



isec
Engenharia

MESTRADO EM ENGENHARIA
MECÂNICA

**Integridade Estrutural de uma
Pedaleira Produzida Por
Manufatura Aditiva**

Autor

Malcolm João Padre António

Orientador

Prof. Doutor Luís Filipe Pires Borrego

Coimbra, outubro de 2024

INSTITUTO POLITÉCNICO
DE COIMBRA

INSTITUTO SUPERIOR
DE ENGENHARIA
DE COIMBRA



isec

Engenharia

Departamento de Engenharia Mecânica

Integridade Estrutural de uma Pedaleira Produzida Por Manufatura Aditiva

Dissertação para obtenção de grau de Mestre em
Engenharia Mecânica – Área de Especialização em
Construção e Manutenção de Equipamentos Mecânicos

Autor

Malcolm João Padre António

Orientador

Prof. Doutor Luís Filipe Pires Borrego

INSTITUTO POLITÉCNICO
DE COIMBRA

INSTITUTO SUPERIOR
DE ENGENHARIA
DE COIMBRA

Coimbra, outubro de 2024

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus por direcionar minha vida, com sua infinita Graça, renovando minhas forças todos os dias.

Minha família, com especial carinho aos meus pais e irmãos pelo amor, confiança e paciência que têm comigo, apoiando-me sempre nos tempos difíceis.

Ao meu orientador, Prof. Luís Filipe Borrego, pela dedicação e trabalho para concluir esta dissertação.

Ao Prof. Joel de Jesus, pelo enorme esforço que realizou na elaboração deste projeto.

Ao Eng. Rui Fernandes, pela ajuda incessante que ofereceu para conclusão deste trabalho.

Ao Instituto Superior de Engenharia de Coimbra – ISEC, professores em geral, em especial ao curso de Mestrado em Engenharia Mecânica – Área de Especialização em Construção e Manutenção de Equipamentos Mecânicos, pela oportunidade de experimentar um ensino de rigor e qualidade.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra – FCTUC, por disponibilizar seus laboratórios para ensaios de fadiga que permitiram elaborar esta dissertação e aos professores que ajudaram na realização dos ensaios.

Aos colegas que conheci durante a frequência do curso que me ajudaram, o meu obrigado.

Enfim,

Muito obrigado a todos.

EPÍGRAFE

Toda vez que você notar, que alguém tem mais
sucesso do que você, eles estão fazendo algo
que você não está.

Malcolm X

RESUMO

A manufatura aditiva envolve um grupo de tecnologias de fabricação aditiva que permitem a criação de objetos físicos a partir de fontes de dados, normalmente desenhos 3D obtidos através de tecnologias *Computer-Aided Design* (CAD). Nesse formato as peças são produzidas pela adição de materiais camada a camada, até obter a peça completa. Estes materiais podem ser filamentos poliméricos ou metais, dependendo da finalidade do componente.

Esta dissertação foca-se no estudo de integridade estrutural de três pedaleiras, teve-se a pedaleira de alumínio 6061-T6 da marca Miranda® como modelo padrão para realização de estudos de otimização topológica usando o Método dos Elementos Finitos (MEF) para obter um modelo final da pedaleira com massa reduzida para ser processada por *Laser Powder Bed Fusion* (L-PBF), de forma a verificar se estas pedaleiras suportariam os 100 000 ciclos de carga de acordo a norma NP EN ISO 4210-8:2019. A primeira abordagem do ensaio foi realizada na pedaleira de liga de alumínio 6061-T6, a segunda abordagem do ensaio foi na pedaleira feita da liga AlSi10Mg sem tratamento térmico e a terceira foi na pedaleira de AlSi10Mg com tratamento térmico de alívio de tensões à 250°C, ambas produzida por *Laser Powder Bed Fusion* (L-PBF).

Em seguida, projetou-se um mecanismo de ensaio em Solidworks®, para se fixar na máquina de ensaio, Instron ElectroPlus E10000, de modo a realizar os ensaios experimentais à fadiga das três pedaleiras.

Por fim, após os ensaios experimentais das três pedaleiras chegou-se à conclusão que a pedaleira de alumínio 6061-T6 e AlSi10Mg com tratamento térmico suportaram os 100 000 ciclos, sem causar assim falhas nas pedaleiras, mas a pedaleira de AlSi10Mg sem tratamento térmico fraturou com cerca de 65 924 ciclos de carga.

Palavras-Chaves: Manufatura aditiva, Integridade estrutural, *Laser Powder Bed Fusion* (L-PBF), Otimização topológica

ABSTRACT

Additive manufacturing involves a group of additive manufacturing technologies that allow physical objects to be created from data sources, usually 3D drawings obtained through Computer-Aided Design (CAD) technologies. In this format, parts are produced by adding materials layer by layer until the complete part is obtained. These materials can be polymeric filaments or metals, depending on the purpose of the component.

This dissertation focuses on the study of the structural integrity of three pedals, using the Miranda® brand 6061-T6 aluminium pedal as a standard model to carry out topological optimization studies using Finite Element Method (FEM) to obtain a final model of the pedal with reduced mass to be processed by Laser Powder Bed Fusion (L-PBF). In order to verify if these pedals would withstand 100,000 load cycles according to the NP EN ISO 4210-8:2019 standard. The first test approach was carried out on the 6061-T6 aluminium alloy pedal, the second test approach was on the AlSi10Mg alloy pedal without heat treatment and the third was on the AlSi10Mg pedal with stress relief heat treatment at 250°C, both produced by Laser Powder Bed Fusion (L-PBF).

A test mechanism was then designed in Solidworks® to be attached to the Instron ElectroPlus E10000 test machine in order to carry out the experimental fatigue tests on the three pedals.

Finally, after the experimental tests on the three pedals, it was concluded that the 6061-T6 aluminium and heat-treated AlSi10Mg pedals could withstand 100,000 cycles without causing the pedals to fail, but the non-heat-treated AlSi10Mg pedal fractured at around 65,924 load cycles.

Keywords: Additive manufacturing, Structural integrity, Laser Powder Bed Fusion (L-PBF), Topological optimization

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE TABELAS.....	ix
SIMBOLOGIAS E ABREVIATURAS	x
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Estrutura da dissertação.....	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 Ligas de Alumínio.....	4
2.1.1. Liga de AlSi10Mg.....	6
2.1.2. Liga de AlSi10Mg processada por L-PBF	7
2.2. Manufatura Aditiva.....	7
2.2.1. Tipos de Manufatura Aditiva	9
2.2.2. <i>Laser Powder Bed Fusion (L-PBF)</i>	9
2.2.3. Parâmetros do processo de L-PBF	11
2.3. Integridade estrutural dos materiais à fadiga.....	13
2.3.1. Processo de caracterização da fadiga.....	13
2.3.2. Solicitações de fadiga.....	14
2.3.3. Ensaio de Fadiga.....	17
3. MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS.....	20
3.1. Caracterização do material da pedaleira AlSi10Mg.....	21
3.2. Norma para ensaio de fadiga com pedaleiras	22
3.2.1. Projeto do mecanismo de ensaio da pedaleira	25
3.3. Dados experimentais de curvas S-N para ensaio de fadiga por MEF	26
4. OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA DA PEDALEIRA POR MEF.....	29
4.1. Primeira geometria da otimização topológica da pedaleira	33
4.2. Segunda geometria da otimização topológica da pedaleira	34
4.3. Terceira geometria da otimização topológica da pedaleira	35
4.4. Quarta geometria da otimização topológica da pedaleira	36
4.4.1. Primeiro modelo da pedaleira para análise de tensões.....	37
4.4.2. Segundo modelo da pedaleira para análise de tensões.....	39

4.4.3.	Terceiro modelo da pedaleira para análise de tensões	41
4.4.4.	Ensaio de fadiga da pedaleira por MEF	45
5.	ENSAIOS EXPERIMENTAIS DE FADIGA DAS PEDALEIRAS	48
5.1.	Ensaio experimental do projeto	48
5.2.	Análise de fratura da pedaleira de AlSi10Mg produzida por L-PBF	51
6.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	54
6.1.	Conclusões.....	54
6.2.	Sugestões de trabalhos futuros.....	55
	REREFÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56
	APÊNDICES	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Etapas básicas no processo de manufatura aditiva (adaptado de Srivastava et al., 2020)	8
Figura 2.2 - Esquema da tecnologia L-PBF (Ferreira, 2023)	10
Figura 2.3 - Processo L-PBF e as alterações da microestrutura da liga AlSi10Mg (Fernandes, 2021)	11
Figura 2.4 - Processo de degradação por fadiga (adaptado de Pinto, 2021)	14
Figura 2.5 - Ciclos de fadiga: a) alternado b) pulsante c) por blocos d) aleatório	16
Figura 2.6 - Curva S-N (Ferreira & Borrego 2023)	18
Figura 3.1 - Geometria da pedaleira padrão no Solidworks®	20
Figura 3.2 - Ensaio de fadiga em MEF com pedaleira à 45° com a horizontal (adaptado de IPQ, 2019)	23
Figura 3.3 - Ensaio de fadiga com pedaleira à 30° com a horizontal (adaptado de IPQ, 2019)	24
Figura 3.4 - Mecanismo de ensaio da pedaleira no SolidWorks®	25
Figura 3.5 - Curva S-N para análise de fadiga por MEF do projeto (adaptado de Fernandes et al., 2024)	26
Figura 4.1 - Pedaleira com restrição fixa no Inventor®	30
Figura 4.2 - Pedaleira com força remota aplicada	31
Figura 4.3 - Regiões preservadas na pedaleira	31
Figura 4.4 - Planos de simetria na pedaleira do projeto	32
Figura 4.5 - Geometria da pedaleira malhada	33
Figura 4.6 - 1ª Simulação do shape generator da pedaleira	33
Figura 4.7 - 2ª Simulação do shape generator da pedaleira	34
Figura 4.8 - 3ª Simulação do shape generator da pedaleira	35
Figura 4.9 – 4ª Simulação da pedaleira no shape generator	36
Figura 4.10 – 1º Modelo da pedaleira	38
Figura 4.11 - Análise de tensões por FEA do 1º modelo do projeto	39
Figura 4.12 - 2º Modelo da pedaleira	40
Figura 4.13 - Análise de tensões por FEA do 2º modelo do projeto	41
Figura 4.14 – 3º Modelo da pedaleira	42
Figura 4.15 - Análise de tensões por FEA do modelo final do projeto	43

Figura 4.16 - Fator de segurança da pedaleira	44
Figura 4.17 - Análise de fadiga da pedaleira por FEA.....	45
Figura 4.18 - Folha de desenho técnico da pedaleira do projeto	47
Figura 5.1 – Primeiro ensaio experimental da pedaleira	49
Figura 5.2 - Pedaleira produzida por L-PBF fraturada	50
Figura 5.3 – Pedaleiras de AlSi10Mg e 6061-T6	50
Figura 5.4 - Processo de degradação por fadiga da pedaleira de AlSi10Mg	51
Figura 5.5 - Ilustração ampliada da linha divisória por MEV	52
Figura 5.6 - Ilustração da iniciação da fenda por MEV	53
Figura 5.7 - Ilustração mais ampliada na zona de iniciação da fenda por MEV	53

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Sistema de designação para ligas de trabalho mecânico (adaptado de Mazzolani, 2003)	5
Tabela 2.2 - Sistema de designação para ligas de fundição (adaptado de Mazzolani, 2003)	6
Tabela 2.3 – Síntese do controlo dos parâmetros nos defeitos de produção (adaptado de Fernandes, 2021)	12
Tabela 3.1 - Composição química do AlSi10Mg (% em peso) (adaptado de EOS aluminium AlSi10Mg, 2022)	21
Tabela 3.2 - Forças no eixo do pedal e ciclos de ensaio	24
Tabela 3.3 - Parâmetros de simulação da pedaleira por MEF	27
Tabela 3.4 - Constantes da curva S-N (adaptado de Fernandes, 2021)	28
Tabela 4.1 - Propriedades mecânicas do Alumínio AlSi10Mg	29

SIMBOLOGIAS E ABREVIATURAS

Acrónimos e Abreviaturas

AA – Aluminium Association

AM – Additive Manufacturing

ASTM – American Society for Testing Materials

CAD – Computer Aided Design

EN – Norma Europeia

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

FEA – Finite Element Analysis

GDL – Graus de Liberdade

IPQ – Instituto Português de Qualidade

ISEC – Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

ISO – International Organization for Standardization

LPBF – Laser Powder Bed Fusion

MEF – Método dos Elementos Finitos

MEV – Microscópio Eletrónico de Varrimento

NP – Norma Portuguesa

SEM – Scanning Electron Microscope

SLA - Estereolitografia

SLM – Selective Laser Melting

Alfabeto Latino

b – Expoente de resistência cíclica

B – Constante do material

B – Inclinação da curva S-N antes do limite de fadiga

Be – Inclinação da curva S-N depois do limite de fadiga

C – Ciclos de ensaio

E – Módulo de elasticidade [MPa]

F₂ – força [N]

K_f – fator de compensação de fadiga

K_{IC} – Fator de intensidade de tensão crítico ou tenacidade de fratura

G – Módulo de elasticidade transversal [MPa]

K/s – Kelvin/segundo (taxa de arrefecimento)

N – Número de ciclos até a rotura

N_0 – número de ciclos de curta duração

R – Razão de tensão

S – Tensão

S_e – limite de resistência a fadiga

S_u – tensão de rotura

ST – Sem tratamento térmico

T – Torque

TT – Tratamento térmico de alívio de tensões residuais

Alfabeto Grego

Δ – variação de uma magnitude

ε – deformação [%]

σ – tensão [MPa]

σ'_f - coeficiente de resistência cíclica

Índices

a – Amplitude

c – Constante do material

f_0 – limite de fadiga

m – Média

máx. – máximo

min – mínimo

1. INTRODUÇÃO

Atualmente tem sido uma enorme preocupação em projetos de engenharia mecânica, projetar estruturas mais leves e cada vez mais resistentes, principalmente em componentes solicitados à carga cíclicas. Em certos casos, a redução de massa dos componentes gera ganhos financeiros, reduzindo o consumo de materiais.

Uma alternativa que tem vindo ser usada em componentes estruturais, são as ligas de alumínio em relação das ligas de aços, por serem mais leves, mais resistentes a corrosão, além do seu preço baixo. Por este motivo, a indústria de manufatura aditiva tem utilizado ligas de alumínio para produção de peças sem ferramentas tradicionais e com geometria complexas, reduzindo assim, o tempo de produção, etapas de produção, custo e consumo de materiais.

O processo de fabrico aditivo, *Laser Powder Bed Fusion (L-PBF)*, também conhecido por *Selective Laser Melting (SLM)*, é um dos usados na indústria aditiva, caracterizado por uso de pós metálicos que são fundidos com energia a laser. A ligação deste método com a liga de alumínio é muito atrativa nas indústrias aeroespacial, aeronáutica e automobilística. Ainda assim, muitos dos componentes usados nestas indústrias estão sujeitos às cargas dinâmicas, originando assim falhas em componentes por fadiga.

Deste modo, nesta dissertação de mestrado abordou três estudos do comportamento à fadiga de pedaleiras, uma de liga de alumínio 6061-T6 pela fabricante Miranda®, uma outra feita da liga AlSi10Mg sem tratamento térmico e outra de AlSi10Mg com tratamento térmico de alívio de tensões à 250°C, ambas produzida por L-PBF.

Primeiramente desenhou-se a geometria da pedaleira de alumínio 6061-T6 no Autodesk Inventor®, depois seguiram-se os estudos de otimização topológica usando o Método dos Elementos Finitos (MEF), foram realizados vários testes em diferentes modelos e sucessivas simulações para determinar o comportamento dos componentes à solicitações aplicadas, de modo avaliar as tensões críticas da estrutura em estudo, até obter um modelo final da pedaleira com massa reduzida para ser processada por L-PBF que cumprisse as exigências do projeto.

Esta foi a geometria final da pedaleira desenvolvida serviu de base para estudos de Análise de Elementos Finitos, em inglês *Finite Element Analysis* (FEA) com auxílio do Autodesk Inventor Nastran®, sendo que as simulações foram feitas no domínio linear elástico e em condições estáticas.

Foi necessário definir vários critérios antes de iniciar as simulações, tais como, materiais dos componentes, direção, sentido e intensidade da força aplicada na pedaleira, tipos de restrições nos componentes e definição da malha.

Em seguida a partir do modelo final do projeto, realizou-se análise de fadiga por FEA, na qual foram definidos os mesmos parâmetros de restrições, carregamento, malhagem e material como na análise de tensões, na qual observou-se uma vida infinita para o componente.

Projetou-se um mecanismo para se instalado na máquina de ensaio, e algumas partes deste mecanismo foram maquinadas no torno convencional, máquina CNC com três e cinco eixos no Laboratório de Tecnologia Oficinal no ISEC, e outras peças já se encontravam no Laboratório de Construções Mecânicas na FCTUC.

