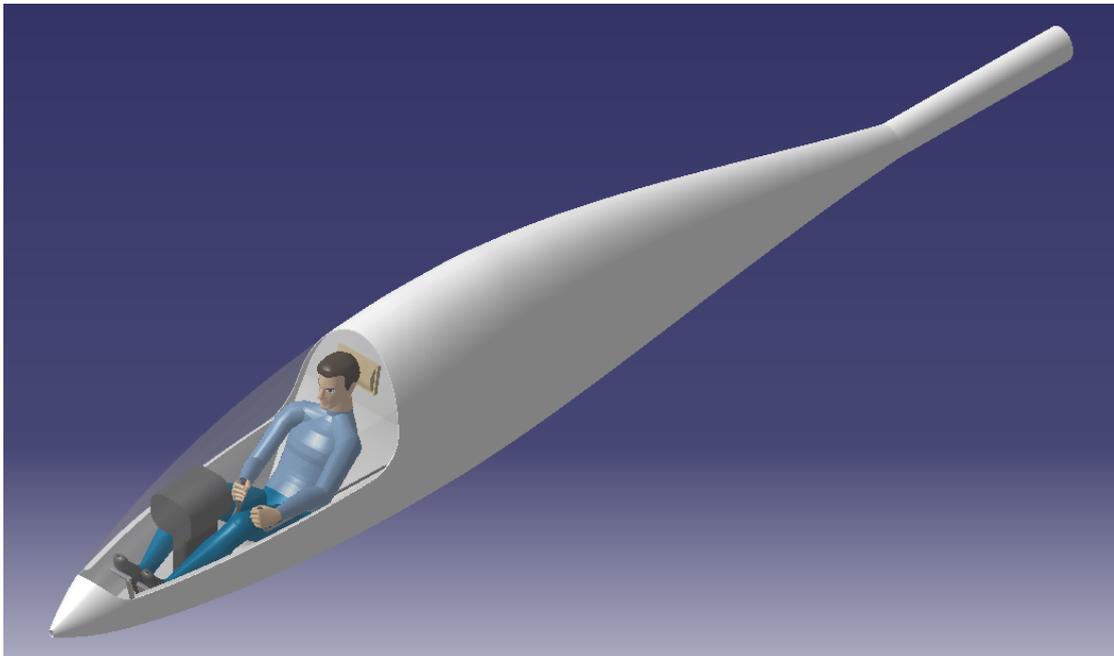


Figura 22 – CAD do Planador NACA (2021).

Não se desenharam as asas nem a empenagem e nem o trem de pouso, visto que, para fins de análise ergonômica do *cockpit*, apenas a fuselagem é importante para este

trabalho de conclusão de curso. Outro detalhe notável é que, na cauda da fuselagem, foi acrescentado um formato cilíndrico para acomodar uma futura empenagem.

3.1.3 Assento

Ambos os assentos acomodam o piloto de modo que ele se sinta confortável e hábil a conduzir a aeronave. Seu formato se assemelha aos assentos dos carros de Fórmula 1, visto que o piloto se acomoda de maneira semideitada devido aos limites dimensionais do planador para obter o mínimo de arrasto possível. Mas apesar de ser uma posição semideitada, o piloto consegue enxergar tanto o painel de instrumentos, quanto a vista externa.

3.1.3.1 AC-21

O assento foi desenhado de acordo com as limitações estruturais da aeronave e da postura do piloto inserido e com base em imagens de referência mostradas nas figuras 106 em anexo.

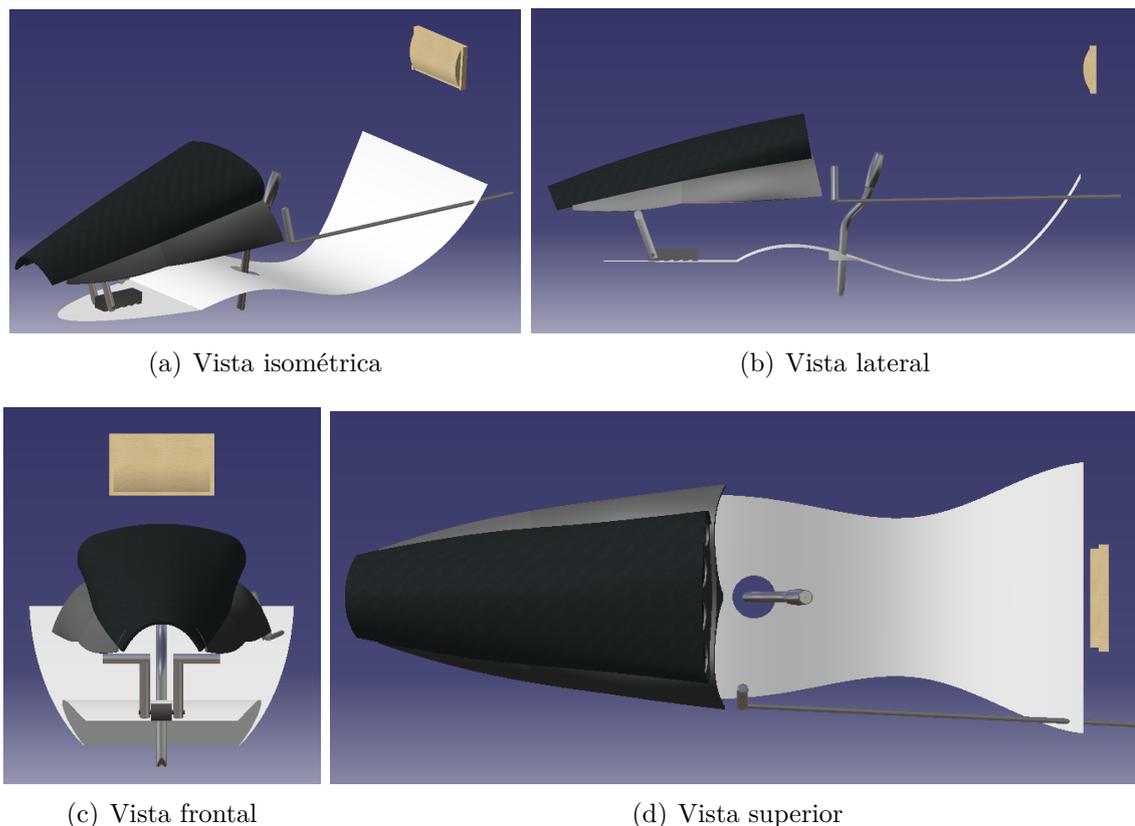


Figura 23 – CAD do assento do AC-21 (2021).

O formato do assento é um pouco mais elevado do que os carros da Fórmula 1. Mas, devido à limitação estrutural e aerodinâmica do motoplanador, o piloto é obrigado a se posicionar de forma semideitada no assento. Um detalhe importante do assento é

que não existe um estofamento, pois, originalmente, o piloto já está com vestimentas grossas devido ao frio do país que o projeto foi construído, como mostrado em anexo 106. Entretanto, caso um protótipo fosse construído no Brasil com as mesmas especificações, um piloto se sentiria desconfortável ao pilotá-lo.

Além do assento, como visto na figura 23, os componentes internos foram desenhados e inseridos na aeronave, além de um orifício desenhado na parte elevada (na frente de onde se localiza o quadril do piloto) para permitir passagem do controle do manche e o piloto ter dois graus de liberdade de movimento do comando.

3.1.3.2 NACA

O *design* do assento do Planador Comparativo foi pensando com base em *designs* similares de outros planadores e também pensando nos limites estruturais da fuselagem.

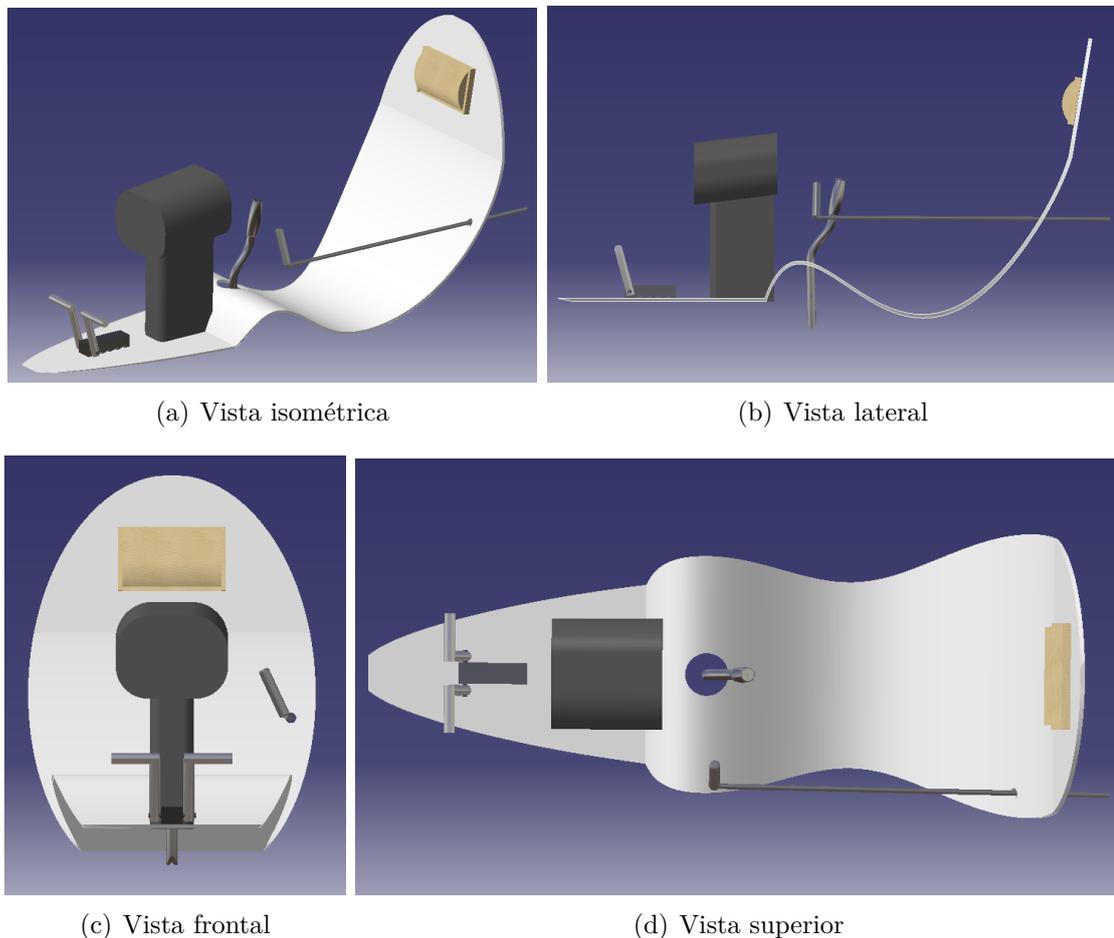


Figura 24 – CAD do assento do planador NACA (2021).

O assento do piloto foi desenhado pensando em conforto, visibilidade, e postura devido à estrutura aerodinâmica da fuselagem. Pode-se notar a presença de um encosto de cabeça atrás do piloto, assim como no AC-21 anteriormente, idêntico ao Planador Conceito, também fixo. Todos os componentes ao redor do assento, como mostrados na

figura 24 são necessários e há algumas diferenças entre este e o Planador Conceito, visto que são projetos diferentes.

3.1.4 Canopy

Canopy é o "pára-brisa" dos planadores, uma proteção contra o vento sobre o rosto do piloto assim como nos automóveis. Sua fabricação é constituída por uma fina camada de *pexiglass*, polímero transparente leve e resistente, e construído sobre molde de gesso para possuir um perfil aerodinâmico e integrado à fuselagem.

Ambos os *Canopies* foram desenhados recortando-se parte das superfícies das fuselagens dos planadores Conceito e Comparativo sobre a vista lateral e no formato desejado, ou seja, em vez de fazer um corte para encaixar os *canopies*, um corte de toda a fuselagem foi feito para extrair seus formatos, o contrário do que foi feito com o desenho das fuselagens.

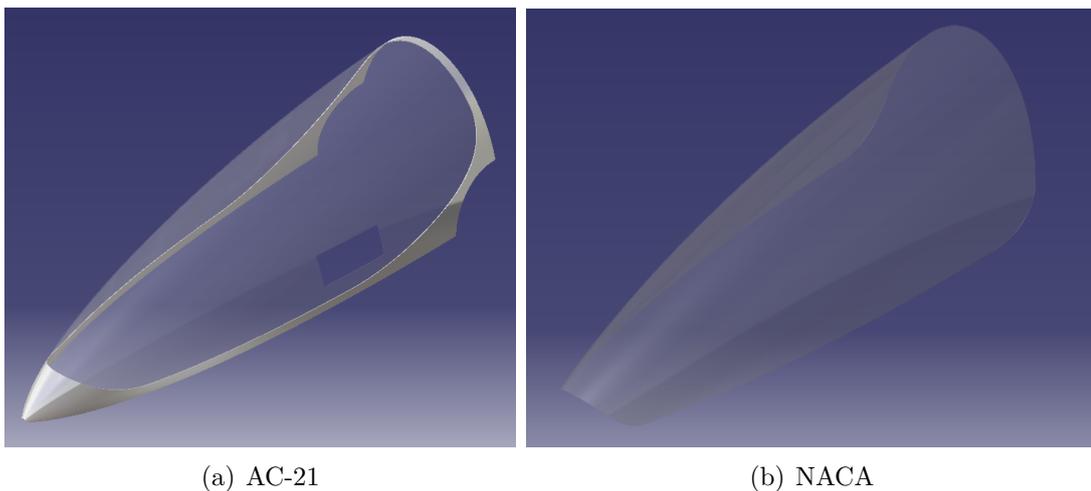


Figura 25 – *Canopies* das aeronaves (2021).

A primeira proteção (a) foi desenhada seguindo uma linha horizontal no desenho da figura 19 (b), desde o nariz da estrutura até a altura dos ombros do piloto, além do fato de existir um recuo circular, devido à localização do bordo de ataque da asa. O *canopy* do AC-21 não é como o de outros planadores, em que é aberto pelo lado esquerdo e com dobradiças à direita da fuselagem. Entretanto, este se abre deslizando todo o *canopy* para frente e fecha-se deslizando-o para o sentido da empenagem. O movimento é auxiliado por trilhos que ficam debaixo da proteção. Ainda sobre o *canopy*, nota-se que ele possui uma proteção metálica e uma pequena janela para ventilação do piloto, visto que a cabine pode aquecer com o tempo. Essa janela existe em todos os planadores para evitar desconforto do piloto durante o voo.

O segundo *canopy* foi desenhado de modo similar, com a diferença que este foi desenhado um pouco depois do nariz, contornou a linha horizontal do *blueprint* e foi até

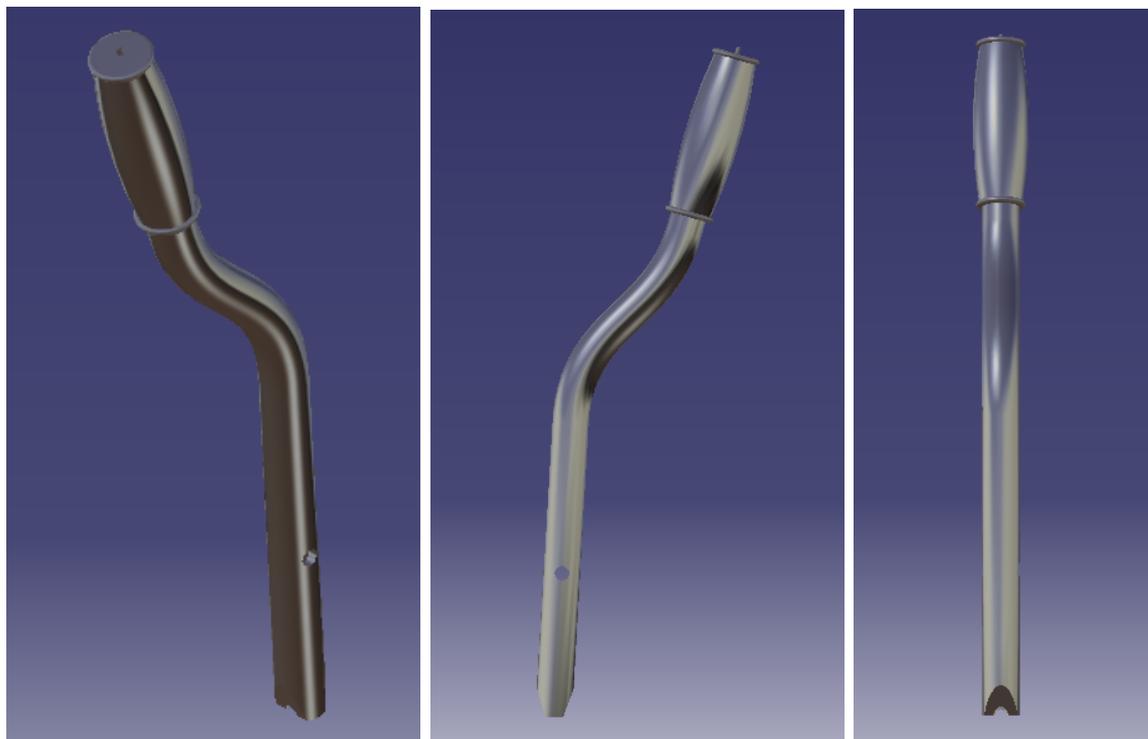
a cabeça do piloto, mas sem recuo, porque esta fuselagem foi desenhada para comparação para a equipe Dragonfly poder visualizar como uma pessoa se acomodaria dentro dele. Pode-se notar que, diferente do *canopy* do AC-21, o *canopy* do NACA não possui uma proteção metálica em suas bordas, sendo que este pode ser inteiramente fabricado em *plexiglass* devido à sua alta resistência e ainda sofrerá mudanças no decorrer do projeto da Dragonfly. Também não existe a janela lateral pelo mesmo motivo.

3.1.5 Comandos

Existem, basicamente, três comandos para o piloto controlar uma aeronave: manche, pedal e flape. Cada um dos comandos de voo foram desenhados com base em fotografias obtidas e detalhados a seguir.

3.1.5.1 Manche

O manche de uma aeronave, seja de um avião ou de um planador, é responsável por controlar os movimentos de cabrar/picar e de rolamento ao longo da fuselagem. Ele é localizado entre as pernas do piloto e logo à frente do assento, e conectado por cabos ou hastes de aço para os controles do profundor e aileron, e movimentados internamente ao longo da fuselagem e das asas.



(a) Vista isométrica

(b) Vista lateral

(c) vista frontal

Figura 26 – Manche dos planadores (2021).

O manche está conectado por baixo com cabos que controlam os ailerons e o profundor, além de estar fixo abaixo da linha do assento e acima dos cabos, pois o comando funciona como uma alavanca de 1º ou 2º tipo, a depender do projeto da aeronave. Como se pode ver na figura 26, o manche não possui um formato reto. Isso é proposital, porque o ponto de apoio está a alguns centímetros à frente da cintura do piloto.

O recuo está no sentido para trás e existe por dois motivos: ajudar o piloto a não estender o braço e não causar fadiga desnecessária; e para o manche não bater no painel de instrumentos e o piloto poder fazer o movimento de picar a aeronave (abaixar o nariz da aeronave), caso contrário, se o manche fosse reto, o piloto teria movimentos limitados e, possivelmente, machucar a mão por bater no painel.

3.1.5.2 Pedal

O pedal é controlado pelos pés e servem para controlar o movimento direcional de uma aeronave sendo conectados ao leme. Em aviões de pequeno porte, os pedais os controlam tanto em voo quanto em solo para guiar a aeronave até a pista de decolagem ou até o pátio após o pouso. No caso dos planadores, os pedais controlam apenas o leme, não controlando o trem de pouso, dado que o taxiamento dessa aeronave é feito manualmente ou por auxílio de veículos terrestres.



Figura 27 – Pedais do planador GROB G103 (2019).

A figura 27 mostra o posicionamento e mecanismos do pedal de um planador convencional. Essa imagem foi tirada de uma filmagem amadora do autor para explicar e visualizar os mecanismos de um planador. Pode se notar que nesta aeronave o leme é controlado por cabos devido a sua simplicidade e redução de peso, e também passa por dentro do suporte de painel de instrumentos. Vale lembrar que esse controle varia de aeronave para aeronave de acordo com seu projeto.

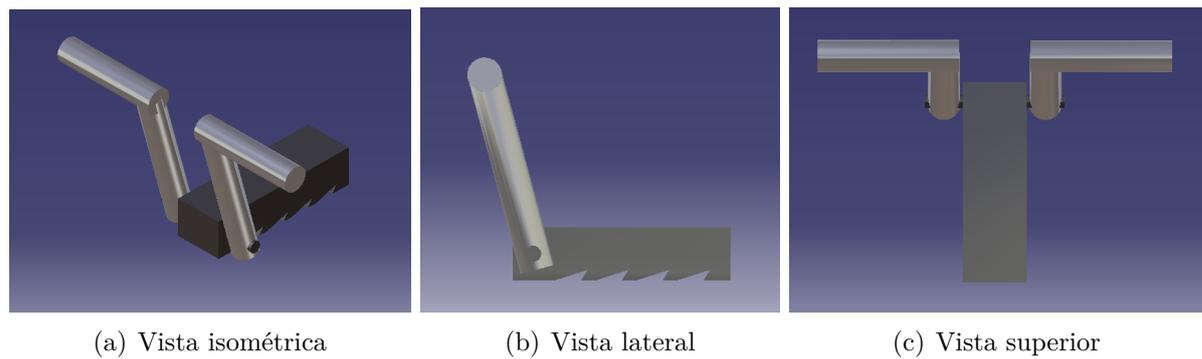


Figura 28 – Pedal das aeronaves (2021).

Pode-se notar na figura 28 que, abaixo das juntas dos pedais, existe um formato de serra na parte inferior. Estes dentes simulam o travamento de posição do comando dos pedais, dependendo da altura do piloto. Isso também acontece com outros planadores, pois cada piloto possui estatura diferente.

3.1.5.3 Alavanca de Flape

Quase todos os planadores possuem mecanismo de controle para descer e subir o flape, um dispositivo hipersustentador para aumentar a sustentação de aeronaves em baixas velocidades, também comum na maioria dos aviões de grande porte, mas não em todos os aviões de pequeno porte. Planadores também possuem controle de *speedbrakes* ou *spoilers*, freios aerodinâmicos de igual formato ou similar ao controle de flape, localizados no extradorso da asa para diminuir a velocidade da aeronave durante o pouso.

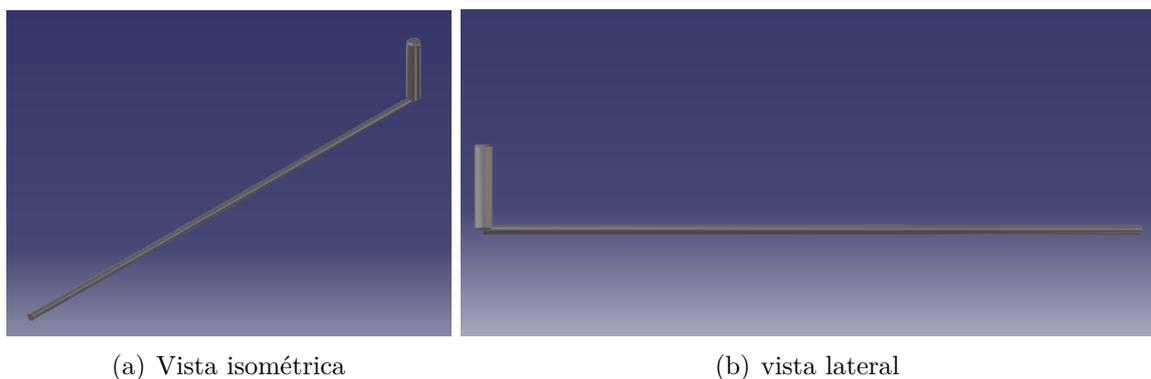


Figura 29 – Alavanca do flape (2021).

Trata-se de um bastão simples de aço e geralmente fixo à esquerda da fuselagem (dentro da cabine) e logo abaixo do *canopy*, sendo até possível de vê-lo externamente. Para acioná-lo, seu mecanismo é feito puxando-o para trás e no mesmo sentido do bastão de aço. Seu curso varia de planador para planador, mas não ultrapassando os 30 cm.

3.1.6 Instrumentos

Todas as aeronaves possuem estes três instrumentos de voo necessários: velocímetro (Air Speed Indicator, ASI), altímetro (Altimeter ALT), indicador de subida (Vertical Speed Indicator, VSI) e indicador de pressão (Plessure, PSI) e temperatura do óleo do motor (Engine Oil Temperature, TEMP).

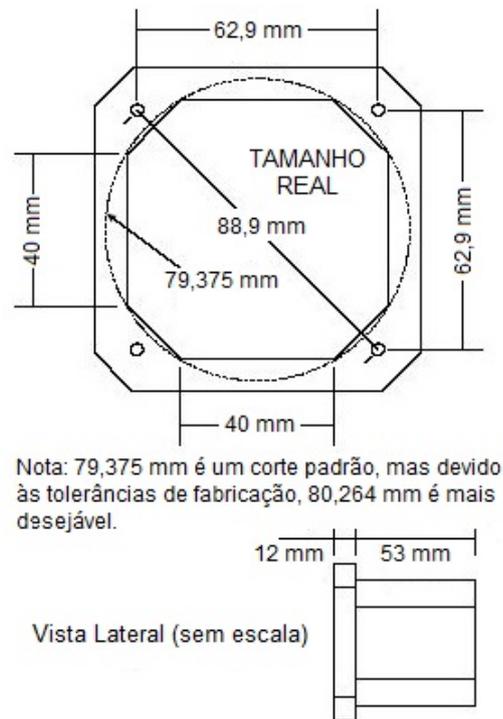


Figura 30 – Tamanho e comprimentos de um instrumento de voo de aeronaves. Fonte: (STRATOMASTER, 2021) (adaptado).

Com base nas medidas de referência da figura 30, pôde-se ter uma noção do tamanho dos instrumentos e poder desenhá-los.



Figura 31 – Instrumentos de voo. Fonte: (OLIVEIRA, 2021).

Estes quatro instrumentos são os utilizados pelo Planador Conceito e também inseridos no Planador Comparativo.

3.1.7 Painel de Instrumentos

O painel de instrumentos é um compartimento onde são alojados os instrumentos de voo. Tal compartimento é vazio por dentro sem os instrumentos, sendo apenas volumoso, portanto não há preocupação em questão de peso.

3.1.7.1 AC-21

Para desenhar o painel do AC-21, ambas as imagens abaixo foram utilizadas como referência visual e obter sua noção de tamanho.

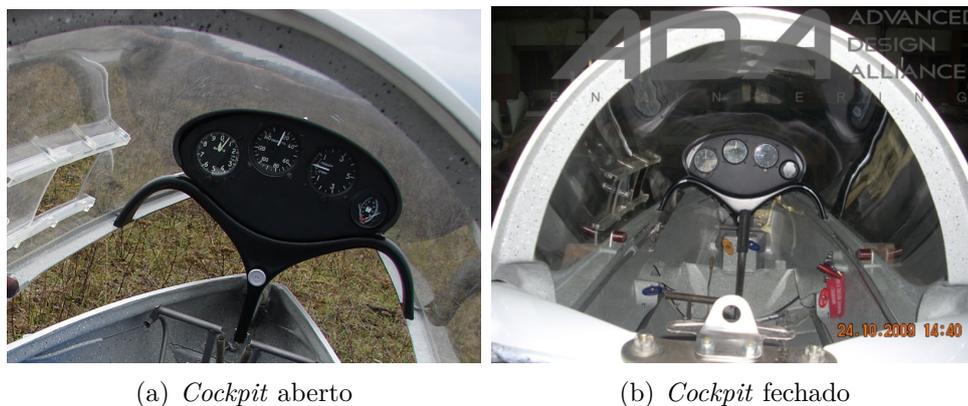


Figura 32 – *Cockpit* do AC-21. Fontes: (AEROS, 2005) e (ADA, 2007).

O motoplanador possui quatro instrumentos: velocímetro, altímetro, variômetro e indicador de rotações e termômetro integrados em um mesmo mostrador. A versão original da aeronave não possui o último instrumento mencionado, mas a versão motorizada, como mostrado, sim. Ainda sobre o instrumento integrado, pode-se ver que este é o menor de todos, então supõe-se que este não é um instrumento de tamanha importância como os outros três, usado apenas para decolagens.

Com base nos detalhes visíveis das figuras 32, foi possível imitar seu formato e ter uma ideia de como ele é por dentro, como mostrado na figura 33.

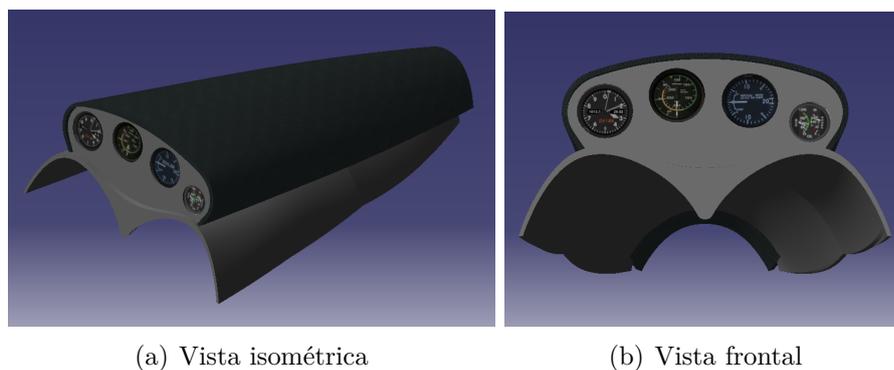


Figura 33 – Painel de instrumentos do AC-21 (2021).

O painel da aeronave é integrado ao *canopy*, fazendo com que ambos sejam uma única peça. Entretanto, para esclarecimento de projeto, as partes foram separadas. Seu formato acompanha o formato do nariz da aeronave à medida que é percorrido, e também foi desenhado pensando em encaixar as pernas do piloto.

3.1.7.2 NACA

O painel do planador NACA foi desenhado com base em um painel real, sendo que o autor captou algumas imagens como referência durante um voo experimental, como mostram as figuras 34 (a) e (b) abaixo.

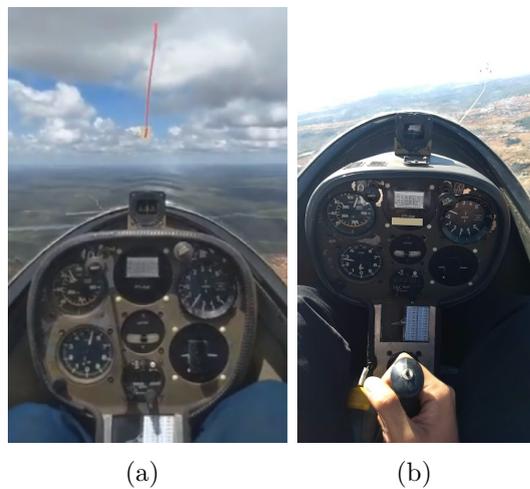


Figura 34 – Painel de instrumentos do planador G103 (2018).

O planador das figuras 34 possui mais de quatro instrumentos, pois não é experimental, além de homologado para treinar pilotos. Porém, seu painel foi utilizado como referência para desenharmos um painel ao Planador Comparativo.

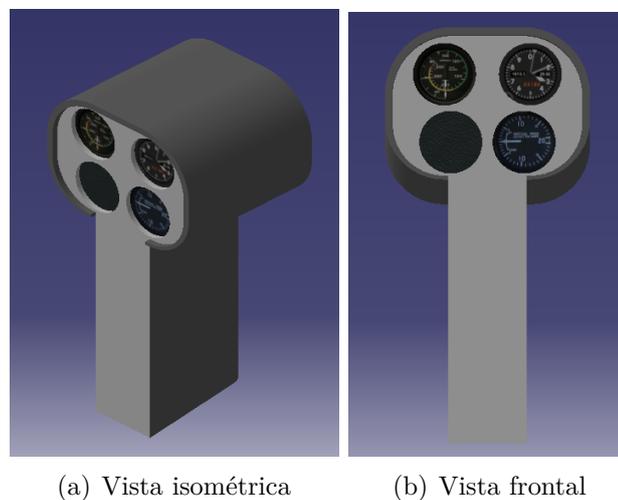


Figura 35 – Painel de instrumentos do planador comparativo NACA (2021).

Este painel de instrumentos difere de um painel convencional, onde há mais de quatro instrumentos inseridos. Ao contrário do AC-21, este painel não cobre as pernas, sendo que sua construção é simples, porém leve, e possui um suporte estreito para que as pernas possam ser acomodadas aos seus lados e sem interferir nos movimentos para alcançar os pedais. Vale lembrar que seu compartimento interno também é vazio, sendo que apenas o peso dos instrumentos o compõem.

4 Package da Cabine

Os manequins utilizados para comparação consideram a altura dos pilotos. Importante lembrar que o AC-21 comporta um peso máximo de decolagem de 264 kg e peso vazio de 144 kg, como mencionado na tabela 3. Mas, por questões de segurança e de projeto, a aeronave deverá comportar uma pessoa de 100 kg, no máximo.

4.1 Percentis Usados

O Catia possui um ambiente de simulação de manequins, chamado *Human Builder* que permite inserir bonecos com cotas antropométricas predefinidas para poder fazer as análises de conforto, alcance e visão e, em seguida, coletar seus dados.

Os percentis escolhidos foram: um homem e uma mulher de percentis 95% (abreviados de P95M e P95F, respectivamente) e uma mulher P20% (P20F), que correspondem às alturas de 1,849 metro para o homem, 1,722 metro para a mulher P95% e 1,569 metro para a mulher P20%. Inicialmente foi testada uma mulher P5%, pois a preocupação era ver se ela alcançava os pedais e tivesse visão externa. Entretanto, a mulher P5% não conseguia pilotar ambas as aeronaves, pois o painel de instrumentos a impedia de ver para fora do *cockpit* devido à sua baixa estatura. O percentil que apresentou resultados mínimos desejáveis foi a P20F, que será usada para comparação com outros manequins. Essa medida foi feita na intenção de abranger o maior número de percentis possíveis na aeronave.

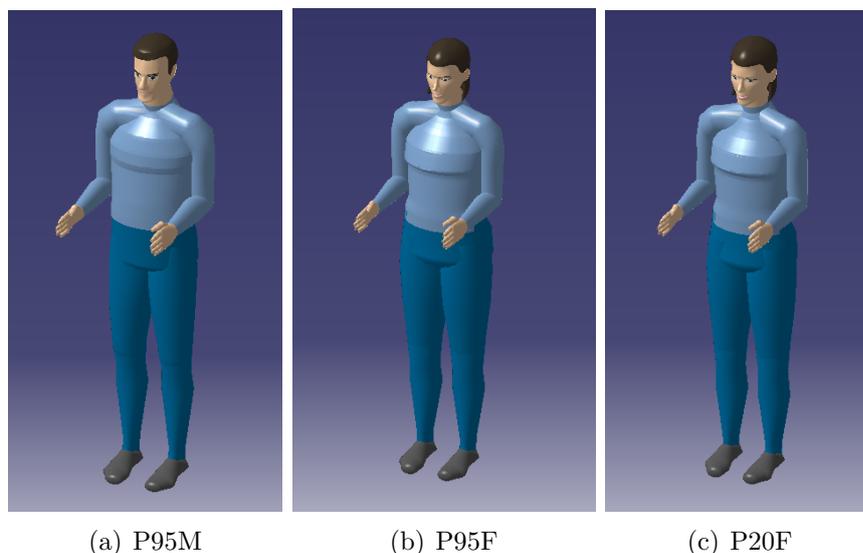
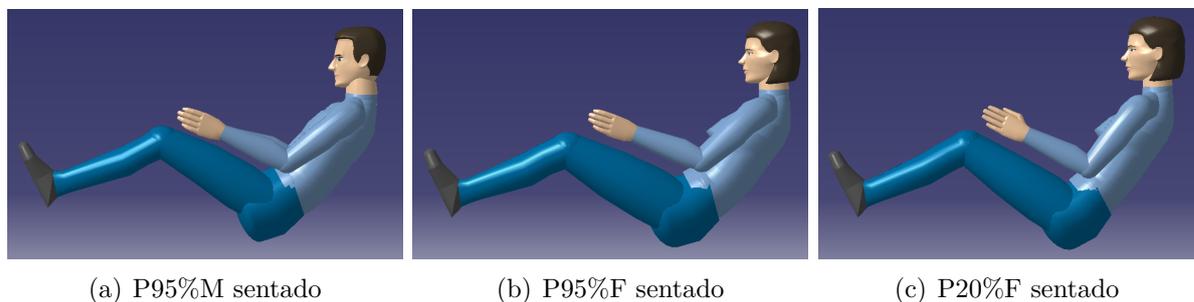


Figura 36 – Percentis usados no trabalho (2021).

As cotas antropométricas brasileiras (IBGE, 2019) não são tabeladas no CATIA V5R21. No entanto, comparações feitas com povos estrangeiros constataram que as medidas do corpo brasileiro são similares às medidas de europeus mediterrâneos (portugueses, espanhóis, franceses, italianos e gregos), com diferenças antropométricas de, no máximo, 3% (MIRANDA, 2014). Logo, os percentis com medidas francesas — tabeladas do programa — foram usados para os estudos no planador (INSEE, 2006). Também, como medida de auxílio, um estudo de cotas antropométricas da população brasileira realizado pela ANAC foi usado como referência (ANAC, 2009). As medidas de referência encontram-se em anexo D, E e F.

4.2 Package

O Catia não possui um package específico para pilotos de planador, o mais próximo disso é um *cockpit* de um carro de Fórmula 1 para inserir o manequim em posicionamento. Entretanto, não é o ideal para acomodar os percentis na aeronave, sendo necessário modelar os manequins manualmente, membro a membro. Com o auxílio das ferramentas *Inverse Kinematics Worker Frame Mode* e *Standard Pose* do Catia, foi possível otimizar tempo e colocar os manequins nas posições previamente desejadas.



(a) P95%M sentado

(b) P95%F sentado

(c) P20%F sentado

Figura 37 – Package dos percentis utilizados (2021).

À primeira vista, pode não parecer uma posição confortável para os pilotos, mas quando os manequins são inseridos dentro dos *cockpits*, as costas são acomodadas aos assentos e as nuças também são acomodadas aos encostos de cabeça, exceto da mulher P5%. Devido à distorção dos manequins, parte das nádegas foram desconsideradas para as análises dos manequins na posição semideitado.

4.3 Integração com Modelo CAD

Para inserir os percentis nos *cockpits*, estes foram refinados para caberem dentro de ambas as aeronaves e seus estudos fossem feitos. Logo após o posicionamento de package dos manequins e suas correções, estes foram inseridos aos planadores AC-21 e NACA, respectivamente, como mostrado a seguir.

4.3.1 AC-21

O AC-21 possui um espaço reduzido, mas confortável e operacional. O material de revestimento da fuselagem foi modificado para o modo translúcido para se poder ver como os manequins se posicionam nos *cockpits*.

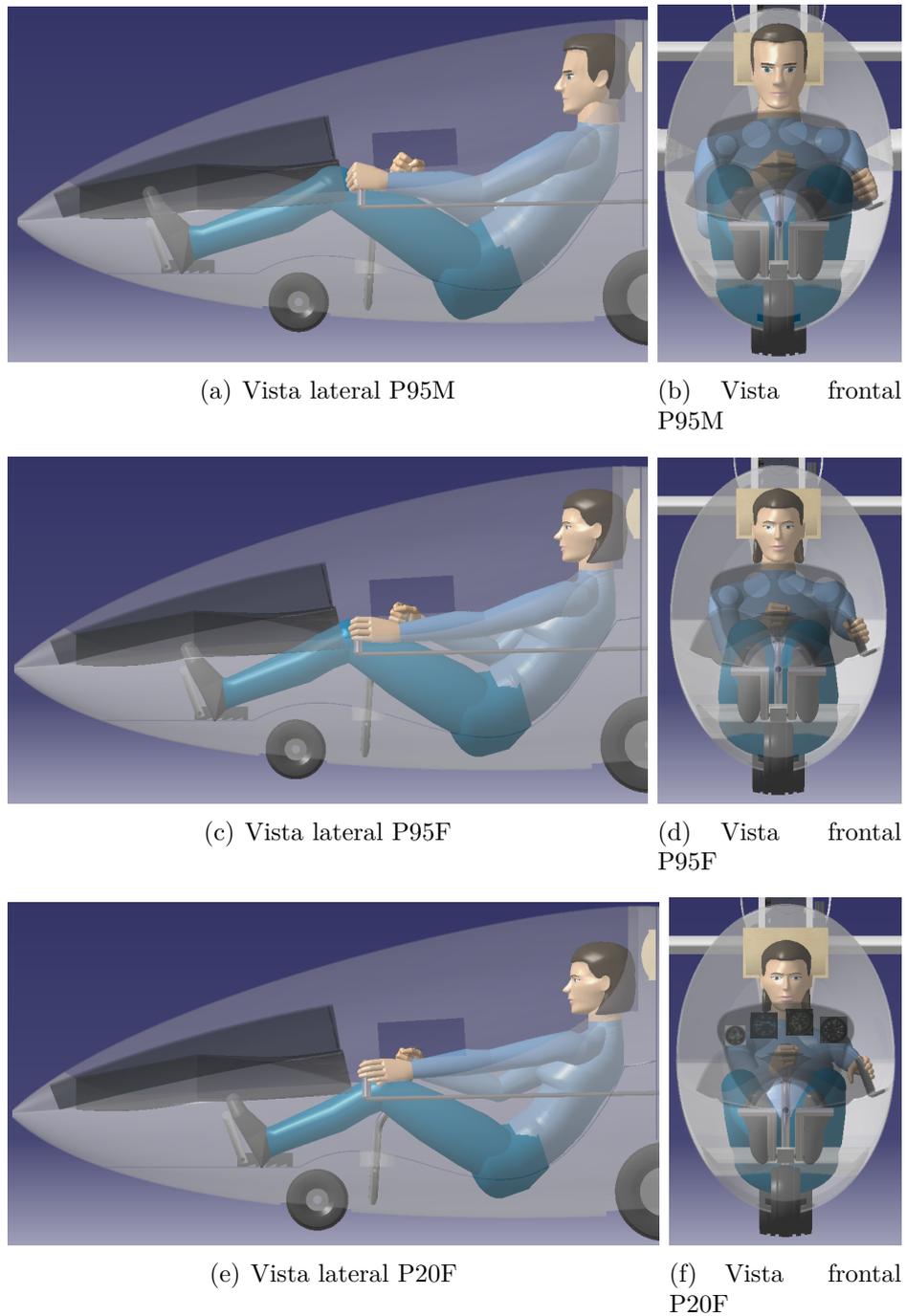


Figura 38 – Espaço interno do AC-21 (2021).

Os três manequins apresentam as pernas levemente abertas para acomodar o painel de instrumentos e o manche, localizados à sua frente. Os pés se juntam no interior do nariz da aeronave, fazendo com que os pedais também permaneçam juntos e acomodem seus

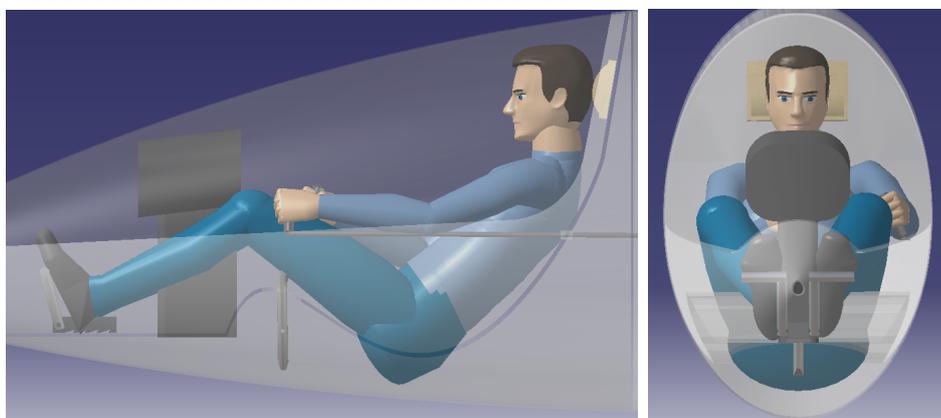
pés. Ainda se tratando das pernas, os ocupantes não vão ter dificuldades na hora de pressionar os pedais, mesmo com parte do banco encostando na batata da perna, pois o calcanhar servirá de apoio para pressionar os pedais com as pontas dos pés, além do fato que é desnecessário o uso da força das pernas. É importante lembrar que o assento é fixo, mas os pedais são ajustáveis com sistema de trilho com trava que permite diferentes estaturas de pilotos sejam acomodadas e não comprometa a operação da aeronave.

O manequim masculino alcança os pedais do leme e consegue empurrá-los sem maiores esforços, além de puxar e empurrar a alavanca de flape. Entretanto, isso não acontece com ambos percentis femininos, que precisam de auxílio para alcançar o punho do flape, tanto que a P95F já encontra dificuldades de alcançá-los, e a P20F somente consegue encostar a ponta dos dedos do comando do flape.

Outra observação é que o homem e a mulher P95% alcançam o encosto de cabeça e conseguem acomodar suas nuca, mesmo a P95F estando um pouco abaixo. Porém, o mesmo não acontece com a P20F que, devido à sua baixa estatura, não alcança o encosto por estar alto e fixo, além de possuir pouco estofamento para que sua nuca pudesse ser alcançada. Se a P20F não tiver preparo adequado, ela pode sofrer de fadiga durante o voo. Mesmo que a P20F consiga alcançar parte de sua cabeça no encosto, ela provavelmente se sentirá desconfortável.

4.3.2 NACA

O espaço interno do Planador NACA foi desenhado com base em no tamanho do *canopy* de outros planadores para o piloto observar tudo à sua volta. Como ocorreu com a Aeronave Conceito, as mesmas características aconteceram com o Planador NACA.



(a) Vista lateral P95M

(b) Vista frontal P95M

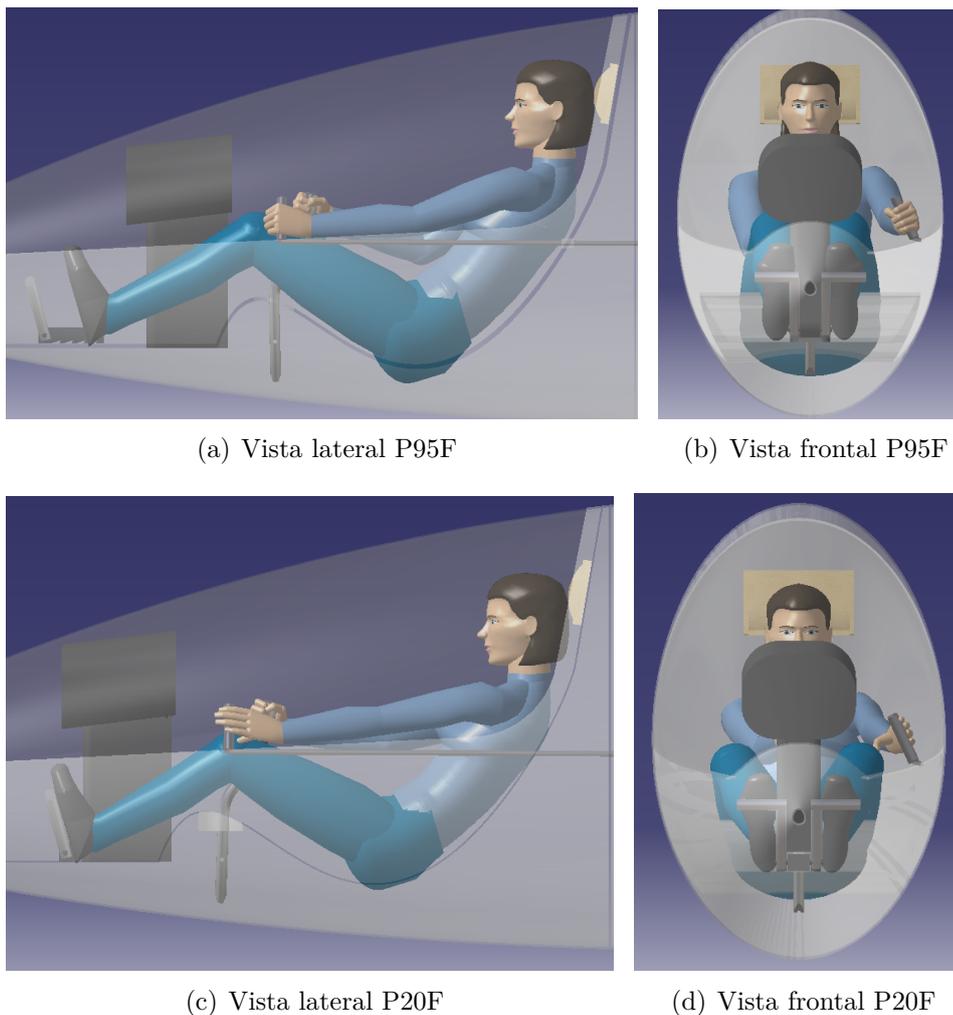


Figura 39 – Espaço interno do NACA (2021).

O planador NACA foi desenhado para caber os ocupantes e os componentes internos. Ao contrário do Planador Conceito, o assento do Planador NACA foi desenhado de forma contínua, onde o assento é integrado ao encosto de cabeça, o que não acontece com o motoplanador AC-21, onde encosto e assento do piloto são separados. Apesar de serem fuselagens diferentes, os aspectos internos são semelhantes ao Planador Conceito. A mulher P20F alcança o encosto de cabeça com mais facilidade, mas ainda encontra dificuldades quanto ao flape.

4.4 Estudos Ergonômicos

Por fim, foram realizados os estudos e análises para os três manequins em ambos os planadores. Todas as ferramentas para as análises foram usadas no *software* Catia V5R21 para entender suas análises. No decorrer do trabalho, as ferramentas foram explicadas de como foram utilizadas, quais parâmetros e critérios foram estabelecidos.

4.4.1 Envelope de Alcance

O Catia possui a ferramenta *Computes a reach envelope*, para computar uma "bolha" de alcance máximo dos membros dos manequins conforme a posição pré-estabelecida no ambiente *Human Builder*.

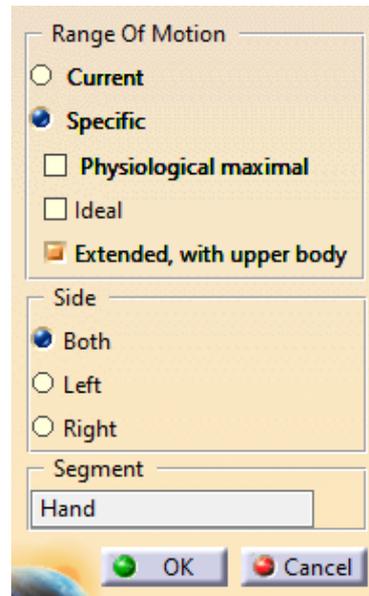
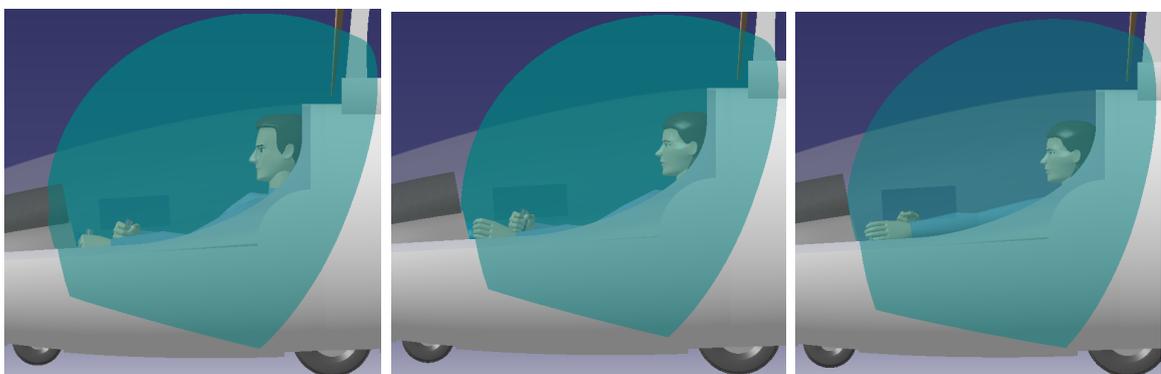


Figura 40 – Vista isométrica da bancada de simulação (2021).

Para determinar o campo de alcance, foi escolhida a opção de membros estendidos *Extended* para ambos os braços dos três manequins já posicionados nos *cockpits* dos planadores, pois é interessante ver se seus braços alcançam os controles sem gerar desconforto. As mãos esquerdas foram posicionadas segurando a alavanca do comando de flape e as mãos direitas segurando o controle do manche na posição neutra.



(a) P95M

(b) P95F

(c) P20F

Figura 41 – Envelope de alcance da aeronave AC-21 (2021).

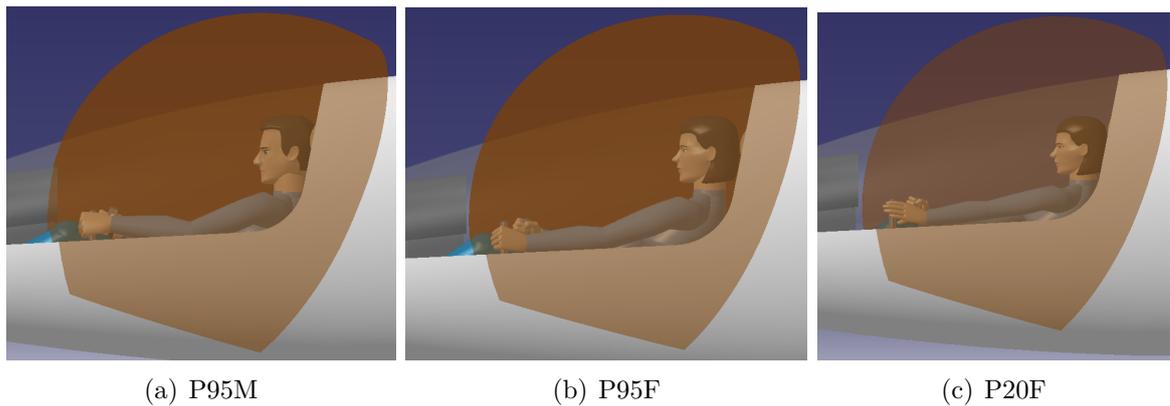


Figura 42 – Envelope de alcance da aeronave NACA (2021).

Em ambos os planadores, o P95M alcança os instrumentos do painel sem dificuldades. No entanto, o mesmo não acontece com os percentis P95F e P20F, necessitando aproximar o tórax. A mulher P95F, por possuir uma estatura inferior à do homem, precisa alcançar o comando do flape com a ponta dos dedos na aeronave AC-21 (envelope de cor azul) sendo que é mais confortável para ela alcançar o flape do planador NACA (envelope de cor laranja). Logo, mesma situação acontece para a mulher P20F.

4.5 Análise RULA — Rapid Upper Limb Assessment

O Catia possui a função *RULA Analysis* de identificar o nível risco musculoesquelético de cada membro do corpo do manequim na posição em que ele foi inserido. Para este estudo, o ambiente *Human Activity Analysis* foi utilizado sendo selecionados os itens *arm supported/Person leaning* e *check balance*, na posição intermitente e sem carregamento para os membros superiores e inferiores.

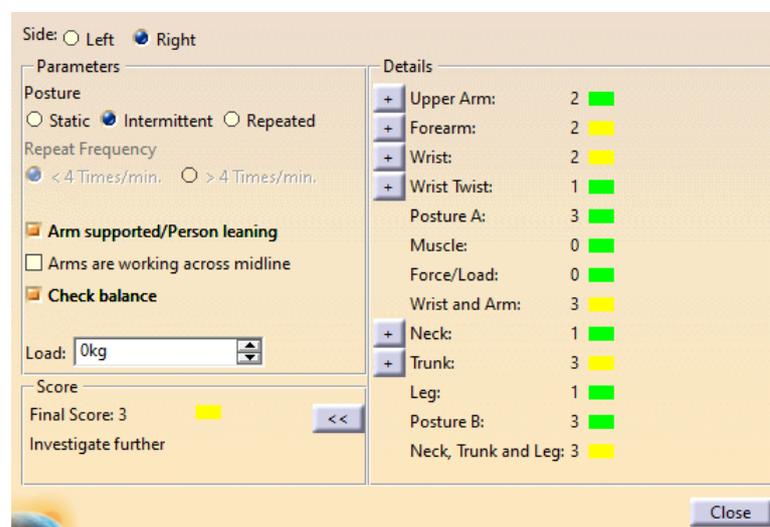


Figura 43 – Configuração de parâmetros do *RULA Analysis* (2021).

A ferramenta possui três opções de postura para a análise RULA: "estática", "intermitente" e "repetitivo". O critério para cada um dos parâmetros está associado à frequência de movimento que o corpo (manequim) irá exercer, tanto para o lado esquerdo quanto para o lado direito do corpo.

Os três manequins, P95M, P95F e P20F, foram analisados com o braço direito segurando o manche na posição neutra da aeronave e a mão esquerda segurando a alavanca do flape na posição recolhido (posição que o braço está estendido, pois o piloto deve estar preparado para acionar o comando a qualquer momento). Os manequins permaneceram nas posições semidentado, com as pernas levemente "abertas" para não atrapalhar o movimento do manche e apoiadas pelos pés aos assoalhos das aeronaves. Não se aplicou nenhuma força de carregamento aos membros dos manequins.

Após os critérios estabelecidos, o posicionamento correto dos manequins às aeronaves AC-21 e NACA, respectivamente, pôde-se realizar a análise RULA e obter seus resultados preliminares, como mostrados nas tabelas abaixo.

Tabela 4 – Resultado RULA da aeronave AC-21 (2021).

AC-21	P95M		P95F		P20F	
Posição	Esquerdo	Direito	Esquerdo	Direito	Esquerdo	Direito
Braço	2	1	2	1	3	2
Antebraço	2	1	3	3	3	2
Pulso	3	2	4	2	2	3
Torção do Pulso	1	1	1	1	1	1
Postura A	3	2	5	3	4	3
Pescoço	3	3	1	1	1	1
Tronco	3	3	2	5	5	3
Pernas	1	1	1	1	1	1
Postura B	5	5	4	4	4	4
Pontuação Final	4	4	4	4	4	4

Tabela 5 – Resultado RULA da aeronave NACA (2021).

NACA	P95M		P95F		P20F	
Posição	Esquerdo	Direito	Esquerdo	Direito	Esquerdo	Direito
Braço	3	1	2	1	2	2
Antebraço	2	2	3	3	3	2
Pulso	2	2	4	2	4	3
Torção do Pulso	1	1	1	1	1	1
Postura A	4	2	5	3	5	4
Pescoço	2	2	1	1	2	2
Tronco	3	3	3	3	3	3
Pernas	1	1	1	1	1	1
Postura B	5	5	4	4	4	4
Pontuação Final	5	4	5	3	5	3

Como se pode ver pelas tabelas 4 e 5, tanto o P95M quanto as mulheres P95F e P20F sentem maior conforto no braço direito do que no braço esquerdo pelo fato daquele não precisar se manter esticado e por estar próximo ao manche e ao corpo. Já o braço esquerdo, principalmente para ambas mulheres, há desconforto pelo fato de estar esticado para alcançar o comando do flape.

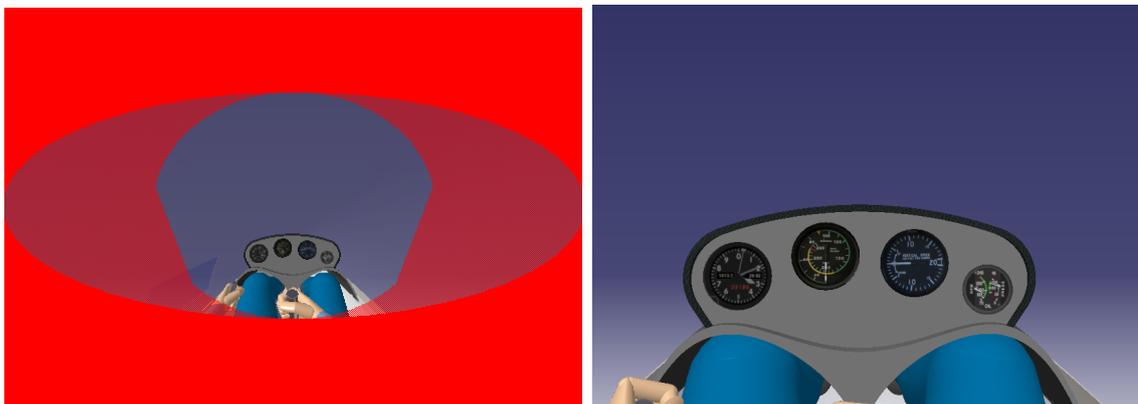
Pode se ver também, por ambas as tabelas, que a posição dos antebraços dos manequins não estão bem posicionados neste primeiro momento, cabendo rever suas posturas novamente. Apesar de os resultados estarem nos limites das análises, como mostrado na pontuação final da tabela 5, pode ocorrer algum distúrbio musuloesquelético dos pilotos, representando risco de vida, portanto, necessário rever essas posturas.

4.6 Visão

O Catia possui a função *Open Vision Window*, para inserir a visão do manequim na postura imposta. Abaixo, estão as imagens, em primeira pessoa, tanto do homem quanto das mulheres nos *cockpits*. As imagens da esquerda foram capturadas utilizando a ferramenta *Open Vision Window*, no ambiente *Human Builder*. Estas imagens possuem restrições focais para imitar a visão humana, o que explica os fundos vermelhos. As imagens da direita foram captadas no ambiente *Photo Studio*, onde a câmera foi posicionada na altura dos olhos dos manequins e ajustada uma distância focal de 35 mm, por ser a distância mais próxima do olho humano (CAMLENSE, 2021). Também ajustou-se a câmera com ângulo de abertura de 63°, correspondente à distância focal humana.

4.6.1 AC-21

Primeiro, colocaram-se os manequins à prova no *cockpit* do Planador Conceito. As cabeças foram posicionadas com visão reta em relação à horizontal, permitindo que os pilotos possam ver os instrumentos de voo da aeronave.



(a) P95M com restrição

(b) P95M sem restrição

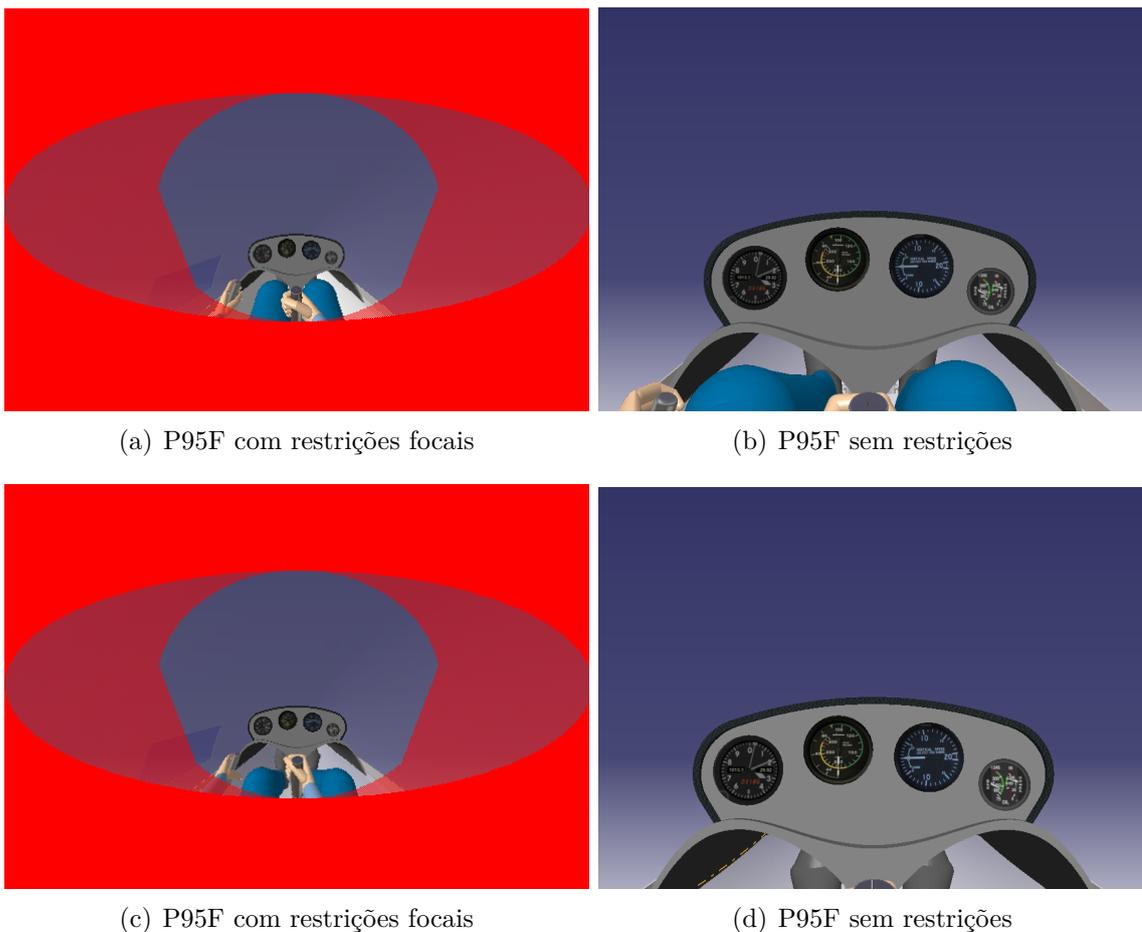


Figura 44 – Visões com e sem restrição focal do AC-21 (2021).

Os três percentis possuem visão ampla, tanto externa, quanto interna do cockpit. As imagens da esquerda e da direita são as mesmas visões dos percentis, sendo que a diferença entre eles é que as da esquerda são visões com restrições focais (fundo vermelho), natural do ser humano; enquanto as imagens da direita são visões amplas do P95M e das mulheres P95F e P20F, respectivamente, sem os contornos do olho humano, para clareza do leitor entender o que há no *cockpit*. Não é necessário o piloto ver o nariz da aeronave, pois o pouso é feito de forma cabrada, ou seja, com o nariz da aeronave levantado para o trem de pouso principal encostar primeiro na pista e não comprometer a bequilha.

Além disso, nota-se uma diferença de alcance entre os membros esquerdos do P95M, e das mulheres P95F e P20F. O manequim masculino alcança, sem esforço, a alavanca de controle do flape devido a sua estatura e de acordo como o comando foi posicionado e desenhado. Mais uma vez, o mesmo não ocorre para os percentis femininos.

4.6.2 NACA

Em seguida, o mesmo foi feito para a fuselagem NACA. As mesmas condições de postura corporal e inclinação da cabeça se mantiveram.

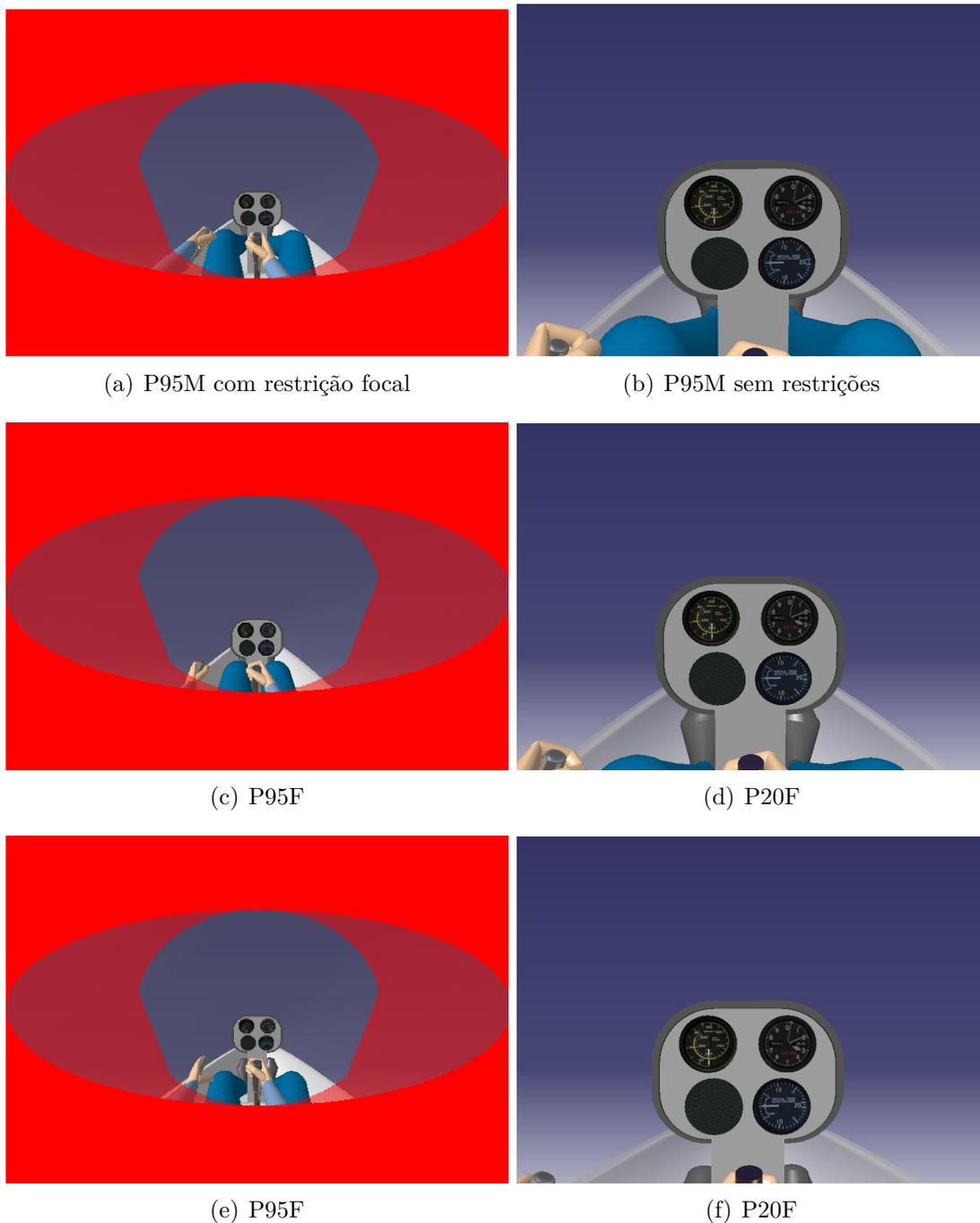


Figura 45 – Visões do AC-21 (2021).

Como aconteceu no AC-21, anteriormente mostrado, as mesmas imagens foram replicadas para o Planador Comparativo. Não há uma mudança de grande magnitude entre os planadores comparados, mas algumas diferenças no que diz respeito ao painel de instrumentos foram observadas: no painel do AC-21, não dá para ver os pés, uma vez que a cobertura do painel os cobre, mas dá para ver os pés no NACA, já que seu painel é pequeno e não há proteção para os membros inferiores. Os dois painéis não são muito elevados, pois caso fossem iriam comprometer a visão dos pilotos em voo visual.

5 Proposta de Projeto de Simulador

O projeto da bancada de simulação de voo foi pensado em construí-lo para atender ao requisito de baixo custo (*low-cost*) pela equipe Dragonfly, porém de fácil entendimento e qualidade ao imitar um voo planado. Com base nos estudos anteriormente realizados e mostrados nos capítulos anteriores, compararam-se os planadores AC-21 e NACA para as análises ergonômicas. Para fins de referência e refinamentos, melhorias foram implementadas ao simulador de voo, onde seu formato se assemelha ao motoplanador AC-21, o planador conceito da equipe e que mais apresentou resultados positivos.

5.1 Bancada de Simulação

A bancada de simulação, isto é, onde o piloto irá se acomodar e pilotar uma aeronave virtual, é composta por todos os componentes, como mostrado na imagem abaixo.