Posteriormente foram realizados os ensaios experimentais de fadiga de longa duração nas três pedaleiras de modo analisar se estas suportariam a carga de 1300 N durante 100 000 ciclos de acordo a norma NP EN ISO 4210-8:2019. Os ensaios foram realizados na Instron ElectroPlus E10000. A máquina é comandada por uma consola de controlo da Instron, modelo 8800, que controla e regista os dados com auxílio de um computador.

Todos os ensaios experimentais foram realizados no Laboratório de Construções Mecânicas, no Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

1.1. Estrutura da dissertação

Esta dissertação apresenta seis capítulos, na qual faz parte o presente capítulo e as referências bibliográficas. Outros capítulos do projeto que constituem o restante dos elementos textuais descrevem os aspectos teóricos científicos que permitiram a elaboração desta dissertação. O projeto foi ainda complementado com uma secção de apêndices que mostram as peças projetadas para elaboração do mecanismo de ensaio do projeto.

O capítulo 1, apresenta objetivos principais do projeto que consistiu em três estudos do comportamento à fadiga de pedaleiras, bem como as ferramentas usadas para realizar estes estudos.

O capítulo 2, serviu de enquadramento teórico dos fundamentos dos comportamentos dos materiais a fadiga para esta dissertação de mestrado, permitindo expor uma abordagem sobre as ligas de alumínio, com maior ênfase na liga de alumínio AlSi10Mg, assim como o processo de fabrico aditivo, *Laser Powder Bed Fusion (L-PBF)*, com principal foco no processo *Selective Laser Melting (SLM)*.

O capítulo 3, mostra uma descrição detalhe da caracterização da liga AlSi10Mg em termos de composição química e parâmetros de produção. Ainda neste capítulo aborda-se as normas de ensaios de fadiga para pedaleiras para elaboração de um mecanismo de ensaio da pedaleira e através da revisão na literatura encontrou-se dados experimentais para simulações numéricas computacionais.

O capítulo 4, retrata sobre estudos de otimização topológica da pedaleira de AlSi10Mg, para obter uma nova geometria padrão que serviu de base para estudos de Análise de Elementos Finitos, em inglês *Finite Element Analysis (FEA)* com auxílio de ferramentas como o SolidWorks® e Autodesk Inventor®.

O capítulo 5, aborda o ensaio experimental realizado em três abordagens. Neste capítulo mostra também análise de fratura da pedaleira através do Microscópio Electrónico de Varrimento (MEV).

O capítulo 6, apresenta as conclusões e sugestões para futuros trabalhos, demonstrando que estudo de investigação científica na área de integridade estrutural de componentes produzidos por manufatura aditiva ainda precisa ser aprofundada e com o desenvolvimento de tecnologias de fabricação aditiva tornará esta área de estudo bastante concorrida.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Como material de suporte para esta dissertação de mestrado, realizasse uma abordagem sobre as ligas de alumínio, com maior ênfase na liga de alumínio AlSi10Mg, material usado para produção das pedaleiras para os ensaios de fadiga, assim como o processo de fabrico aditivo, *Laser Powder Bed Fusion (L-PBF)*, com principal foco no processo *Selective Laser Melting (SLM)*.

Neste capítulo também vai ser apresentado os principais fundamentos teóricos dos comportamentos dos materiais a fadiga.

2.1 Ligas de Alumínio

Mazzolani (2003) afirma que alumínio e suas ligas são metais leves, macios e resistentes. Suas propriedades físicas e mecânicas têm sido os grandes motivos de sucesso como material de construção, tornando-os competitivo com os aços na área da produção. As principais vantagens das ligas de alumínio são:

- Baixa massa específica ($\sim 2,70 \text{ g/cm}^3$);
- Boa resistência a corrosão;
- Boa condutividade térmica e elétrica;
- Baixo ponto de fusão ($\sim 600^\circ\text{C}$);
- Baixo custo;
- Reciclável.

Uma desvantagem do alumínio puro é sua baixa resistência mecânica, cerca de 70 MPa, logo não é recomendável para construções ou estruturas mecânicas de maior exigência. No entanto com adição de outros elementos liga na sua microestrutura, a resistência mecânica pode atingir valores acima de 600 MPa, superando muitos aços estruturais.

Segundo Simões (2023) as ligas de alumínio podem ser classificadas de várias formas, mas de acordo processo de fabricação são da seguinte forma:

- a) Ligas de alumínio para fundição;
- b) Ligas de alumínio para trabalho mecânico.

As ligas de alumínio para trabalho mecânico estão divididas em duas:

- Para trabalho mecânico sem tratamento térmico;
- Para trabalho mecânico com tratamento térmico.

Para distinguir as duas classes de ligas de alumínio, existe uma designação numérica derivada da nomenclatura Americana *Aluminium Association* (AA). E atualmente usada na Europa pela *International Organization for Standardization* (ISO), com quatro dígitos, na qual o primeiro dígito representa o elemento principal na liga (Fernandes, 2021).

A tabela 2.1 mostra a primeira classe de ligas de alumínio, ligas de alumínio de trabalho mecânico, com seu respectivo sistema de designação.

Tabela 2.1 - Sistema de designação para ligas de trabalho mecânico (adaptado de Mazzolani, 2003)

Liga de alumínio	Elementos de Ligas Principais
1xxx	99% mínimo de alumínio
2xxx	Cobre
3xxx	Manganês
4xxx	Silício
5xxx	Magnésio
6xxx	Magnésio + silício
7xxx	Zinco
8xxx	Outros elementos
9xxx	Obsoleta

A tabela 2.2, mostra a primeira classe de ligas de alumínio, ligas de fundição, com seu respectivo sistema de designação.

Tabela 2.2 - Sistema de designação para ligas de fundição
(adaptado de Mazzolani, 2003)

Liga de alumínio	Elementos de Ligas Principais
1xx.x	99% mínimo de alumínio
2xx.x	Cobre
3xx.x	Silício + (Cobre e/ou Magnésio)
4xx.x	Silício
5xx.x	Magnésio
6xx.x	Obsoleta
7xx.x	Zinco
8xx.x	Estanho
9xx.x	Outros elementos

Os elementos de liga principais representam normalmente 5% do peso das ligas para trabalho mecânico e a mesma quantidade ou maior para as ligas de fundição. Embora em quantidades muito menores que o elemento liga primário, a maioria das ligas contém dois a quatro outros elementos.

Normalmente estes elementos de liga melhoram significativamente a resistência mecânica, simultaneamente aumentando outras propriedades como, tenacidade, resistência à corrosão e a facilidade de fabrico.

De acordo o teor de silício, as ligas de alumínio podem ser classificadas como:

- a) Hipoeutéticas (inferior à 12.9%);
- b) Eutéticas (igual à 12.9%);
- c) Hipereutéticas (superior à 12.9%).

Nesta dissertação as pedaleiras usadas para realizar os ensaios de fadiga são de AlSi10Mg, as quais serão abordadas com mais detalhes no subcapítulo seguinte.

2.1.1. Liga de AlSi10Mg

Fernandes (2021) afirma que a liga AlSi10Mg é uma liga da série 3xx.x, ou seja, uma liga de alumínio obtida por fundição, com o silício como elemento de liga principal, sendo seu teor entre 9% à 11%, sendo assim uma liga hipoeutética. Esta liga possui também magnésio, que ajuda a endurecer a liga por precipitação,

formando assim a fase Mg_2Si que garante assim o aumento de resistência mecânica da liga.

Portanto, dada que a liga $AlSi10Mg$ possui silício torna-a muito atrativa para o processo de fabrico L-PBF, visto que, o silício garante boa soldabilidade, fluidez, boa capacidade de fundição, resistência à fissuração e baixo ponto de fusão.

2.1.2. Liga de $AlSi10Mg$ processada por L-PBF

Mertens *et al.* (2020) realça que o processo de fabrico aditivo em L-PBF conhecido também como SLM, oferece grande flexibilidade no design das peças, na qual permite produzir peças de geometrias complexas e com recurso a otimização topológica. Além disso, o processo SLM oferece taxa de arrefecimento elevadas entre 10^3 e 10^7 K/s durante a solidificação, resultando em estruturas fortemente refinadas melhorando assim as propriedades mecânicas do material.

A liga hipoeutética $AlSi10Mg$ tem sido objeto de enorme atenção devido sua boa capacidade de fundição e soldadura, sua elevada fluidez de fusão e baixa contração após a solidificação. Contudo, existem alguns problemas que persistem na utilização da liga $AlSi10Mg$ no processo SLM, como a porosidade e tensões residuais nas peças (Mertens *et al.*, 2020).

2.2. Manufatura Aditiva

Por definição, manufatura aditiva é uma tecnologia de fabricação aditiva, onde são usadas fontes de dados para produção de objetos físicos. Estas fontes de dados são normalmente desenhos 3D obtidos através de tecnologias *Computer-Aided Design* (CAD). A geometria do objeto a produzir pode ser definida por programas de Modelação 3D (CAD), tais como, SolidWorks®, Autodesk Inventor®, etc., ou ainda pode ser obtida por scanners 3D, tomografia computadorizada e ressonância magnética (Bandyopadhyay *et al.*, 2015).

A manufatura aditiva (AM, em inglês, Additive Manufacturing), foi desenvolvida na década de 1980, quando Charles “Chuck” Hull inventou a primeira forma de impressão 3D, chamada estereolitografia (SLA). Posteriormente foram inventadas

novas tecnologias, para aplicação na indústria e fins comerciais (Bandyopadhyay *et al.*, 2015).

As tecnologias de manufatura aditiva têm muitas características diferentes, distinguindo-se dos processos tradicionais de fabricação subtrativa como torneamento, fresagem, etc., oferecendo ampla autonomia no desenvolvimento e construção de formas geométricas complexas com uma precisão não alcançada pela maquinação (Srivastava *et al.*, 2020).

Ferreira (2023) afirma que todos os processos de manufatura aditiva possuem cinco etapas básicas:

1. Criação de um modelo CAD da peça que está sendo projetada;
2. Conversão do arquivo CAD em formato STL, próprio para estereolitografia;
3. Fatiamento do arquivo STL em finas camadas transversais;
4. Construção física do modelo, empilhando-se uma camada sobre a outra;
5. Limpeza e acabamento do protótipo.

Estas etapas, para uma melhor compressão, podem ser observadas na figura 2.1.

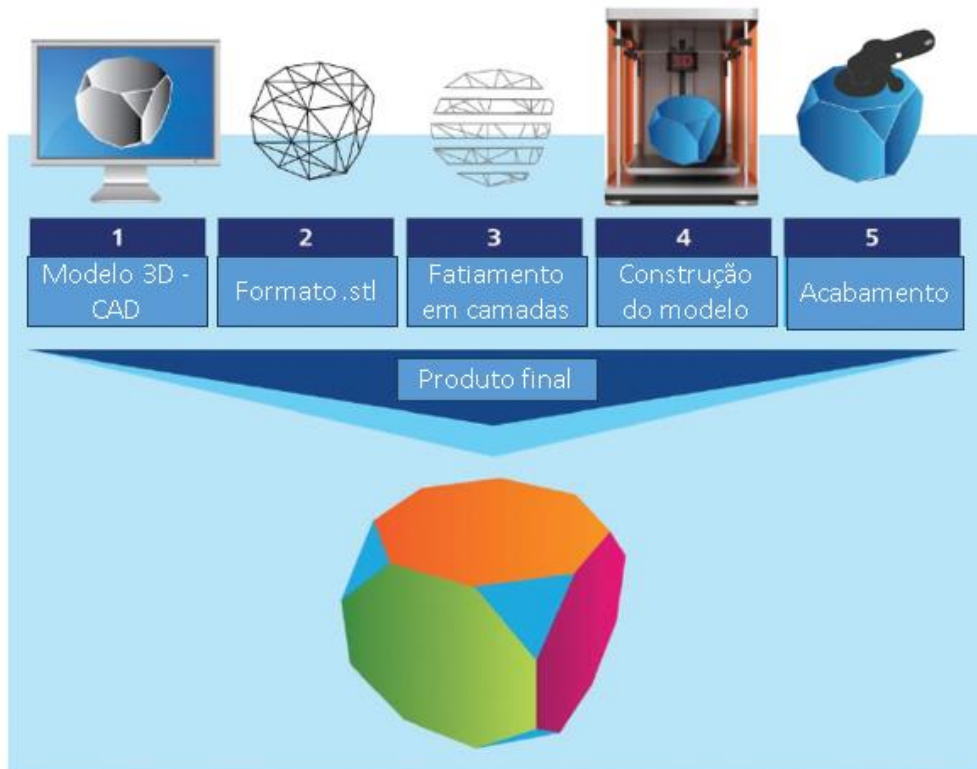


Figura 2.1 - Etapas básicas no processo de manufatura aditiva (adaptado de Srivastava *et al.*, 2020)

2.2.1. Tipos de Manufatura Aditiva

Fernandes (2021) informa que de acordo a ASTM F2792-12a, os processos de fabricação aditiva podem ser divididos em 7 classes:

1. Extrusão de material (*Material extrusion*);
2. Foto polimerização de cuba (*Vat Photopolymerization*);
3. Fusão de pós metálicos (*Powder Bed Fusion*);
4. Jato de material (*Material Jetting*);
5. Jato ligante (*Binder Jetting*);
6. Laminação de Folhas (*Sheet Lamination*);
7. Deposição de energia direcionada (*Directed energy deposition*).

Estas são as principais categorias do processo da manufatura aditiva. No entanto esta dissertação vai abordar somente a tecnologia *Powder Bed Fusion*, sendo especificamente o processo de *Selective Laser Melting (SLM)*, visto que é a tecnologia usada para produção da pedaleira em estudo.

2.2.2. Laser Powder Bed Fusion (L-PBF)

Oliveira (2017) reitera que o processo de L-PBF ou também conhecido como SLM, é uma tecnologia que cria modelos de peças físicas a partir de materiais em forma de pó. A produção ocorre dentro de uma máquina de manufatura aditiva contendo um laser, uma plataforma de construção, e um distribuidor de pós (rolos). A produção de peça faz-se camada a camada de pó, cerca de 30-50 μm . Com a deposição completa do pó na cama, o laser incide sobre a camada de pó seletivamente devido a trajetória definida no computador (figura 2.2). Nessa fase, dá-se a sinterização (temperatura de fusão) e consolidação dos pós sempre que o laser entrar em contato com o material, criando a primeira camada. Assim que termina a trajetória do laser, a plataforma desce o suficiente para que se possa depositar uma nova camada, assim o processo é repetido até obter a peça física.

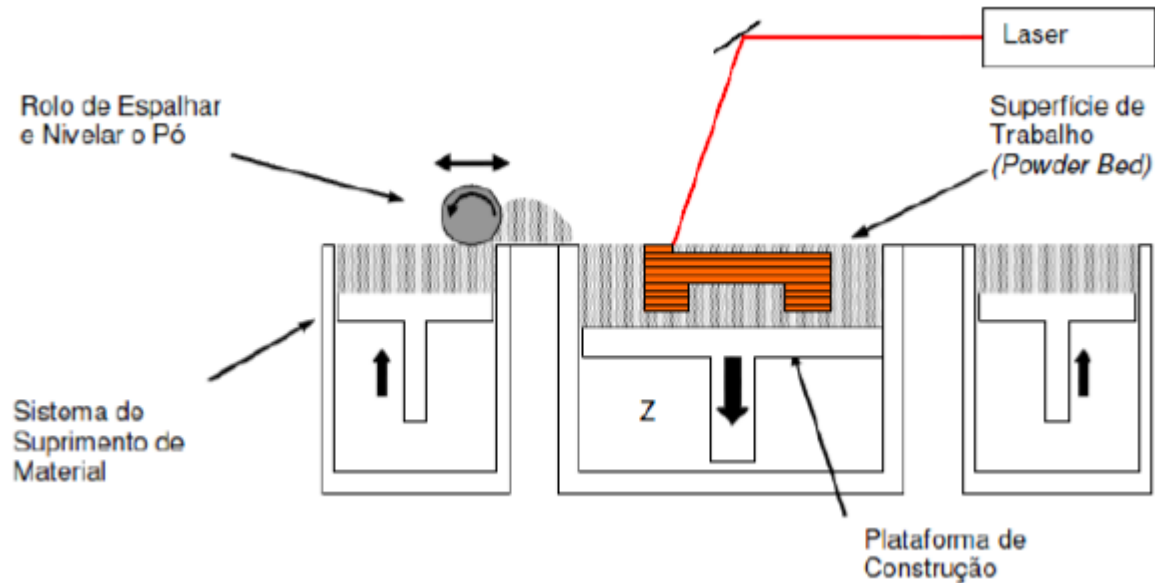


Figura 2.2 - Esquema da tecnologia L-PBF (Ferreira, 2023)

Esta tecnologia usa diferentes ligas como ligas de titânio, aços e ligas de alumínio, garantindo boas propriedades mecânicas, assim torna-se muito atrativa nas indústrias aeroespacial e automóvel, permitindo enorme redução do peso das estruturas. O processo L-PBF provoca alterações na microestrutura da liga AlSi10Mg, sendo assim necessário uma análise microscópica do componente fabricado.