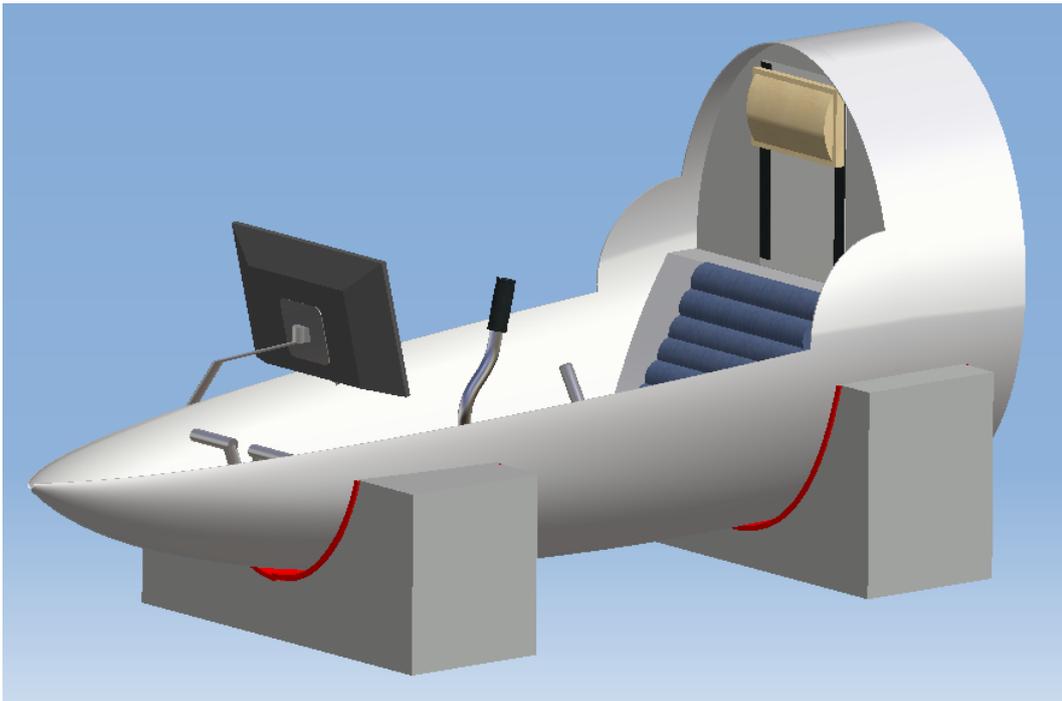


Figura 46 – Vista isométrica da bancada de simulação (2021).

Com relação à fuselagem da bancada, esta será modelada em fibra de vidro sob molde de isopor para sua confecção. Não será necessário acrescentar um *canopy* à estrutura, pois a temperatura iria aumentar no *cockpit* e o piloto iria sentir desconforto devido ao calor, pois no *cockpit* a pessoa em treinamento irá movimentar-se de forma repetitiva, seja durante um voo normal ou num procedimento de movimento brusco, caso o fizesse estando em uma aeronave real.

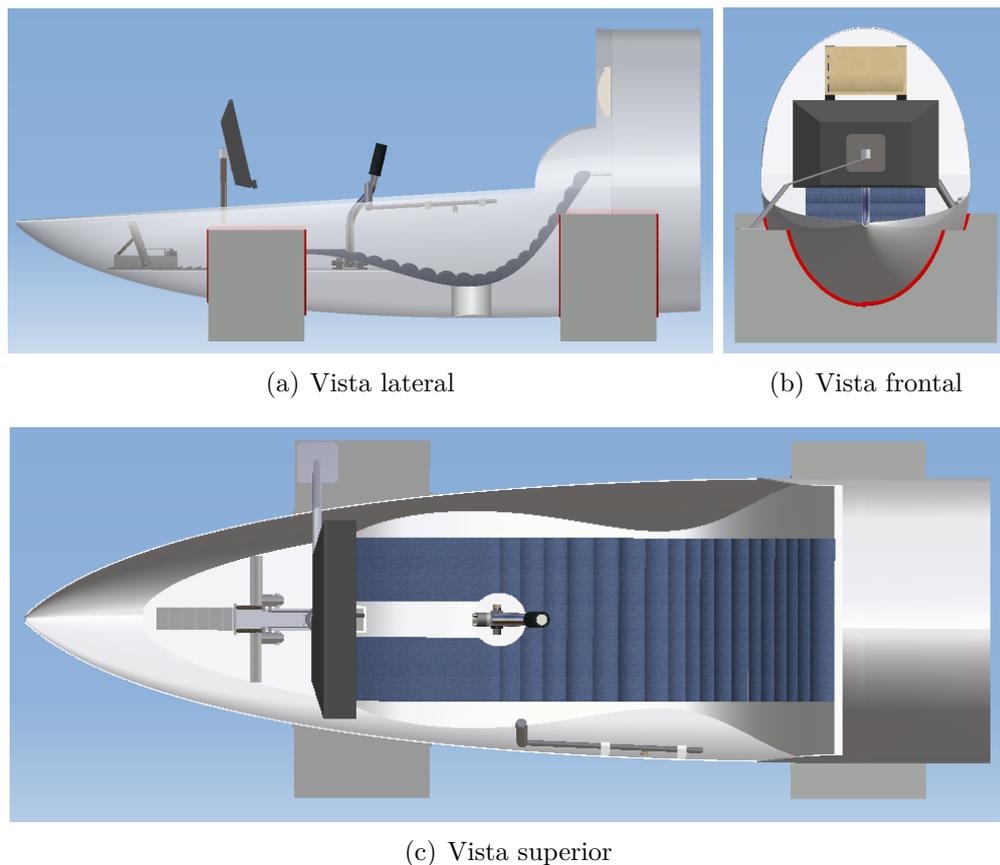


Figura 47 – Projeto da Bancada de simulação (2021).

O formato da fuselagem será feita em camadas de fibra de vidro com resina de poliuretano, por ser resistente e para suportar o peso do piloto e dos componentes periféricos do simulador.

Pode-se perceber, nas imagens 47 acima, que melhorias foram implementadas com base nos estudos anteriores. Algumas destas melhorias destacam-se um estofado para o assento (azul), ajuste de posição do pedal e ajuste de altura do encosto de cabeça. Estas melhorias serão detalhadas mais para frente no decorrer do trabalho.

O interior da fuselagem possuirá uma placa plana de fibra de vidro para acomodar o mecanismo do manche, visto que este será fixo em local plano. Pode-se notar que existe um formato cilíndrico abaixo do assento que deverá servir de reforço à estrutura, pois há de se considerar, não somente o momento quando o piloto está inserido no *cockpit*, mas também quando este entra e sai do simulador. Um dos procedimentos para entrar numa aeronave é pisar no assento para, em seguida, alocar as pernas aos pedais. O procedimento reverso, na hora de se retirar, também consiste em pisar no assento.

Para manter a fuselagem elevada, esta deverá ser suspensa com o auxílio de dois blocos de concreto moldados para acomodar a bancada de simulação, como mostram as imagens abaixo:

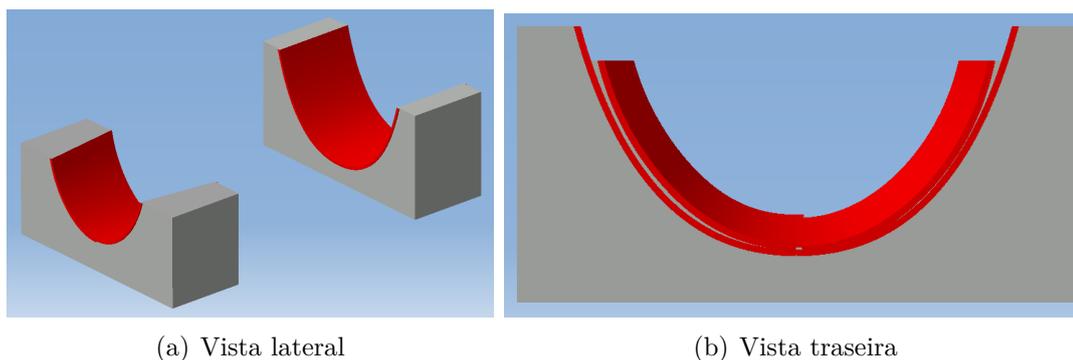


Figura 48 – Bases de concreto para elevar a bancada (2021).

Pode-se perceber que, acima de ambos os blocos de concreto, existe uma camada de tecido (em vermelho, ilustração). As funções de ambas as peças são: evitar desgastes e amortecer vibrações que poderão vir do movimento do piloto no *cockpit*, pois, uma vez utilizando o simulador, ele irá exercer forças nos comandos de voo e movimentar o corpo, tanto para sair quanto para entrar na cabine, como dito anteriormente.

5.2 Software Embarcado

O *software* adotado para imitar o voo a vela será o *Condor 2*, da empresa Condor Soaring (CONDOR, 2021), como ilustrado abaixo:

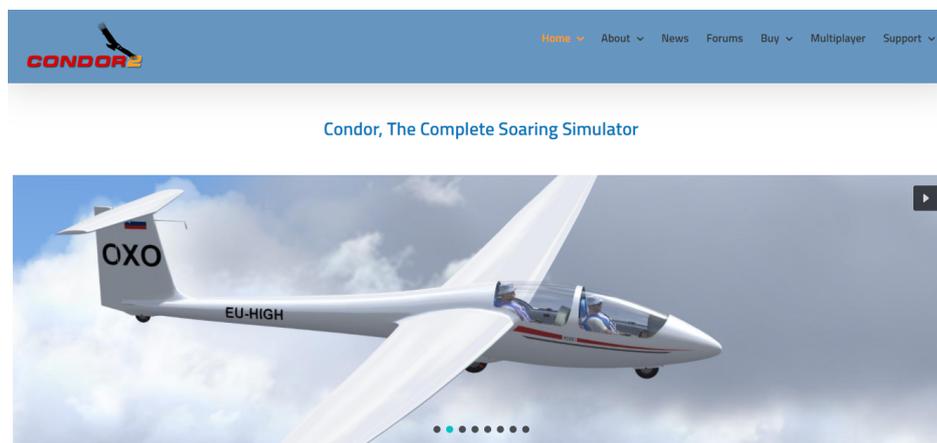


Figura 49 – Site oficial do Condor Soaring. Fonte: (CONDOR, 2021).

Este também é o programa de simulação que será adotado pelo aeroclube de Formosa, o APC, que usará para treinar alunos pilotos de planador (PPL) para memorizarem e exercerem procedimentos de voo e se ambientarem com o *cockpit* da aeronave.

A plataforma possui diferentes modelos de planadores, sendo eles para uso recreativo, competitivo e para instrução, logo sendo possível ser configurável para dois pilotos manobrem o mesmo simulador, apesar de não ser o foco do trabalho.

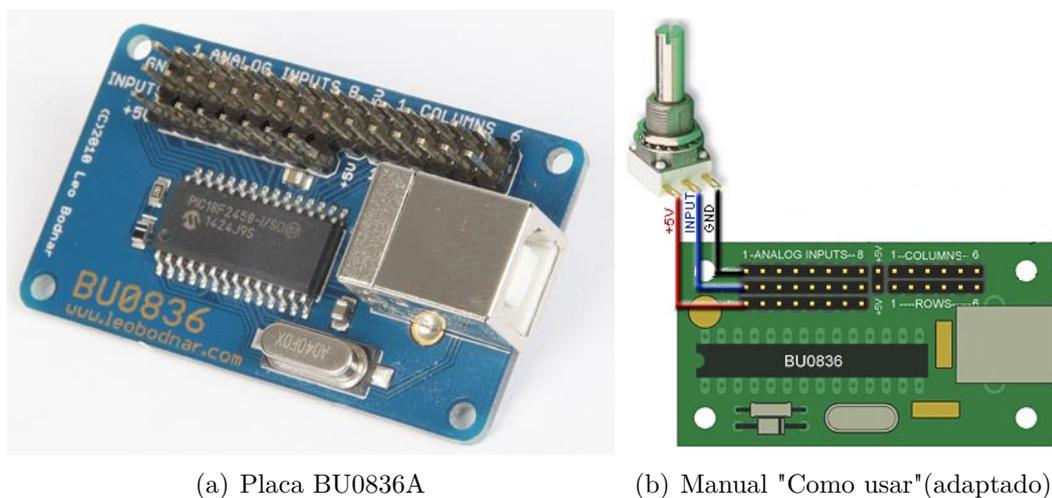


Figura 50 – Cockpit de planador do simulador Condor 2 (2021).

A figura 50 acima ilustra o interior da aeronave Antares 18S, que substituirá o motoplanador AEROS AC-21, pois não existe um arquivo computacional que simula o planador AC-21, nem seu antecessor, Alatus M-12. A aeronave Antares 18s também é um motoplanador e é a aeronave mais semelhante ao planador conceito da Dragonfly.

5.3 Eletrônica Embarcada

Para simular os comandos de voo, adotou-se o uso da placa controladora BU0836A, desenvolvida pela empresa britânica de componentes eletrônicos *Leo Bodnar electronics LTD*, própria para simulação (LEOBODNAR, 2021).



(a) Placa BU0836A

(b) Manual "Como usar"(adaptado)

Figura 51 – Placa BU0836A para simulação. Fonte: (LEOBODNAR, 2021).

A placa possui 8 entradas analógicas do tipo *pin head* para controle de posição e 6 entradas de controle liga/desliga, também do tipo *pin head*. Para integrar os componentes, existem três conectores nas entradas analógicas e dois nas entradas liga/desliga, sendo eles o *GND*, *INPUPTS* e *+5V*, respectivamente, enquanto as entradas de dois conectores são compostas apenas pelas duas conexões citadas.

Apesar de o custo da placa ser alto (detalhado em anexo), vale a pena implementá-la na bancada de simulação, pois um *joystick* — controle de *video-game* para jogo de aviões de caça — possui um custo superior, embora seja o mais barato do mercado, além de não possuir a precisão mais elevada para simulação.

Porém, para haver respostas de comando das entradas à placa, há a necessidade de se instalar um firmware (software embarcado) que interceda o movimento físico por um componente ao software de simulação. Este *firmware* pode ser instalado no próprio site da Leo Bodnar de forma gratuita, bastando apenas seguir os passos do manual de instrução (também disponível para download no site) e executando-o no computador do usuário.

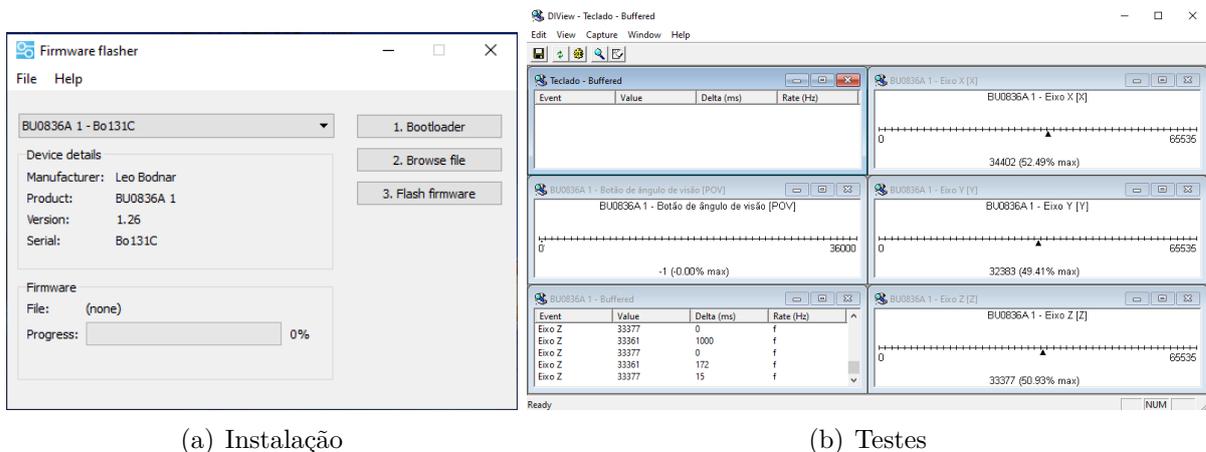


Figura 52 – *Firmwares* usados para controle da placa. Fonte: (LEOBODNAR, 2021).

Após instalar o firmware, basta realizar download e instalar o programa *BU0836A configurations* para configurar os comandos físicos e integrá-lo ao simulador Condor. Para integrar os comandos físicos à placa, serão utilizados os seguintes componentes eletrônicos: potenciômetros, sensor de efeito hall e interruptores chaveados para simularem os comandos de uma aeronave. Apesar de os componentes serem simples e de fácil manuseio, também há de se considerar os limites operáveis neles, pois existe limite de faixa de operação. A placa suporta potenciômetros com valor máximo de 10k Ω , não podendo ultrapassar este valor, mas podendo usar potenciômetros de menores faixas, visto que não há limite mínimo (LEOBODNAR, 2021).

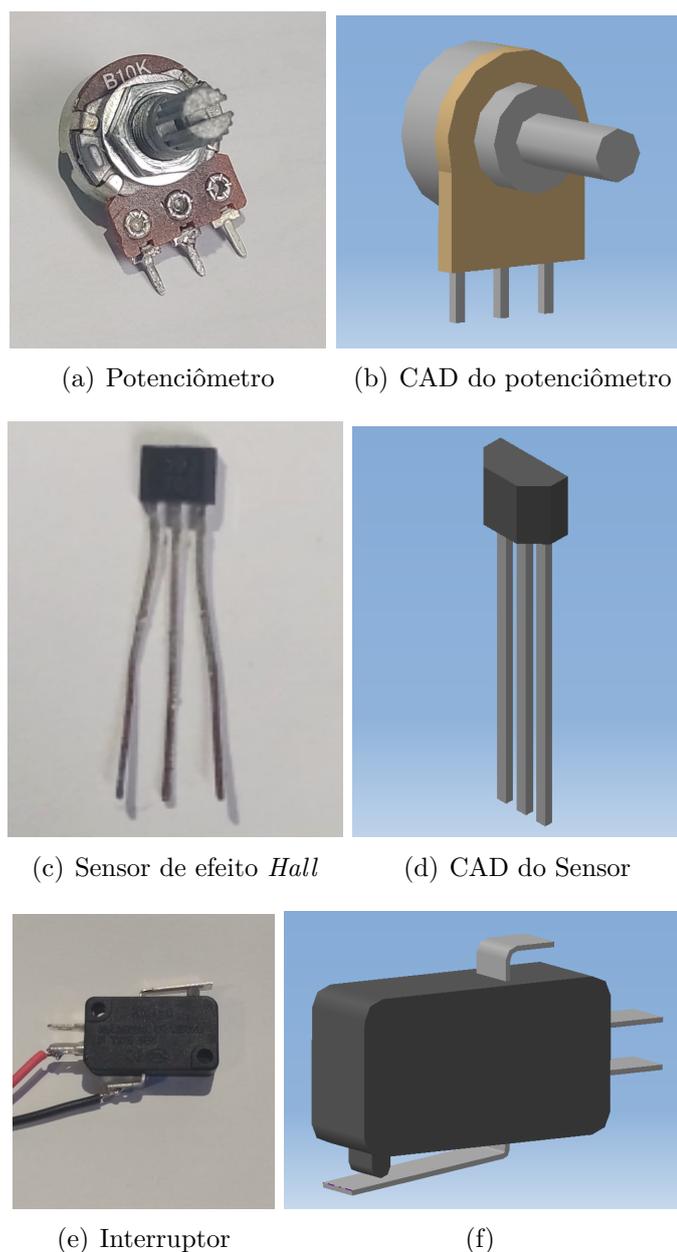


Figura 53 – Componentes eletrônicos para integrar ao simulador (2021).

Os componentes ilustrados nas figuras 53 (b), (d) e (f) também foram desenhados em CAD para comporem os comandos de voo — também desenhados em CAD e explicados posteriormente — e explicar suas posições em cada parte dos controles. As imagens 53 (a), (c) e (e) são fotografias dos componentes, sendo esses os utilizados para testes de futura integração à bancada. Os componentes foram emprestados pelo Ten. Brig. do Ar do APC, além da placa BU0836A, para se poder realizar testes de funcionamento e como cada componente poderia ser integrado ao simulador do aeroclube, visto que este também é corpo de trabalho do estágio supervisionado, realizado no mesmo período do presente trabalho. Mas também se aproveitou esses testes para poder desenhar a primeira proposta de projeto da bancada de simulação da equipe Dragonfly.

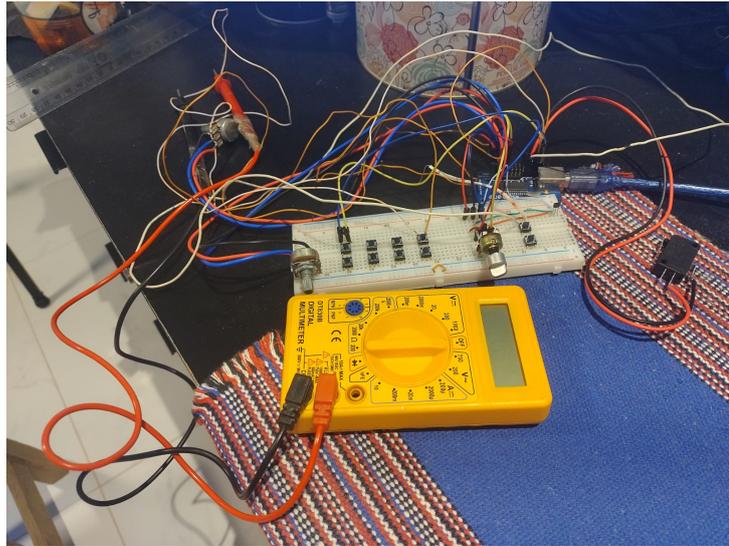


Figura 54 – Testes dos componentes eletrônicos (2021).

Todos os componentes foram testados, além do próprio simulador Condor 2, como mostra as figuras 54 e 50. Instalou-se o *software* de simulação, sob licença mantida em *pen-drive* (emprestado pelo Ten. Brig. do Ar), e os *firmwares* necessários para sua execução. Descobriu-se, durante o período de testes que os interruptores podem ser ligados em paralelo, acontecendo a mesma possibilidade para os potenciômetros.

5.4 Tela de projeção

Para simular um voo planado com maior aproximação da realidade, uma tela branca curva de projeção será usada para o treinamento de pilotos.

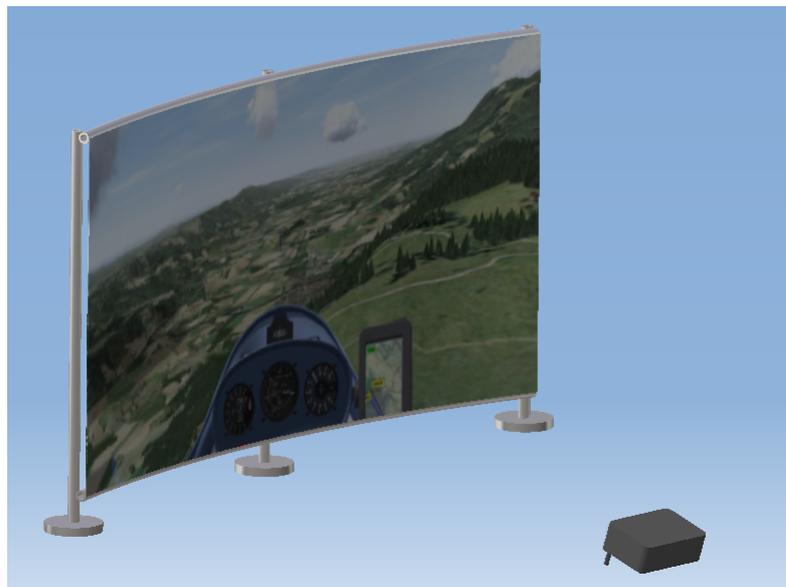


Figura 55 – Tela e projetor de imagem usados para a bancada de simulação (2021).

A estrutura da figura 55 mostra uma tela de 100 polegadas, levemente curvada para a direção do espectador, junto a um projetor de imagem à sua frente. Essa curvatura serve para dar ao espectador uma leve noção de profundidade. O APC também adotará uma tela curva, porém não como representada na figura 56 abaixo, pois uma tela muito curva necessita de ao menos três projetores de imagem e estas imagens projetadas são distorcidas e desorientam o piloto, como relatado por colaboradores do aeroclube.



Figura 56 – Exemplo de tela de projeção curva. Fote: APC (2021).

A tela será projetada para a bancada com a curvatura para permitir ao aluno-piloto uma visão panorâmica do voo e poder treinar procedimentos de emergência, além de permitir ampla vista do voo. Sua projeção será coberta por um tecido de cor branca anti-reflexiva e preso a uma estrutura de metal em formato de arco para permitir uma pequena noção de profundidade.

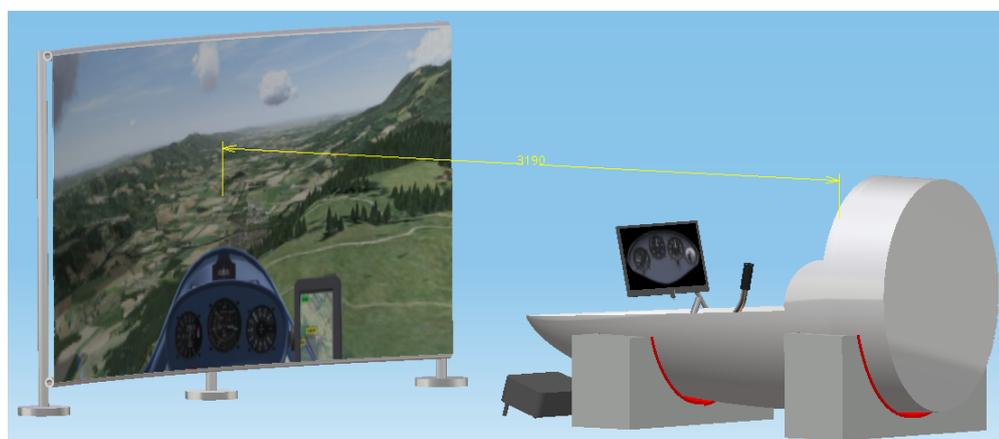


Figura 57 – Distância mínima entre tela e olho do piloto (2021).

A figura 57 mostra uma linha (em amarelo) para indicar o distanciamento entre a tela do simulador e o olho do piloto. Para saber a distância mínima necessária entre os olhos do piloto e a tela, a seguinte tabela deverá ser seguida ((CONTABILISTA, 2021)):

Tabela 6 – Distâncias de projeção (16:9). Fonte: (CONTABILISTA, 2021).

Tamanho da Imagem	Distância da projeção Mínimo ao Máximo
80"(203 cm)	255 a 278 cm
100"(254 cm)	319 a 348 cm
120"(305 cm)	383 a 418 cm
150"(381 cm)	479 a 523 cm

A tela possui um tamanho de 100", com relação 16:9, medindo 1,25 m de largura por 2,21 m de comprimento e um raio de curvatura de 3,19 m, visto que esta é a mesma distância mínima sugerida (6). A tela, com o auxílio de uma estrutura de alumínio, será suspensa a 12,5 cm de altura do chão, pois, pode-se ver que existe um painel de instrumentos da aeronave Arantes-18s, porém o piloto não irá vê-lo, porque será "coberta" por um monitor de computador que substituirá o painel de instrumentos.

Para facilitar o posicionamento e montagem, o projetor de imagem será posicionado logo à frente da fuselagem do "planador", além de estar levemente inclinado para cima, dado que seu posicionamento não afetará a visão do piloto durante o voo. O projetor será um tipo *short throw*, de curta distância de projeção, visto que se este fosse colocado por cima da bancada do simulador, iria obstruir a visão do piloto da tela.

5.5 Controles de voo

Os controles da aeronave são idênticos aos de uma aeronave real, porém com a diferença que não serão interligados por cabos nem polias — como acontece na maioria das aeronaves de pequeno porte —, mas por componentes eletrônicos. Seus movimentos em nada mudam, mesmo quando se trata de um simulador. Entretanto, a diferença é que não estão ligados às superfícies externas de controle, visto que estes já são inexistentes na bancada de simulação.

Os comandos da bancada de simulação serão constituídos de peças fabricadas em PLA sob impressão 3D, pelo uso de alumínio e peças que podem ser compradas para confecção desses comandos, além de serem usados componentes eletrônicos para substituírem os controles reais de uma aeronave.

5.5.1 Manche

Os movimentos de cabrar/picar e rolamento são realizados com o manche da aeronave. Para transferir os movimentos físicos do manche para o *software* de simulação,

serão usados dois potenciômetros de 10k ohm de resistência, um para permitir o movimento de subir e descer o nariz da aeronave, e um segundo potenciômetro para permitir seu rolamento durante o voo. A união dos potenciômetros junto ao manche será realizada como mostrada na figura abaixo:

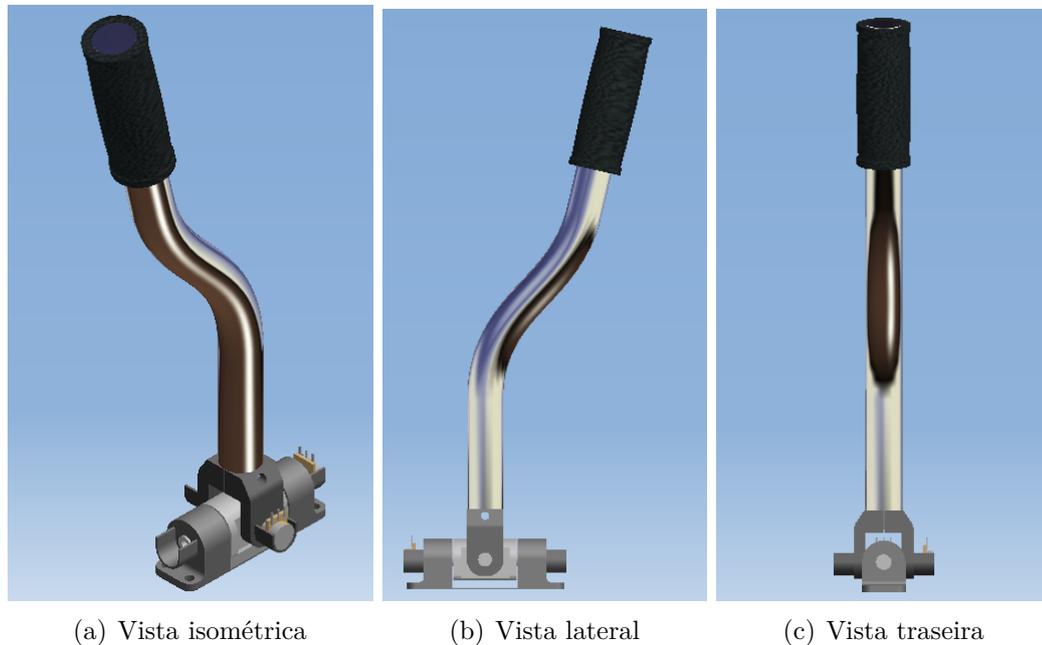


Figura 58 – Manche do simulador (2021).

Pode-se notar na figura 58 que existem três peças para compor o mecanismo do manche: um mancal fixo (em preto) preso ao assoalho da fuselagem; um rolamento por ímã do mancal (em cinza), para permitir o movimento da aeronave ao longo do eixo longitudinal, e duas juntas em formato "U" invertido (em preto) por cima do rolamento para prender o manche de aço.

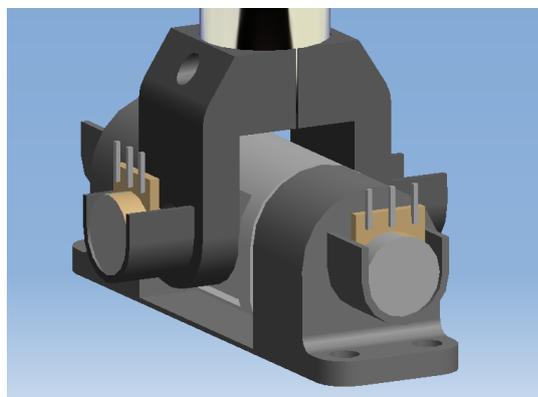


Figura 59 – Montagem do mecanismo do manche (vista frontal) (2021).

Nota-se, pela figura 59, que existe um espaço entre a junta em "U" e o rolamento, permitindo os movimentos de arfagem. Ainda na junta em "U", nota-se a presença de dois

apoios para o potenciômetro, apesar de apenas um ser o suficiente, pois também servem de batentes para o controle do manche.

O primeiro potenciômetro será encaixado junto ao mancal para permitir o rolamento do planador, enquanto o segundo será alocado em uma das laterais da peça de rolamento, permitindo o movimento de cabrar e picar.

5.5.2 Pedais

Os pedais permitem o movimento de guinada da aeronave. A desse movimento usando a força dos pés para o *firmware* será feita utilizando um sensor de efeito *hall*.

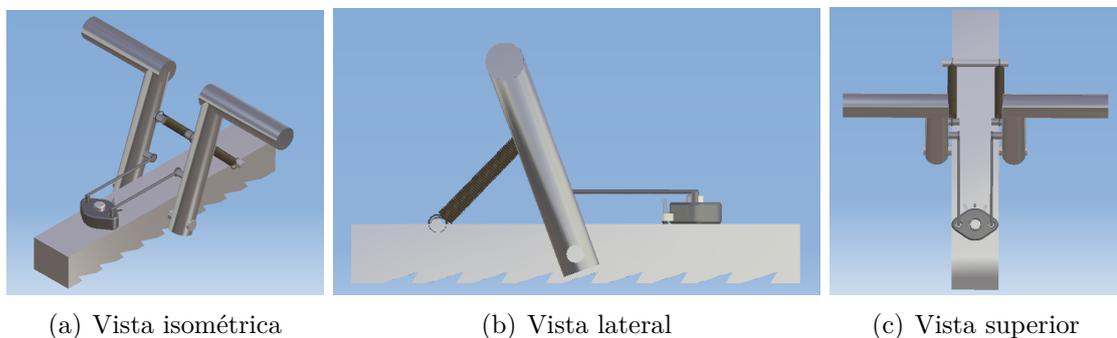


Figura 60 – Conjunto de pedais do simulador (2021).

O pedal é composto por: uma base de alumínio, um par de pedaleiras, um par de pedaleiras, um mancal de rolamento, um par de super ímãs de neodímio, um par de molas de força restauradora e um sensor de efeito *hall*. O conjunto montado será alocado acima de uma trava de posição em forma de serra, como mostrado na figura 61 abaixo:

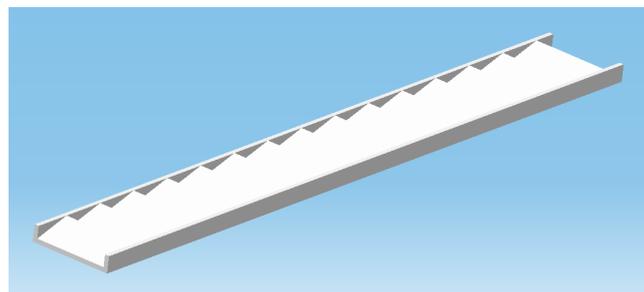


Figura 61 – Ajuste de posição do pedal (2021).

O pedal poderá ser ajustado conforme a altura do piloto, sendo possível movê-lo para frente ou para trás. A base do conjunto em nada impedirá o movimento dos pés dos pilotos, nem os pedais encostarão na fuselagem do simulador.

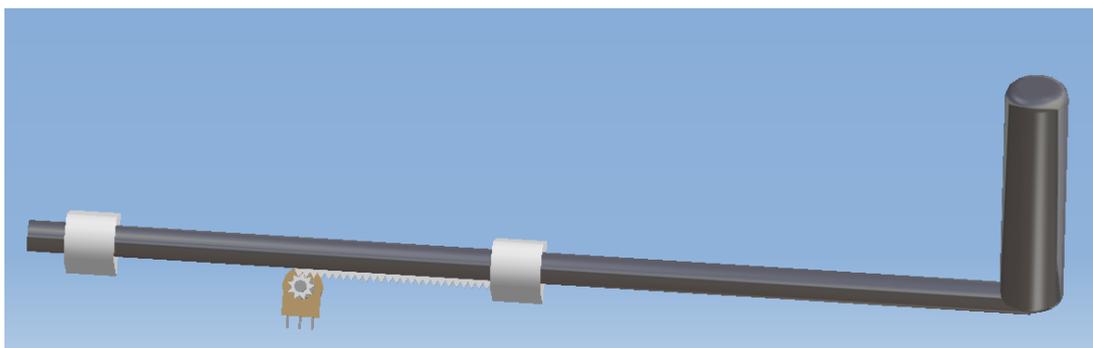
O mecanismo do pedal foi concebido baseado em projeto caseiro de simulador de voo (STANTON, 2020). Para movimentá-lo, basta aplicar força dos pés aos pedais para

executar o movimento de guinada da aeronave. O movimento é transmitido dos pedais para um pequeno mancal de rolamento, à frente dos pedais, por um par de hastes presos e o retorno do pedal à posição neutra se dá por um par de molas, presas aos pedais e à base. No mancal existe um par de ímãs, distanciados 1,2 mm um do outro na horizontal e entre eles há um sensor de efeito *hall*, fixo na base e à frente do mancal, para transmitir os movimentos à medida que o piloto executa o movimento.

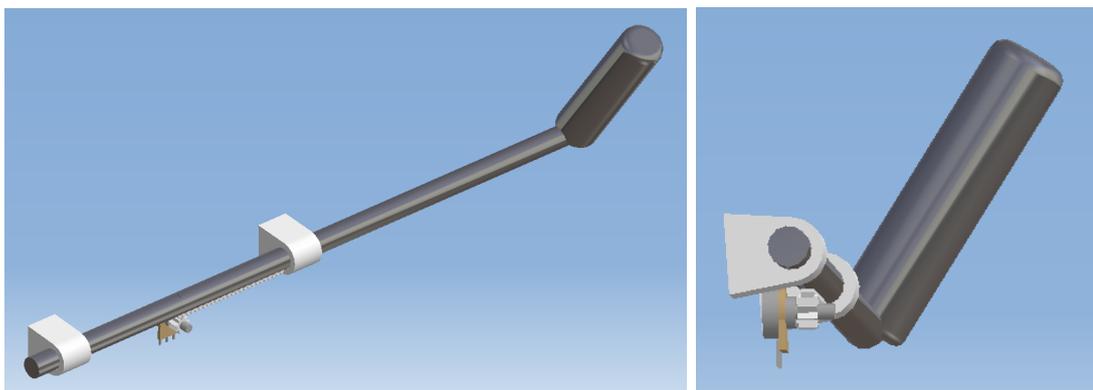
Optou-se por utilizar este sensor no lugar de um potenciômetro, pois a força transmitida pelas pernas do piloto é maior quando comparada aos braços (manche e flape). Também há de se considerar que, devido ao esforço do piloto — que, às vezes, pode ser feito de forma excessiva —, com o tempo, haverá desgaste rápido com o uso excessivo do potenciômetro, o que resulta em necessidade de trocá-lo em pouco espaço de tempo.

5.5.3 Flape

O flape é o dispositivo hipersustentador da aeronave. Ele será acionado pelos movimentos de puxar/empurrar através de um punho para a mão esquerda.



(a) Vista lateral



(b) Vista isométrica

(c) Vista traseira

Figura 62 – Comando do flape do simulador (2021).

O comando do flape possui uma inclinação de 35° em relação à vertical voltada para o lado do piloto para facilitar ao piloto a execução do movimento de maneira precisa e confortável.

Pode-se ver na figura 62 que, abaixo do flape, existem 5 dispositivos: duas alças fixas à fuselagem para segurá-lo (haste), um potenciômetro, uma pequena cremalheira fixa abaixo do flape e um pequeno pinhão fixado à rotação do potenciômetro. O flape possui duas posições máximas: recolhido e estendido (AEROLA, 2008). Na posição recolhido, o piloto estará com o braço esticado e pronto para, a qualquer instante, poder acioná-lo para efetuar manobras de baixa velocidade. Para movê-lo à posição estendido, basta o piloto puxar o punhão.

Abaixo da haste existe uma pequena cremalheira que transmitirá o movimento linear para circular a uma pequena engrenagem (também conhecido por pinhão), esta fixada a um potenciômetro (preso à fuselagem) que, por fim, será acionado o flape no simulador. O curso do flape será limitado a 72 cm, pois os suportes servirão de batentes — estes distanciados 15 cm — para a cremalheira abaixo da haste.

5.6 Painel de instrumentos

Para imitar o painel de instrumentos da aeronave real, será implementado um monitor de computador de bancada (*desktop*) para imitar seus funcionamentos e seus posicionamentos.

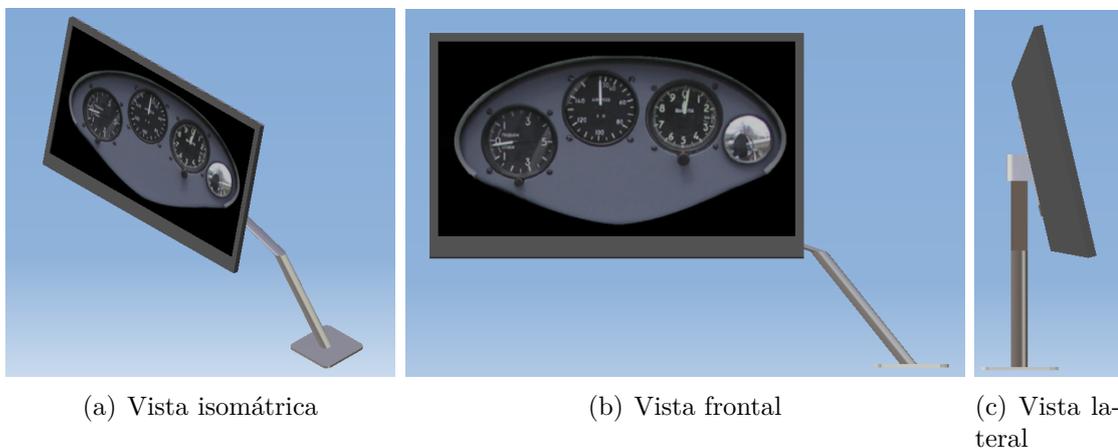


Figura 63 – Monitor de computador preso a um suporte. (2021).

A imagem do painel de instrumentos do Planador Conceito está replicada no monitor para simular seus instrumentos e mostrar que estes estarão ativos durante o voo. O monitor será suspenso por um suporte para monitores, que poderá ser adquirido através de compra.

Pelo fato de ser um monitor para simular, também foi encontrado um problema quanto ao seu posicionamento que será explicado mais adiante. Mas, devido ao seu tamanho, este será posicionado alguns à frente quando comparado ao planador real, mas com a mesma inclinação do painel de instrumentos real, de 13° em relação à vertical.

5.7 Assento

Nos estudos anteriores, um dos problemas relatados diz respeito ao encosto de cabeça ser fixo na aeronave real. Para contornar esse problema, sugere-se a implementação de encaixe de velcro para posicionar o encosto na altura desejada, resultando em uma solução simples e de baixo custo, visto que o velcro é forte o suficiente para não desprender do assoalho da fuselagem

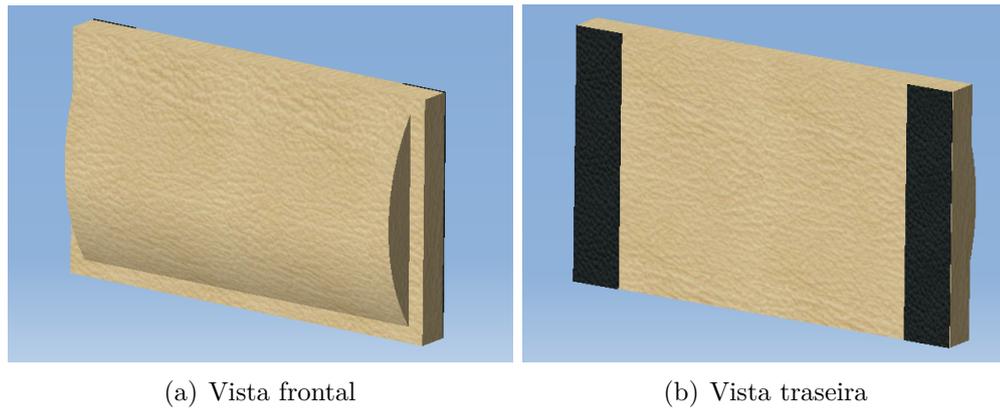


Figura 64 – Encosto de cabeça (2021).

O encosto não é tão necessário para o piloto durante o voo, tanto que algumas aeronaves reais, sejam aviões ou planadores, nem o possuem. Porém, como o projeto original do motoplanador AC-21 tem um encosto de cabeça, optou-se por mantê-lo e melhorá-lo. Para ajustar sua altura, basta retirá-lo e alocar na altura desejada. Uma chapa de alumínio será usada para fixar as tiras de velcro na fuselagem para dar maior rigidez, como mostrado nas figuras 65 (a) e (b) abaixo:

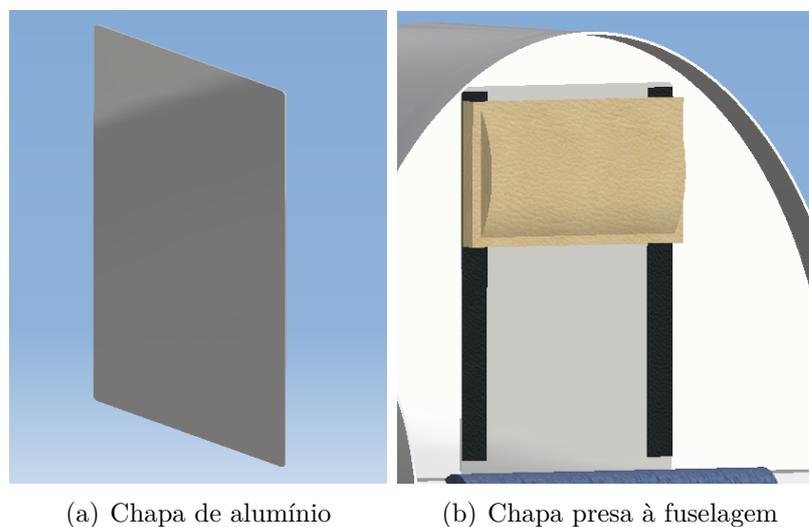
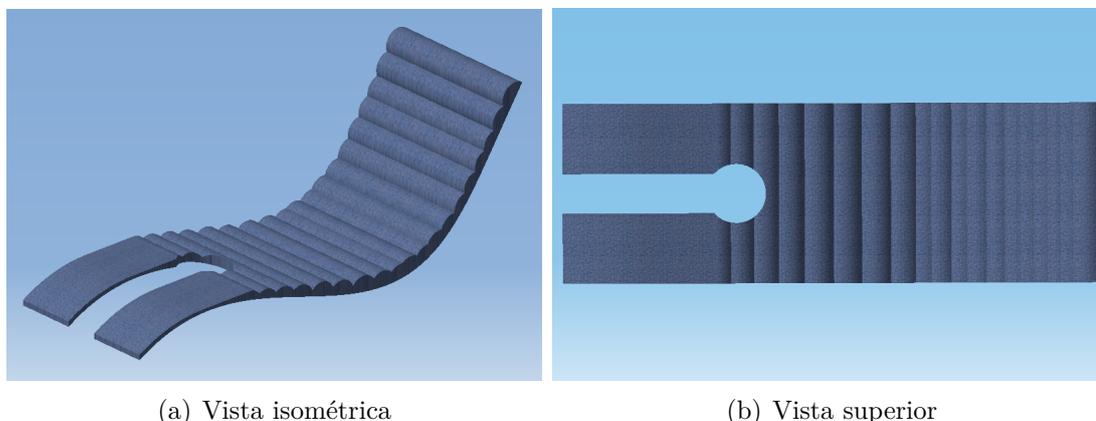


Figura 65 – Chapa de alumínio para fixar o encosto de cabeça (2021).

Outro problema relatado no AC-21 se trata da falta de estofamento do assento do piloto. Como solução a este problema, sugere-se implementar um tecido de estofamento desde a região lombar até a "coxa" da perna.



(a) Vista isométrica

(b) Vista superior

Figura 66 – Estofado do assento do simulador (2021).

Nota-se que existem dois furos no estofado: um em forma cilíndrica e outro em formato circular. Este buraco único serve para dar passagem ao manche no momento que esta peça será alocada no assento da fuselagem. Para fixá-la, basta aplicar duas camadas de fita do tipo dupla face para o estofado não deslizar para baixo e não causar desconforto ao piloto. O estofado deverá ser adquirido através de compra e ser fabricado sob encomenda.

5.8 Estimativas Preliminares

Após feitas as análises ergonômicas e melhorias de projeto para a bancada, os requisitos técnicos também foram revisados. Foram listados os materiais necessários para a construção física da bancada, por parte da Dragonfly, e desenhos técnicos das peças que compõem o simulador foram realizados para facilitar a futura aplicação, na prática.

5.8.1 Materiais Preliminares

As peças a serem fabricadas estão listadas em apêndice sob forma de desenho técnico, através do *software* Catia, com medidas e material a serem implementados para futura obtenção física do simulador. Como existem peças a serem fabricadas em PLA e outras deverão ser adquiridas por meio da compra, houve a necessidade de quantificar essas peças para a concepção do projeto da bancada.

Com a ferramenta *Measure Inertia*, no ambiente *Assembly Design*, foi possível calcular a área externa e interna da fuselagem para estimar a quantidade de material necessário para modelar a fuselagem. A lista de materiais está apresentada na tabela 7. Não foi considerado o custo com material de construção.

Tabela 7 – Lista preliminar de materiais.

Produto	Quantidade	Unidade
Manta Fibra de vidro 300 17 m2 (05 kg)	4,3	m ²
Resina de poliuretano A+B CST 47 (900 g)	5	unid.
Catalisador PSL-1 para Borracha de Silicone	5	unid.
Bloco de isopor 2 x 1 x 0,5m	5	unid.
Projektor de tela <i>short throw</i>	1	unid.
Rolo de velcro 19mm x 3,6m	1	unid.
Cimento para obras (50 kg)	4	unid.
Potenciômetro 10k Ω	3	unid.
Sensor de efeito <i>hall</i>	1	unid.
Filamento de PLA Premium 1.75mm	1	unid.
Placa Controladora BU0836A	1	unid.
Licença de <i>software</i> Condor 2	1	unid.
Suporte Articulado de Mesa com Pistão Para Monitor	1	unid.
Tela de projeção 3D	1	unid.
Tubos de alumínio 2.5"	5	unid.
Tubos de aço 1"	1	m
Tubos de aço 1/2"	1	m
Chapa de alumínio 40 x 25 x 0,2 cm	1	unid.
Tecido Malha de Algodão Lisa	2,5	m ²

Após citar alguns materiais para confecção de bancada, fez-se um levantamento aproximado para custear a construção. O custo estimado para a construção da bancada ficou calculado em R\$ 4200,00. Preços de cada peça do simulador estão listados na tabela 12 do Apêndice C. Todos os custos são apenas preliminares.

6 Integração do Simulador Com Package

Como este estudo do presente capítulo se trata das melhorias dos estudos realizados nos capítulos anteriores, os manequins serão inseridos com as devidas correções e posicionamentos anteriormente propostos. As condições serão as mesmas do capítulo 5, porém com as correções estabelecidas dos problemas encontrados.

6.1 Percentis Utilizados e Package

Os percentis serão os mesmos utilizados dos estudos anteriores, sem nenhuma alteração de postura, massa corporal ou coloração. Logo, a altura, os gêneros de manequins serão mantidos no atual trabalho, sendo eles P95M, P95F e P20F.

Antes de inserir os manequins ao posto de simulação, estes foram colocados em postura de pé e ao lado da bancada para se obter noção de altura da bancada e de como um piloto entraria no simulador.

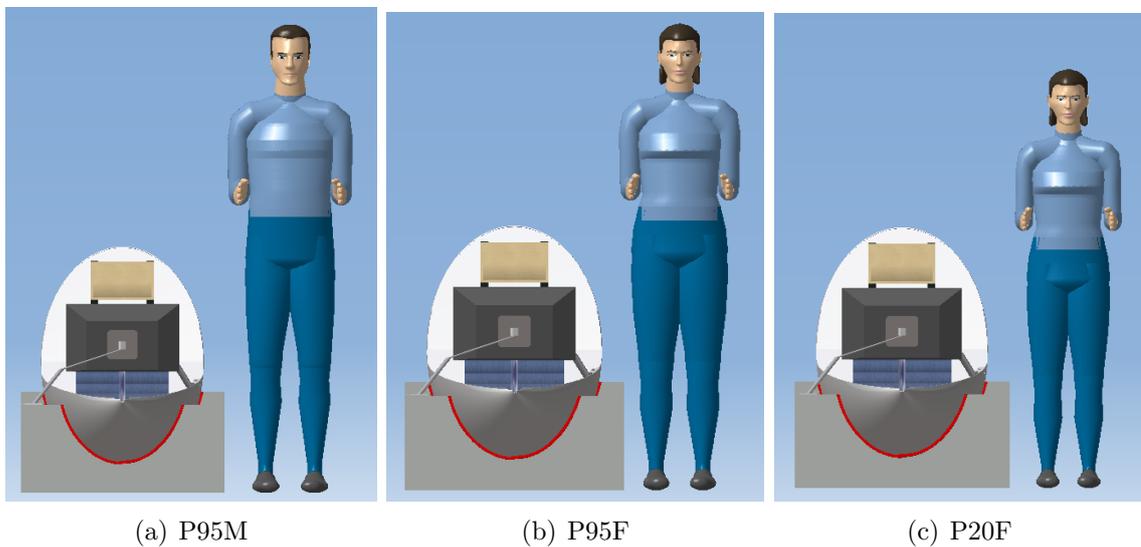


Figura 67 – Bancada com os percentis ao lado (2021).

O posicionamento dos percentis ao lado da fuselagem permitem obter uma dimensão do seu tamanho e como um piloto entraria e se posicionaria no assento. É comum entrar e sair da aeronave pelo lado esquerdo (BASSETO, 2020), mas nada impede que, no planador, a depender de seu projeto, se entre pela direita também. O planador AC-21, por exemplo, possui o *canopy* com trilhos, fazendo com que seja aberto para frente da aeronave (imagens em anexo: A).

6.2 Integração com Bancada de Simulação

Por fim, os manequins puderam ser inseridos à bancada de simulação, como mostram as figuras 68 abaixo. Comparado ao espaço interno dos primeiros estudos, no segundo, teve de ser modificado em alguns aspectos, entre eles a inserção de estofamento para as costas, mas principalmente em relação às pernas dos pilotos.



(a) P95M



(b) P95F



(c) P20F

Figura 68 – Bancada com os percentis ao lado (2021).

No primeiro trabalho, as pernas eram totalmente cobertas — a partir do joelho — pela cobertura do painel de instrumentos da aeronave. Entretanto, isso não se faz mais necessário no simulador, pois, como o nome diz, se trata de uma bancada que imita um

voos planados e permite dar condições ao piloto de treinar os procedimentos de voo. E por se tratar de um simulador, também nota-se a ausência de *canopy*, por se fazer desnecessário, além do fato de poder emitir reflexos e atrapalhar na pilotagem.

Nas imagens 68 acima, os blocos de concreto e o projetor foram removidos e a fuselagem foi mudada para modo translúcido para poder ver o posicionamento dos manequins. Nota-se que não houve muitas diferenças de posicionamento em relação ao trabalho anterior, mesmo com a alocação de estofamento — desenhado de forma que acompanhe o formato do assento do Planador Conceito — e encosto de cabeça ajustável.

A primeira mudança diz respeito ao comando dos pedais. Nota-se que nas três imagens acima, os manequins alcançam os pedais, sendo que o controle é ajustável de acordo com a altura do piloto. Quando o P95M está inserido no *cockpit*, o pedal alcança o ajuste mais afastado do assento, enquanto o ajuste mais próximo acontece com a P20F. Um detalhe importante, que pode ser visto na figura DF09 do apêndice A, é que o assento original teve de ser modificado com um orifício retângulo para acomodar o trilho de posição do comando do pedal, visto que este possui um formato de paralelepípedo retangular para acomodar o mecanismo de funcionamento e para abranger todos os percentis possíveis.

Outro detalhe importante se trata do posicionamento do monitor que simula o painel de instrumentos. Na aeronave AC-21 original, os instrumentos ficam localizados exatamente acima dos joelhos do piloto. Entretanto, isso não foi possível de ser replicado no simulador, pois o monitor, de 18,5 polegadas (47 cm), iria obstruir a visão do piloto para a tela de projeção caso fosse alocado sobre os joelhos. A principal preocupação seria para a P20F, pois é o percentil de menor tamanho aceito para poder treinar no simulador, vide os estudos realizados. Portanto, para contornar este problema, o monitor foi posicionado um pouco mais à frente dos joelhos dos pilotos. E para compensar o tamanho dos instrumentos, os mostradores foram aumentados para parecer que possuem o mesmo tamanho dos mostradores reais do Planador Conceito.

Algo importante a recordar, ainda quanto ao monitor afastado, é que o piloto não precisa tocá-lo durante o "voo", mas apenas observar os mostradores ASI, VSI e ALT, enquanto o PSI apenas será útil para o momento da decolagem. Outro motivo pelo qual o monitor será posicionado mais à frente do que no planador real é para facilitar a entrada e saída do piloto em treinamento da bancada, pois, não só para treinamentos o simulador servirá, mas também para fins de desenvolvimentos acadêmicos da UnB-FGA e também para uso recreativo, não somente o profissional.

Logo após os manequins serem posicionados e inseridos ao simulador, pôde-se fazer os devidos estudos ergonômicos referentes à aeronave AC-21, como mostram os tópicos a seguir, complementando estudos mais aprofundados nos tópicos de alcance, visão e níveis de conforto (*RULA*).

6.2.1 Envelope de Alcance

O envelope de alcance, representado por uma bolha ao redor de um membro do corpo, representa o alcance máximo que a pessoa consegue atingir, mas sem alterar sua postura. A ferramenta *Computes an envelope reach*, do ambiente *Human builder*, do Catia, foi utilizado para este fim, como mostram as figuras abaixo.

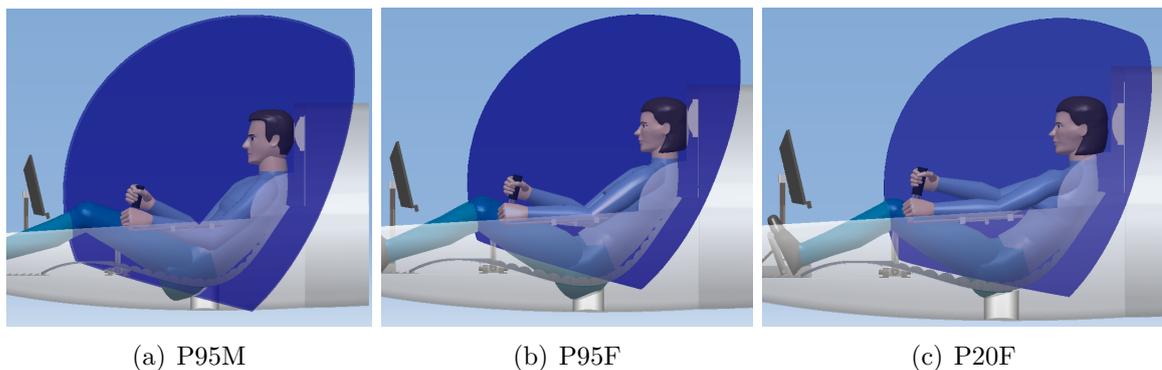


Figura 69 – Envelope de alcance dos percentis usados (2021).

Um dos problemas relatados no trabalho anterior dizia respeito ao alcance, por parte do P20F, do alcance da mão esquerda ao comando do flape do AC-21. Para contorná-lo, optou-se por aproximar o flape (controle) do piloto, ou seja, deslocando-o no sentido para trás da aeronave. Logo, os percentis femininos P95F e P20F não precisam mais alcançá-lo com os dedos, mas agora sendo alcançável com as mãos, assim como o homem P95M, que já conseguia alcançar anteriormente.

Outro detalhe, como relatado antes, é que nenhum dos três percentis, na posição em que se encontram, conseguem alcançar o painel de instrumentos. Durante um voo, isso não se faz necessário, pois os mostradores devem ser calibrados antes do voo, como é o caso do ALT, que, dependendo da pressão, precisa ajustar a altitude de decolagem de acordo com a pressão atmosférica do local. Porém, como se trata de um simulador para planador, não há necessidade de ajustar os instrumentos, pois não é possível, sendo que o monitor não é do tipo **touch screen** e o simulador voará em condições ideais.

6.2.2 Campo de Visão

O piloto deve possuir um campo de visão que o possibilite olhar tanto para o interior quanto para o exterior do *cockpit* do simulador. Para isso, a ferramenta *Open Vision Window* foi usada para esta função, com as restrições focais e adicionado posicionamento focal, representado por um círculo amarelo, para indicar para onde o manequim está concentrado. Também foi posicionada a câmera do ambiente *Photo Studio*, na frente dos olhos dos pilotos e captadas imagens com distância focal de 35 mm e 63º de campo de visão, os mesmos parâmetros adotados para analisar os planadores comparativos.

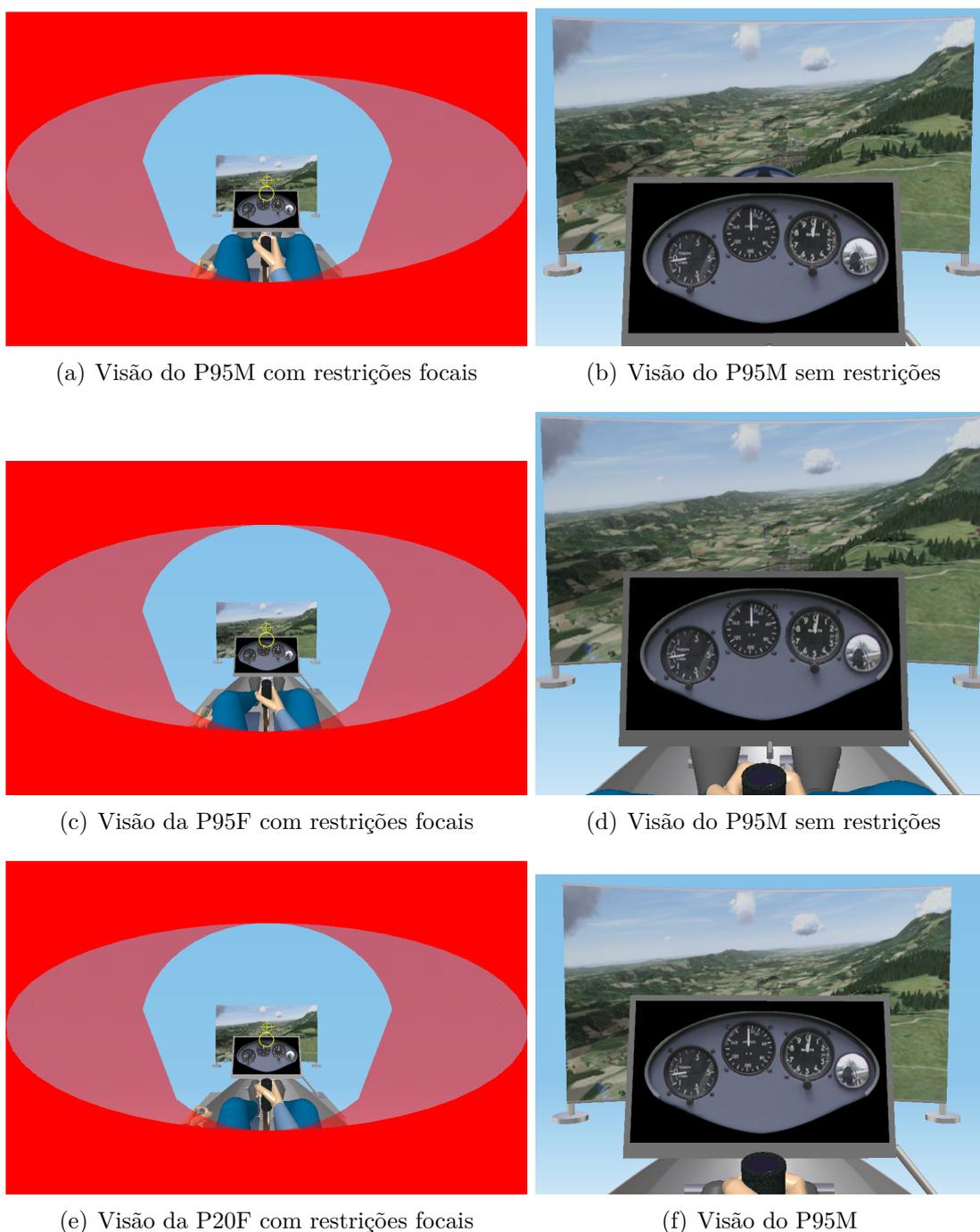


Figura 70 – Visões dos percentis utilizados (2021).

As imagens 70 (a), (c) e (e) foram obtidas pelo uso da ferramenta citada do Catia, com as restrições focais do olho humano, enquanto as imagens 70 (b), (d) e (f) foram obtidas colocando-se a câmera (com profundidade) na frente do piloto, simulando a visão em primeira pessoa.

Nas imagens da esquerda (com restrições focais) nota-se a presença de dois círculos amarelos para cada visão. O círculo amarelo representa a visão focal, com inclinação de 6º para baixo, natural do ser humano. Já o segundo círculo, com uma cruz amarela,

representa o real foco, ou seja, para onde está realmente direcionado o foco da pessoa, para onde ela está olhando. Ambos os círculos não estão distantes um do outro, portanto não cansando a vista dos olhos tanto para olhar para os instrumentos, nem para olhar para o horizonte de voo, mesmo quando se trata de simulador.

As imagens da direita foram obtidas para imitar a vista humana, que possui distância focal de 35 mm. Estas fotos foram captadas para se obter uma noção mais próxima da realidade de como cada um dos percentis observam o simulador no *cockpit*. Observa-se, ainda que pouco perceptível, que o homem e a mulher P95 possuem visão mais ampla do cenário de voo, enquanto a P20F possui um pouco de obstrução devido ao monitor. Estas obstruções e campos de visão estão representados nas imagens abaixo, em vista lateral e através de ângulos, para entender como cada percentil observa tanto para a tela quanto para o monitor.

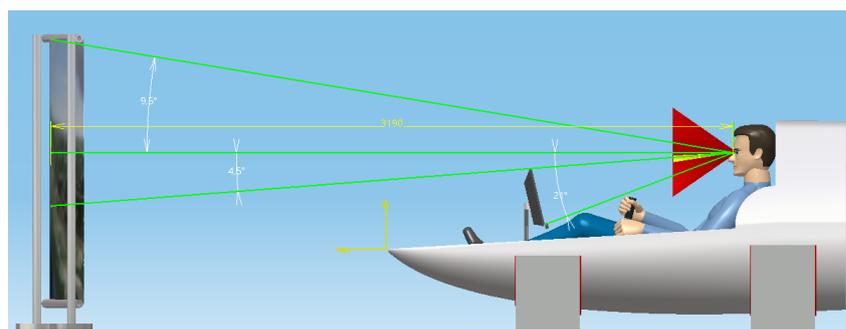
Os ângulos das figuras 71 estão mostrados com mais clareza na tabela 8 abaixo. Os ângulos foram medidos a partir da linha horizontal de visão dos pilotos, sendo o primeiro e segundo ângulos a vista para o horizonte na tela, e o terceiro ângulo a vista para o painel de instrumentos (monitor). O primeiro ângulo (1) corresponde entre a linha horizontal da vista dos pilotos e a borda superior da tela de projeção. O ângulo 2 corresponde entre a linha horizontal e a borda superior do monitor. O terceiro e último ângulo (3) corresponde entre a linha horizontal e a borda inferior do monitor.

Tabela 8 – Ângulos de visão dos percentis

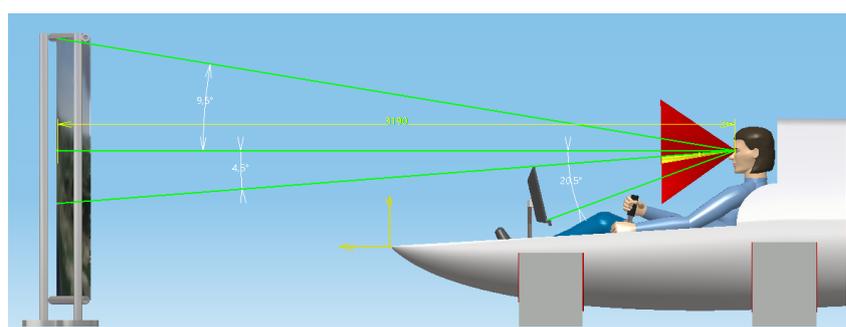
Ângulo	P95M	P95F	P20F
1	9,5°	9,5°	10°
2	4,5°	4,5°	1,6°
2	21°	20,5°	18°

A visão humana possui um ângulo máximo de 35°, tanto para cima quanto para baixo. Estes ângulos são mostrados pelos campos de visão dos manequins, representados por cones vermelhos a partir da altura dos olhos, enquanto o cone amarelo representa a visão focal dos pilotos. Para ativá-los, necessitou-se ativar as opções *Field of View* e *Visual Cone*, encontrados nas propriedades de cada manequim.

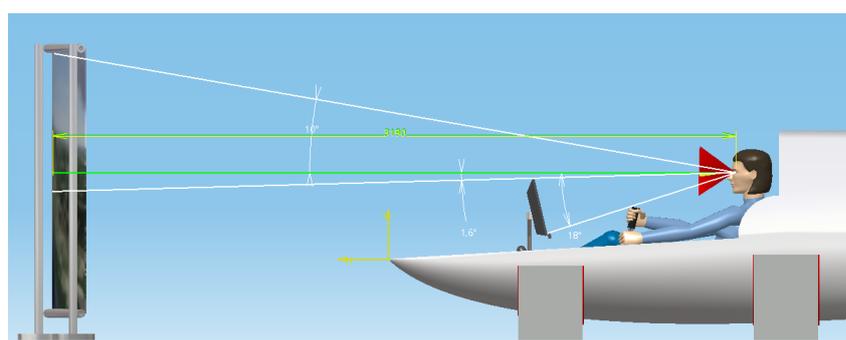
Nenhum dos ângulos máximos necessários para observar o monitor e a tela ultrapassaram, em ângulo, o campo de visão máximo dos olhos dos manequins, como evidenciado pelas figuras 71 (a), (b) e (c). A mulher P20F possui uma visão um pouco limitada em comparação aos manequins P95M e P95F, mas não representando risco de obstrução durante o voo. Ainda sobre o homem e a mulher de percentis iguais, estes possuem ângulos de visão muito próximos um do outro, evidenciando que, apesar da pouca diferença de tamanho para ambos os gêneros, em quase nada muda a postura para os percentis de



(a) P95M



(b) P95F



(c) P20F

Figura 71 – Ângulos de visão para a tela de projeção (2021).

maiores estaturas

6.3 Validação da bancada de simulação

Por fim, a validação virtual da bancada de simulação deu-se pela ferramenta RULA do Catia, no ambiente *Human Activity*.

A ferramenta RULA foi utilizada novamente para as novas análises do simulador, porém alguns critérios adicionais foram implementados e seguidos. Nos primeiros estudos ergonômicos, apenas as posições neutras de ambas as mãos foram consideradas, ou seja, o manche na posição neutra e o flape na posição recolhida — posição que obriga o piloto a ficar com o braço e antebraço estendidos —, mas, mesmo assim, os resultados não foram

satisfatórios em decorrência do desconforto dos manequins quanto ao antebraço e pulsos.

Nesta nova análise, considerou-se o movimento desses dois comandos no simulador, onde os três manequins movimentam o manche e o comando do flape. O manche foi analisado em cinco posições: neutra; deslocado para a esquerda, deslocado para a direita; cabrado e picado, enquanto o flape foi analisado em duas posições: recolhido (braço esticado) e estendido (braço contraído), ou seja, quando o flape foi acionado e está solto do bordo de fuga da asa.

Os critérios foram os mesmos usados nos estudos dos dois planadores anteriores, com a diferença que este possui mais dados. O braço esquerdo de cada manequim foi posicionado no flape sendo este recolhido (*Up*) e estendido (*Down*). Já a mão direita dos manequins foi posicionada no manche e inclinada de acordo com cada posição de voo do planador. Os resultados obtidos estão expostos nas três tabelas abaixo, cada uma representando um percentil por vez.