Durante a fabricação por L-PBF, a temperatura varia ao longo da poça de fusão. O laser sinteriza a camada de pó depositada, onde a temperatura é maior e vai decaindo à medida que se aproxima do metal de base. Este processo forma três camadas distintas na microestrutura do AlSi10Mg como mostra a figura 2.3. Na zona da poça de fusão, a temperatura é superior a temperatura líquida do material, formando-se uma zona de grãos finos. No entanto, na zona onde a temperatura atinge valores entre a temperatura sólida e temperatura líquida, gera alteração no metal de base, passando para um estado semissólido, com uma zona característica de grãos grosseiros. Finalmente, existe uma terceira zona, conhecido como zona termicamente afetada, onde se dá um tratamento térmico, em que a temperatura é inferior à do metal de base. Este tratamento é responsável por eliminar o Si do Al supersaturado, com as partículas de Si a condensarem no limite das zonas solidificadas, através do micro segregação, formando a fase cristalizada.

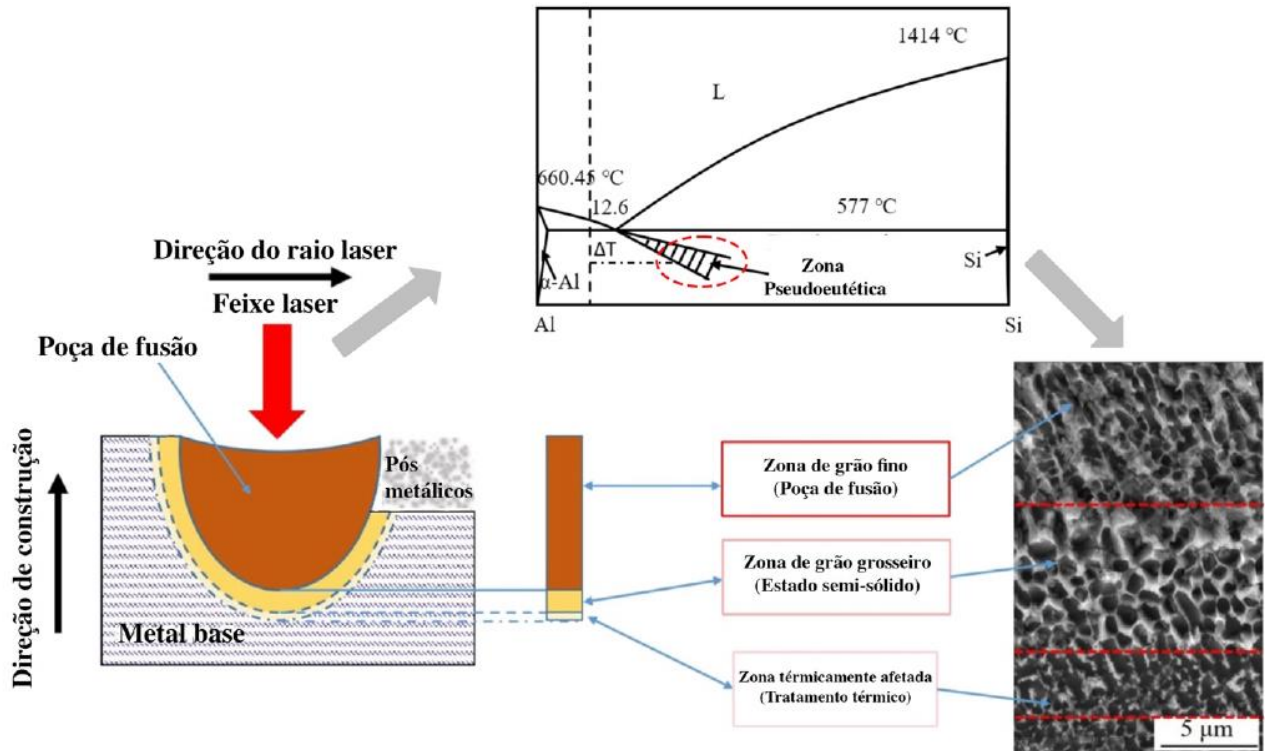


Figura 2.3 - Processo L-PBF e as alterações da microestrutura da liga AlSi10Mg (Fernandes, 2021)

Contudo, o processo L-PBF acarreta algumas desvantagens, como acabamento superficial, defeitos internos inerentes do próprio processo, distorção nas peças, devido ao gradiente de temperatura. Estas desvantagens podem ser controladas por parâmetros do processo, que serão abordados no subcapítulo seguinte.

2.2.3. Parâmetros do processo de L-PBF

Os principais parâmetros no processo L-PBF que podem ser controlados para reduzir os defeitos e assim garantir uma peça final com maior qualidade que existem são: a potência do laser, a espessura da camada, a velocidade e a dimensão do feixe de laser e ainda a orientação da impressão, que tem implicações no caminho do laser em cada camada (Fernandes, 2021).

Deste modo, controlando estes parâmetros vai influenciar na qualidade da peça final, minimizando os defeitos, rugosidade da superfície tornando os materiais mais densos. Logo, as empresas que produzem os componentes devem buscar forma de otimizar estes parâmetros de modo a cumprir com as exigências de funcionamento das peças (Fernandes, 2021).

A tabela 2.3 mostra alguns procedimentos realizados de forma resumida para controlar os defeitos inerentes do processo L-PBF.

Tabela 2.3 – Síntese do controlo dos parâmetros nos defeitos de produção (adaptado de Fernandes, 2021)

Defeitos	Procedimento primário	Procedimento secundário
Porosidade ("Keyholes")	Reduzir energia do laser	Aumentar velocidade do laser
Porosidade (falta de fusão)	Reduzir dimensão da linha de impressão; reduzir espessura da camada	Reduzir velocidade do laser; aumentar energia do laser
Mudança de composição	Reduzir energia do laser; aumentar velocidade de laser	Aumentar dimensão da linha de impressão; aumentar espessura da camada
Tensões residuais	Reduzir dimensão do laser; usar pós pré-aquecidos	Reduzir velocidade do laser

Para reduzir os defeitos como porosidade do tipo “keyholes”, termo em inglês para buraco de fechadura, é necessário controlar a solidificação da poça de fusão, numa primeira abordagem reduz-se a energia do laser, pois demasiada energia provoca uma forte agitação da poça de fusão, e em seguida, se necessário, aumentar a velocidade do laser, sendo que a velocidade de ser suficientemente alta para preencher os poros durante a solidificação. Os defeitos de falta de fusão, estão relacionados a qualidade do laser, sendo necessário reduzir o raio do laser ou reduzir a espessura da camada a fundir, caso não seja suficiente, deve-se reduzir a velocidade do laser e aumentar a energia do laser (Fernandes, 2021).

Os defeitos de mudança de composição, são gerados por elevados gradientes térmicos que são inerentes ao processo L-PBF, que levam as alterações na microestrutura, em comparação com o mesmo material obtido por métodos convencionais. Para a liga AlSi10Mg, essa mudança na microestrutura mostra-se vantajosa em termo de resistência mecânica. No entanto, uma abordagem para controlar as alterações na microestrutura, isto é, reduzir os gradientes térmicos, passa por reduzir a energia ou aumentar a velocidade do laser, caso necessário,

deve-se aumentar a linha de impressão (raio do laser) ou aumentar a espessura da camada. Os gradientes térmicos também são os responsáveis pela introdução de tensões residuais, devido ao aquecimento localizado que o material sofre e nesse sentido é impossível produzir uma peça sem tensões residuais. Até o momento, é possível reduzir as tensões residuais aplicando um pré-aquecimento dos pó, ou com a redução da dimensão do laser, e ainda através de pós-tratamento térmicos de alívio de tensões (Fernandes, 2021).

2.3. Integridade estrutural dos materiais à fadiga

Integridade estrutural de uma peça ou equipamento concerne a capacidade desta peça suportar cargas sem se deformar, fissurar ou fraturar comprometendo sua capacidade de desempenho/performance na qual foi projetada.

Esta dissertação, foca-se na integridade estrutural de pedaleiras de bicicleta em relação fenômeno de fadiga. Este fenômeno responsável por cerca de 80 a 90% das roturas em peças ou equipamentos sujeitos a esforços mecânicos, normalmente cargas dinâmicas, e operando em temperatura ambiente (Ferreira & Borrego, 2023).

Por definição, fadiga é um fenômeno que resulta das alterações progressivas e permanentes na microestrutura do material devido a solicitações dinâmicas, cargas que variam ao longo do tempo, levando à rotura para tensões inferiores à tensão de rotura ou ainda tensões inferiores ao limite elástico do material, dependendo da repetição do carregamento cíclico pode conduzir a fratura do material (Bancalero, 2018).

2.3.1. Processo de caracterização da fadiga

Ferreira e Borrego (2023) afirmam que o mecanismo de rotura por fadiga inicia-se com pela nucleação de uma fissura que se propaga por ação de tensões dinâmicas (figura 2.4). Este processo é descrito em quatro fases:

1. Nucleação da fenda;
2. Crescimento microscópico;
3. Propagação da fenda;
4. Rotura final.

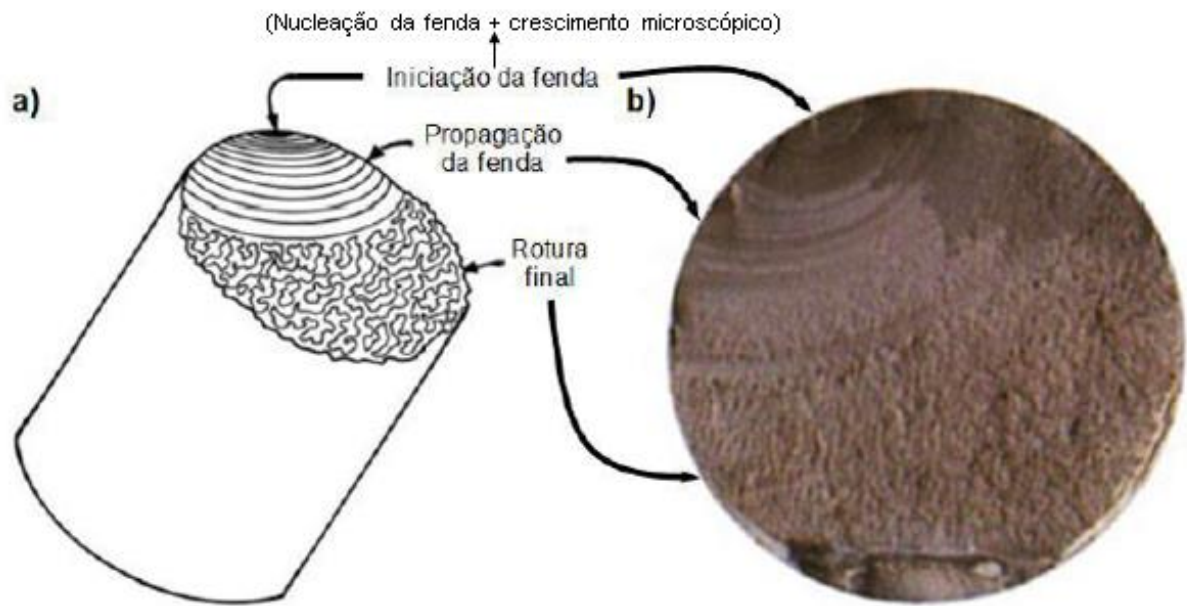


Figura 2.4 - Processo de degradação por fadiga (adaptado de Pinto, 2021)

As duas primeiras fases compreendem a fase de iniciação da fenda. Em seguida, tem a fase de propagação da fenda onde ocorre a propagação microscópica da fenda, ou seja, quando seu crescimento é visível ao olho nu. Posteriormente com o avanço progressivo e localizado das fendas, leva a rotura do material, muitas vezes de forma súbita. Sendo assim, a vida de uma peça à fadiga pode ser descrita como o número de ciclos da fase da iniciação da fenda mais a fase de propagação, constituído assim, o número de ciclos de rotura.

2.3.2. Solicitações de fadiga

O fenómeno de fadiga ocorre quando existem carregamentos dinâmicos, ou seja, variação da tensão com o tempo ou com número de ciclos de aplicação durante deste carregamento, como esquematizado na figura 2.5.

Ferreira e Borrego (2023) informam que os ciclos de fadiga podem ser agrupados de acordo a amplitude de tensão durante o carregamento:

1. Ciclos de amplitude de tensão constante;
2. Ciclos de amplitude de tensão variável.

Os ciclos de amplitude constante são todos iguais e diferentes nos ciclos de amplitude variável. Os ciclos de amplitude constante verificam-se normalmente

em mecanismos que trabalham a velocidade constante, tais como: veios, cames, rolamentos, engrenagens, polias, etc. No entanto, os problemas de fadiga atuais das estruturas e componentes estão mais associados a cargas/deformações aleatórias.

Os ciclos de tensão/deformação são caracterizados pela razão de tensões/deformações, R , dada pela seguinte equação:

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = \frac{\varepsilon_{min}}{\varepsilon_{max}} \quad [2.1]$$

Em que σ_{min} e σ_{max} são os valores de tensão mínimo e máximo de tensão, e ε_{min} e ε_{max} , são os valores mínimo e máximo de deformação, respetivamente. Os ciclos mais encontrados na prática são caracterizados por $R \geq 0$, ciclo pulsante e no caso de $R = -1$, o ciclo alternado, é muito usado para se estudar um novo material.

Os ciclos de tensão constante podem ser:

- Alternados puros;
- Repetidos;
- Pulsante.

O ciclo alternado puro é um caso particular dos ciclos alternados e pode ser caracterizado por $\sigma_m = 0$ ou $\sigma_{max} = -\sigma_{min}$ ou ainda $R = -1$. O ciclo pulsante é caracterizado por $\sigma_{min} = 0$ ou $R = 0$.

Os ciclos de tensão aleatório podem ser:

- Por blocos;
- Aleatórios.

Os ciclos de amplitude variável por blocos consistem numa sucessão de vários blocos com amplitude constante. Cada bloco é caracterizado pela tensão máxima e mínima e pelo número de ciclos. Os ciclos de tensões aleatórios não apresentam nenhuma lei definida entre a tensão e o tempo, sendo também, os mais difíceis de analisar, pelo que muitas vezes, por simplificação, é tratado como um ciclo de amplitude de tensão constante com certa margem de segurança.

Para além disso, como caracterização dos ciclos de tensão, são utilizados outros parâmetros como gama de tensão, $\Delta\sigma$, como mostra a equação 2:

$$\Delta\sigma = \sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n} \quad [2.2]$$

A figura 2.5 mostra os ciclos de tensão de amplitude constante e variável, caracterizados por tensões máximas e mínimas.

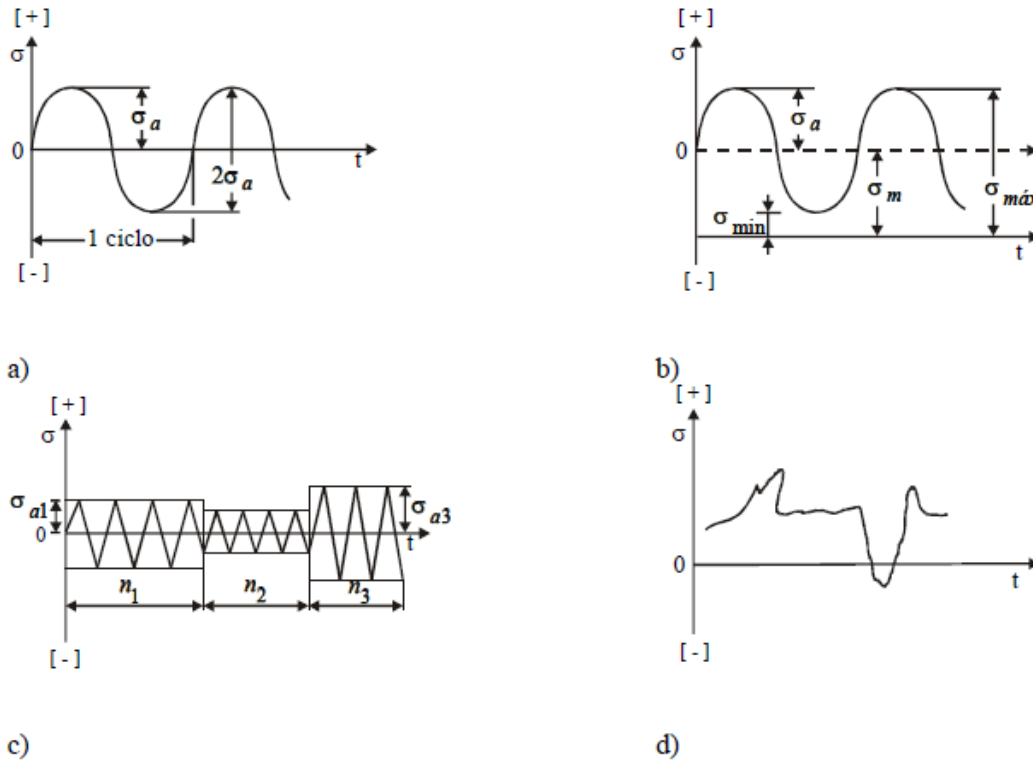


Figura 2.5 - Ciclos de fadiga: a) alternado b) pulsante c) por blocos d) aleatório (Ferreira e Borrego, 2023)

Em que $\sigma_{m\acute{a}x}$ e $\sigma_{m\acute{i}n}$, são os valores de tensões máxima e mínima durante o ciclo de tensão. Através desses valores é possível calcular a amplitude de tensão, σ_a e tensão média, σ_m , com as equações 3 e 4, respetivamente.

$$\sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n}}{2} \quad [2.3]$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} + \sigma_{m\acute{i}n}}{2} \quad [2.4]$$

Em muitos casos, nos ensaios de fadiga, a variável de controlo é a deformação, sendo então necessário desenvolver expressões análogas às anteriores, como a

gama de deformação, $\Delta\varepsilon$, amplitude de deformação, ε_a , e deformação média, ε_m , como mostram as equações 5, 6 e 7, respetivamente.

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_{m\acute{a}x} - \varepsilon_{m\acute{i}n} \quad [2.5]$$

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\varepsilon_{m\acute{a}x} - \varepsilon_{m\acute{i}n}}{2} \quad [2.6]$$

$$\varepsilon_m = \frac{\varepsilon_{m\acute{a}x} + \varepsilon_{m\acute{i}n}}{2} \quad [2.7]$$

Em que $\varepsilon_{m\acute{a}x}$ e $\varepsilon_{m\acute{i}n}$, são a deformação máxima e mínima, durante os ciclos de carga.

Portanto, estas são as variáveis gerais, a ter em conta ao realizar ensaio de fadiga à um material, de acordo os parâmetros pré-estabelecidos. Dependendo do que se quer observar, é importante definir corretamente os parâmetros de cada tipo de ensaio, sendo que há diferentes tipos de ensaios para avaliar o comportamento do material à fadiga.

2.3.3. Ensaio de Fadiga

Ferreira e Borrego (2023) reiteram que os ensaios de fadiga são normalmente apresentados através das curvas S-N, em que no eixo vertical é representado a amplitude de tensão ou gama de tensão e no eixo horizontal, o número de ciclos até a rotura do provete ou componente. Estas curvas são apresentadas em escalas bi-logarítmicas, e de modo geral, segundo uma reta (figura 2.6). Para obtenção de uma curva S-N realiza-se vários ensaios, aproximadamente vinte ensaios, em provetes ou componentes de mesma geometria e acabamento. Os componentes ou provetes são ensaiados para vários valores de amplitude de tensão, mas nas mesmas condições de ensaio. Anota-se o valor nominal de amplitude de tensão e número de ciclos de rotura.

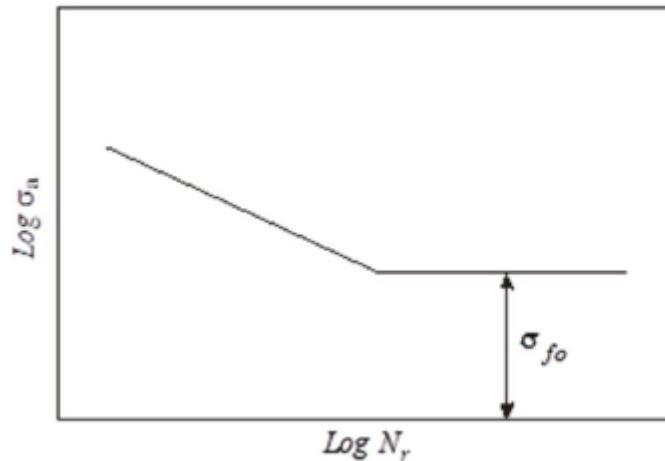


Figura 2.6 - Curva S-N (Ferreira & Borrego, 2023)

A curva S-N são do tipo:

$$\log \sigma_a = \log B + c \log N_r \quad [2.8]$$

Ou seja,

$$\sigma_a N_r^c = B \quad [2.9]$$

Em que:

B e C são constantes do material.

Estas curvas, geralmente são horizontais em uma certa tensão de limite, σ_{fo} , chamada de tensão de limite de fadiga ou resistência a fadiga, na qual para tensões abaixo deste valor o material tem vida infinita. Nos aços a curva S-N torna-se horizontal para ciclos de tensões entre 2×10^6 e 2×10^7 ciclos, dependendo da microestrutura do material. Em alguns materiais não ferrosos como os alumínio, magnésio e ligas de cobre a curva S-N decresce continuamente não apresentando um valor de limite de fadiga. Os materiais que não apresentam um valor verdadeiro de limite de fadiga, como por exemplo as ligas de alumínio, define-se um de limite de fadiga que corresponde uma vida de 10^8 ciclos de tensão (Ferreira & Borrego, 2023).

Ferreira e Borrego (2023) afirmam que a curva S-N apresenta duas regiões com comportamentos distintos. Uma região com ciclos de tensão entre 10^4 - 10^5 ciclos, designada de fadiga oligocíclica ou fadiga de curta duração e outra região com

ciclos de tensão superiores a 10^4 - 10^5 ciclos, designada fadiga de longa duração. Na fadiga oligocíclica as tensões são predominantes plásticas, sendo o comportamento à fadiga controlado pela deformação plástica. Na fadiga de longa duração as tensões nominais são normalmente inferiores a tensão de cedência ocorrendo deformação plástica apenas numa região localizada na ponta da fenda ou do entalhe.

Os resultados dos ensaios de fadiga apresentam, de modo geral, uma grande dispersão por diversos motivos como acabamento superficial e dimensões dos provetes ou componentes, defeitos do material, precisão das máquinas de ensaios, etc. Para a mesma tensão de ensaio podem-se obter durações muito diferentes, sendo necessário fazer uma análise estática dos resultados. Esta análise pode ser feita considerando uma distribuição de Gauss ou normal para uma determinada duração constante. Assim, definem-se curvas S-N para várias probabilidades de rotura. À medida que a probabilidade de rotura diminui obtêm-se curvas para projeto mais baixas. A curva de referência geralmente é a curva média, que corresponde uma probabilidade de rotura de 50% (Ferreira & Borrego, 2023)

Os ensaios nos provetes ou componentes têm solicitações, tais como:

- Flexão Alternada;
- Flexão Plana;
- Torção Plana;
- Tração-Compressão alternada ou pulsante.

Em casos mais específicos é realizar ensaios biaxiais, para condições de serviço especiais, contudo estes são mais exigentes, tanto na parte económica como na montagem.

3. MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

Esta dissertação aborda o estudo do comportamento à fadiga de três pedaleiras, uma de liga de alumínio 6061-T6 fabricada pela marca Miranda® para comparação, uma outra feita da liga AlSi10Mg sem tratamento térmico e uma de liga da AlSi10Mg com tratamento térmico de alívio de tensões à 250°C, ambas produzida por L-PBF.

Para este projeto inicialmente teve-se que projetar no Solidworks® a pedaleira de alumínio 6061-T6 (figura 3.1), sendo que a figura 4.18 mostra uma melhor descrição das dimensões da pedaleira em folha 2D. Deste modo, foi usada esta geometria como modelo padrão para posteriormente serem realizados estudos de otimização topológica usando o Método dos Elementos Finitos (MEF) para obter um modelo final da pedaleira com massa reduzida para ser processada por L-PBF.

Os procedimentos experimentais serão realizados no Laboratório de Construções Mecânicas, no Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

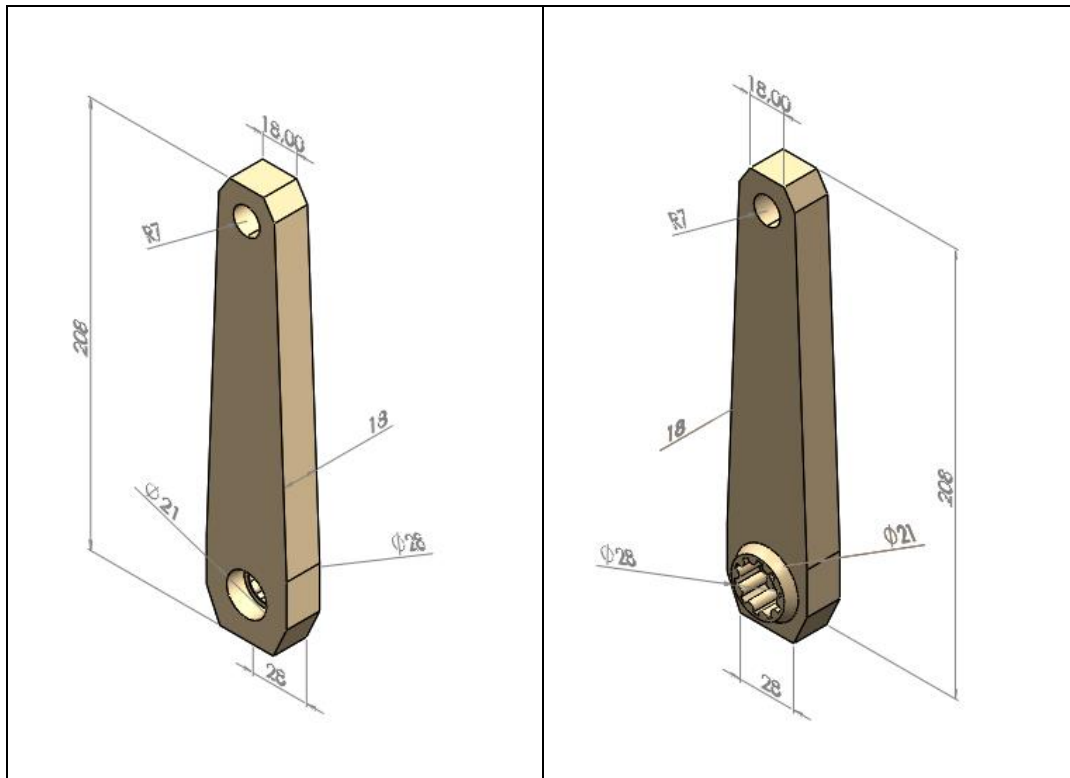


Figura 3.1 - Geometria da pedaleira padrão no Solidworks®

3.1. Caracterização do material da pedaleira AlSi10Mg

A produção da pedaleira de AlSi10Mg processada por SLM foi realizada pela empresa Aluport, com sede em Águeda, Aveiro. A máquina usada na produção dos componentes foi uma “Renishaw”, modelo AM 400, com um feixe de laser com potência máxima de 400 W. A potência usada na produção da pedaleira foi de 350 W, com feixe de laser de 30 μm , com uma velocidade de 1,8 m/s, com espessura de camada de 30 μm . O tamanho das partículas de pó para o fabrico da pedaleira tem uma granulometria entre 25 - 75 μm e a composição química da é descrita na tabela abaixo, de acordo a norma DIN EN 1706 (EN AC-4300).

Na tabela 3.1 mostra-se a composição química do AlSi10Mg, com respetiva percentagem de cada elemento de liga.

Tabela 3.1 - Composição química do AlSi10Mg (% em peso) (adaptado de EOS aluminium AlSi10Mg, 2022)

Elemento químico	Fração mássica (%)
Al	Restante
Si	9,0 -10,0
Mg	0,25 – 0,45
Zn	1,0
Fe	0,55
Mn	0,45
Ti	0,15
Ni	0,05
Cu	0,05
Pb	0,05
Sn	0,05

Deste modo, observa-se que a liga de AlSi10Mg tem em sua maior constituição de alumínio que oferece uma característica leve e boa resistência à corrosão. O silício proporciona fluidez durante o processo de manufatura e melhora a capacidade de fundição do material. O magnésio essencialmente garante o aumento de resistência mecânica e outras propriedades mecânicas. Outros elementos químicos em baixas quantidades, mas importantes como o zinco, que garante resistência mecânica e oferece a possibilidade de tratamento térmico favorável na liga.

As aplicações da liga AlSi10Mg, inclui componentes da indústria aeroespacial, tais como, partes estruturais, componentes dos motores, suportes e carcaças. A liga é também largamente usada na indústria automóvel em componentes de motores, suportes, coletores de admissão e dissipadores de calor.

Portanto, é possível constatar que a liga AlSi10Mg é bastante útil e extensivamente usada em grandes aplicações de engenharia, que são fundamentais em componentes de máquinas aeronáuticas e automóveis que fazem parte do nosso quotidiano.

3.2. Norma para ensaio de fadiga com pedaleiras

Para certificação dos ensaios realizados no laboratório foi feita uma revisão na literatura sobre ensaios de fadiga tração-compressão numa pedaleira. Encontrou-se a norma NP EN ISO 4210-8:2019. A figura 3.2, mostra o ensaio que simula as forças com a pedaleira à 45° com a horizontal, escolheu-se este ensaio para realizar os estudos de otimização topológica e de fadiga, visto que as componentes das forças nos dois planos são iguais que simplifica as simulações. As forças dinâmicas para estudos de Método dos Elementos Finitos verticais, F_2 , foi de 1800N, atuando alternadamente no eixo do pedal à 65 mm do plano central da pedaleira (IPQ, 2019).

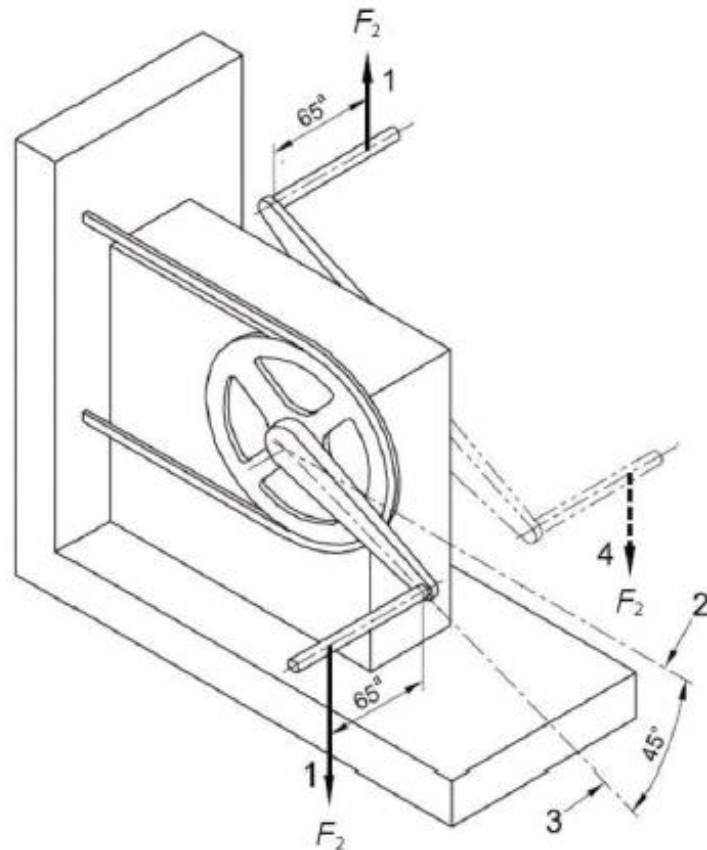


Figura 3.2 - Ensaio de fadiga em MEF com pedaleira à 45° com a horizontal (adaptado de IPQ, 2019)

Sendo que os números representam:

1. Força de ensaio repetidas;
2. Eixo horizontal;
3. Eixo da pedaleira;
4. Posição alternativa da pedaleira esquerda (medida da face externa da pedaleira).

A figura 3.3, mostra o ensaio que simula as forças com a pedaleira à 30° com a horizontal, escolheu-se este ensaio para realizar os ensaios experimentais de fadiga porque se enquadra com o mecanismo de ensaio projetado e a máquina de ensaio.

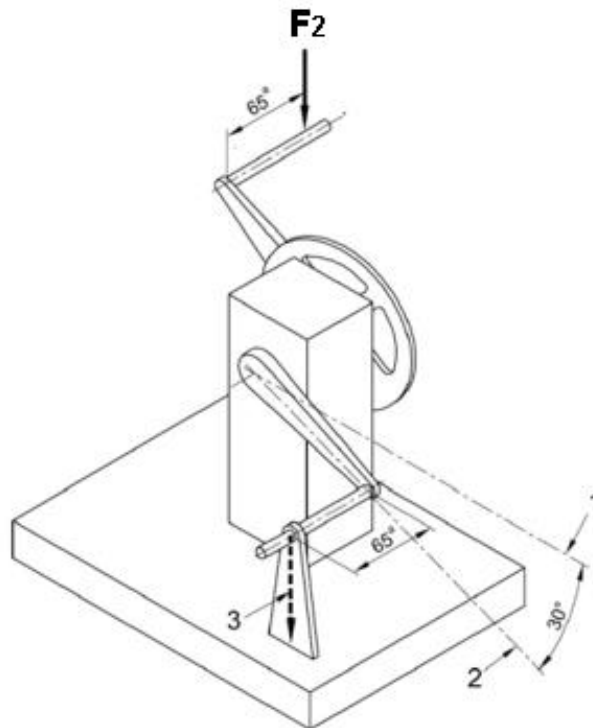


Figura 3.3 - Ensaio de fadiga com pedaleira à 30° com a horizontal (adaptado de IPQ, 2019)

Sendo que os números representam:

1. Eixo horizontal;
2. Eixo da pedaleira;
3. Força de ensaio aplicada no eixo da pedaleira (medida da face externa da pedaleira).