Tabela 9 – Resultado RULA do percentil 95% masculino - Flape vs Manche (2021).

P95M	Flape		Manche				
	Up	Down	Neutro	Cabrado	Picado	Esquerda	Direita
Braço	1	1	1	1	2	1	1
Antebraço	1	1	2	2	3	1	2
Pulso	2	3	2	2	2	2	2
Torção do Pulso	1	1	1	1	1	1	1
Postura A	2	2	2	2	4	2	2
Pescoço	1	2	2	2	2	2	2
Tronco	3	3	3	3	3	3	3
Pernas	1	1	1	1	1	1	1
Postura B	4	4	4	4	4	4	4
Pontuação Final	4	4	4	4	4	4	4

Tabela 10 – Resultado RULA do percentil 95% feminino - Flape vs Manche (2021).

P95F	Flape		Manche				
	Up	Down	Neutro	Cabrado	Picado	Esquerda	Direita
Braço	1	2	1	1	2	1	1
Antebraço	1	1	2	2	3	2	2
Pulso	2	3	2	2	2	2	2
Torção do Pulso	1	1	1	1	1	1	1
Postura A	2	3	2	2	4	2	2
Pescoço	1	2	2	2	2	2	2
Tronco	3	3	3	3	3	3	3
Pernas	1	1	1	1	1	1	1
Postura B	3	3	3	3	3	3	3
Pontuação Final	3	3	3	3	3	3	3

Tabela 11 – Resultado RULA do percentil 20% feminino - Flape vs Manche (2021).

P20F	Flape		Manche				
	Up	Down	Neutro	Cabrado	Picado	Esquerda	Direita
Braço	3	2	2	1	2	2	2
Antebraço	2	2	2	2	3	2	2
Pulso	2	2	2	2	2	2	2
Torção do Pulso	1	1	1	1	1	1	1
Postura A	4	3	2	2	4	3	3
Pescoço	1	1	1	1	1	1	1
Tronco	3	3	3	3	3	3	3
Pernas	1	1	1	1	1	1	1
Postura B	3	3	3	3	3	3	3
Pontuação Final	3	3	3	3	3	3	3

As sugestões implementadas no projeto da bancada de simulação apresentaram melhoras significativas para os manequins. Observa-se nas tabelas 9, 10 e 11 que os comandos ficaram mais confortáveis de serem manuseados, de forma geral.

Exite, no entanto, apenas duas preocupações, no que diz respeito ao manche e no flape. Nos três pilotos, houve desconforto dos antebraços na hora que o manche é totalmente movido para a posição picado (nariz da aeronave para baixo). Entretanto, há pouco espaço para este movimento, além de ser desnecessário, pois o principal movimento exercido pelo manche é o de cabrar a aeronave, tanto em pouso quanto na decolagem. Ainda que o piloto possua a intenção de descer a aeronave, esta o fará de forma gradual, cabendo ao piloto controlar a razão de descida, feita através do manche.

Outra observação importante diz respeito ao home e à mulher P95 quando puxam a alavanca do flape. Seus pulsos são levemente mal posicionados quando executam o comando, porém sem causar algum distúrbio aos membros, mas com a necessidade de serem revistos, visto que, para o simulador, o comando foi posicionado mais próximo ao membro. A mesma situação não acontece para P20F, que possui a posição nos limites da análise *RULA*.

Apesar destes defeitos, a pontuação final para cada manequim foi melhorada em relação aos estudos anteriores, sendo que as melhorias sugeridas surtiram efeitos positivos à bancada de simulação.

7 Conclusões

Ao longo do desenvolvimento do trabalho, foi possível notar como as análises ergonômicas afetam os refinamentos de projeto de uma aeronave e sua importância. Notou-se a verdadeira importância de como a ergonomia está presente na aviação, mesmo em aeronave de pequeno porte, como foi evidenciado no trabalho.

Os primeiros estudos ergonômicos dos planadores Conceito e Comparativo obtiveram resultados satisfatórios. Entretanto, não foram suficientes para a concepção de projeto de uma aeronave a ser construída, porque seu design deveria passar por processos de refinamentos ergonômicos para a concepção de projeto na categoria planador.

Apesar de o AC-21 ser um excelente motoplanador e por se tratar de uma aeronave experimental, ele precisou ser melhorado em termos ergonômicos. A primeira sugestão foi de aproximar a alavanca de comando do flape para ser alcançada por pilotos de menores estaturas. A segunda sugestão foi de desenhar um encosto de cabeça regulável segundo a altura do ocupante. Também aconselhou-se instalar estofamento para o assento, com a implementação de uma camada de espuma, envolvendo costas, nádegas e pernas do piloto.

Para realizar os refinamentos, o trabalho obteve direcionamento na concepção de projeto de uma bancada de simulação de voo de planador. O simulador foi baseado no Planador Conceito, estudado para servir de projeto para a equipe Dragonfly. Porém, o desenvolvimento da bancada de simulação será a primeira etapa a ser realizada, pois será necessário realizar refinamentos de projeto, além da construção e validação da cabine.

Todas as implementações de melhorias no simulador obtiveram resultados positivos para os três percentis, apesar de a mudança no painel de instrumentos pelo monitor não ser alcançável por nenhum deles quando posicionados no *cockpit*, mas não sendo necessário durante o voo. As análises foram realizadas, no segundo estudo, com mais profundidade em relação aos primeiros estudos, além de detalhado com maior clareza. Os desenhos técnicos foram realizados para compor o projeto da bancada e os materiais foram selecionados e listados para sua concepção.

A validação da futura bancada física será feita através de um questionário subjetivo. Questionário esse com perguntas referentes a experiências com aeronaves reais e a simuladores de voo, desde os mais simples até os mais complexos. A pesquisa deverá ser realizada com pilotos de planadores e alunos PPL's para ser possível a validação física do simulador, pois será de suma importância definir um package aeronáutico para a futura construção de um motoplanador real.

Referências

- ABERGO. O que é ergonomia (associação brasileira de ergonomia - abergo). Rio de Janeiro, Brasil, 2012. Disponível em: <<https://bityli.com/ZxqEm>>. Citado na página 23.
- ADA. Ac-21 powered sailplane. Ukraine, 2007. Disponível em: <<https://bityli.com/hD8G5>>. Citado 7 vezes nas páginas 8, 11, 12, 39, 40, 50 e 133.
- AEROLA. Alatus – m owner’s manual. AEROLA Ltd., 19 Tupoleva str., Kiev 04128 Ukraine, 2008. Disponível em: <<https://bityli.com/C757Pt>>. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 76.
- AEROS. Ac-21 powered sailplane. AEROS CARBON WORKS, 2005. Disponível em: <<https://bityli.com/tfxf0>>. Citado 6 vezes nas páginas 8, 11, 38, 39, 50 e 132.
- ANAC. Levantamento do perfil antropométrico da população brasileira usuária do transporte aéreo nacional – projeto conhecer. Rio de Janeiro, Brasil, 2009. Disponível em: <<https://bityli.com/fwHvu>>. Citado 3 vezes nas páginas 11, 54 e 136.
- ANAC. Rbac nº 103 emenda nº 00: Operação aerodesportiva em aeronaves sem certificado de aeronavegabilidade. ANAC, 2018. Disponível em: <<https://bityli.com/Ax5iX>>. Citado na página 37.
- ANAC. Rbac nº 61 emenda nº 00: Requisitos para qualificação e uso de dispositivos de treinamento para simulação de voo. ANAC, 2020. Disponível em: <<https://bityli.com/vt3op1>>. Citado na página 35.
- BASSETO, M. Por que só as portas da esquerda dos aviões são usadas para as pessoas embarcarem? AEROIN, 2020. Disponível em: <<https://bityli.com/RpElfa>>. Citado na página 80.
- CAE. Airline pilot training. CAE, 2021. Disponível em: <<https://bityli.com/F4jn40>>. Citado na página 35.
- CAE. Cae 7000xr series level d full-flight simulator. 2021. Disponível em: <<https://bityli.com/jalc1s>>. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 35.
- CAMLENSE. Which lens is closest to human eye? (2021). CAMLENSE, 2021. Disponível em: <<https://bityli.com/4MRGKe>>. Citado na página 61.
- CATIADOC. Catia doc - analysis introduction. CATIADOC, 2021. Disponível em: <<https://bityli.com/vWyqjH>>. Citado na página 28.
- CATIADOC. Catia doc - rula analysis. CATIADOC, 2021. Disponível em: <<https://bityli.com/15CxeW>>. Citado 3 vezes nas páginas 12, 28 e 29.
- CONDOR. Condor, the complete soaring simulator. CONDOR SOARING, 2021. Disponível em: <<https://www.condorsoaring.com/>>. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 66.

- CONTABILISTA. Como calcular a distância correta de instalação do projetor? 2021. Disponível em: <<https://bityli.com/Cnw0QH>>. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 72.
- EFA. Epic flight academy: Are there height restrictions for becoming a pilot? New Smyrna Beach, USA, 2021. Disponível em: <<https://bityli.com/qYHSr>>. Citado na página 26.
- ERGOS. Ergos human factors engineering: Mockup. Netherlands, 2016. Disponível em: <<https://bityli.com/udiac>>. Citado na página 35.
- FAA. *Manual Voando Planador*. [S.l.], 2013. 239 p. Disponível em: <<https://bityli.com/Eb5pm>>. Citado 3 vezes nas páginas 8, 18 e 28.
- FREITAS, E. A. A. D. Desenvolvimento de uma bancada de simulação de cockpit de uma aeronave de pequeno porte. Brasília, Brasil, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 33.
- GALVÃO, F. L. A note on low drag bodies - paper given at the ostiv congress. Lesyno, Poland, 1968. Disponível em: <<https://bityli.com/A8odP>>. Citado na página 41.
- GRU. Turismo corporativo: conheça o cae. 2018. Disponível em: <<https://bityli.com/p9XA59>>. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 35.
- HOMA, J. M. Aerodinâmica e teoria de voo - noções básicas. Sao Paulo, Brasil, p. 133, 2010. Citado 3 vezes nas páginas 8, 31 e 32.
- IBGE. Tabela 8171 - percentis da altura das pessoas de 15 anos ou mais de idade, por sexo e grupo de idade. IBGE, 2019. Disponível em: <<https://bityli.com/36kjTy>>. Citado na página 54.
- IIDA, I. *Ergonomia: Projeto e Produção, 2a edição revisada e ampliada*. São Paulo, Brasil, 2005. 359 p. Citado 4 vezes nas páginas 8, 23, 24 e 26.
- INSEE. Dossier de presse - campagne natiolane de mensuration. Paris, France, 2006. Disponível em: <<https://bityli.com/IJ6LwF>>. Citado na página 54.
- JUNIOR, M. A. Uso do simulador de voo de baixo custo no processo ensino-aprendizagem de navegação aérea e teoria de voo. Campina Grande, PB, p. 20, 2015. Disponível em: <<https://bityli.com/6EKoM>>. Citado na página 33.
- LEOBODNAR. Bu0836a 12-bit joystick controller. Leo Bodnar Electronics LTD, 2021. Disponível em: <<https://bityli.com/7kfRMb>>. Citado 3 vezes nas páginas 9, 67 e 68.
- LIPAOGAMER. Omprei um simulador de voo!!! 2018. Disponível em: <<https://bityli.com/NGEDRr>>. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 34.
- MIRANDA, M. R. Desenvolvimento de bancada para simulação veicular integrando realidade virtual e medição de dados fisiológicos. Brasília, Brasil, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 54.
- MIRANDA, M. R. Ergonomia do produto, notas de aula. Brasília, Brasil, 2017. Citado 4 vezes nas páginas 8, 24, 25 e 26.
- OLIVEIRA, L. R. M. Luizmonteiro.com lcc d/b/a online simulators. LUIZMONTEIRO, 2021. Disponível em: <<https://bityli.com/Ceu5S>>. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 49.

- PLUS, E. A step-by-step guide: Rapid upper limb assessment (rula). Ergonomics Plus Inc, 2021. Disponível em: <<https://bityli.com/YqFJHa>>. Citado 8 vezes nas páginas 8, 11, 12, 29, 30, 31, 134 e 135.
- RATE. Which industries use catia? First-Rate Molde Solution co., Ltd, 2010. Disponível em: <<https://bityli.com/Ag1Gwj>>. Citado na página 37.
- SAE. Aerospace recommended practice sae apr4101. SAE international Group, United States, 2003. Disponível em: <<http://www.sae.org>>. Citado 4 vezes nas páginas 26, 27, 28 e 37.
- SMITH, J. H. *An Introduction to Modern Vehicle Design 1st edition*. Transport Research Laboratory (TRL), UK, 2000. 632 p. Citado na página 36.
- STANTON, T. Diy flight simulator joystick. 2020. Disponível em: <<https://bityli.com/lkICA>>. Citado na página 74.
- STRATOMASTER. Stratomaster mgl avionics, instruments efis. St Martin d'Uriage, France, 2021. Disponível em: <<https://bityli.com/oiLjj>>. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 49.
- TILLEY, A. R. *As Medidas do Homem e da Mulher – Henry Dreyfuss Associates*. New York, USA, 2005. Citado 6 vezes nas páginas 8, 11, 24, 27, 137 e 138.
- WINGS, G. Simulador elite mono e bi-motor treinamento programa ifr. 2021. Disponível em: <<https://bityli.com/IyAdXu>>. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 34.

Apêndices

APÊNDICE A – Desenhos Técnicos

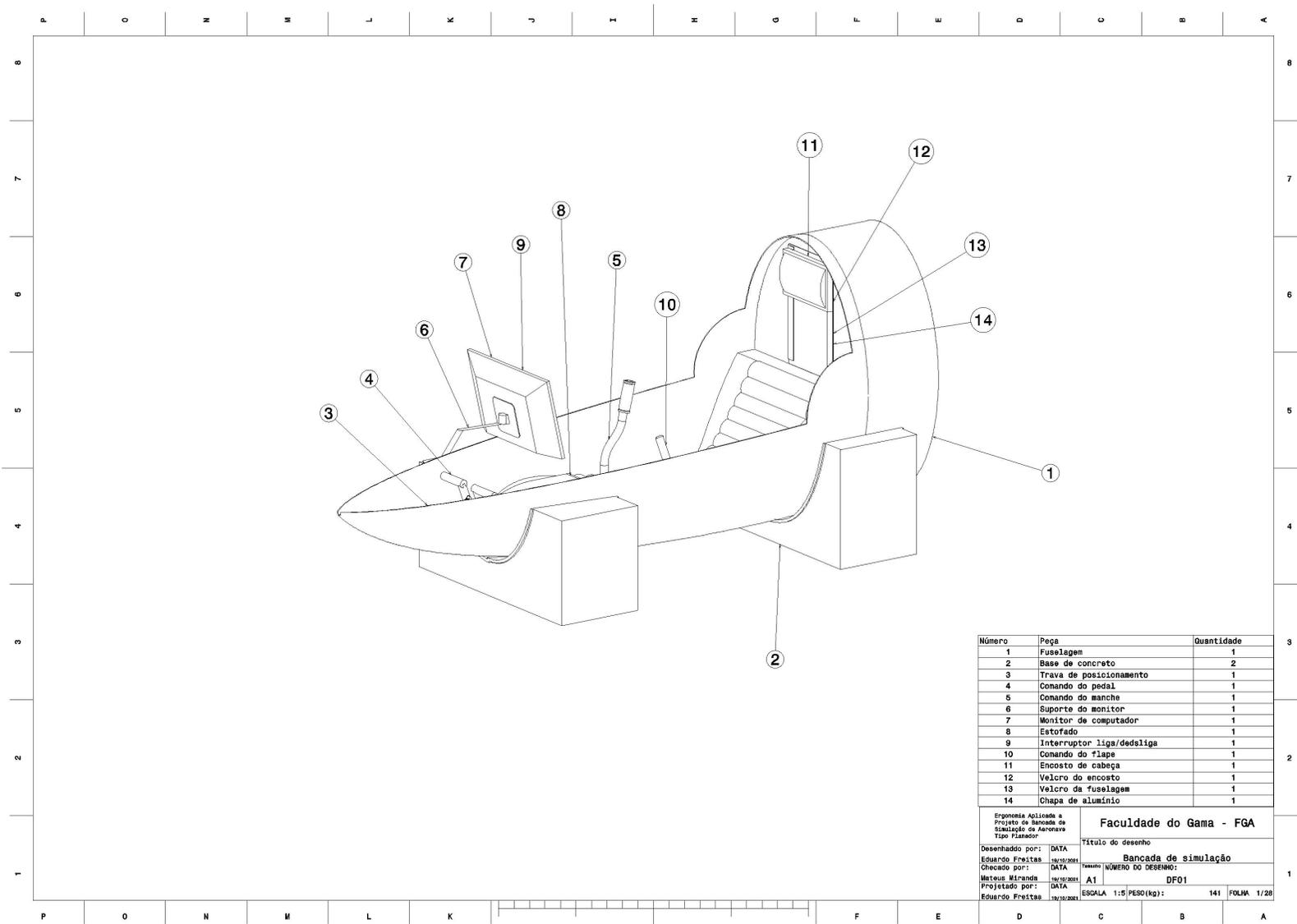


Figura 72 – Desenho técnico da bancada montada (2021).

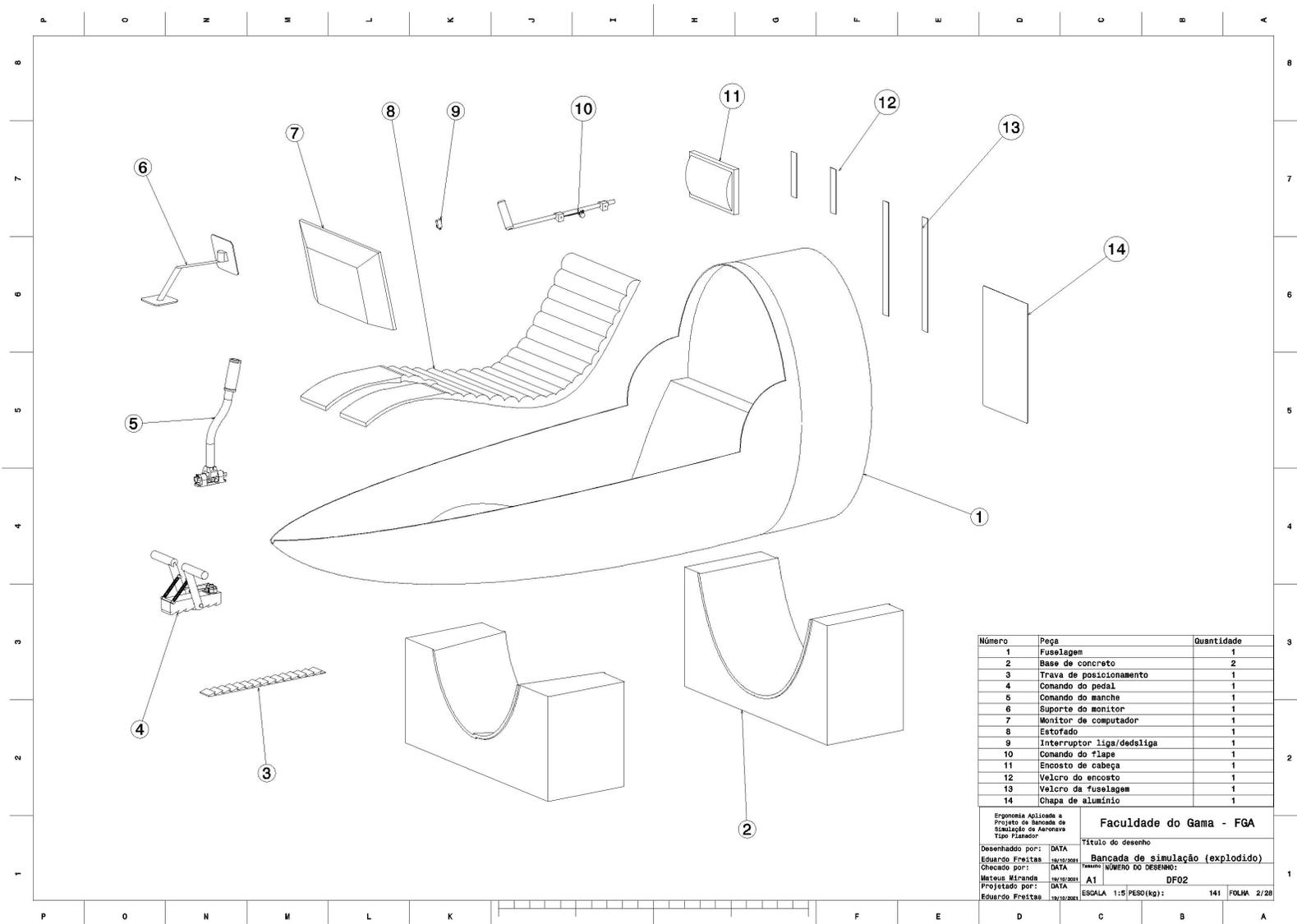


Figura 73 – Desenho técnico da bancada explodida (2021).

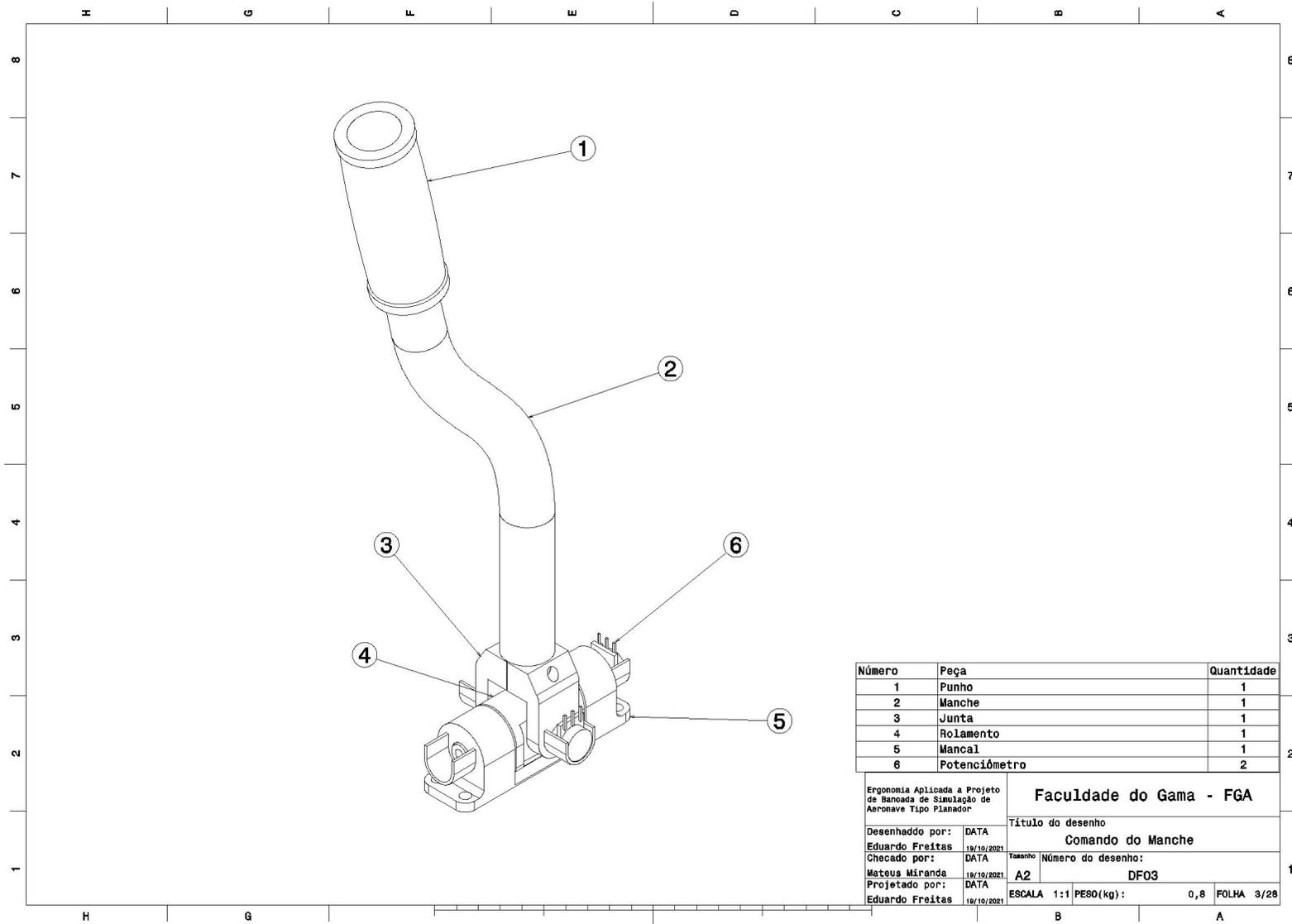


Figura 74 – Desenho técnico do conjunto do manche montado (2021).

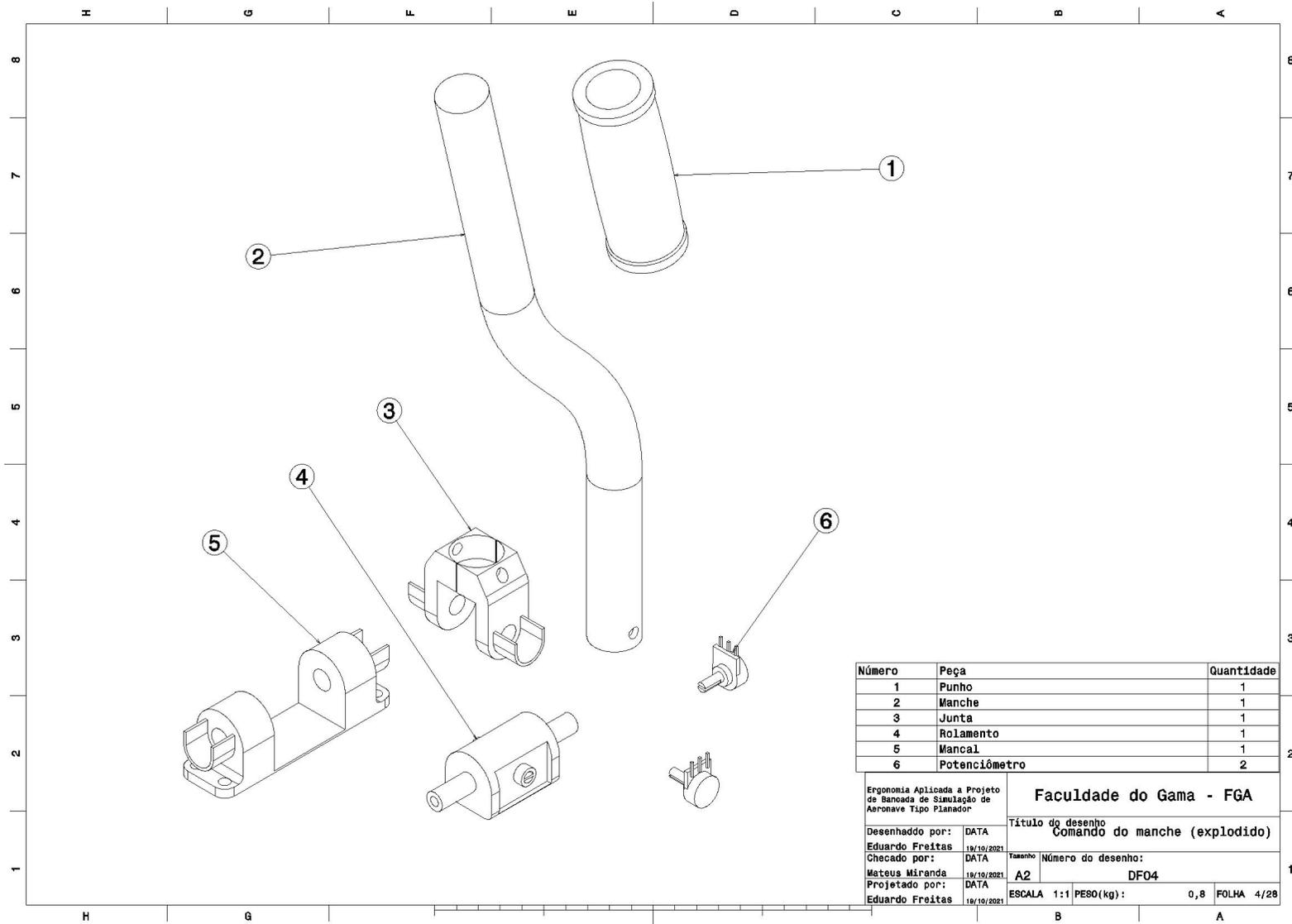


Figura 75 – Desenho técnico conjunto do manche explodido (2021).

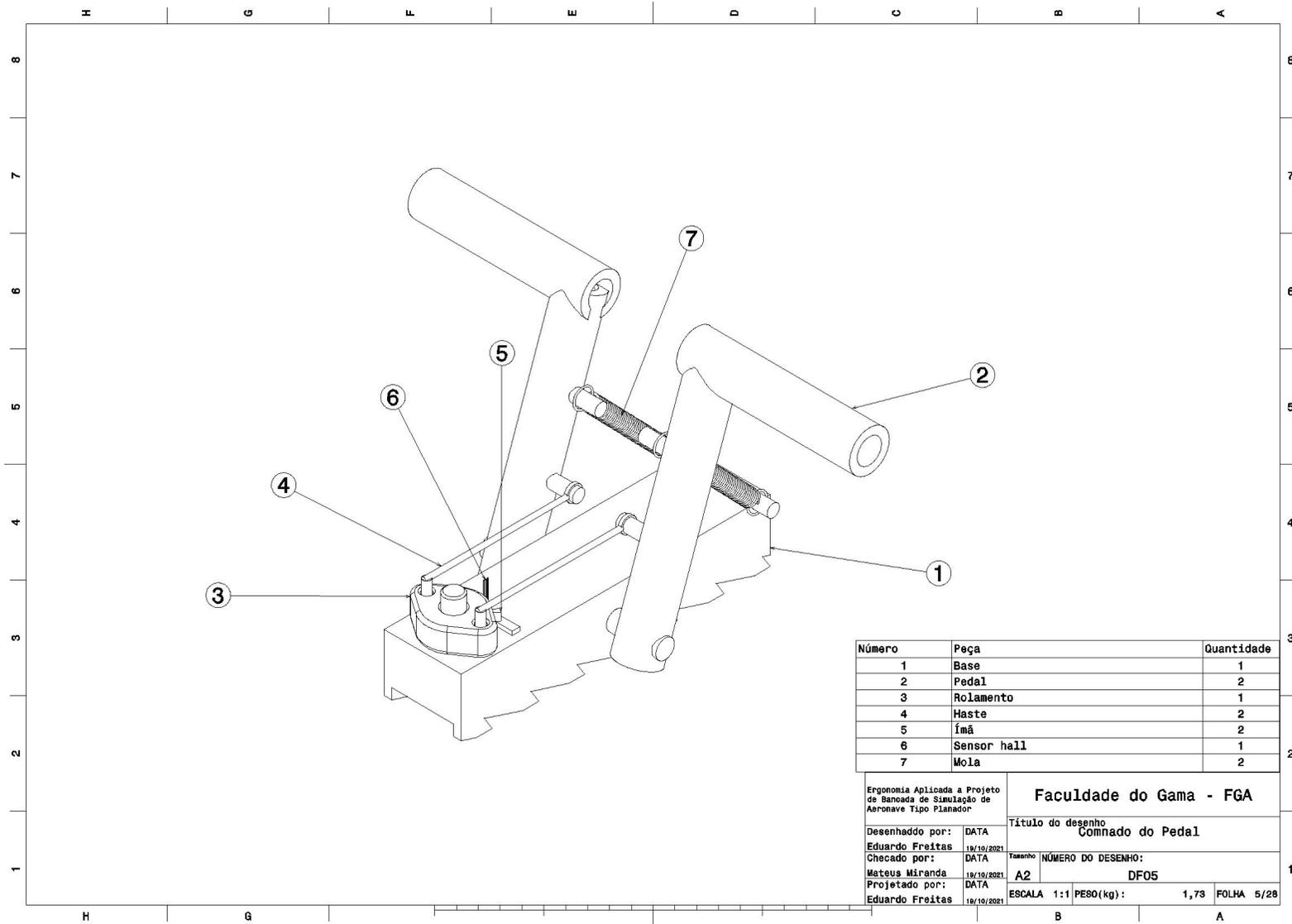


Figura 76 – Desenho técnico conjunto do pedal montado (2021).

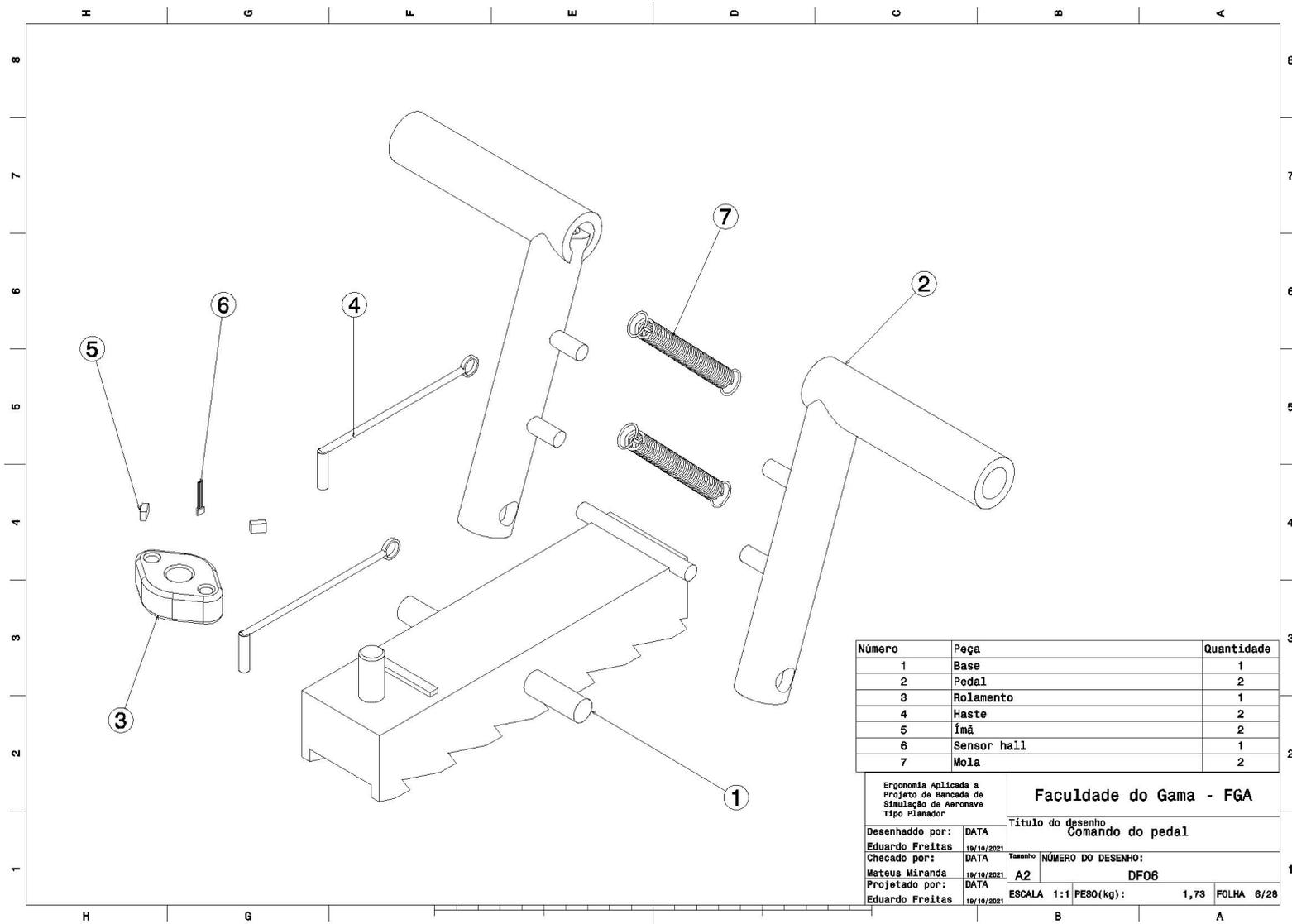


Figura 77 – Desenho técnico conjunto do pedal explodido (2021).

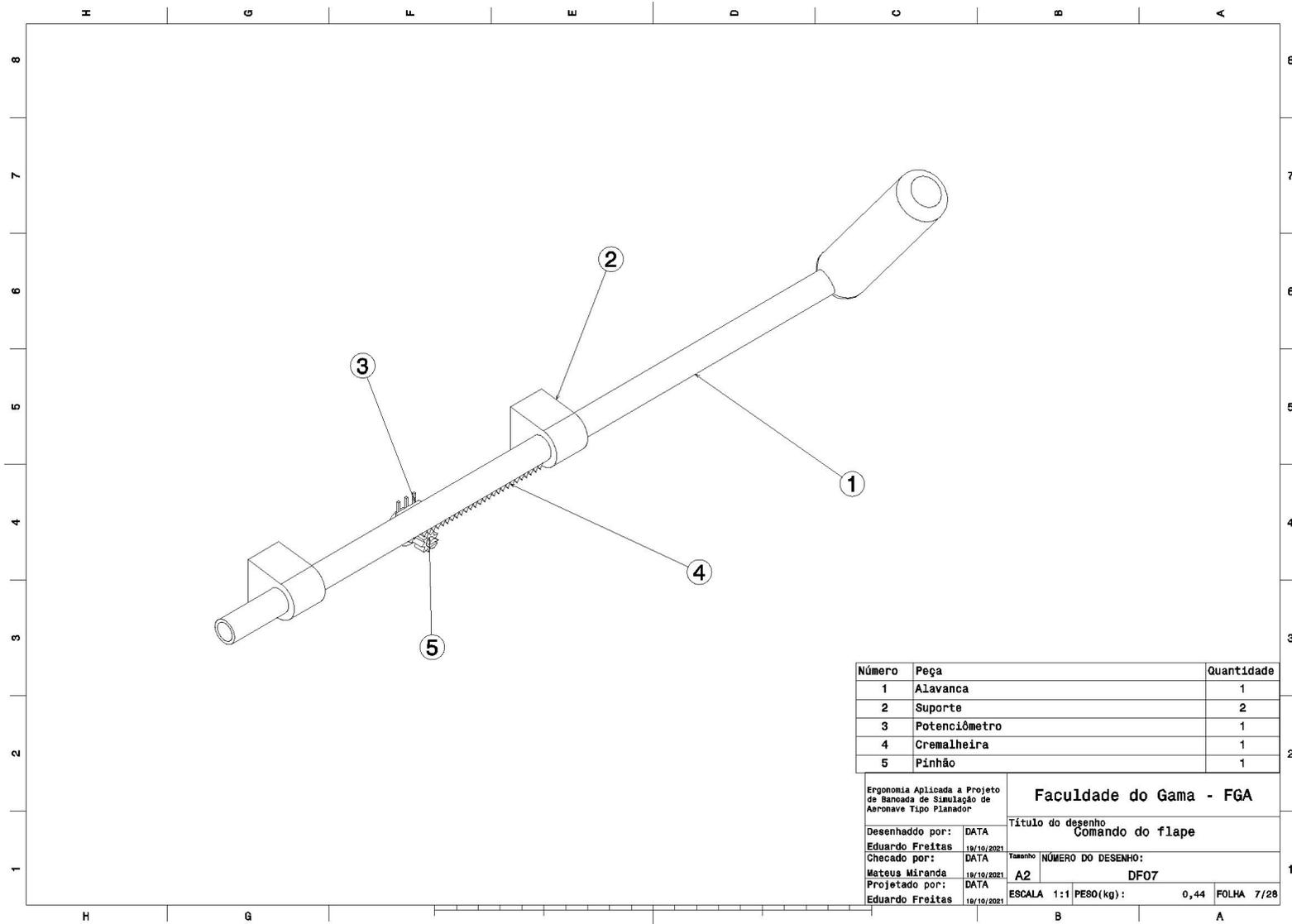


Figura 78 – Desenho técnico do conjunto do flape montado (2021).

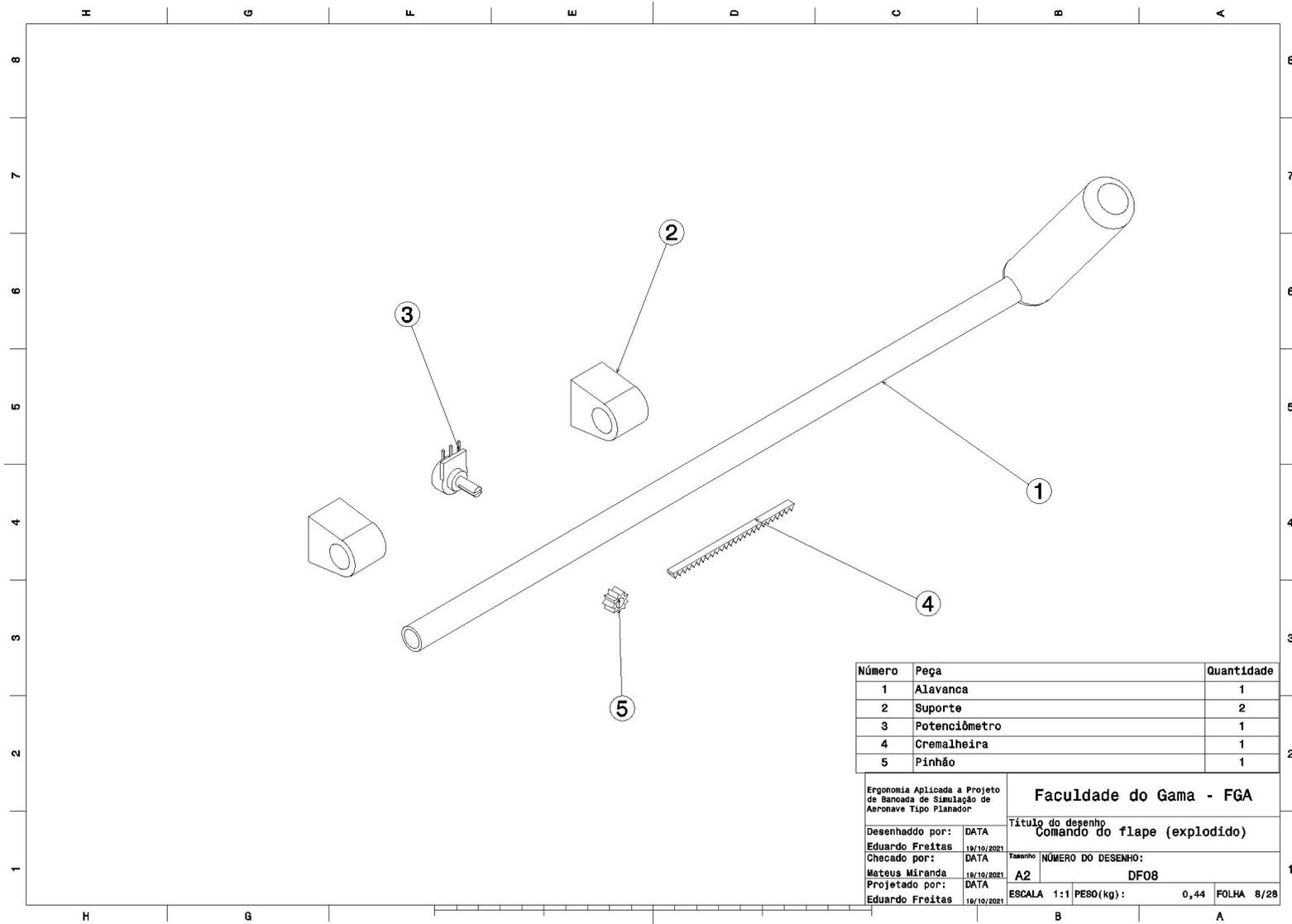


Figura 79 – Desenho técnico do conjunto do flape montado (2021).

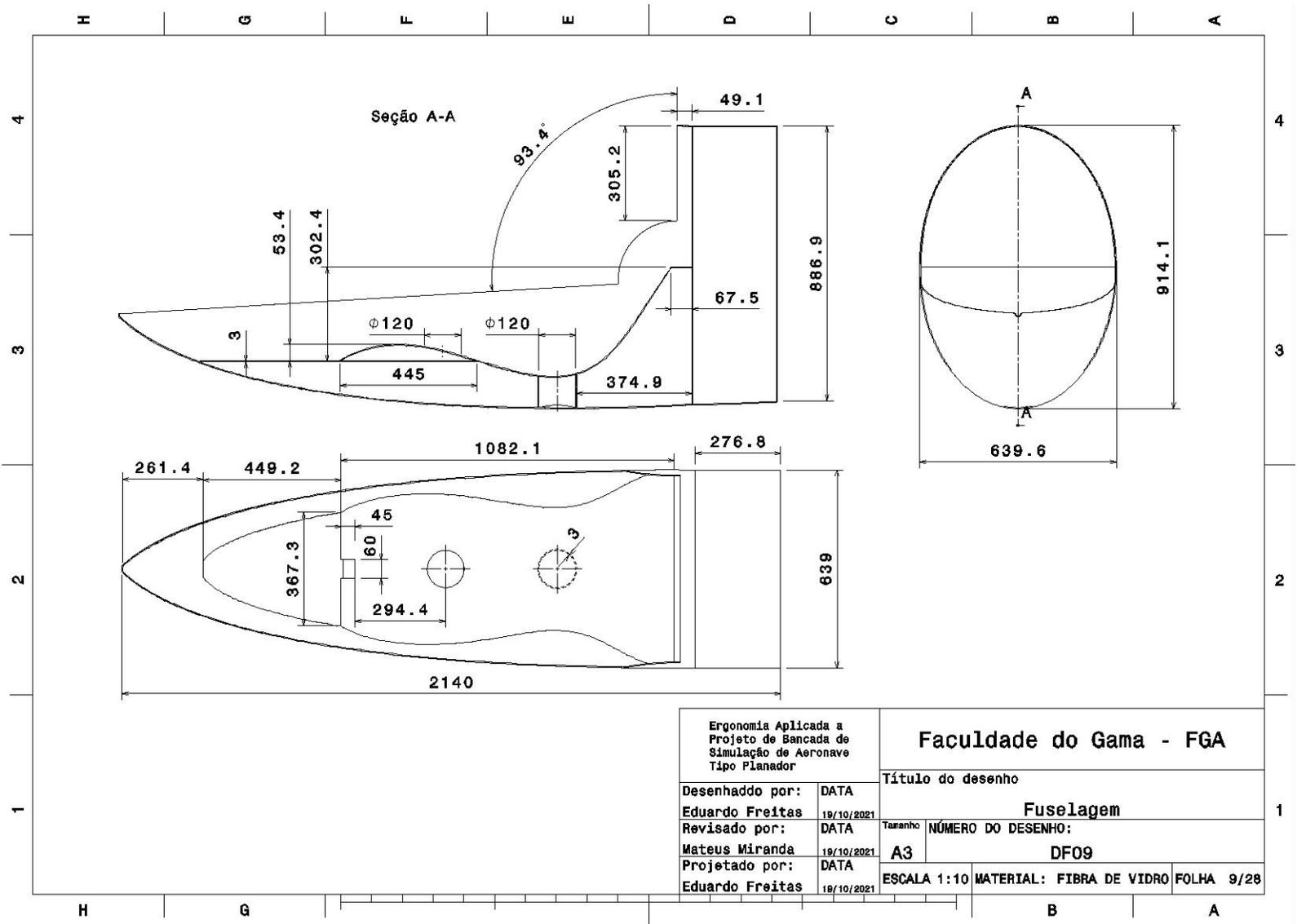


Figura 80 – Desenho técnico da fuselagem (2021).

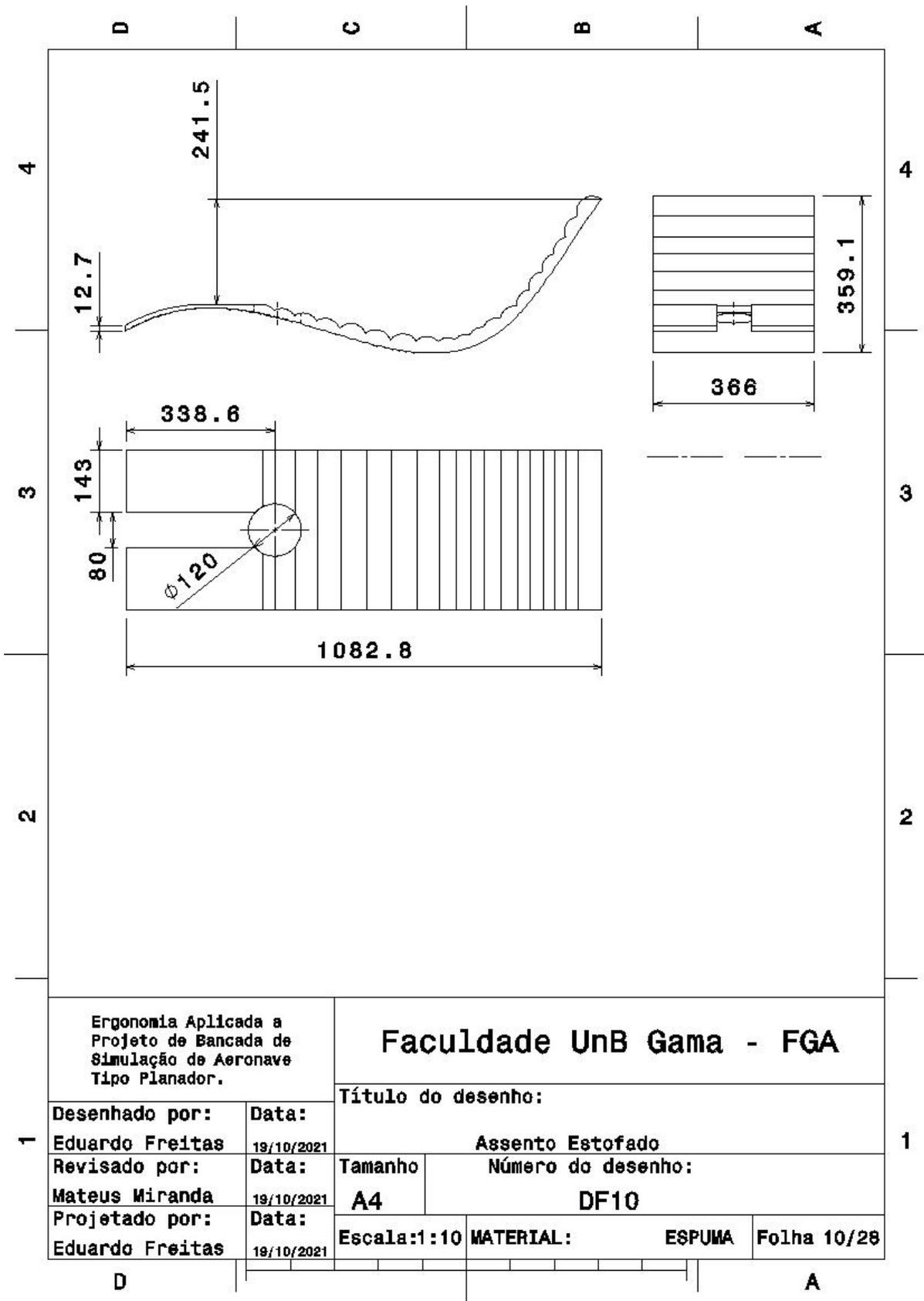


Figura 81 – Desenho técnico do assento estofado (2021).

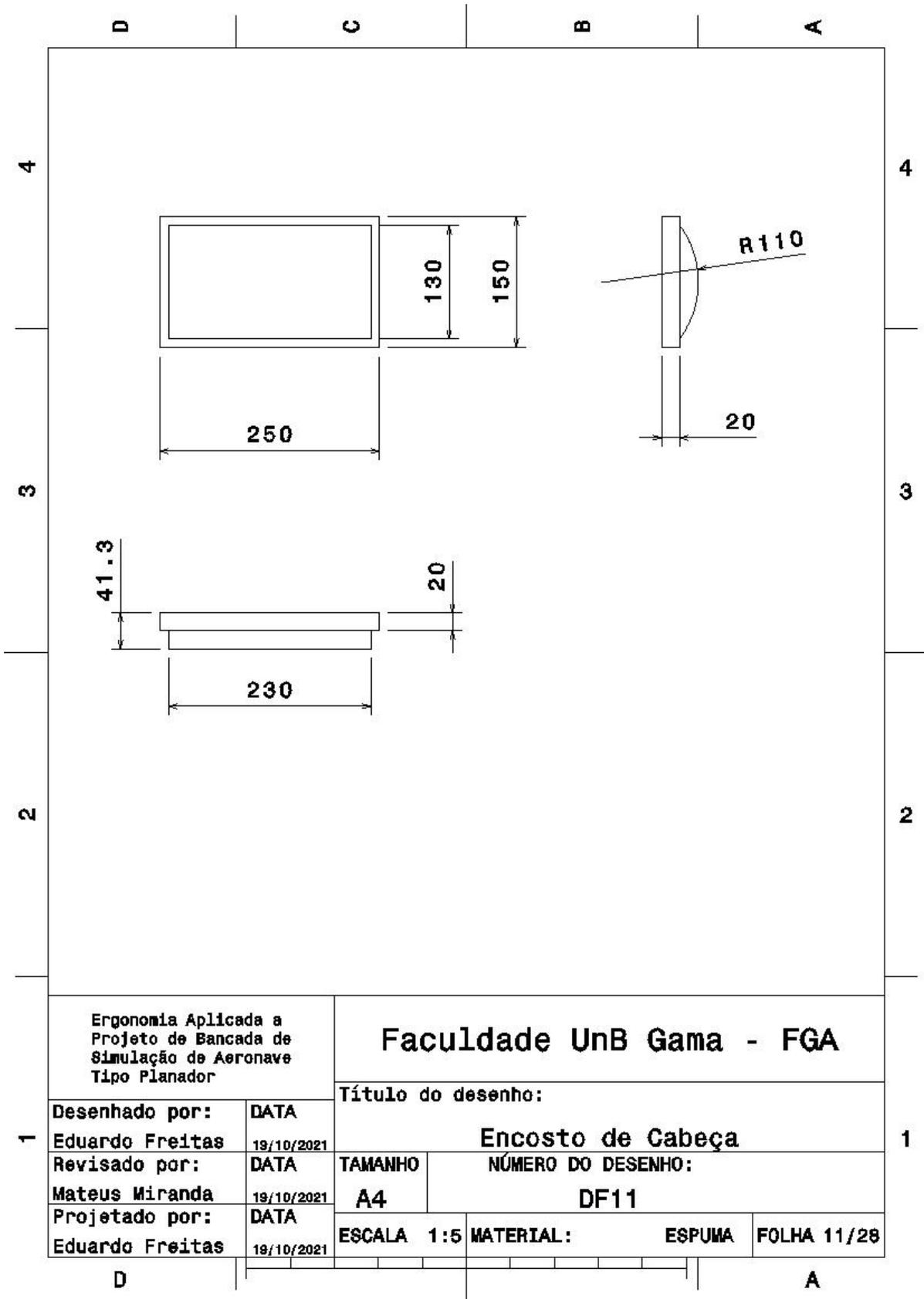


Figura 82 – Desenho técnico do encosto de cabeça (2021).

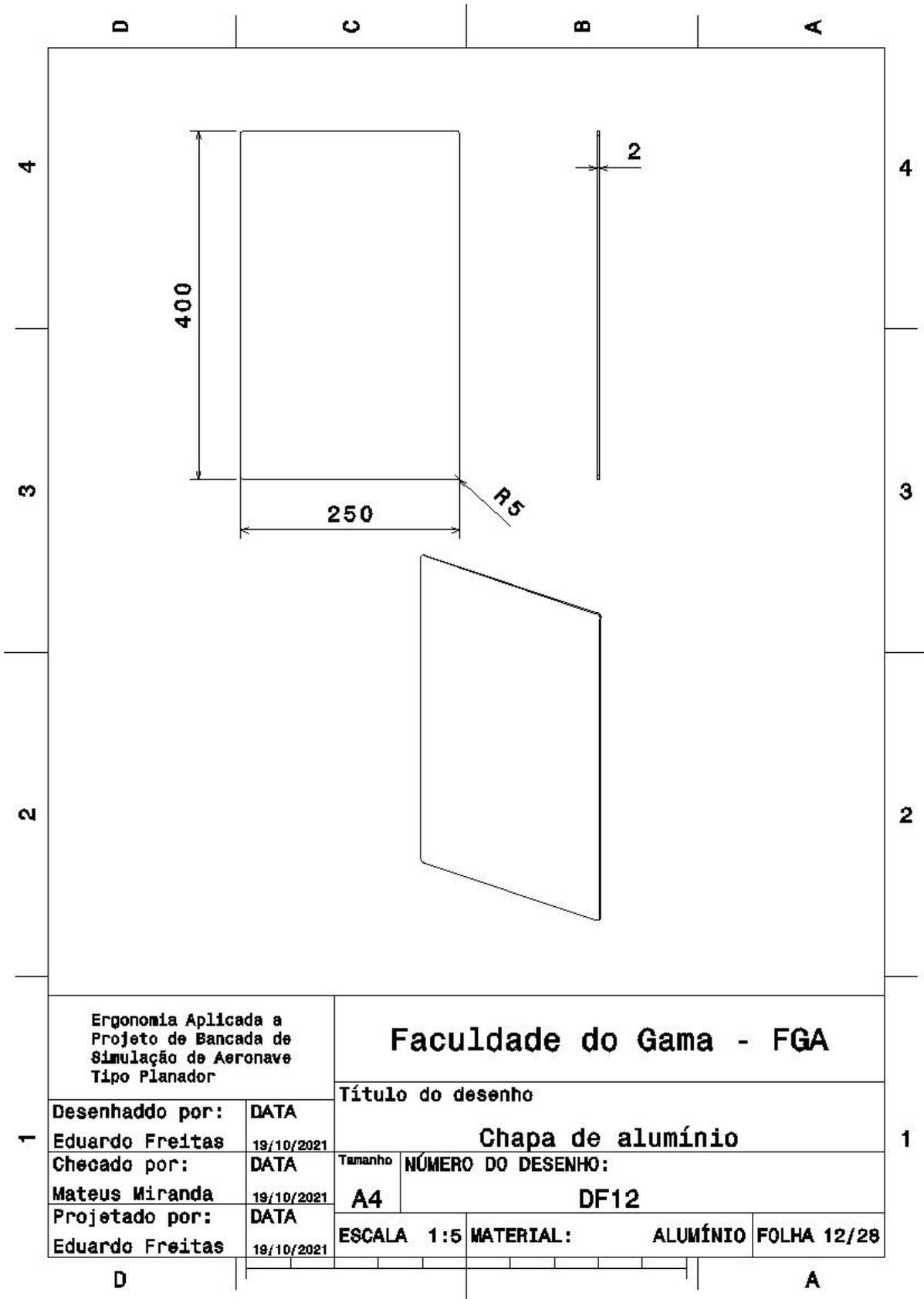


Figura 83 – Desenho técnico da chapa de alumínio (2021).

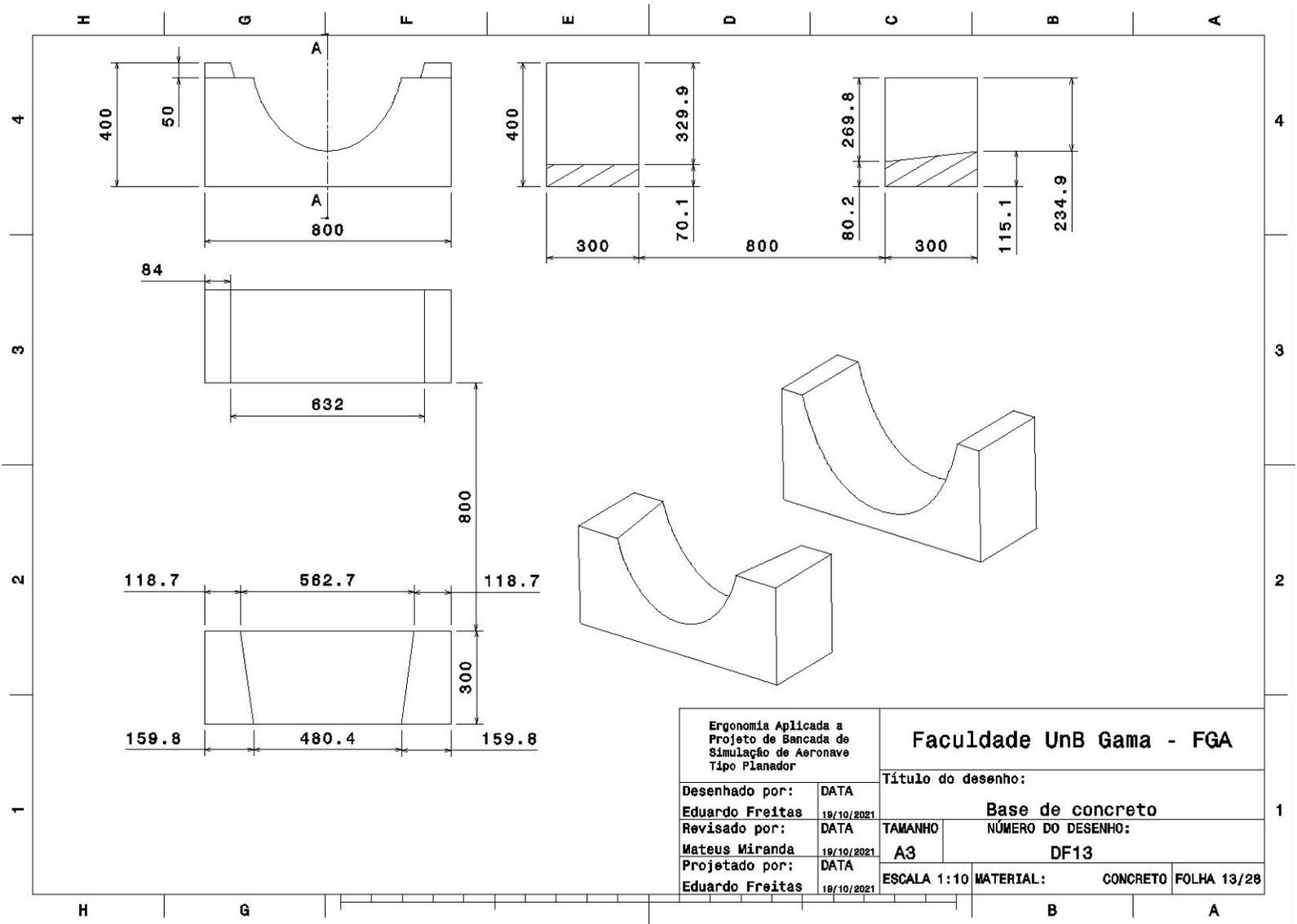


Figura 84 – Desenho técnico das bases de concreto (2021).

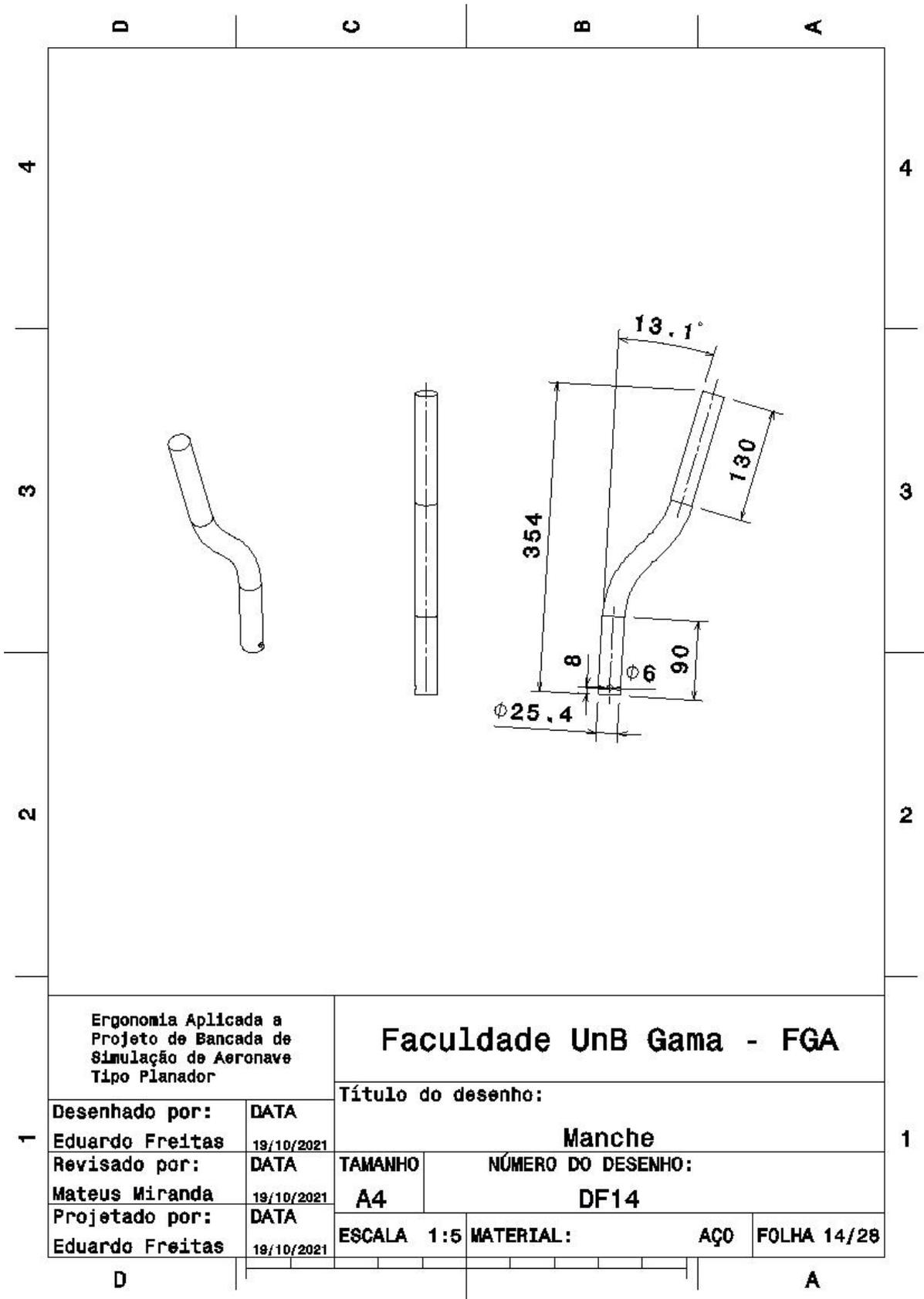


Figura 85 – Desenho técnico da alavanca do manche (2021).

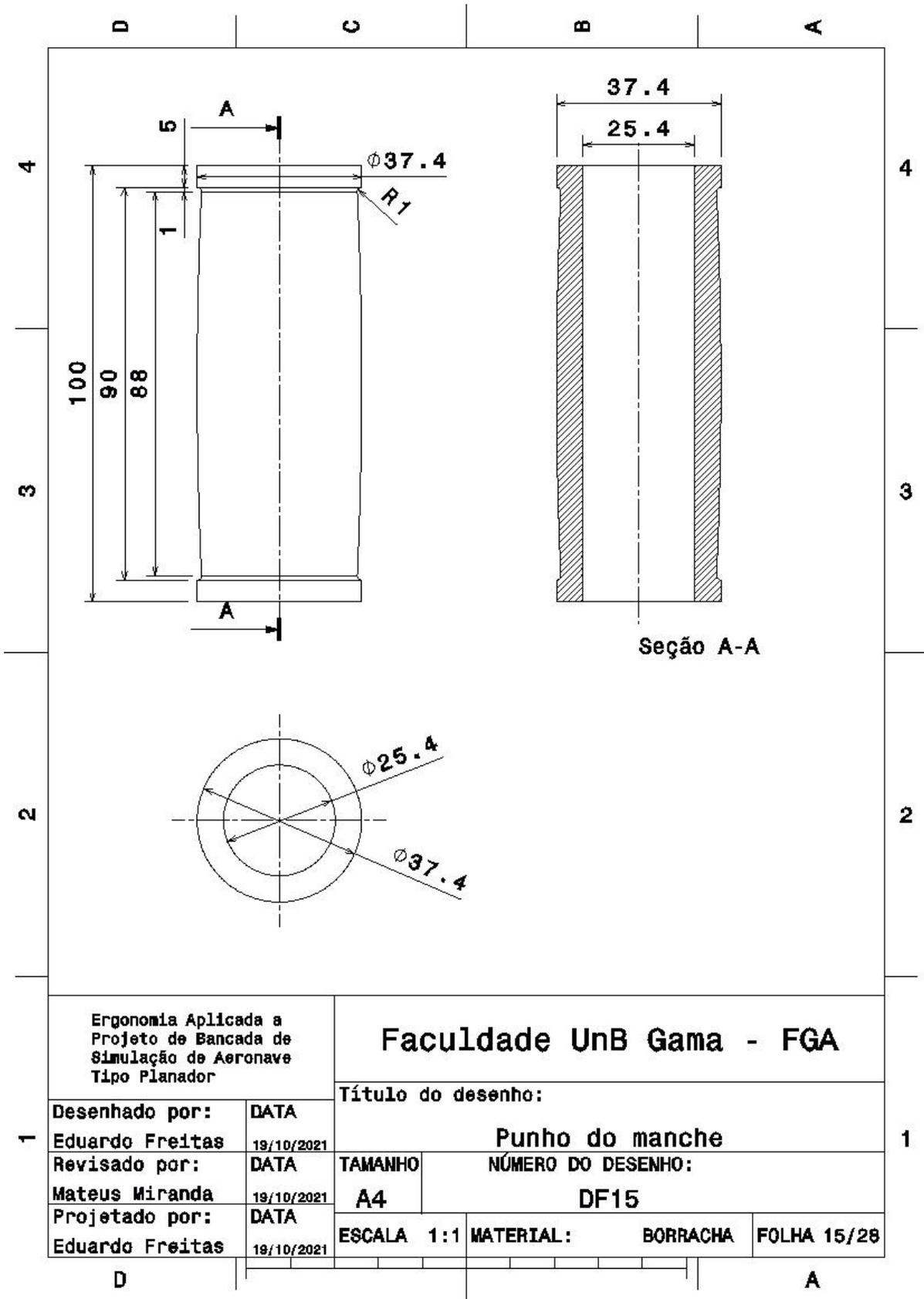


Figura 86 – Desenho técnico do punho do manche (2021).