Portanto para os ensaios experimentais de fadiga do projeto será estudado o caso que envolve bicicletas de cidade e passeio com carga aplicada de 1300 N e com uma expectativa de vida de 100 000 ciclos de ensaio, mostrado na tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Forças no eixo do pedal e ciclos de ensaio

Tipo de bicicleta	Bicicletas de cidade e passeio	Bicicletas para jovem adulto	Bicicletas de montanha	Bicicletas de corrida
Força, F_2	1300	1300	1800	1800
Ciclos de ensaio, C	100 000	100 000	50 000	100 000

3.2.1. Projeto do mecanismo de ensaio da pedaleira

Para elaboração do mecanismo de ensaio da pedaleira foi usado o Solidworks®, desde modo foi possível definir a geometria de cada peça da estrutura (figura 3.4), sendo que no Apêndice da dissertação mostra-se detalhadamente as dimensões de cada peça em desenho técnico de folha 2D. Primeiramente foi necessário projetar uma base com uma espessura suficiente, cerca de 10 mm, para garantir para os esforços resultantes dos ciclos de carga não flexionassem ou torcessem a base a ser fixada na máquina de ensaio de fadiga, Instron Electroplus E10000.

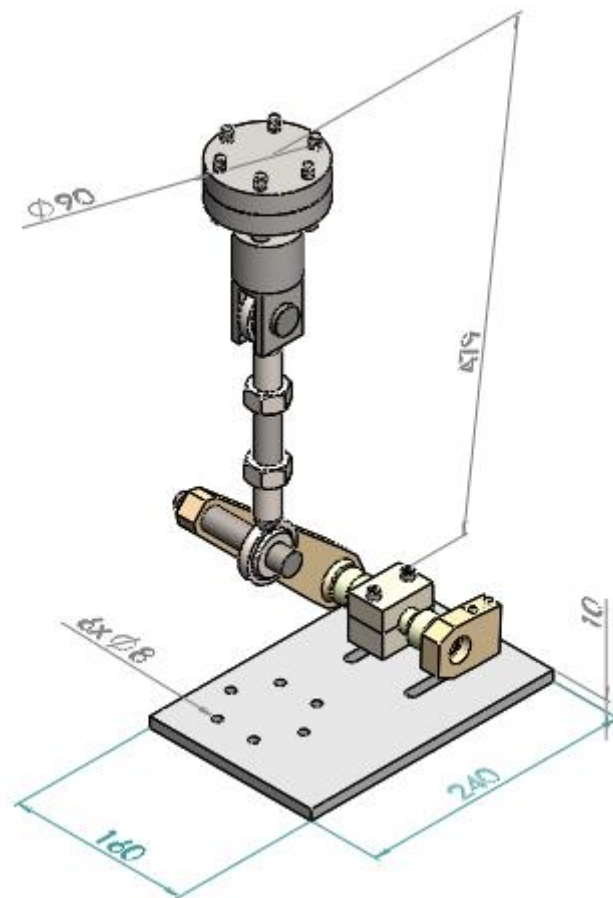


Figura 3.4 - Mecanismo de ensaio da pedaleira no SolidWorks®

Na base ainda foram feitos dois furos passantes em forma de ranhuras, onde têm duas ligações não permanentes por parafusos, para fixação de dois suportes, estes que fixam o elo de ligação da pedaleira. Foram feitos seis furos na base para alinhar a estrutura com as bolachas do suporte de cima da máquina de ensaio. Projetou-se, duas rotulas com um eixo roscado, para acoplar o eixo da

pedaleira de modo a transmitir os ciclos de força aplicados pela máquina de ensaio na pedaleira. Maiores detalhes das peças do mecanismo de ensaio encontram-se nos apêndices deste documento. Algumas peças do mecanismo de ensaio foram maquinadas num torno convencional, máquina CNC com três e cinco eixos no Laboratório de Tecnologia Oficinal no ISEC, e as restantes já se encontravam no Laboratório de Construções Mecânicas na FCTUC.

3.3. Dados experimentais de curvas S-N para ensaio de fadiga por MEF

Para realizar simulação de ensaio de fadiga por MEF de uma pedaleira de AlSi10Mg, foi necessário consultar a literatura. Deste modo, encontrou-se o artigo de Fernandes *et al.* (2024), *Notch Sensitivity and Heat Treatment Effect on the Fatigue Behavior of AlSi10Mg Aluminium Alloy Processed by additive manufacturing* e extraíram-se os dados através de duas curvas S-N (figura 3.5).

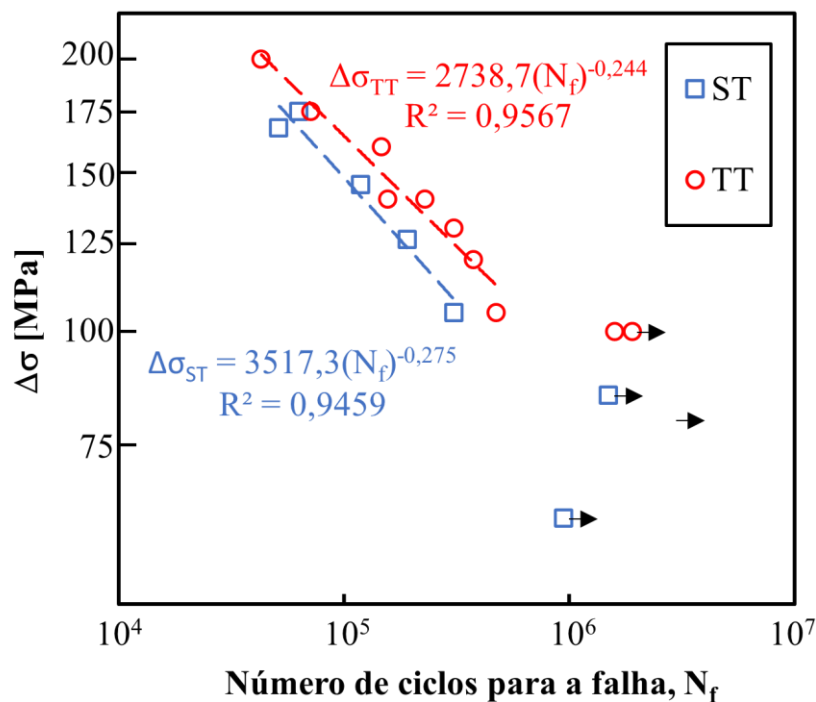


Figura 3.5 - Curva S-N para análise de fadiga por MEF do projeto (adaptado de Fernandes *et al.*, 2024)

A curva azul representa ensaios de provetes de AlSi10Mg sem tratamento térmico (ST) e curva vermelha (TT) representa ensaios de provetes AlSi10Mg com tratamento térmico de alívio de tensões à 250°C.

O gráfico na figura 3.5, representa a gama de tensão, $\Delta\sigma$, em função dos números de ciclos para a falha, N_f , para ciclos repetidos, ou seja, $R=0$. A curva TT representa um tratamento térmico de alívio de tensões à 250°C durante duas horas seguido de um arrefecimento à água. Esta curva TT apresenta em relação a curva ST maiores valores de ciclos de rotura para tensões similares, aproximadamente aumento de 11% em relação à resistência a fadiga para vidas curtas e cerca de 15% em relação aos ciclos da fadiga de longa duração (Fernandes *et al.*, 2024).

Para simulação de ensaio de fadiga no Autodesk Inventor Nastran® é necessário definir alguns parâmetros de fadiga como mostra a tabela 3.3 e tabela 3.4.

Tabela 3.3 - Parâmetros de simulação da pedaleira por MEF

Parâmetros de fadiga	Valor (Unidades)
B	0,275
S_u	85 MPa
N₀	60 000 ciclos
K_f	0,75
Be	1
Se	50 MPa

O parâmetro B, representa a inclinação da curva S-N antes de atingir a resistência a fadiga do material. O parâmetro S_u representa a tensão necessária para atingir N₀=60000 ciclos de tensão, o N₀ representa o número de ciclos do material.

Ainda é possível observar o parâmetro K_f representa o fator de acabamento superficial de comportamento a fadiga, que representa os efeitos de redução da vida do material.

A tabela 3.4, mostra de forma resumida os parâmetros das equações que descrevem as curvas ST e TT no gráfico. Tem-se o coeficiente de resistência cíclica, σ'_f , e expoente de resistência cíclica, b. O parâmetro R representa o

coeficiente de correlação de pearson, que mede o grau de correlação linear entre duas variáveis quantitativas.

Tabela 3.4 - Constantes da curva S-N (adaptado de Fernandes, 2021)

Provetes	σ'_f	b	R
Sem Tratamento (ST)	3517	-0,275	0.95
Tratamento Térmico (TT)	2738	-0,244	0,96

4. OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA DA PEDALEIRA POR MEF

A otimização topológica consiste em obter uma nova geometria de um componente, reduzindo a massa do material sem comprometer suas propriedades mecânicas, essencialmente a rigidez. Deste modo, nessa dissertação projetou-se uma geometria padrão da pedaleira de liga de alumínio de 6061-T6 da marca Miranda® com auxílio do SolidWorks®, como já mostrado na figura 3.1.

Esta foi a geometria padrão desenvolvida que serviu de base para estudos de Análise de Elementos Finitos, em inglês *Finite Element Analysis (FEA)* com auxílio de ferramentas como o SolidWorks® e Autodesk Inventor®.

Posteriormente, para a realização dos estudos de otimização topológica optou-se pelo software Autodesk Inventor®, tendo em vista os estudos de Análise de Elementos Finitos (FEA) subsequentes de tensões e fadiga, sendo que o Inventor possui uma calculadora muito forte para simulações de elementos finitos, denominada Autodesk Inventor Nastran®.

Assim sendo, com o modelo da pedaleira criado no Autodesk Inventor® selecionou-se o comando *Shape Generator*, para realizar as simulações de otimização topológica. Primeiramente, definiu-se o material para o estudo, foi escolhido o Alumínio AlSi10Mg, com as propriedades mecânicas descritas na tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Propriedades mecânicas do Alumínio AlSi10Mg

Propriedades do Alumínio AlSi10Mg	Valor (Unidades)
Módulo de elasticidade	68,9 GPA
Coefficiente de Poisson	0,33
Massa específica	2,7 g/cm ³
Tensão de rotura	310 MPa
Tensão de cedência	275 MPa

Em seguida, definiu-se as restrições, em inglês *constraints*, da pedaleira, optou-se pela *fixed constraint*, do inglês restrição fixa, que restringe todos os 6 graus de liberdade (GDL), tornando fixa os movimentos da face selecionada do

componente. Sendo assim, foi seleccionada a face com o diâmetro inferior como mostra a figura 4.1.

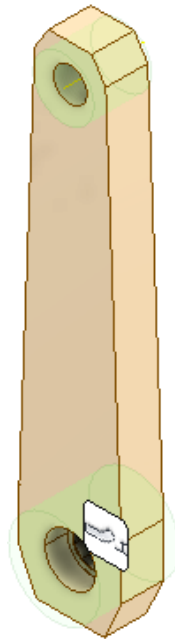


Figura 4.1 - Pedaleira com restrição fixa no Inventor®

O passo seguinte, foi definir o carregamento aplicado na pedaleira, no comando Carregamentos, em inglês *Loads*, escolheu-se a opção carga remota, em inglês *remote force*. Seleccionou-se a face interior do diâmetro superior e definiu-se a magnitude da carga de 1800 N à 65 mm do plano central da pedaleira (figura 4.2).

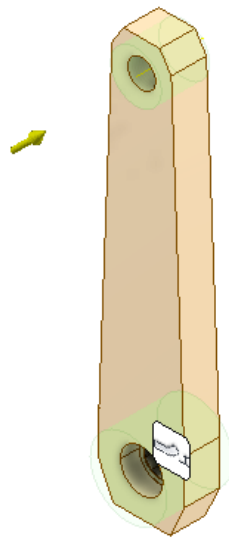


Figura 4.2 - Pedaleira com força remota aplicada

Em seguida, definiu-se as regiões preservadas, em inglês *preserve regions*, que são as regiões com círculos levemente amareladas, no qual foram selecionadas as regiões em que o software não deve retirar material. Escolheu-se duas regiões críticas que foram os furos, por razões de segurança para não comprometer as exigências funcionais da pedaleira, como mostra a figura 4.3.

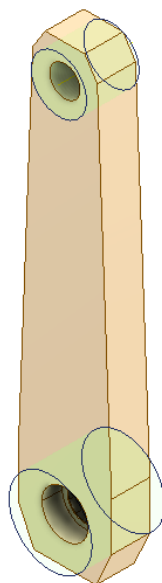


Figura 4.3 - Regiões preservadas na pedaleira

Foi necessário definir planos de simetria, em inglês *Symmetry planes*, para uma melhor distribuição de massa retirada da pedaleira, como mostra a figura 4.4.

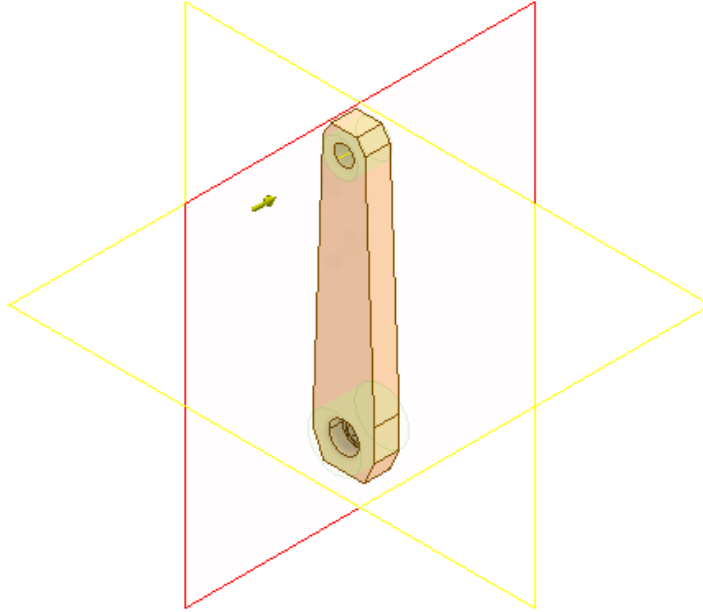


Figura 4.4 - Planos de simetria na pedaleira do projeto

Por fim, usou-se o comando malha, em inglês *Mesh*, para gerar uma geometria de pedaleira dividida em pequenos elementos finitos com a forma triangular, de aproximadamente 0.2 mm, com cerca de 207 404 nós e 127 456 elementos, de modo que o computador executasse a simulação (figura 4.5).

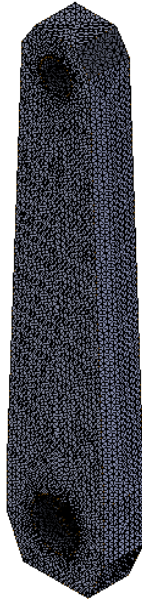


Figura 4.5 - Geometria da pedaleira malhada

4.1. Primeira geometria da otimização topológica da pedaleira

Foi realizada a primeira simulação da pedaleira (figura 4.6), sendo necessário definir no comando *Shape generations settings*, a percentagem de massa a ser reduzida da geometria padrão.

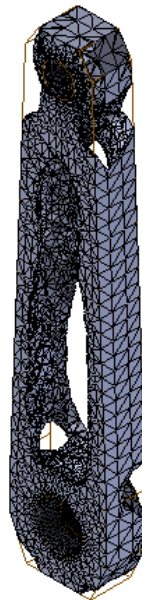


Figura 4.6 - 1ª Simulação do shape generator da pedaleira

A geometria padrão tem uma massa original de 335 g, e para primeira simulação escolheu-se uma redução em 51% da massa, ou seja, escolheu-se obter uma

nova massa de 164 g. A primeira simulação produziu a geometria já mostrada na figura 4.6.

Pode-se observar que o software gerou uma geometria com material removido mais ao centro, deixando mais material nas laterais. As regiões com material removido pelo software mostram partes da pedaleira com tensões baixas, desse modo, não contribuiu muito para rigidez da peça, assim o programa aproveita estas regiões como potenciais zonas para retirar material sem comprometer muito a rigidez da peça.

4.2. Segunda geometria da otimização topológica da pedaleira

A segunda simulação escolheu-se reduzir em 64%, obtendo uma massa de 121 g, sendo a geometria muito similar a gerada na primeira simulação (figura 4.7).



Figura 4.7 - 2ª Simulação do shape generator da pedaleira

É possível observar que a segunda geometria gerada foi semelhante a primeira, mas com pequenas diferenças, na qual se removeu mais material nas laterais da pedaleira e retirando um pouco de material no topo e na base, embora de uma forma não muito nítida.

Então, constatou-se que com o aumento do valor da redução da massa definida, o programa procurou regiões mais próximas na geometria anterior para retirar material, oferecendo ao *designer* uma maior flexibilidade e de certa forma liberdade de obter uma geometria mais próxima do que se procura para o projeto.