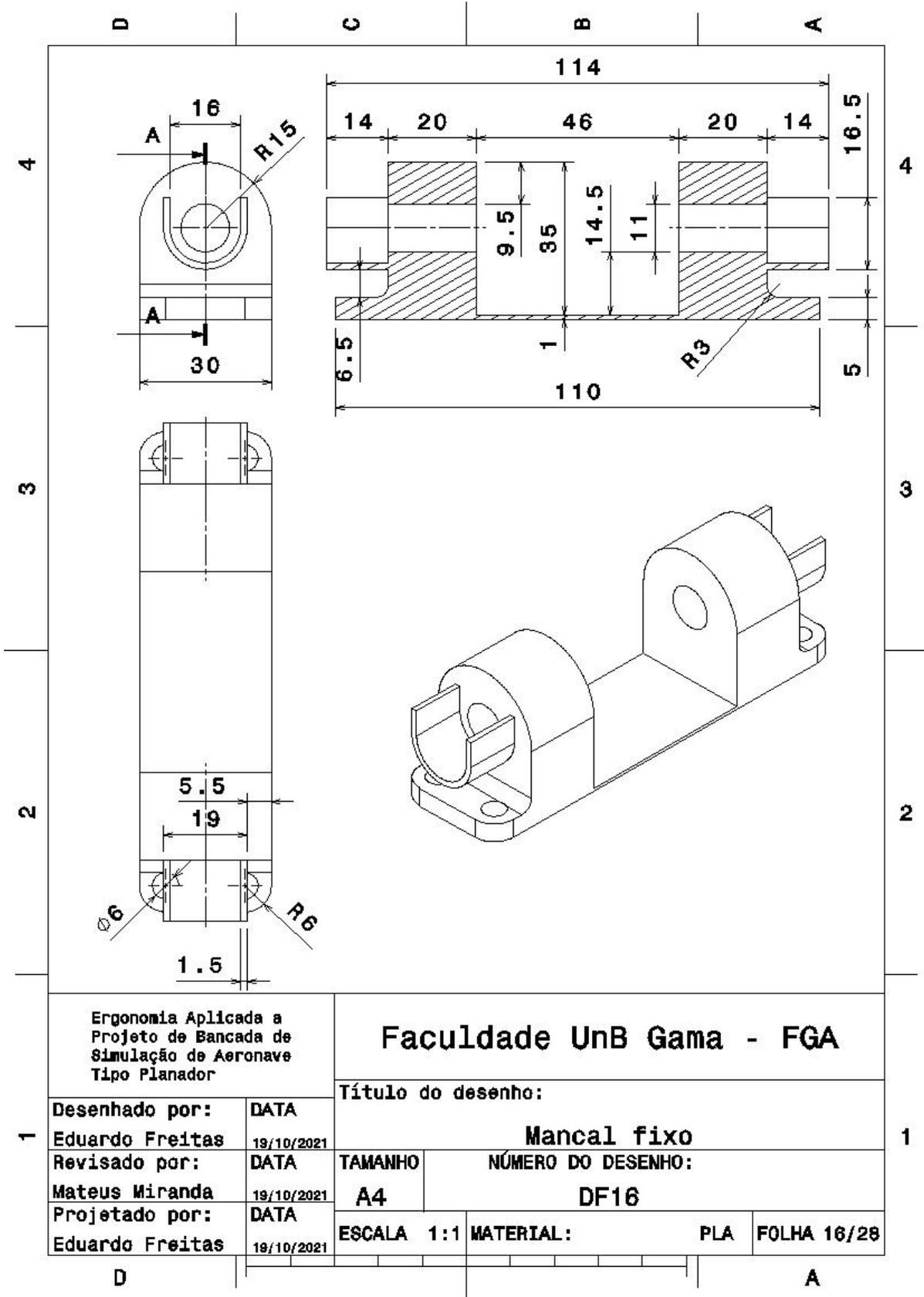


Figura 87 – Desenho técnico do mancal do manche (2021).

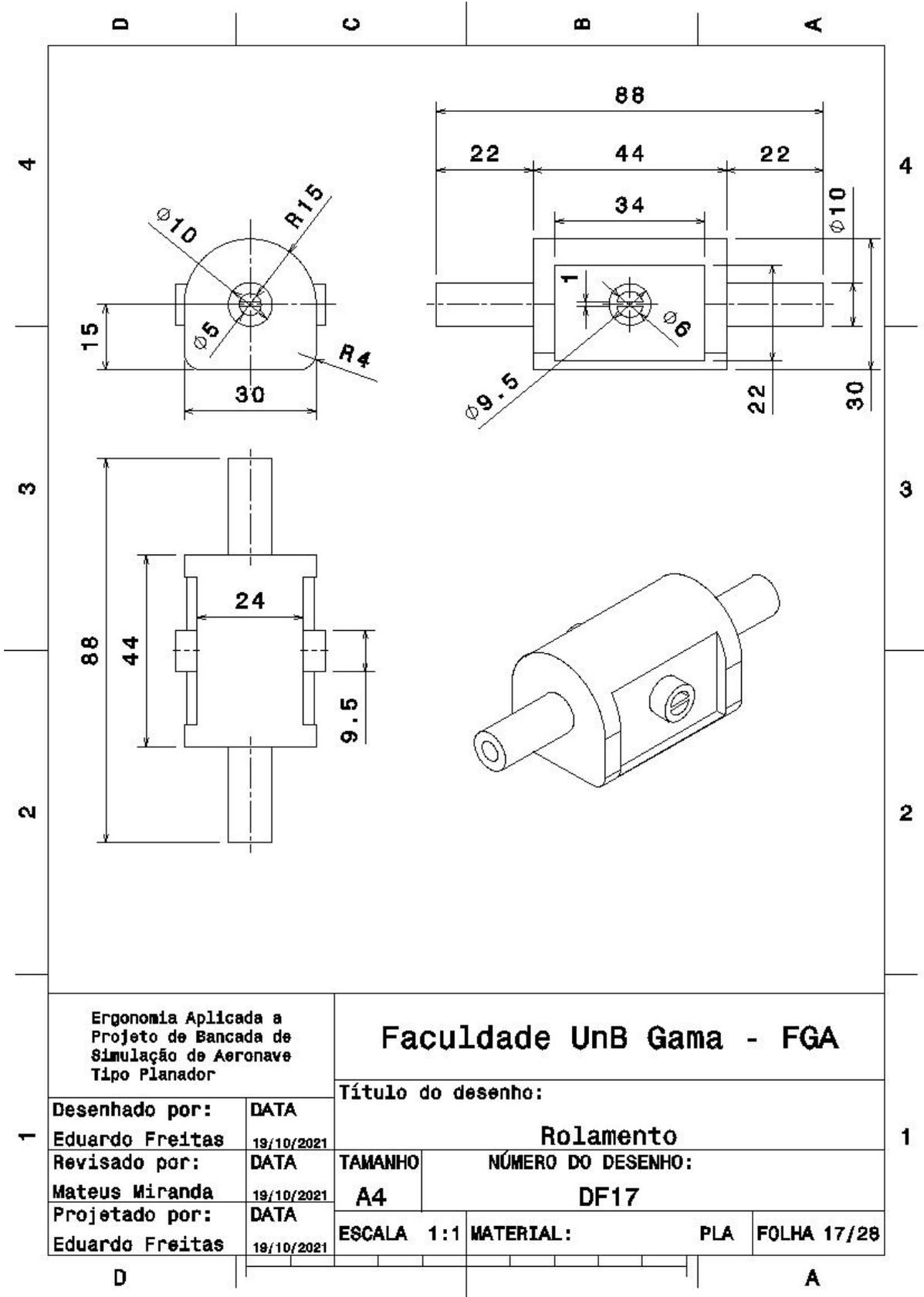


Figura 88 – Desenho técnico do rolamento (2021).

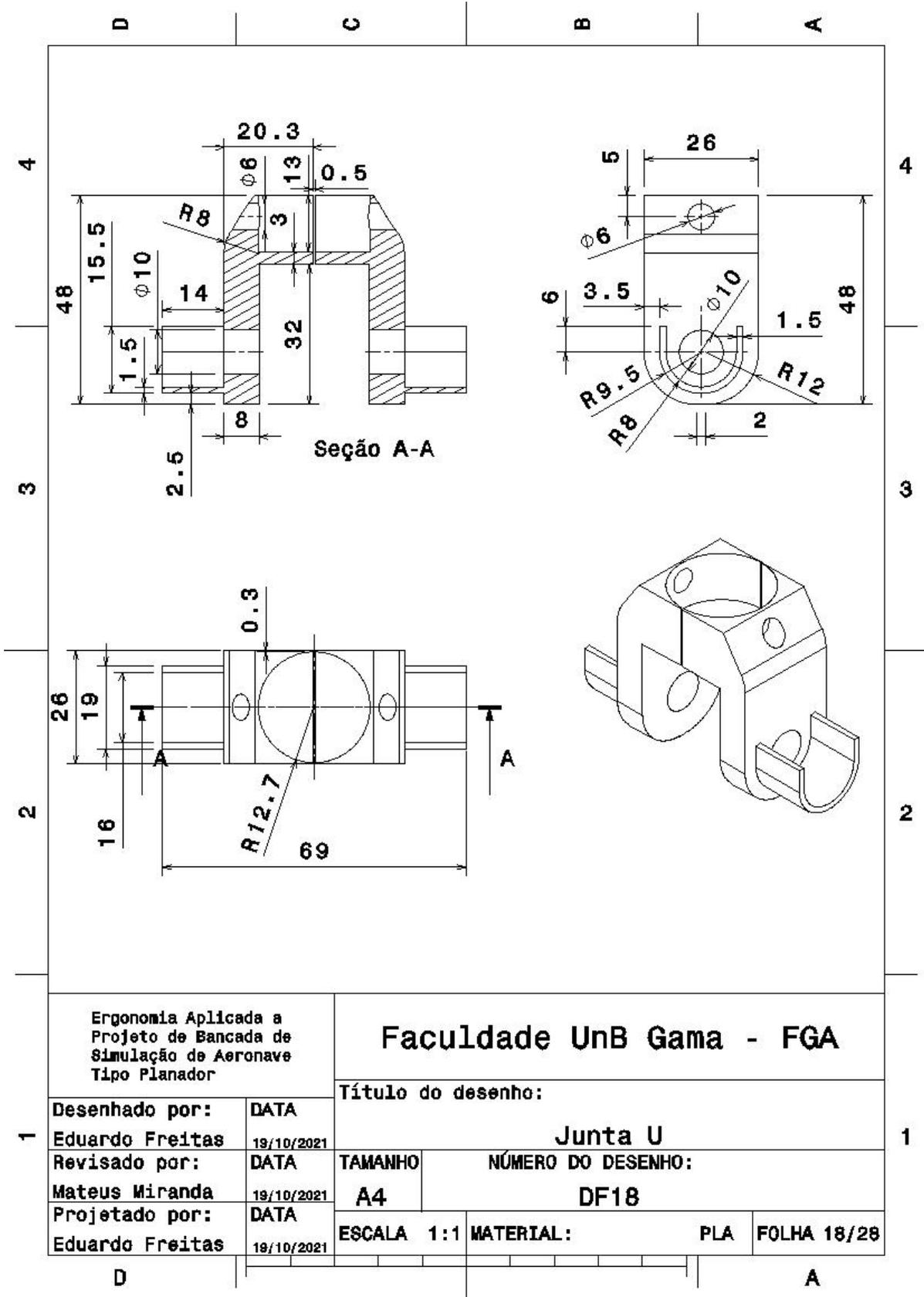


Figura 89 – Desenho técnico da junta em "U"invertido (2021).

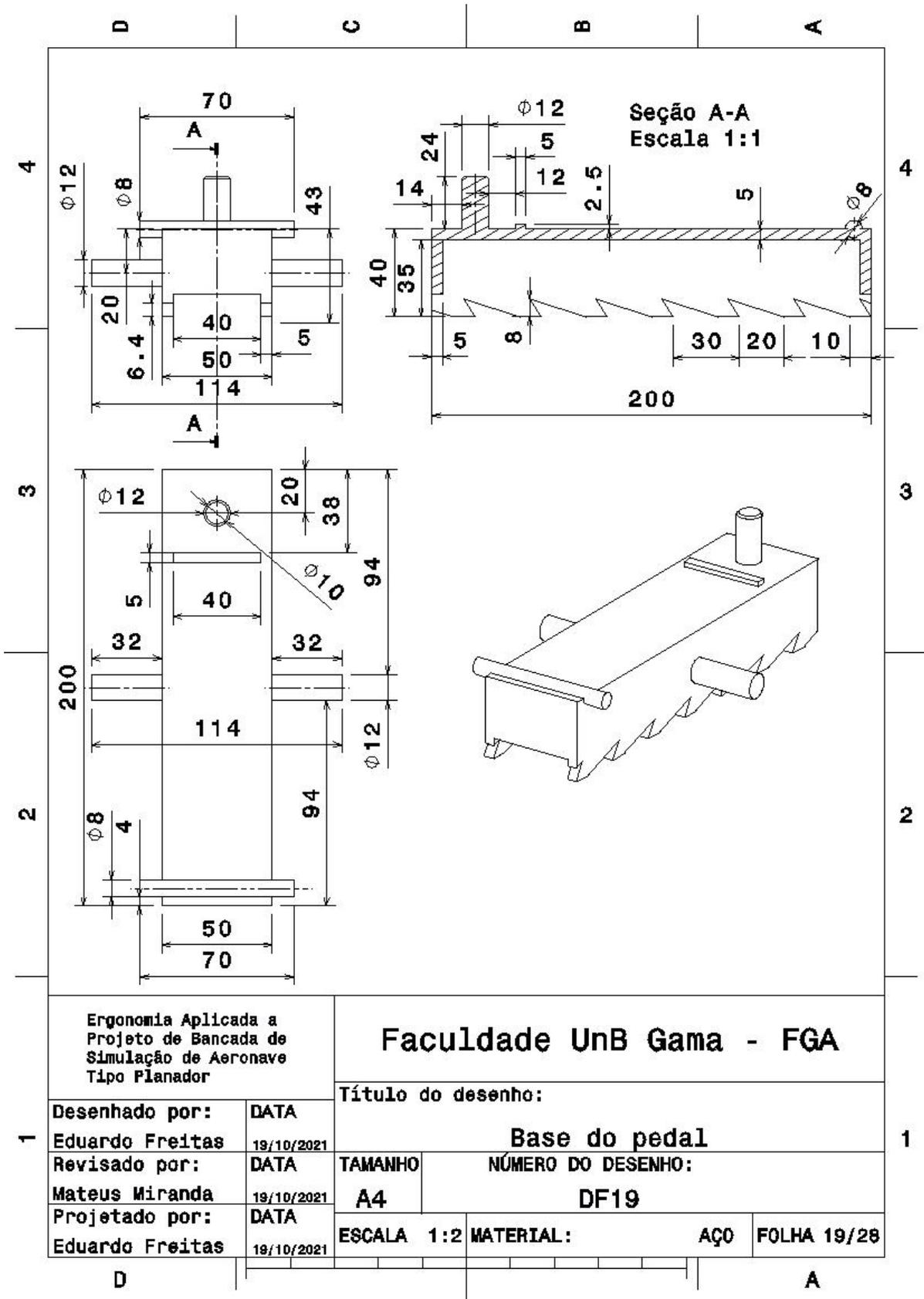


Figura 90 – Desenho técnico da base do pedal (2021).

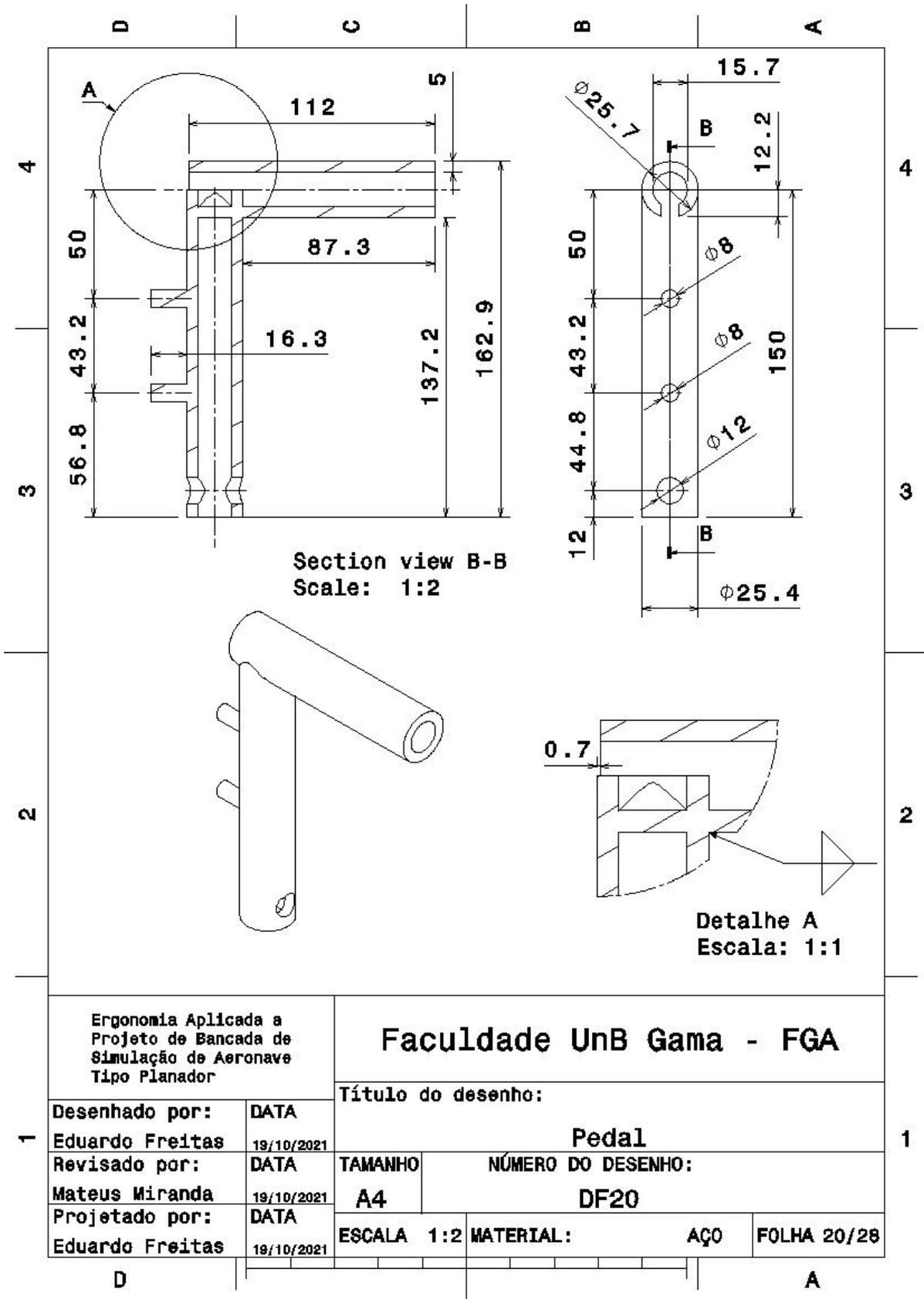
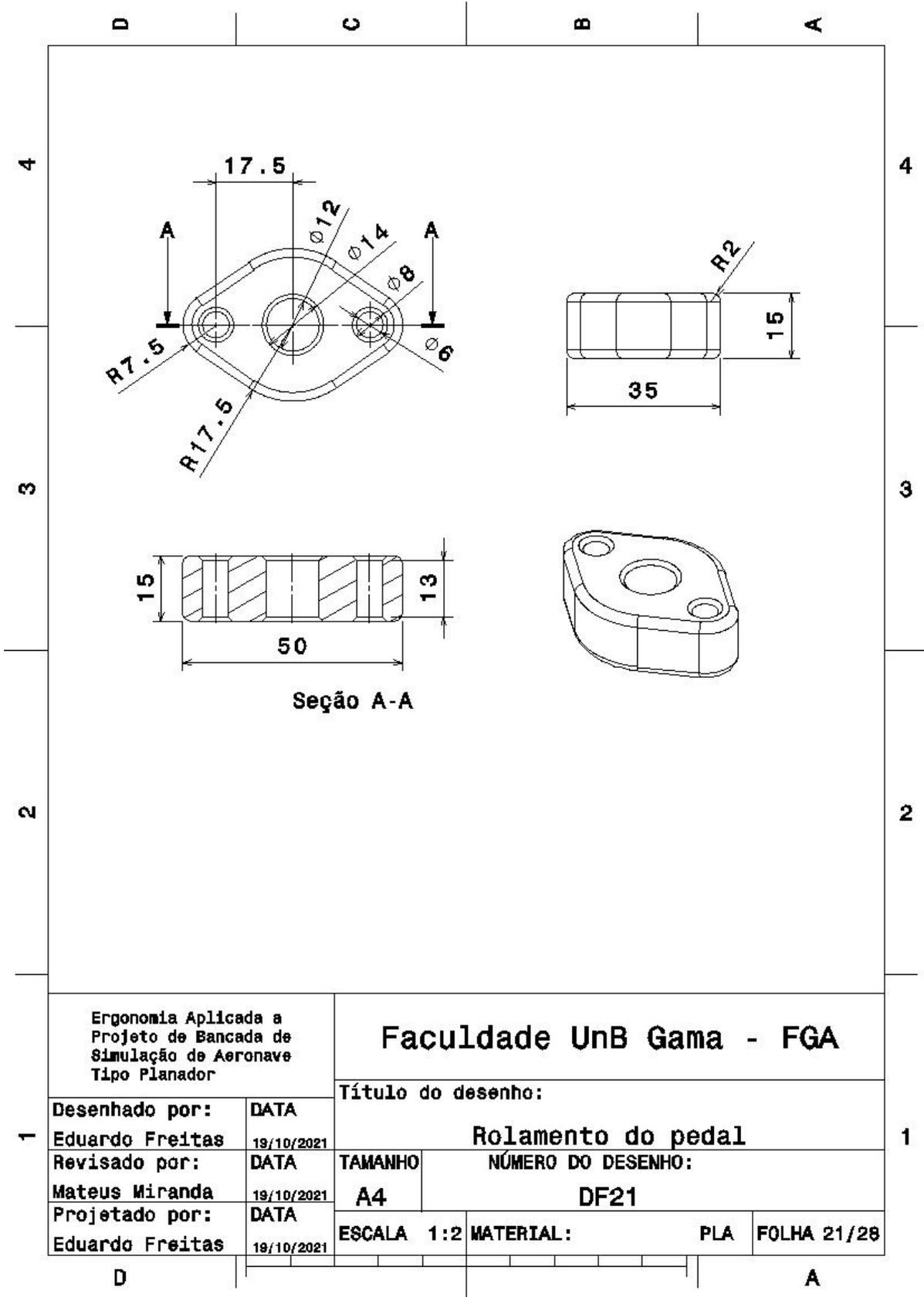


Figura 91 – Desenho técnico da pedaleira (2021).



Ergonomia Aplicada a Projeto de Bancada de Simulação de Aeronave Tipo Planador		Faculdade UnB Gama - FGA			
Desenhado por: Eduardo Freitas		Título do desenho: Rolamento do pedal			
DATA	19/10/2021	TAMANHO		NÚMERO DO DESENHO:	
Revisado por: Mateus Miranda	DATA	A4	DF21		
19/10/2021	Projeto por: Eduardo Freitas	ESCALA	1:2	MATERIAL:	PLA FOLHA 21/28
DATA	19/10/2021				

Figura 92 – Desenho técnico do mancal do pedal (2021).

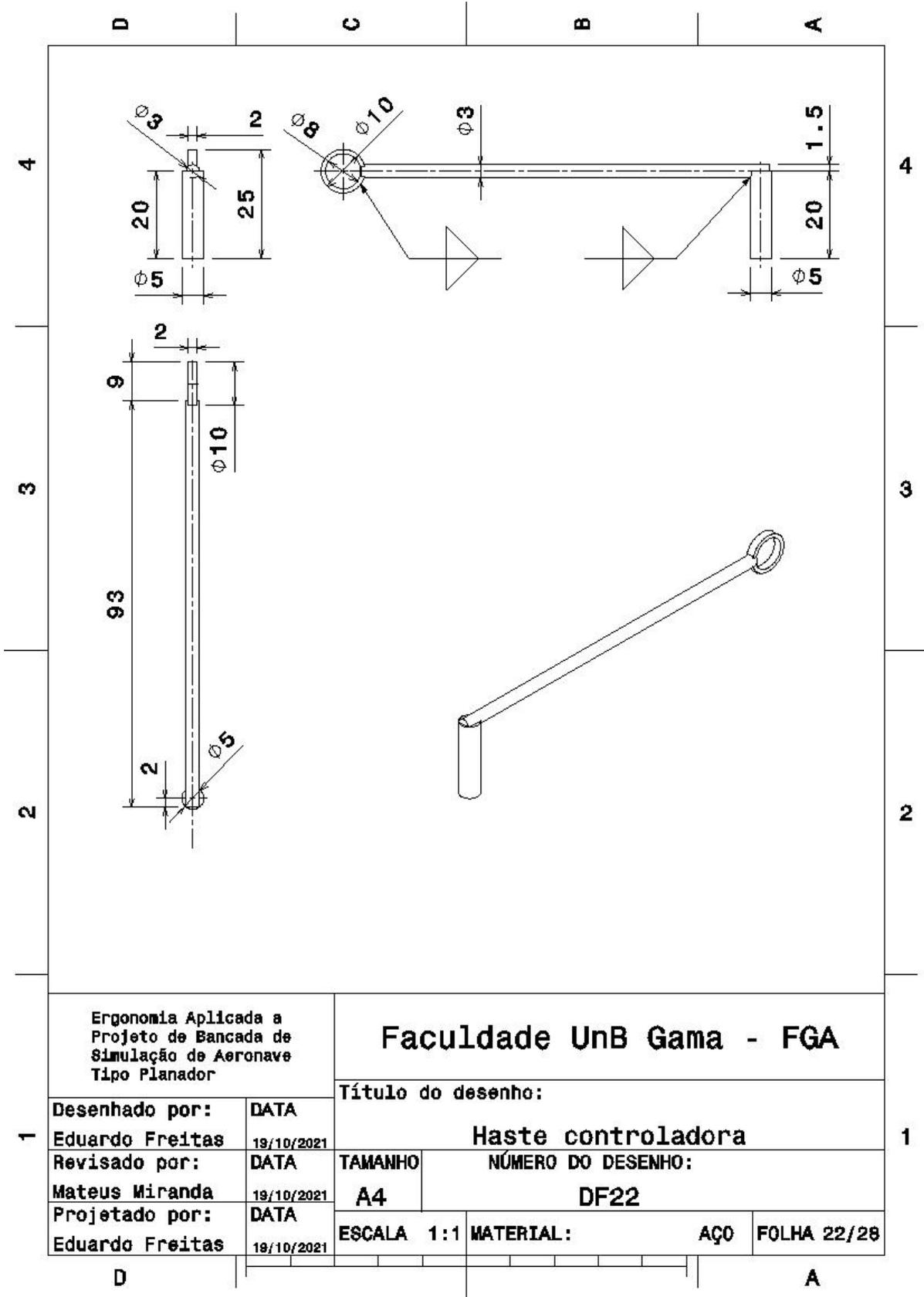


Figura 93 – Desenho técnico da haste controladora do pedal (2021).

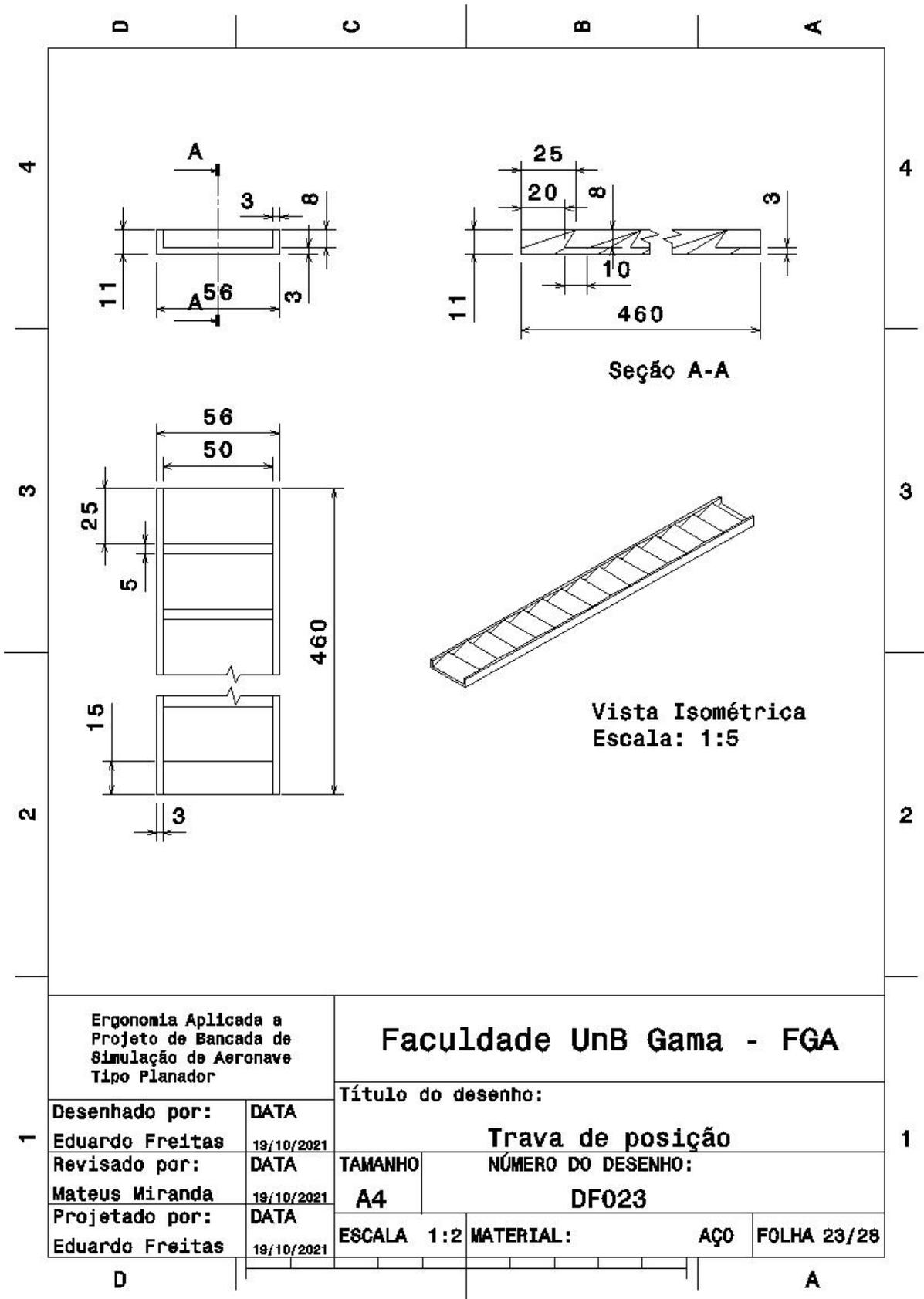


Figura 94 – Desenho técnico da trava de posição do conjunto pedal (2021).

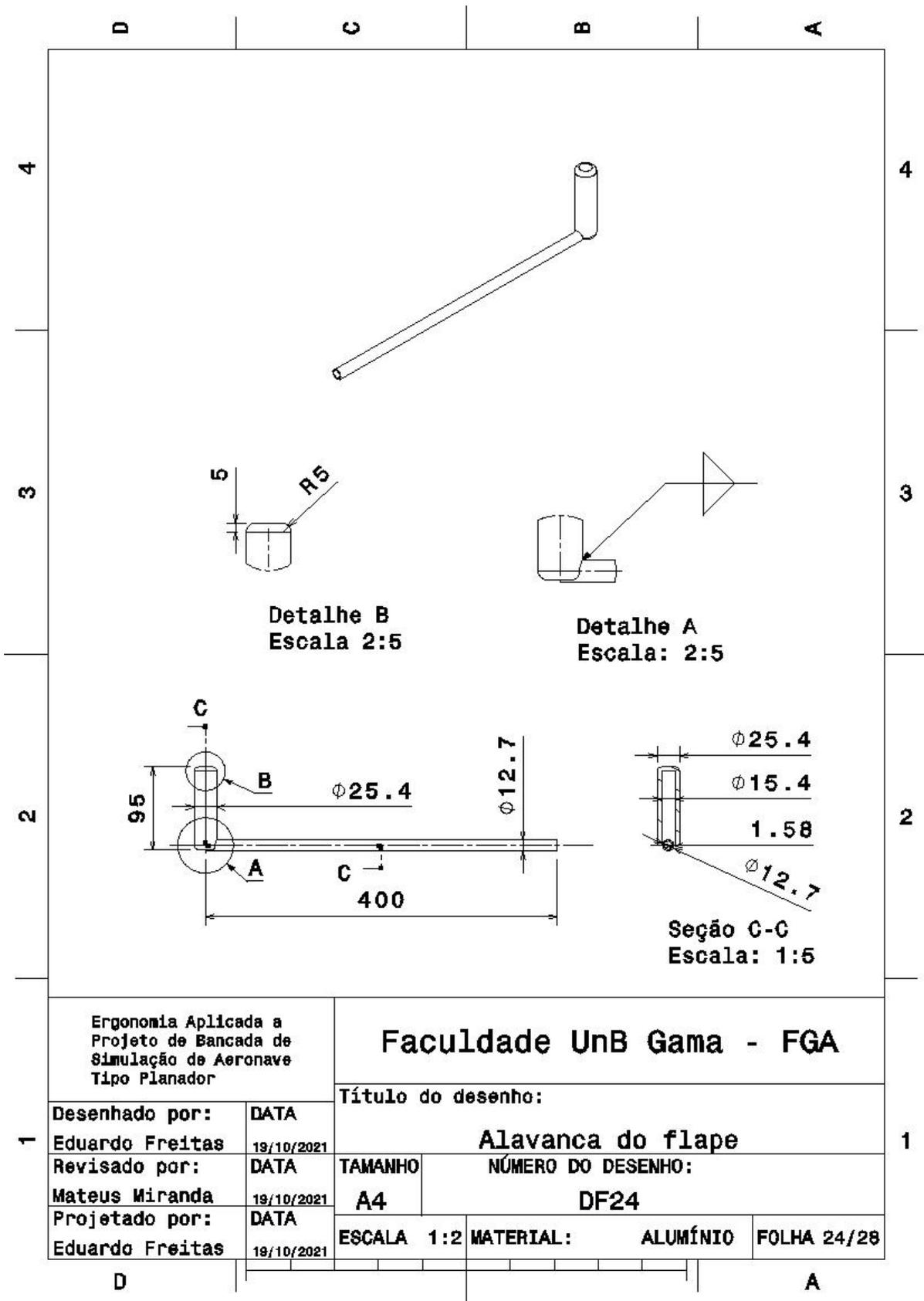


Figura 95 – Desenho técnico da alavanca de flape (2021).

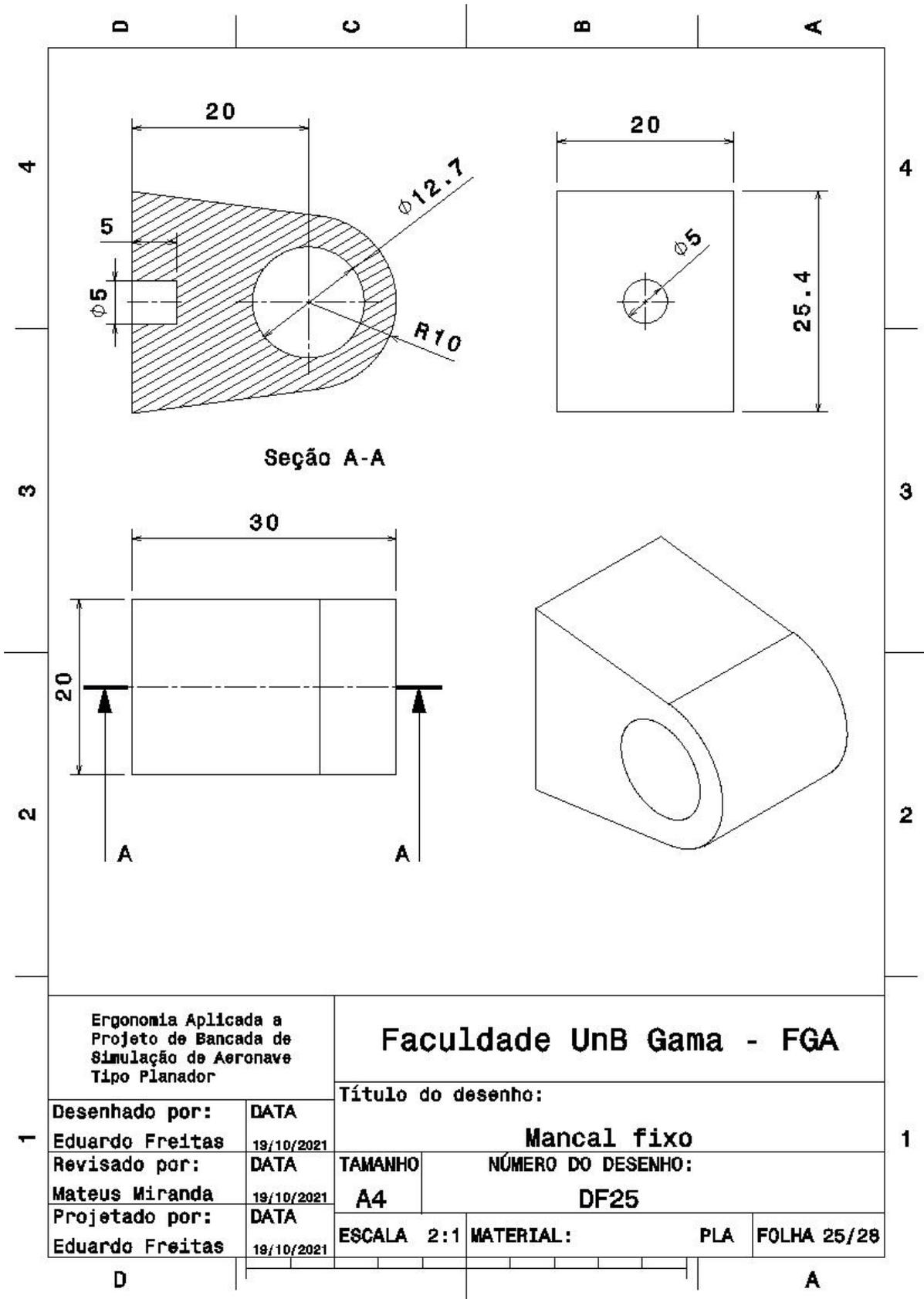


Figura 96 – Desenho técnico do suporte do flape (2021).