É importante realçar que a geometria fornecida pelo programa não é definitiva, ou seja, o programa somente propõe uma geometria reduzida da massa, não significa que a geometria dada vai cumprir diretamente logo para as exigências funcionais da peça durante a sua definição, tais como, restrições de deformação e tensão de cedência, de resistência ou rotura.

Portanto, após a geometria gerada pelo *Shape Generator*, é necessário realizar testes de análise de tensões para verificar, no novo modelo, se as tensões e deformações não ultrapassam as restrições do projeto, como tensão de cedência do material ou uma deformação limite definida na fase do projeto

4.3. Terceira geometria da otimização topológica da pedaleira

A terceira simulação, foi a mais extrema dos testes realizados no programa, então escolheu-se uma redução da massa em 75%, gerando uma nova massa de 85,2 g para a pedaleira (figura 4.8).



Figura 4.8 - 3ª Simulação do shape generator da pedaleira

A terceira simulação gerou ainda mais remoção de material, como era esperado, devido aumento de massa reduzida requerida, tanto no centro quanto na lateral da pedaleira, mas podemos observar que as regiões preservadas continuam inalteradas em todas as simulações geradas.

A geometria gerada na terceira simulação tem características relevantes, como menor massa gerada, cerca de 85,2 g, mas, no entanto, constituiu um risco quanto as propriedades mecânicas para pedaleira, porque pode não atender as exigências funcionais de um projeto da pedaleira.

Com este modelo gerado por esta simulação pode comprometer a rigidez do material, porque removendo a massa torna a estrutura mais suscetível de deformar ou até romper quando submetidas a pequenas cargas constantes ou cíclicas.

4.4. Quarta geometria da otimização topológica da pedaleira

Para a geometria do projeto decidiu-se um valor de redução de massa inferior em comparação com o caso extremo definido, a terceira simulação, escolheu-se um valor que foi de 70% da redução da massa (figura 4.9), obtendo-se uma nova massa de 102 g para a pedaleira. Esta geometria será usada realizar os testes de análise de tensões, e posteriormente ensaios de fadiga do projeto.



Figura 4.9 – 4ª Simulação da pedaleira no shape generator

Deste modo, é possível observar que o software gerou uma geometria semelhante a anterior, mas com menos material removido. O programa deixou mais material ao centro, e deixando mais material nas laterais.

É possível observar uma enorme quantidade de material removido, comparando com a primeira e segunda simulação gerada pelo programa, mas ainda sim obteve-se uma geometria próxima das pedaleiras próxima da fabricante Miranda®. Optou-se por esta geometria porque é mais apropriada para produção da pedaleira por manufatura aditiva.

Portanto, com o modelo gerado por esta simulação corre-se menos riscos de comprometer a rigidez do material, porque apresenta menos material removido no centro e nos lados, e por expectativa do projeto espera-se que suporte cargas cíclicas que serão aplicados no modelo final.

4.4.1. Primeiro modelo da pedaleira para análise de tensões

A partir do modelo gerado no *shape generator*, voltou-se a geometria padrão da pedaleira, e removeu-se material nas regiões sugeridas pelo programa, obtendo-se o primeiro modelo, como mostra a figura 4.10.

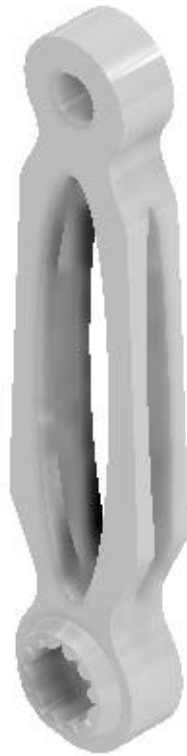


Figura 4.10 – 1º Modelo da pedaleira

Em seguida, foi realizado o teste de análise de tensões por FEA no modelo com uma carga de 1800N, gerando tensões, principalmente nas regiões onde foi removido material, entre os 400 e os 1000 MPa (figura 4.11).

Os valores ao redor da região de material removido foram muito superiores a tensão de cedência do material de 275 MPa. Ainda se constata o surgimento de altas tensões com valor máximo de 1643 MPa.

Através da análise de tensões na pedaleira observou-se que estas eram altas, portanto, esse modelo não cumpre as exigências do projeto, cujo objetivo é obter tensões abaixo da tensão de cedência do material.

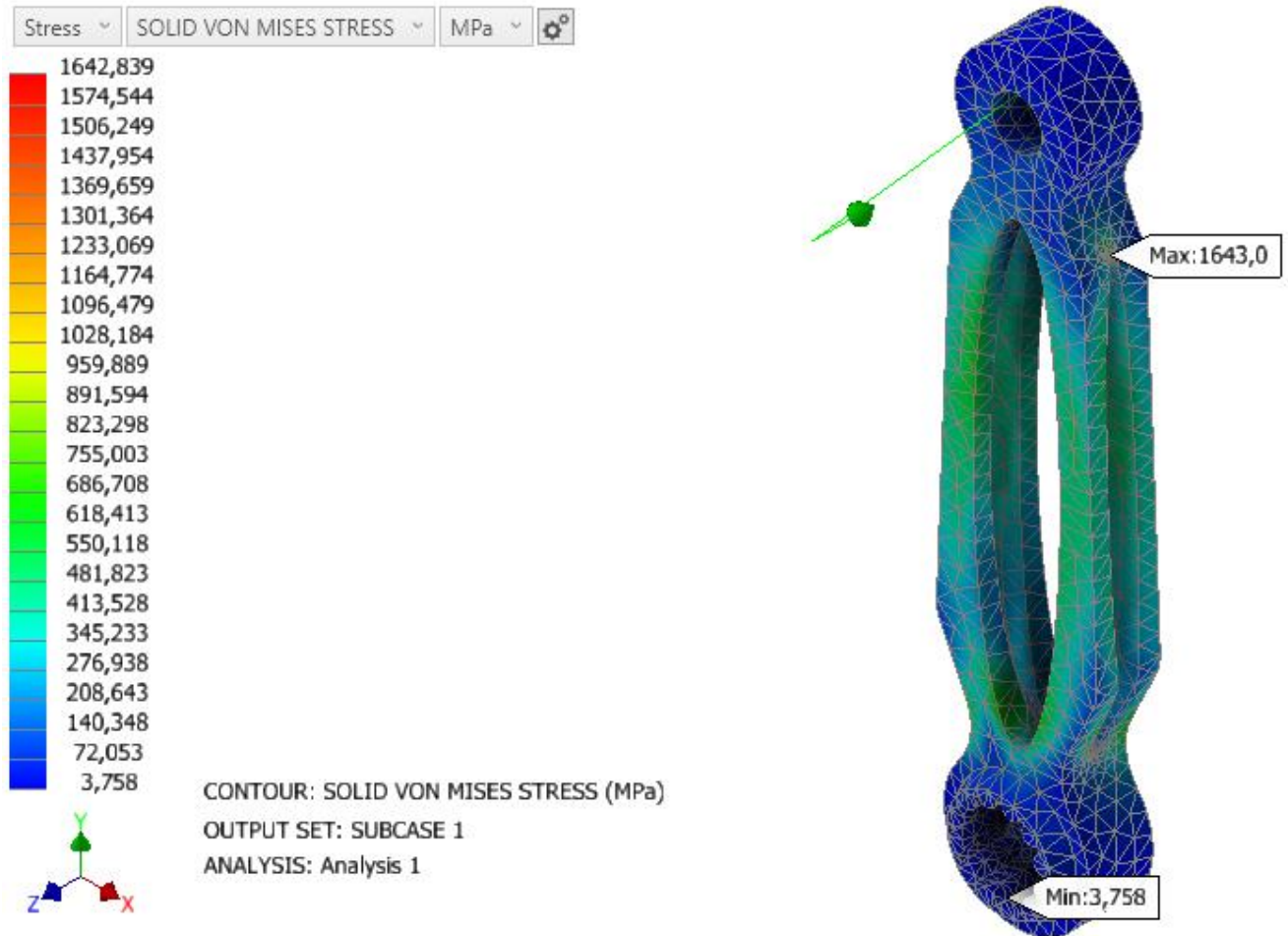


Figura 4.11 - Análise de tensões por FEA do 1º modelo do projeto

4.4.2. Segundo modelo da pedaleira para análise de tensões

Para o segundo modelo decidiu-se retirar apenas material no centro e deixar as os lados maciços, como mostra a figura 4.12.

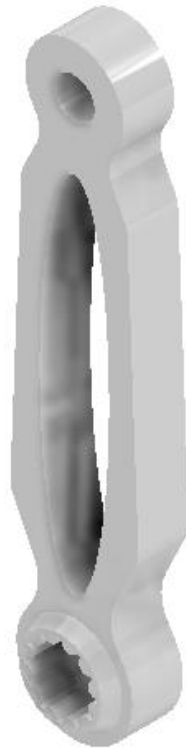


Figura 4.12 - 2º Modelo da pedaleira

A geometria deste modelo oferece mais confiabilidade de tensões, porque deixa mais massa na pedaleira para suportar a carga de 1800 N aplicada. Ainda para o segundo modelo, decidiu-se manter uma geometria com material removido mais ao centro, mas com mesma altura da abertura com filetes e exclui-se a ideia de remoção de material nas laterais, visto no primeiro modelo ter apresentado nesta zona valores de tensões elevadas acima de 1000 MPa. Existe a desvantagem de ter a peça com mais peso, mas em contrapartida garante-se que a rigidez da peça não fica comprometida e assim é aumentada a probabilidade de suportar as tensões definidas para o projeto.

Novamente para o segundo modelo, foi realizado o teste de análise de tensões por FEA no modelo com uma carga de 1800N, gerando tensões principalmente nas regiões onde foi removido material que apresentam valores entre os 135 e os 310 MPa (figura 4.13).

Assim sendo, é possível observar que as tensões foram menores em relação ao primeiro modelo, e em certas regiões ao redor da pedaleira as tensões estavam

abaixo da tensão de cedência do material, mas, no entanto, ainda continuam altas na maior parte da pedaleira e superam a tensão de cedência de 275 MPa.

Então, através da análise de tensões na pedaleira no segundo modelo observou-se que estas eram altas, portanto, esse modelo ainda não cumpre as exigências do projeto, cujo objetivo é obter tensões abaixo da tensão de cedência do material em toda a pedaleira.

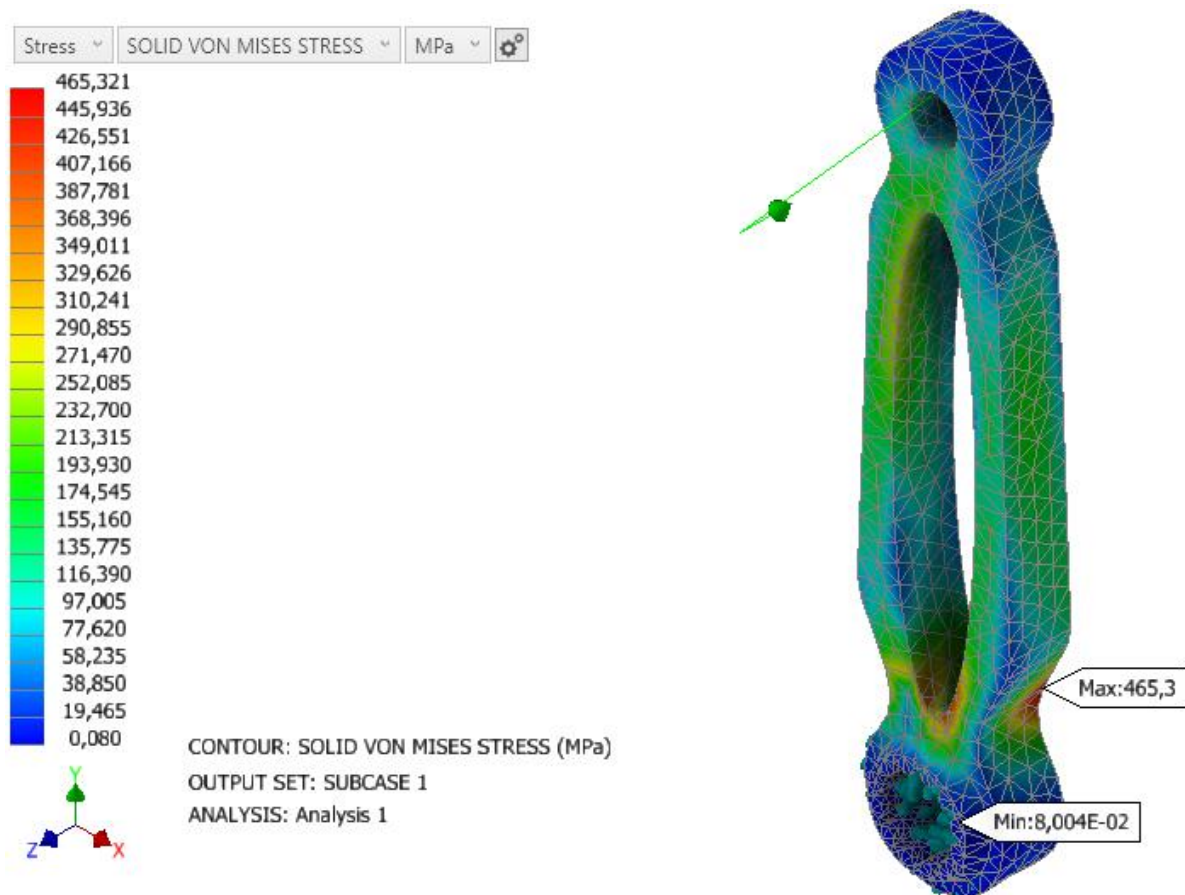


Figura 4.13 - Análise de tensões por FEA do 2º modelo do projeto

4.4.3. Terceiro modelo da pedaleira para análise de tensões

Após vários outros testes, chegou-se a terceira simulação do projeto, na qual foi obtido um modelo final da pedaleira com filetes, com uma geometria melhorada da segunda simulação, na qual se retirou material do centro, mas desta vez, diminuiu-se a altura da abertura do centro e faz-se um furo na lateral da peça, pois tinha sido observado a partir dos dados da segunda simulação que esta era uma região de baixas tensões (inferiores a 100MPa).

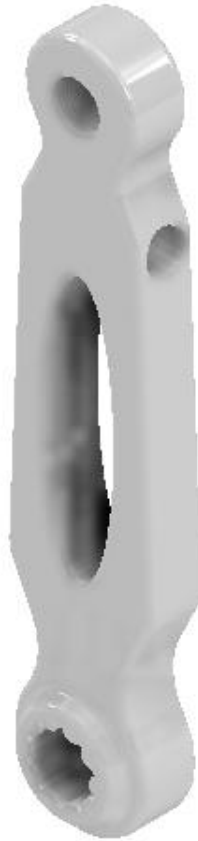


Figura 4.14 – 3º Modelo da pedaleira

A geometria do modelo final possuiu mais massa na pedaleira que o modelo gerado pelo *shape generator* adotado, tem cerca de 256 g, ou seja, foi possível reduzir 25% da massa original de 355 g da pedaleira, de modo atingir os objetivos do projeto (figura 4.14).

Para o modelo do projeto, foi realizado o teste de análise de tensões por FEA com uma carga de 1800 N, gerando tensões no redor da peça entre os 70 e os 200 MPa (figura 4.15). Deste modo, foi possível observar que as tensões geradas foram menores em relação ao modelo anterior, praticamente ao redor da pedaleira as tensões estão abaixo da tensão de cedência do material, não superam as tensões de cedência de 275 MPa.

Então, através da análise de tensões observou-se que esse modelo cumpre as exigências do projeto, cujo objetivo foi reduzir a massa da pedaleira original e obter tensões abaixo da tensão de cedência do material em grande parte da pedaleira.

Ainda se constata o surgimento de altas tensões com valor máximo de 350 MPa devido um nó não convergente, sendo assim seria necessária uma malhagem mais refinada, mas exigiria um maior tempo de simulação e uma grande capacidade de computação, então com intuito de prosseguir com os estudos neste projeto ignorou-se estes valores porque não têm representação mecânica durante o serviço da pedaleira.

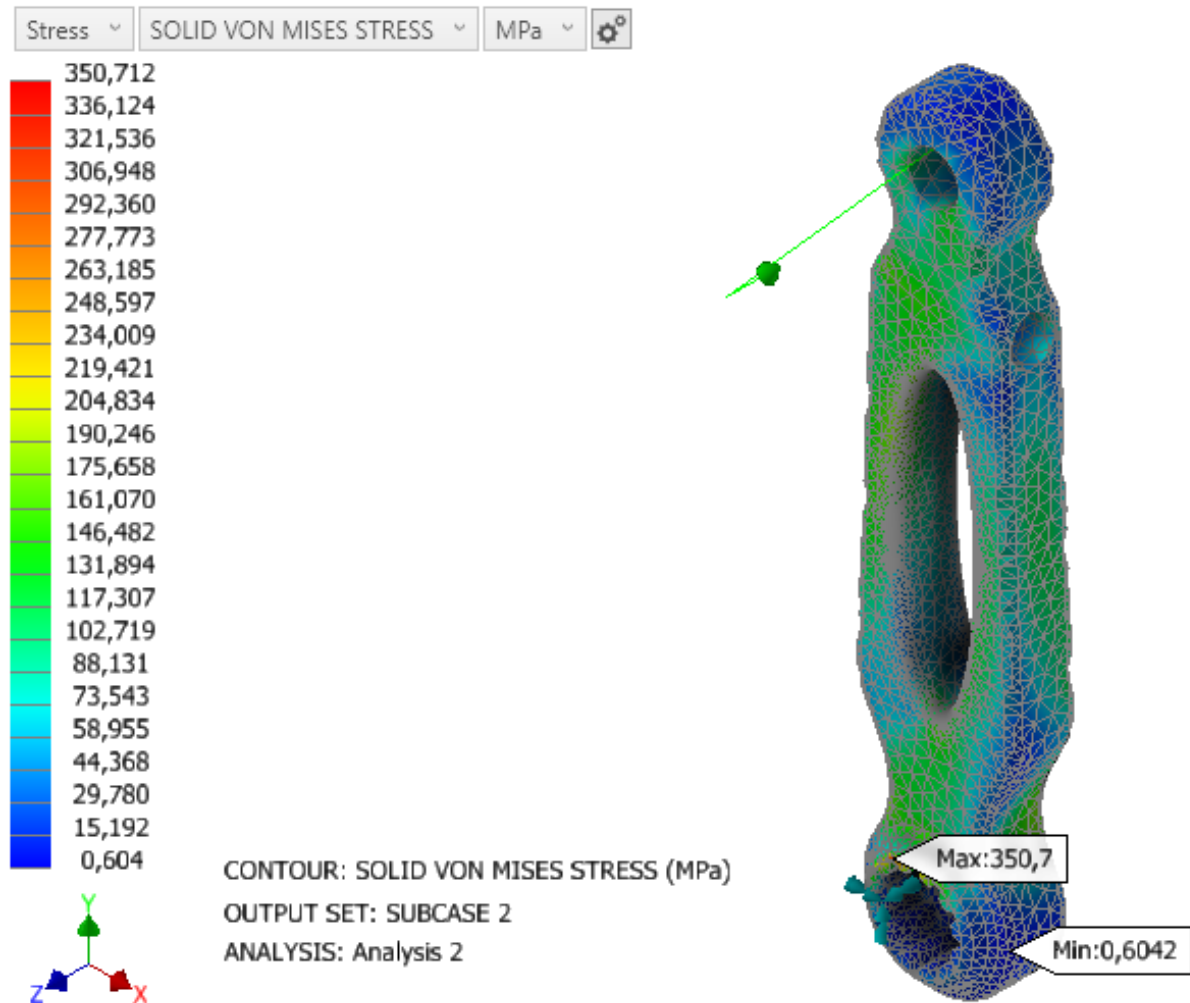


Figura 4.15 - Análise de tensões por FEA do modelo final do projeto

Para o modelo do projeto, após ter sido realizado o teste de análise de tensões por FEA com uma carga de 1800 N. Foi necessário verificar as condições de segurança do projeto, para analisar que a tensão máxima aplicada na pedaleira é inferior a tensão de cedência do material, como mostra a figura 4.16.

Observou-se que o fator de segurança, razão que relaciona a tensão de cedência do material e tensão máxima aplicada na pedaleira, é superior à 1, indicando que

a tensão máxima não ultrapassou a tensão de cedência do material, desde modo cumpre as exigências do projeto, cujo objetivo foi reduzir a massa da pedaleira original e obter tensões abaixo da tensão de cedência do material em grande parte da pedaleira.

Ainda, foi possível observar que a pedaleira poderia suportar cargas muito superiores à 1800N, atingindo valores na ordem de 100 vezes a carga aplicada.

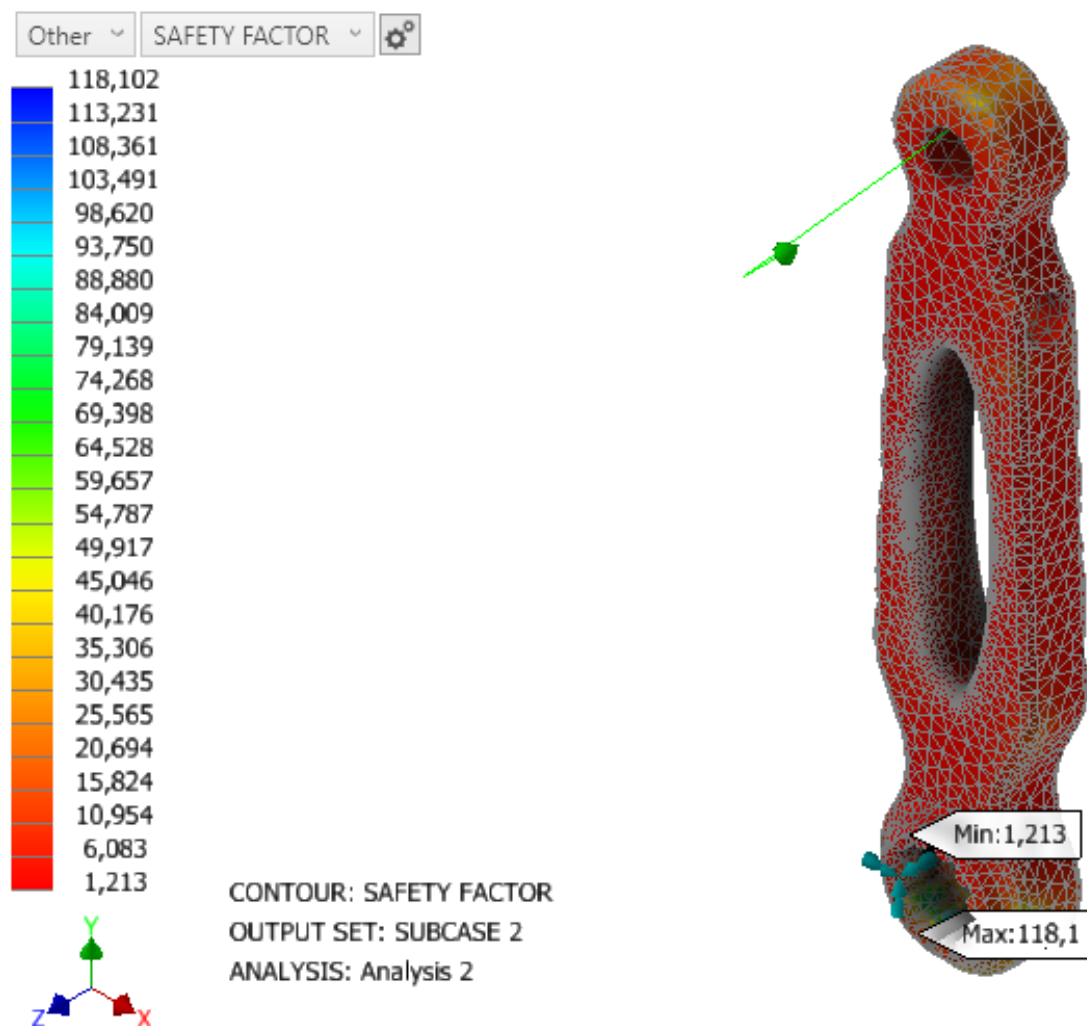


Figura 4.16 - Fator de segurança da pedaleira

4.4.4. Ensaio de fadiga da pedaleira por MEF

A partir do modelo final da pedaleira, foi realizada a análise de fadiga por FEA, na qual foram definidos os mesmos parâmetros de restrições, carregamento, malhagem e material como descritos para a análise de tensões.

Foi realizado o estudo de comportamento a fadiga da pedaleira, de modo analisar se cumpriria o caso crítico, ou seja, os 100 000 ciclos de ensaio exigidos pela norma. É possível observar na pedaleira que os ciclos ao redor da peça cumprem o objetivo do projeto, implicando assim uma vida infinita na pedaleira (figura 4.17).

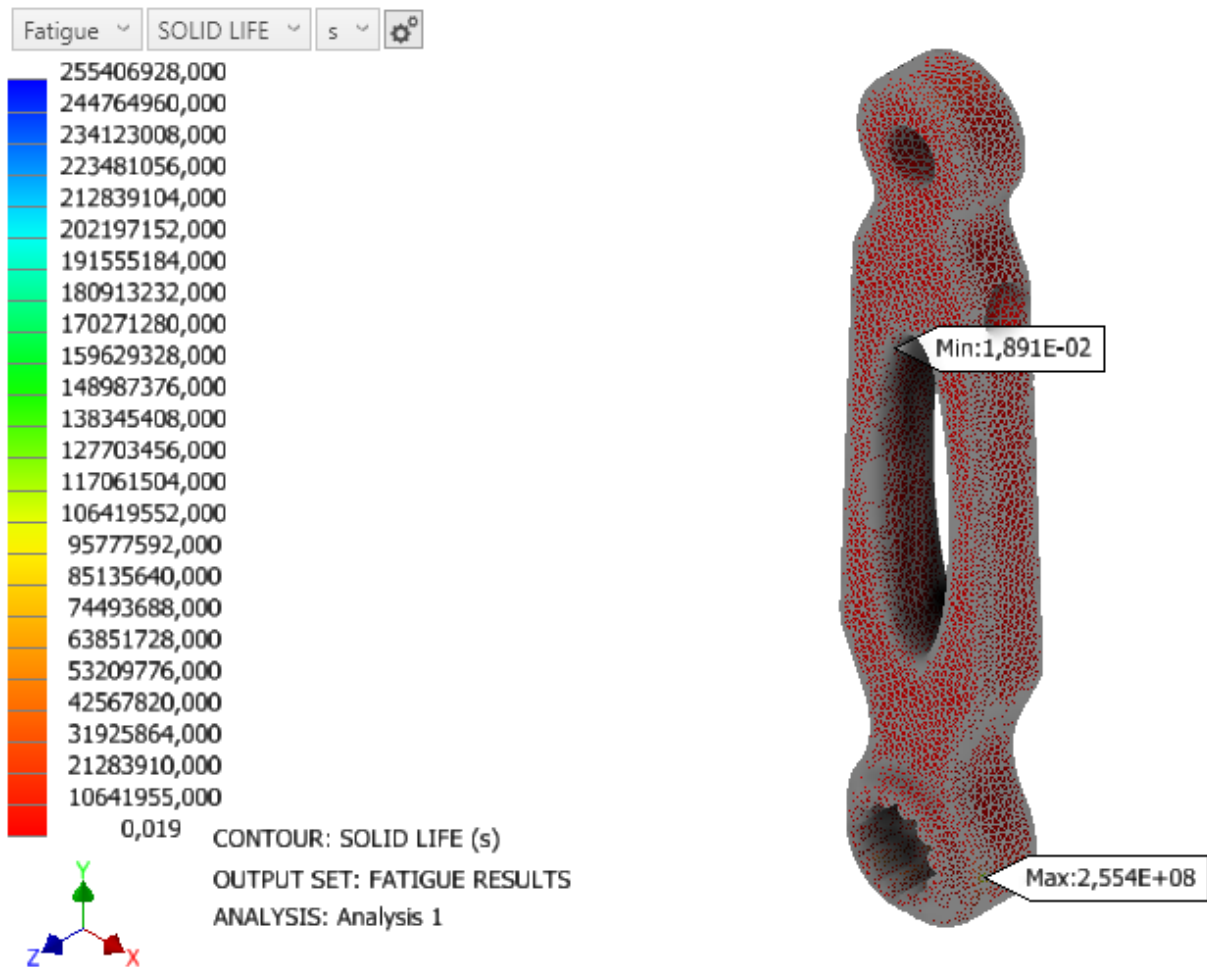


Figura 4.17 - Análise de fadiga da pedaleira por FEA

Novamente devido um nó não convergente gerou um número de ciclos de $1,0E-10$, o que poderia ser resolvido com uma malhagem mais refinada, mas exigiria um maior tempo de simulação e uma grande capacidade de computação, então

com intuito de prosseguir com os estudos ignorou-se este valor porque não têm representação mecânica durante o serviço da pedaleira.

Através dessa análise na pedaleira fica-se com a expectativa que a peça impressa por L-PBF para realizar o procedimento experimental atinja o valor imposto pela norma já descrita anteriormente (100 000 ciclos).

A figura 4.18 mostra a folha de desenho técnico da pedaleira que foi produzida por manufatura aditiva, através da opção Drawings do Autodesk Inventor®.

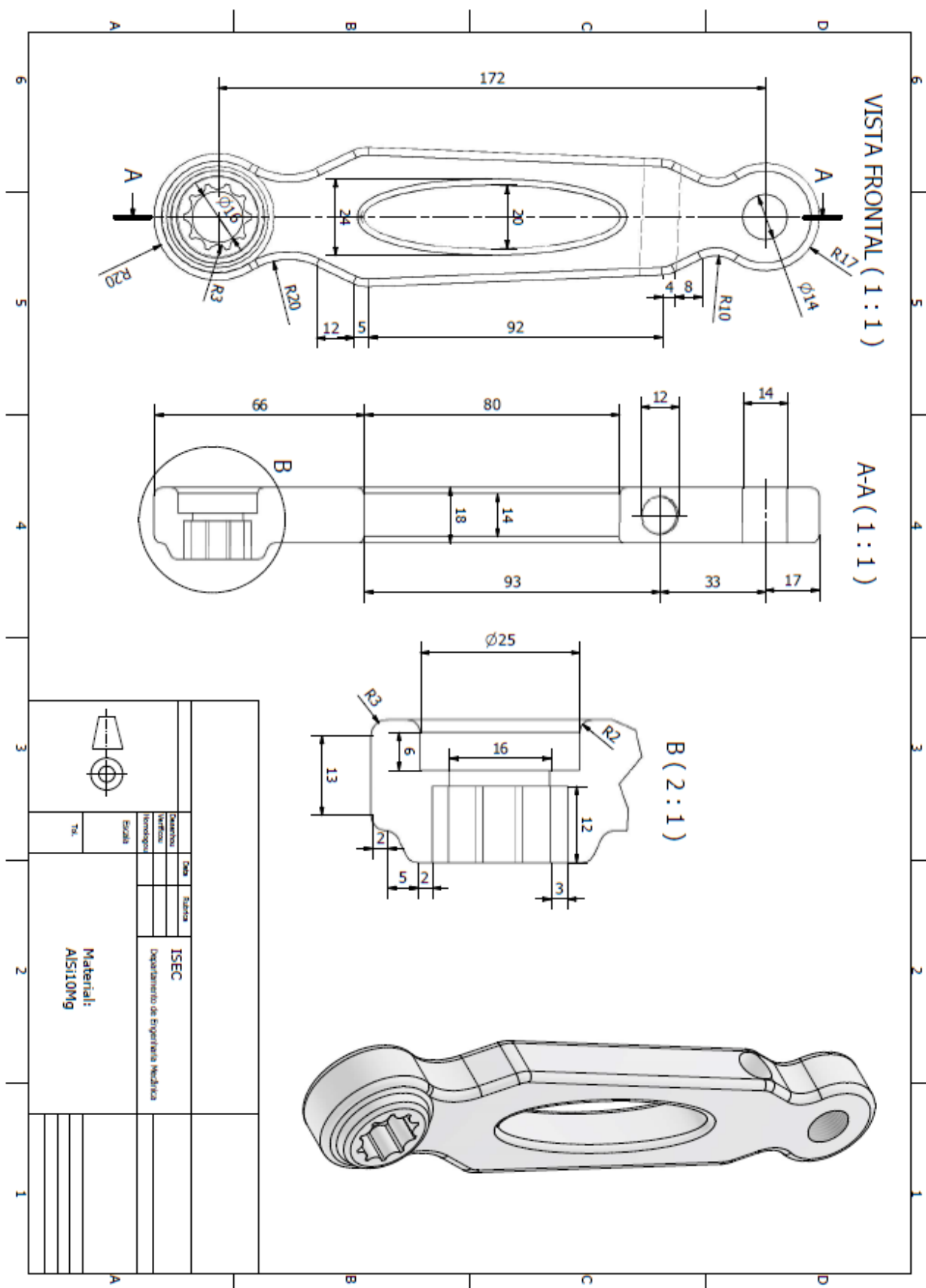


Figura 4.18 - Folha de desenho técnico da pedaleira do projeto

5. ENSAIOS EXPERIMENTAIS DE FADIGA DAS PEDALEIRAS

Os ensaios de fadiga de longa duração, foram realizados numa máquina Instron ElectroPlus E10000, com 10 kN de capacidade de carga dinâmica e 100 Nm de capacidade de torção dinâmica. A máquina é comandada por uma consola de controlo da Instron, modelo 8800, que controla e regista os dados com auxílio de um computador.

5.1. Ensaio experimental do projeto

Foi necessário proceder a montagem do mecanismo de ensaio na máquina, como projetado em SolidWorks®. Numa primeira abordagem do ensaio de fadiga foi feito com a pedaleira de alumínio 6061-T6 da marca Miranda® (figura 5.1), para $R=0,05$. Deste modo, a partir dos valores da norma a força máxima de ensaio foi de 1300 N e o número de ciclos de carga limite foi 100 000 ciclos, foi introduzida no programa que controla a máquina de ensaio, o valor da força média de 682,5 N e amplitude de força de 617,5 N, estes valores serão usados para os restantes ensaios das pedaleiras. Os ensaios foram realizados aplicando uma onda sinusoidal com uma frequência de 5 Hz.