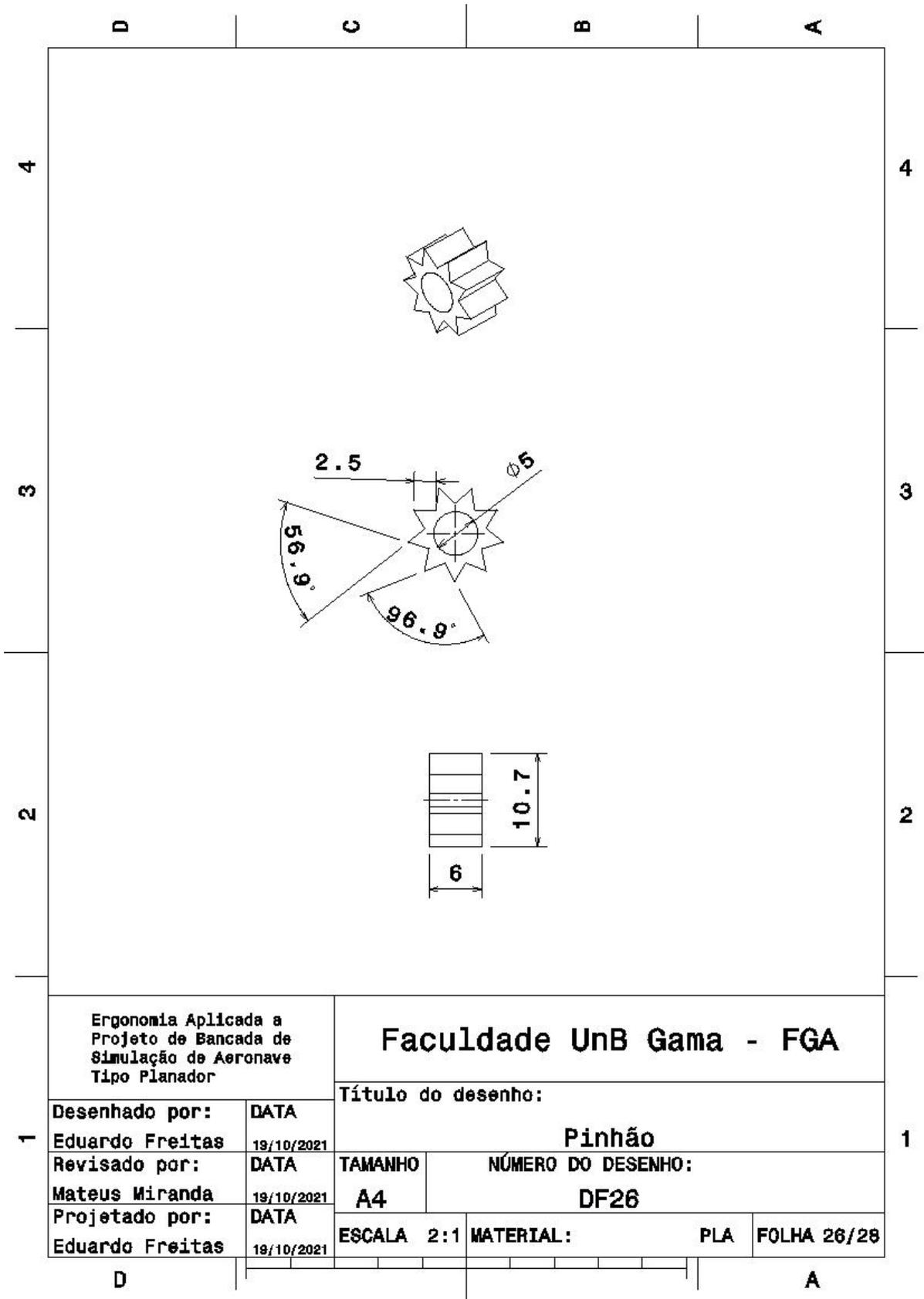


Figura 97 – Desenho técnico do pinhão do controle do flape (2021).

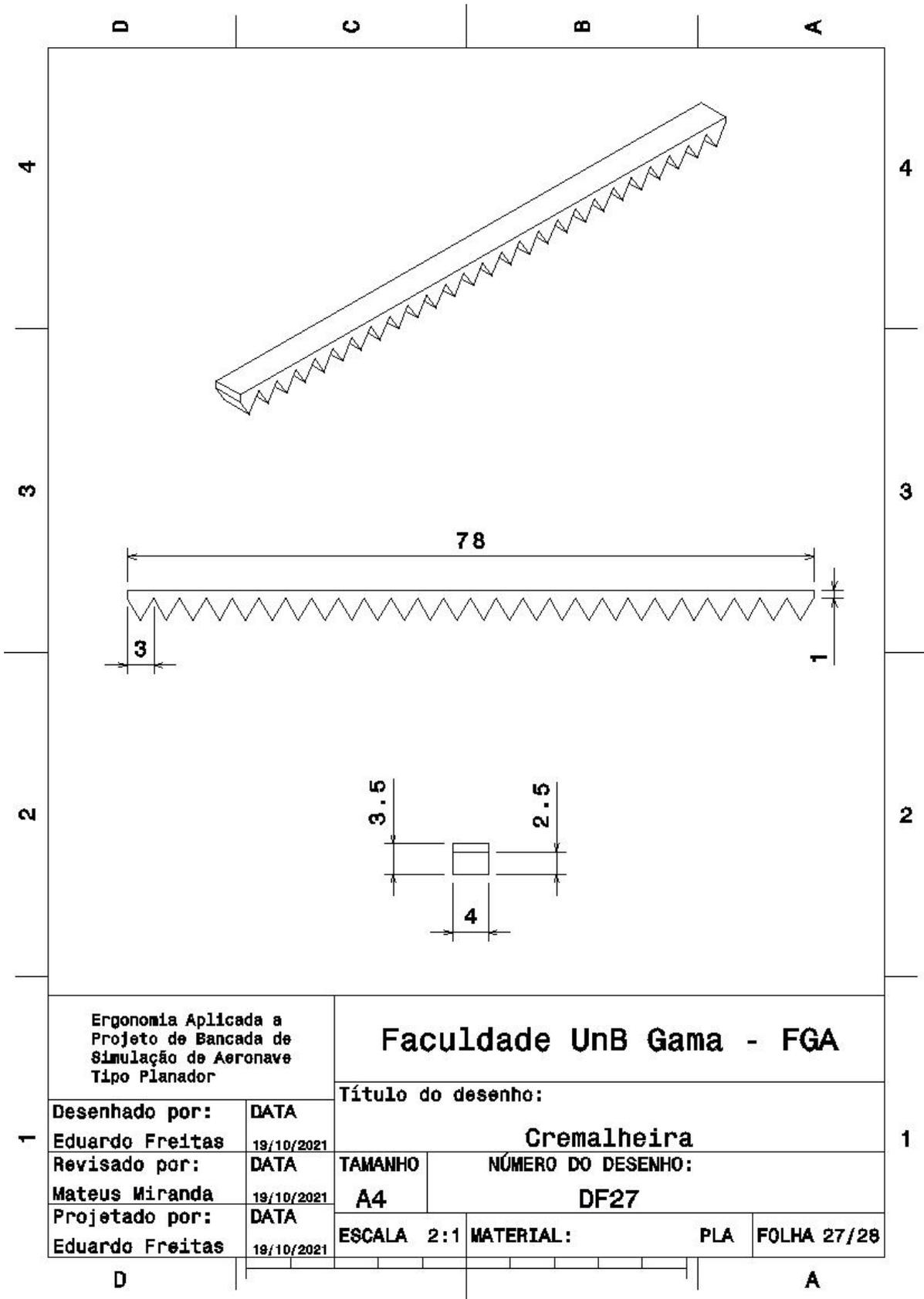


Figura 98 – Desenho técnico da cremalheira do controle do flape (2021).

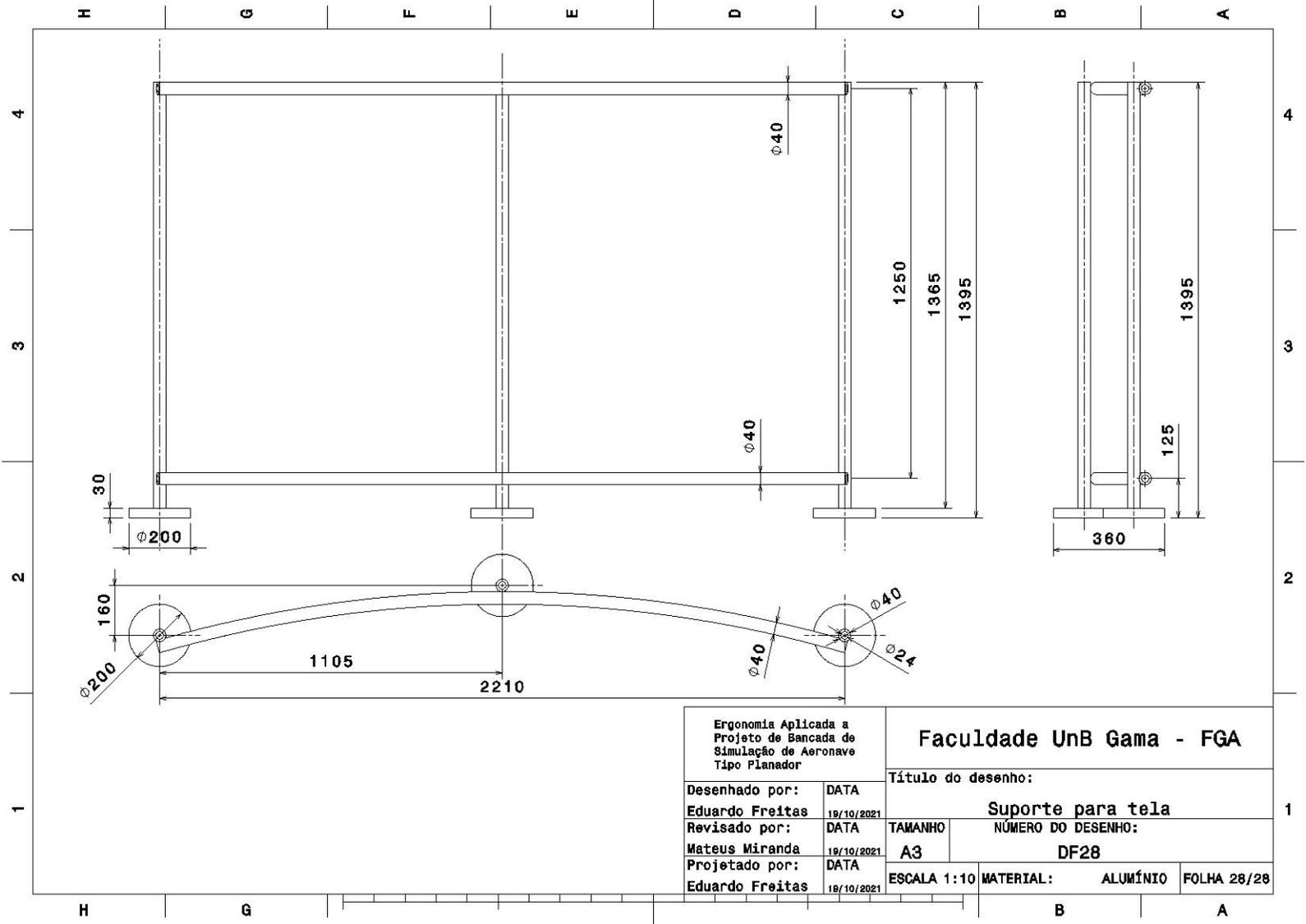


Figura 99 – Desenho técnico do suporte da tela de projeção (2021).

APÊNDICE B – Questionário de Validação Ergonômica da Bancada de Simulação de Voo

QUESTIONÁRIO SUBJETIVO

SIMULAÇÃO SUBJETIVA DE UMA BANCADA DE SIMULAÇÃO DE AERONAVE TIPO PLANADOR

Termo de compromisso:	
Eu _____ estou ciente que os dados coletados e gerados nesta simulação realizado no dia _____ de _____ de _____, são apenas para fins acadêmicos e verídicos. Me responsabilizo por qualquer acidente ou injuria contra a minha pessoa, não sendo atribuídos valores monetários em nenhum momento da pesquisa.	
Pesquisadores:	_____
	Assinatura

	Assinatura
Voluntário:	_____
	Assinatura

Favor preencher os campos abaixo como complemento do questionário para a avaliação subjetiva deste experimento.

Horário de início do ensaio: ____: ____.

Dados Individuais

Nome: _____

Sexo: Masculino Feminino

Idade: _____

Você é: Destro Canhoto

Grau de Instrução: Ensino Médio Ensino Superior Pós-graduação

Se graduado/graduando, qual o curso:

Você é piloto De aeronave: Sim Não

Figura 100 – Questionário subjetivo de simulação ergonômica em bancada de simulação de voo (2021).

Dados Antropométricos

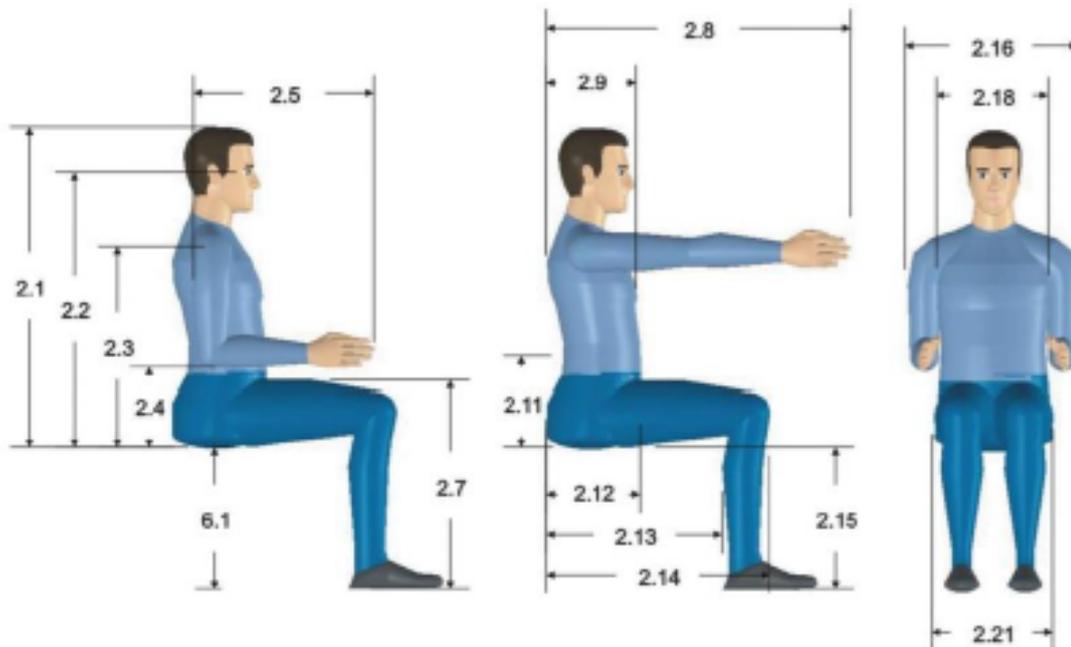


Tabela 1 – Tabela antropométrica referente a Figura

Peso	kg	
Altura Total	m	
Especificações referente a Figura 1	cm	pol
2.1	Altura da cabeça	
2.2	Altura do nível dos olhos	
2.3	Altura do ombro	
2.4	Altura do cotovelo fletido	
2.5	Comprimento antebraço-mão	
2.7	Altura do joelho	
2.8	Alcance frontal máximo	
2.9	Profundidade do tórax	
2.11	Altura da concavidade lombar	
2.12	Profundidade do abdômen	
2.13	Profundidade das nádegas-popliteal	
2.14	Profundidade nádegas-joelho	
2.15	Altura popliteal	
2.16	Largura cotovelo a cotovelo	
2.18	Largura do tórax entre axilas	
2.21	Largura do quadril	
	Altura Máxima do Assento	
6.1	(assoalho ao banco)	

Figura 101 – Questionário subjetivo de simulação ergonômica em bancada de simulação de voo (2021).

Questionário Pré-Condução

- 1) Você já pilotou um planador? Sim ou Não
- 2) Como se sente hoje?
 - Cansado ou Disposto
 - Com sono ou Sem sono
- 3) Você ingeriu bebida alcoólica durante as últimas 24 horas?
 - Sim Não
- 4) Quantas horas você dormiu na última noite, aproximadamente?
 - Até 4 horas 5 horas 6 horas 7 horas 8 horas Mais de 8 horas
- 5) Com qual frequência você pilota em:
 - Nunca/ Quase nunca/ Às vezes/ Quase sempre/ Sempre
 - Aeroclube:
 - Simulador:
 - Aeroporto:
- 6) Quanto tempo, em média, você pilota por dia, aproximadamente?

_____ (minutos) .
- 7) Em quantos dias por semana você pilota? _____ (dias)
- 8) Por quanto tempo você está pilotando?
 - Menos de 1 ano Entre 1-5 anos Entre 5-15 anos Mais de 15 anos
- 9) Qual hora do dia que você costuma pilotar? (Marcar todos os aplicáveis)
 - Amanhecer Durante o dia Anoitecer Noite
- 10) Qual o tipo de aeronave que você pilota na maioria das vezes (marque um)?
 - Avião
 - Planador
 - Helicóptero
 - Girocóptero
 - Outros: _____
- 11) Como você descreveria a si mesmo em termos de experiência de pilotagem?
 - Muito inexperiente
 - Inexperiente
 - Nem inexperiente, nem experiente.
 - Experiente
 - Muito experiente
- 12) Você tem alguma experiência com simuladores de voo?
 - Sim Não

Figura 102 – Questionário subjetivo de simulação ergonômica em bancada de simulação de voo (2021).

13) Por favor, se a resposta for positiva, qual a estimativa de tempo de pilotagem em simulador: _____ horas

14) Quando obteve brevê de piloto (CHT), usou o simulador da ANAC?
 Sim Não

14) Quais tipos de simulador você já usou? (marcar todos os aplicáveis)

- Simples (ex: vídeo game com controle de mão / joystick / sidestick)
 Profissional / homologado (ex: simulador com manche / pedal / flape)
 Profissional (FFC) (ex: simuladores com movimento de assento e volante / pedal / cambio)
 Realidade Virtual (ex simuladores 3D, 4D, com movimentação)

15) Alguma vez você experimentou desconforto/enjoo devido a movimentos realizados (trepidação, giro, etc) enquanto usando simuladores?
 Sim Não

16) Em caso positivo, quando foi a última vez que que você experimentou tal desconforto devido a movimentos?
 Recentemente
 Nos últimos 5 anos
 Mais de 5 anos

Questionário Pós-Pilotagem
Avaliação ergonômica da bancada

Duração da simulação (min:seg): _____

1) As posições do assento, manche, pedais e flape foram ajustadas para as suas medidas?
 Sim Não

2) Dê uma nota de 1 a 5 para classificar a posição dos seguintes componentes: assento, manche e pedais

- 0- Muito ruim
 1- Ruim
 2- Aceitável
 3- Bom
 4- Muito Bom
 5- Excelente

Alcance	0	1	2	3	4	5
Assento						
Manche						
Pedais						
Flape						

Figura 103 – Questionário subjetivo de simulação ergonômica em bancada de simulação de voo (2021).

3) Dê uma nota de 1 a 5 para classificar a posição dos seguintes componentes: Banco, volante e os pedais

Altura	0	1	2	3	4	5
Banco						
Volante						
Pedais						
Falpe						

- 0- Muito ruim
- 1- Ruim
- 2- Aceitável
- 3- Bom
- 4- Muito Bom
- 5- Excelente

4) De 1 a 5, qual foi o nível de facilidade para ENTRAR no simulador? 1 para muito difícil e 5 para muito fácil.

1	2	3	4	5

5) De 1 a 5, qual foi o nível de facilidade para SAIR do simulador? 1 para muito difícil e 5 para muito fácil.

1	2	3	4	5

6) Percebeu algum tipo de reflexo proveniente de telas ou lâmpadas?

- Sim Não

7) Caso positivo, de onde veio o reflexo?

Motivo: _____

Figura 104 – Questionário subjetivo de simulação ergonômica em bancada de simulação de voo (2021).

APÊNDICE C – Custos Estimados

Tabela 12 – Tabela de preços estimados dos materiais.

Produto	Quantidade	Preço/unidade	Preço total
Manta Fibra de vidro 300 17 m ² (05 kg)	1	R\$196,90	R\$196,90
Resina de poliuretano	6	R\$159,90	R\$959,40
Catalisador	2	R\$5,90	R\$11,80
Projektor de tela <i>short throw</i>	1	R\$1196,39	R\$1196,39
Rolo de velcro	1	R\$19,9,00	R\$19,90
Saca de cimento	3	R\$49,90	R\$149,70
Potenciômetro 10k Ω	3	R\$1,89	R\$5,67
Sensor de efeito <i>hall</i>	1	R\$2,95	R\$2,95
Filamento de PLA	1	R\$69,99	R\$69,99
Impressão 3D (por hora)	8	R\$15,00	R\$120,00
Placa BU0836A	1	R\$185,00*	R\$185,00
Licença Condor 2	1	R\$300,00*	R\$300,00
Suporte para monitor	1	R\$219,00	R\$219,00
Tecido de algodão 3,5 m ²	1	R\$55,65	R\$55,65
Tela 100"	1	R\$212,50	R\$212,50
Tubos de alumínio	7	R\$48,00	R\$336,00
Tubo de aço 6m	1	R\$59,90	R\$59,90
—	—	Total:	R\$4100,75

*Custos atualizados para o real brasileiro (cotação do Euro e da Libra Esterlina de 13/09/2021).

Anexos

ANEXO A – fotos da aeronave Aeros AC-21



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 106 – Motoplanador AC-21. Fonte: (AEROS, 2005).

ANEXO B – Blueprint do AC-21

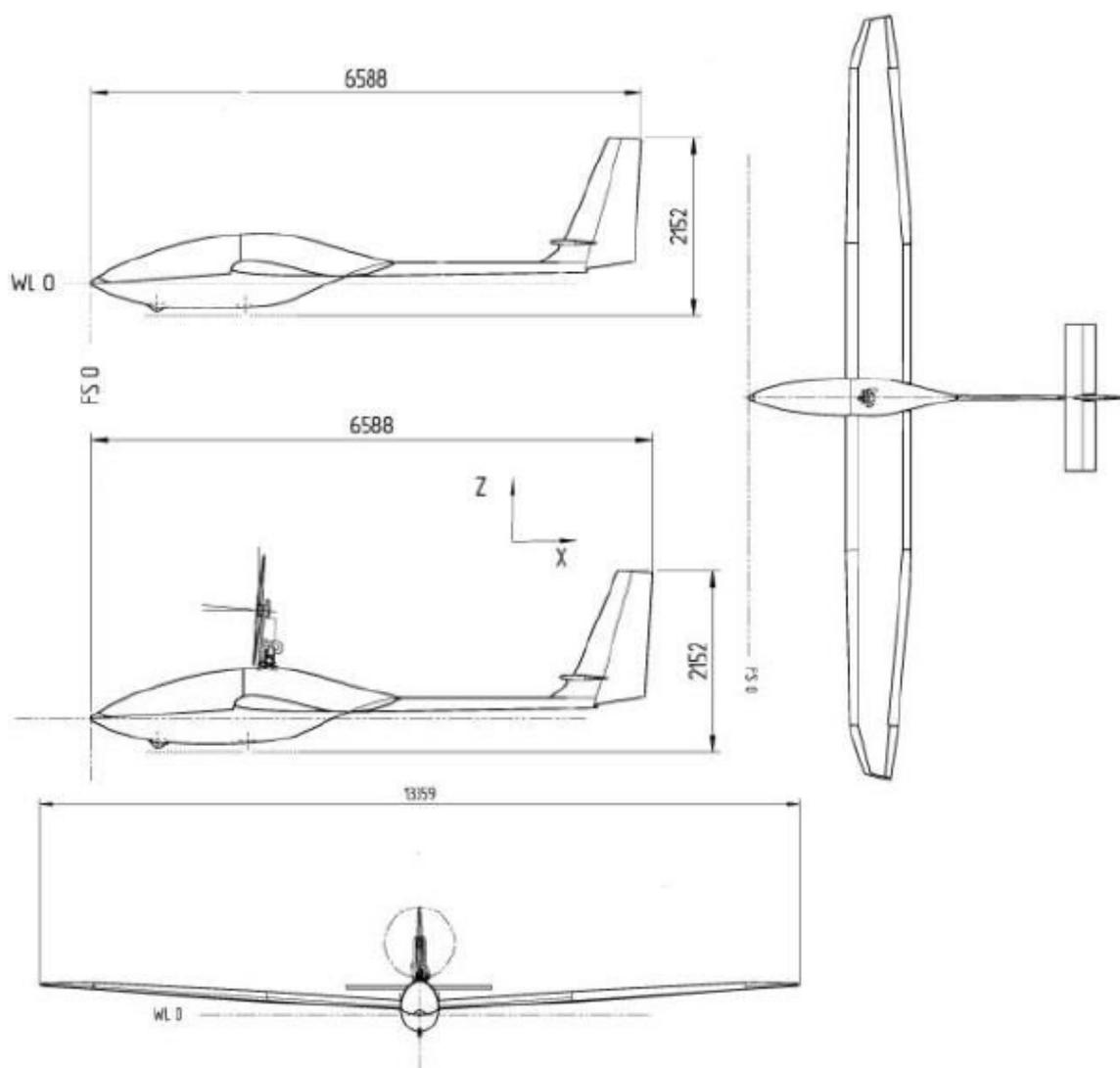


Figura 107 – Blueprint AC-21. Fonte: (ADA, 2007).

C.2 Tabela B

Figura 109 – Tabela B do RULA. Fonte: (PLUS, 2021) adaptado.

Pontuação da Postura do Pescoço	Tabela B: Pontuação de Postura do Tronco											
	1		2		3		4		5		6	
	Pernas		Pernas		Pernas		Pernas		Pernas		Pernas	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1	1	3	2	3	3	4	5	5	6	6	7	7
2	2	3	2	3	4	5	5	5	6	7	7	7
3	3	3	3	4	4	5	5	6	6	7	7	7
4	5	5	5	6	6	7	7	7	7	7	8	8
5	7	7	7	7	7	8	8	8	8	8	8	8
6	8	8	8	8	8	8	8	9	9	9	9	9

C.3 Tabela de Pontuação Final

Figura 110 – Tabela de Pontuação final do RULA. Fonte: (PLUS, 2021) adaptado.

Tabela C	Pontuação do Pescoço, Tronco e Perna							
	1	2	3	4	5	6	7+	
Pontuação do Pulso/Braço	1	1	2	3	3	4	5	5
	2	2	2	3	4	4	5	5
	3	3	3	3	4	4	5	6
	4	3	3	3	4	5	6	6
	5	4	4	4	5	6	7	7
	6	4	4	5	6	6	7	7
	7	5	5	6	6	7	7	7
	8+	5	5	6	7	7	7	7

ANEXO D – Tabela Antropométrica da população brasileira

Tabela 2 – Distribuição Percentual para as Diferentes Medidas Antropométricas e IMC na amostra (n = 960)

Percentil	Massa Corporal Total (kg)	Estatura (cm)	Altura Tronco-Cefálica (cm)	Comprimento Glúteo-Joelho (cm)	IMC (kg/m ²)
P3	63,0	162,8	83,4	54,4	21,1
P5	65,0	164,3	84,3	55,0	21,9
P50	83,9	175,1	90,9	60,0	27,4
P95	115,9	187,8	97,5	65,4	35,9
P97	124,6	189,5	98,3	66,1	38,3

Figura 111 – Distribuição Percentual para as diferentes medidas antropométricas e IMC na atmosfera (n = 960). Fonte: (ANAC, 2009).

Tabela 4 – Distribuição Percentual para as Larguras, Alturas e Comprimento

	Largura Bideltóide (cm)	Largura do Quadril (cm)	Comprimento Glúteo-Joelho (cm)	Altura Popliteal (cm)	Altura do Joelho (cm)
P1	38,7	31,0	52,6	39,4	47,2
P2,5	39,7	32,0	53,7	40,1	48,2
P5	40,6	32,9	54,6	40,7	49,1
P10	41,6	33,8	55,6	41,4	50,1
P25	43,1	35,3	57,1	42,5	51,6
P50	46,5	38,6	60,6	45,2	55,5
P75	50,2	42,2	64,3	47,5	58,6
P90	51,7	43,7	65,9	48,6	60,1
P95	52,7	44,6	66,9	49,3	61,1
P97,5	53,6	45,4	67,7	49,9	61,9
P99	54,6	46,4	68,8	50,7	63,0

Figura 112 – Distribuição percentual para as larguras, alturas e comprimento. Fonte: (ANAC, 2009).

ANEXO E – Cotas Antropométricas - Posição em Pé

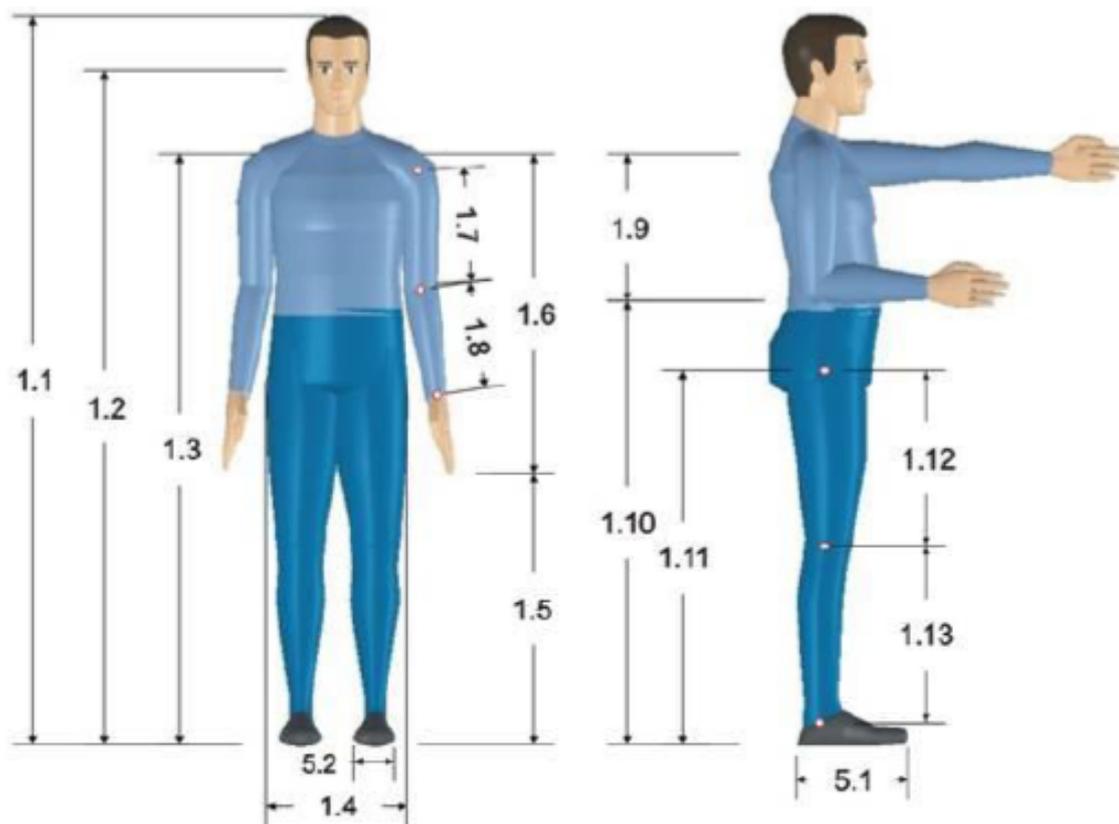


Figura 113 – Cotas do percentil em pé. Fonte: (TILLEY, 2005).

Tabela 13 – Medidas do corpo: posição em pé (medidas em mm).

Cotas	P95 Masculino	P95 Feminino	P20 Feminino
1.1	1849	1722	1569
1.3	1406	1317	1283
1.4	353	355	308
1.7	352	322	291
1.8	287	261	236
1.11	933	884	789
1.12	406	407	373
1.13	527	477	425
5.1	279	251	231
5.2	80	70	64

ANEXO F – Cotas Antropométricas - Posição sentado

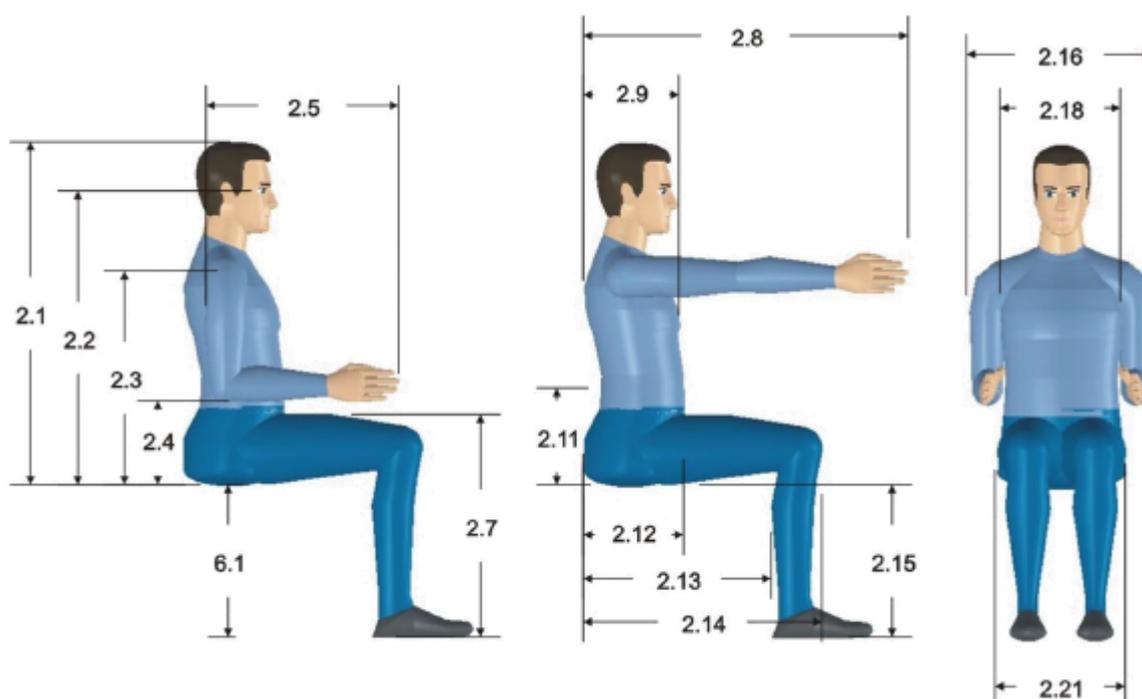


Figura 114 – Cotas do percentil sentado. Fonte: (TILLEY, 2005).

Tabela 14 – Medidas do corpo: posição sentada (medidas em mm).

Cotas	P95 Masculino	P95 Feminino	P20 Feminino
2.1	998	920	854
2.3	675	622	563
2.5	528	452	416
2.7	622	526	471
2.8	934	775	706
2.9	304	224	218
2.12	330	253	187
2.13	548	493	436
2.14	673	613	543
2.15	495	391	359
2.16	523	423	395
2.18	358	303	340
2.21	429	381	332