Figura 5.1 – Primeiro ensaio experimental da pedaleira

Nessa primeira abordagem que a pedaleira resistiu os 100 000 ciclos de carga, não houve propagação de fenda na pedaleira nem no eixo da pedaleira.

Na segunda abordagem do ensaio de fadiga foi realizada com a pedaleira de AlSi10Mg produzida por manufatura aditiva e sem tratamento térmico. O eixo do suporte da base de ensaio da pedaleira resistiu apenas até aos 30161 ciclos de carga, quando se observou abertura de uma fenda devido a concentração de tensões nessa peça auxiliar. Deste modo, este eixo teve de ser corrigido com um maior raio de curva, de 5 mm, como mostra figura A-5 (apêndice). Simultaneamente, foi selecionado um aço mais resistente para produção do novo eixo da pedaleira. Após o recomeço do ensaio, a pedaleira suportou mais 35763 ciclos de carga, totalizando no total 65924 ciclos de carga até fratura da pedaleira (figura 5.2).



Figura 5.2 - Pedaleira produzida por L-PBF fraturada

A terceira abordagem do ensaio foi na pedaleira de AlSi10Mg produzida por L-PBF com tratamento térmico de alívio de tensões à 250°C durante duas horas e arrefecido rapidamente, (figura 5.3). Neste terceiro ensaio a pedaleira resistiu os 100000 ciclos de carga, e não houve propagação de fenda na pedaleira. Assim, o tratamento térmico permitiu a redução das tensões residuais contribuindo para que a pedaleira suportasse os ciclos de carga exigidos pela respetiva norma.

A figura 5.3 apresenta a comparação de geometria entre as pedaleiras de AlSi10Mg produzidas por L-PBF e a pedaleira de alumínio da marca Miranda®.



Figura 5.3 – Pedaleiras de AlSi10Mg e 6061-T6

5.2. Análise de fratura da pedaleira de AlSi10Mg produzida por L-PBF

Finalmente foi efetuada a de fratura da pedaleira de AlSi10Mg produzida por L-PBF sem tratamento térmico, para tentar compreender o que contribuí para iniciação da fenda e consequente a rotura do componente (figura 5.4).



Figura 5.4 - Processo de degradação por fadiga da pedaleira de AlSi10Mg

Inicialmente foi efetuada uma observação macroscópica da superfície da fratura da pedaleira. Pode ser observado um ponto na superfície da pedaleira onde se deu a nucleação da fenda e o seu posterior crescimento microscópico, estas duas fases compreendem o período de iniciação da fenda. Posteriormente, com a contínua aplicação da solicitação dinâmica, ocorreu um avanço progressivo e localizado da fenda, o período de propagação, caraterizado por uma região lisa com aspeto brilhante, diferente da região de fratura frágil caraterizada por uma região grosseira que corresponde a rotura final da peça. Estas duas regiões são facilmente observáveis por uma linha divisória como mostra a figura 5.4.

Na figura 5.5 é apresentada uma imagem da superfície da fratura da pedaleira de AlSi10Mg fabricada por L-PBF tirada no Microscópio Eletrónico de Varrimento (MEV), em inglês, *Scanning Electron Microscope (SEM)*, modelo *Hitachi SU3800*.

A propagação da fenda é de cima para baixo nesta figura. É possível distinguir as duas regiões separadas por uma linha divisória, acima desta tem-se a região de propagação da fenda caracterizada por estrias ao longo da sua superfície, na qual representa o processo mais típico de propagação de fendas de fadiga. Abaixo da linha divisória tem uma região com aspeto grosseiro onde ocorre a rotura por fadiga de forma súbita quando é atingido o K_{IC} do material, e em geral, sem deformação plástica aparente, embora exista sempre regiões localizadas que são normalmente responsáveis do processo de rotura a nível microscópico.

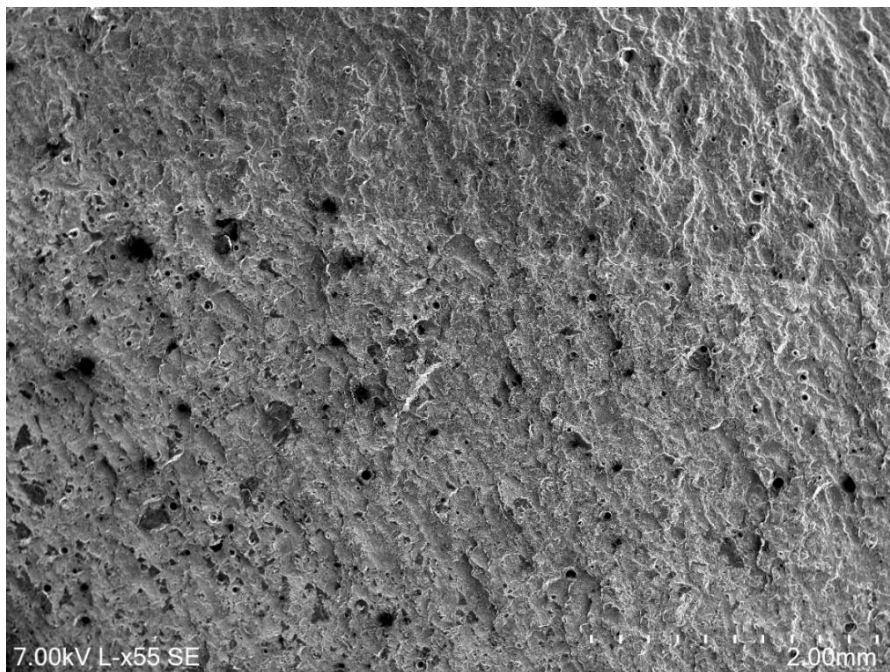


Figura 5.5 - Ilustração ampliada da linha divisória por MEV

Na figura 5.6 tem-se uma imagem no MEV na região de iniciação de fenda, na qual é possível observar onde se deu a nucleação da fenda.

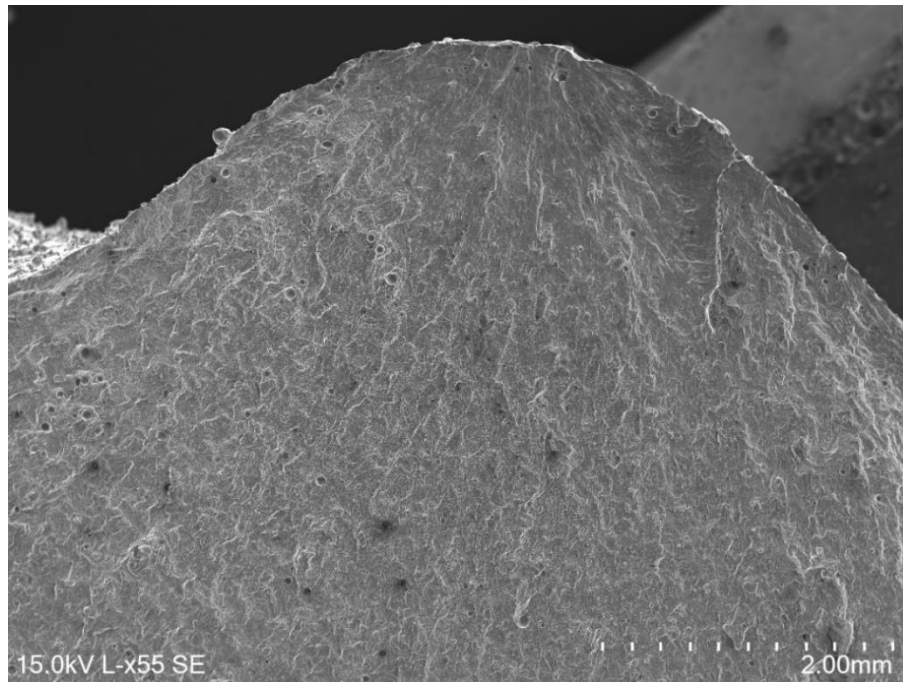


Figura 5.6 - Ilustração da iniciação da fenda por MEV

Ainda na figura 5.7 desta vez a imagem mais ampliada da região de iniciação da fenda no MEV, é possível observar defeitos superficiais como rugosidades, partículas não fundidas e porosidade, estes fatores contribuíram para iniciação da nucleação e crescimento microscópico da fenda.

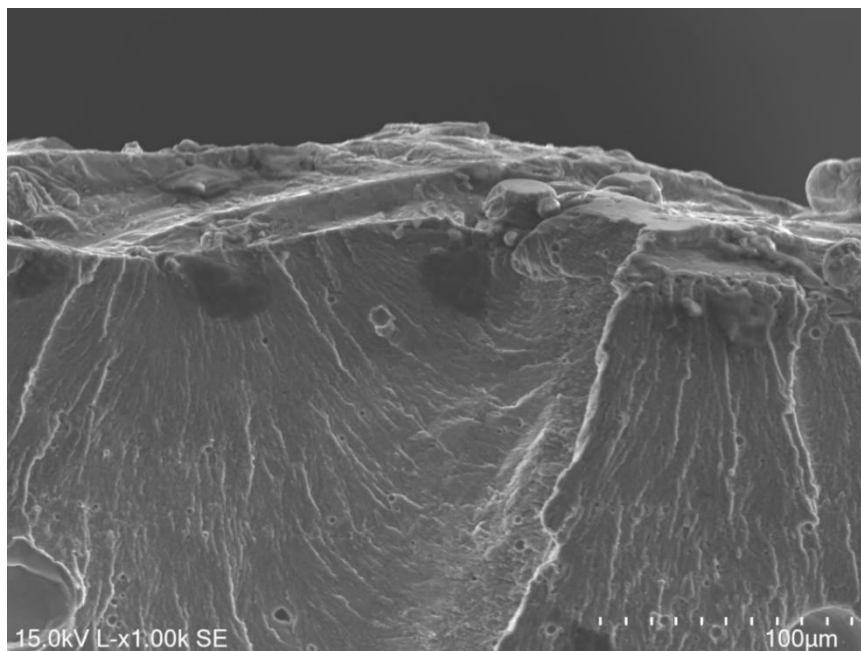


Figura 5.7 - Ilustração mais ampliada na zona de iniciação da fenda por MEV

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões e sugestões para futuros trabalhos.

6.1. Conclusões

Esta dissertação teve em foco estudos de ensaios a fadiga de três pedaleiras, de modo a verificar se estes componentes suportariam os 100000 ciclos de carga de acordo a norma NP EN ISO 4210-8:2019.

Durante o trabalho foi possível realizar a otimização topológica da pedaleira de alumínio 6061-T6 da Miranda®, reduzindo cerca de 25% da sua massa original nas pedaleiras a fabricar por L-PBF. Foram realizados testes de análise de tensões por FEA com uma carga de 1800 N, gerando tensões ao redor da peça entre os 70 e os 200 MPa. Deste modo, foi possível observar que as tensões geradas estão abaixo da tensão de cedência do material. Em seguida foi realizada uma análise de fadiga na pedaleira, sendo possível observar que os ciclos ao redor da peça cumprem o objetivo do projeto, implicando assim uma vida infinita na pedaleira, cerca de 10 milhões de ciclos.

Foi possível criar o mecanismo de ensaio, um sistema que permitiu verificar as condições impostas na norma. Algumas peças do mecanismo de ensaio foram maquinadas no Laboratório de Tecnologia Oficinal no ISEC, e outras peças já encontravam no Laboratório de Construções Mecânicas na FCTUC. Logo, este mecanismo de ensaio da pedaleira conseguiu transmitir os ciclos de força da máquina na pedaleira, de modo a verificar se as três pedaleiras atingiram os 100000 ciclos de carga.

A primeira abordagem do ensaio foi realizada na pedaleira de liga de alumínio 6061-T6 do fabricante Miranda®, o ensaio teve uma duração de quase seis horas. O mecanismo de ensaio suportou os esforços internos desenvolvidos, a pedaleira resistiu a carga aplicada e eixo da pedaleira teve um comportamento linear em relação aos deslocamentos máximos e mínimos durante todo o ensaio.

A segunda abordagem de ensaio foi na pedaleira produzida por L-PBL na liga AlSi10Mg sem tratamento térmico. Esta pedaleira resistiu apenas 65924 ciclos de carga até romper. Foi realizada também análise de superfície da fratura na pedaleira à vista desarmada e com o Microscópio Eletrônico de Varrimento (MEV), para compreender o processo de fadiga da pedaleira.

O terceiro ensaio foi na pedaleira produzida por L-PBL na liga AlSi10Mg com tratamento térmico de alívio de tensões à 250°C. A pedaleira resistiu os 100 000 ciclos de carga exigidos pela respetiva norma.

Portanto, foi observado que a pedaleira de AlSi10Mg produzida por L-PBF sem tratamento térmico atingiu apenas 65924 ciclos de carga não atingindo a valor exigido pela respetiva norma. No entanto, a pedaleira de AlSi10Mg produzida por L-PBF com tratamento térmico atingiu os 100000 ciclos de carga, tal como a pedaleira sem geometria modificada da liga de alumínio 6061-T6 do fabricante do fabricante Miranda®.

Assim, foi possível concluir com êxito o objetivo de redução de peso na elaboração por manufatura aditiva.

6.2. Sugestões de trabalhos futuros

O estudo de investigação científica na área de integridade estrutural de componentes produzidos por manufatura aditiva é um conceito novo e relativamente pouco estudado. Existem várias linhas de estudo que necessitam um maior estudo e aprofundamento, sendo assim com o forte crescimento e desenvolvimento no uso peças produzidas por fabricação aditiva tornará esta área de estudo bastante competitiva.

Deste modo, segue-se algumas sugestões para trabalhos futuros:

- a) Aprofundar os estudos de otimização topológica para obter um modelo com a menor massa reduzida possível;
- b) Realizar ensaio experimental de fadiga para o caso mais crítico da norma, pedaleiras de corrida, com carga de 1800N com um mecanismo de ensaio mais sofisticado;

REREFÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bancaleiro, T. M. (2018). *Influência dos Defeitos de Fabrico na Integridade Estrutural de uma Engrenagem*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Departamento de Engenharia Mecânica, Lisboa. Acesso em 05 de Novembro de 2023
- Bandyopadhyay, A., Gualtieri, T. P., & Bose, S. (2015). *Additive Manufacturing*. Flórida: Taylor & Francis Group, LLC.
- EOS. (2022). *EOS Aluminium AlSi10Mg Material Data Sheet*. Alemanha: EOS core.
- Fernandes, R. (2021). *Comportamento à fadiga da liga de alumínio AlSi10Mg em componentes de fabricação aditiva*. Projeto de Tese, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Mecânica, Coimbra.
- Fernandes, R., Jesus, J., Borrego, L., Ferreira, J., Neto, D., Branco, R., & Costa, J. (2024). Notch sensitivity and heat treatment effect on the fatigue behaviour of AlSi10Mg aluminium alloy processed by additive manufacturing. p. 50.
- Ferreira, J. A., & Borrego, L. F. (2023). *Fadiga dos Materiais*. Apostila, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Departamento de Engenharia Mecânica, Coimbra. Acesso em 5 de Novembro de 2023
- Ferreira, P. M. (2023). *Tecnologias de Fabrico Prototipagem Rápida*. Sebenta, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Departamento de Engenharia Mecânica, Coimbra. Acesso em 25 de Outubro de 2023
- Instituto Português de Qualidade. (2019). *Norma Portuguesa Bicicletas Requisitos de Segurança para Bicicletas Parte 1: Termos e Definições (ISO 4210-1:2014)*. Instituto Português de Qualidade. Lisboa: Instituto Português de Qualidade. Acesso em 31 de Outubro de 2023
- Instituto Português de Qualidade. (2019). *Norma Portuguesa Bicicletas Requisitos de Segurança para bicicletas parte 8: Métodos de Ensaio de Pedais e do Sistema de Transmissão*. Lisboa: Instituto Português de Qualidade.
- Mazzolani, F. (2003). *Aluminium Structural Design*. New York: Springer-Verlag Wien.
- Mertens, A., Delahaye, J., Dedry, O., & Vertruyen, B. (2020). Microstructure and Properties of SLM AlSi10Mg: Understanding the Influence of the Local Thermal History. *Procedia Manufacturing*, 7.

- Oliveira, G. V. (2017). *Fusão Selectiva por Laser (SLM) como processo de eleição para a produção de componentes multimaterial*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Mecânica, Coimbra. Acesso em 30 de Outubro de 2023
- Rodrigues, P. M. (2018). *Processos subtrativos versus aditivos para o fabrico de componentes de plástico*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Mecânica, Coimbra. Acesso em 30 de Outubro de 2023
- Simões, F. (2023). *Materiais Metálicos Estudados (Aços Inoxidáveis e Ligas não ferrosas)*. Sebenta, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Departamento de Engenharia Mecânica, Coimbra.

APÊNDICES

APÊNDICE A – FOLHAS DE DESENHO TÉCNICO DO MECANISMO DE ENSAIO DO PROJETO

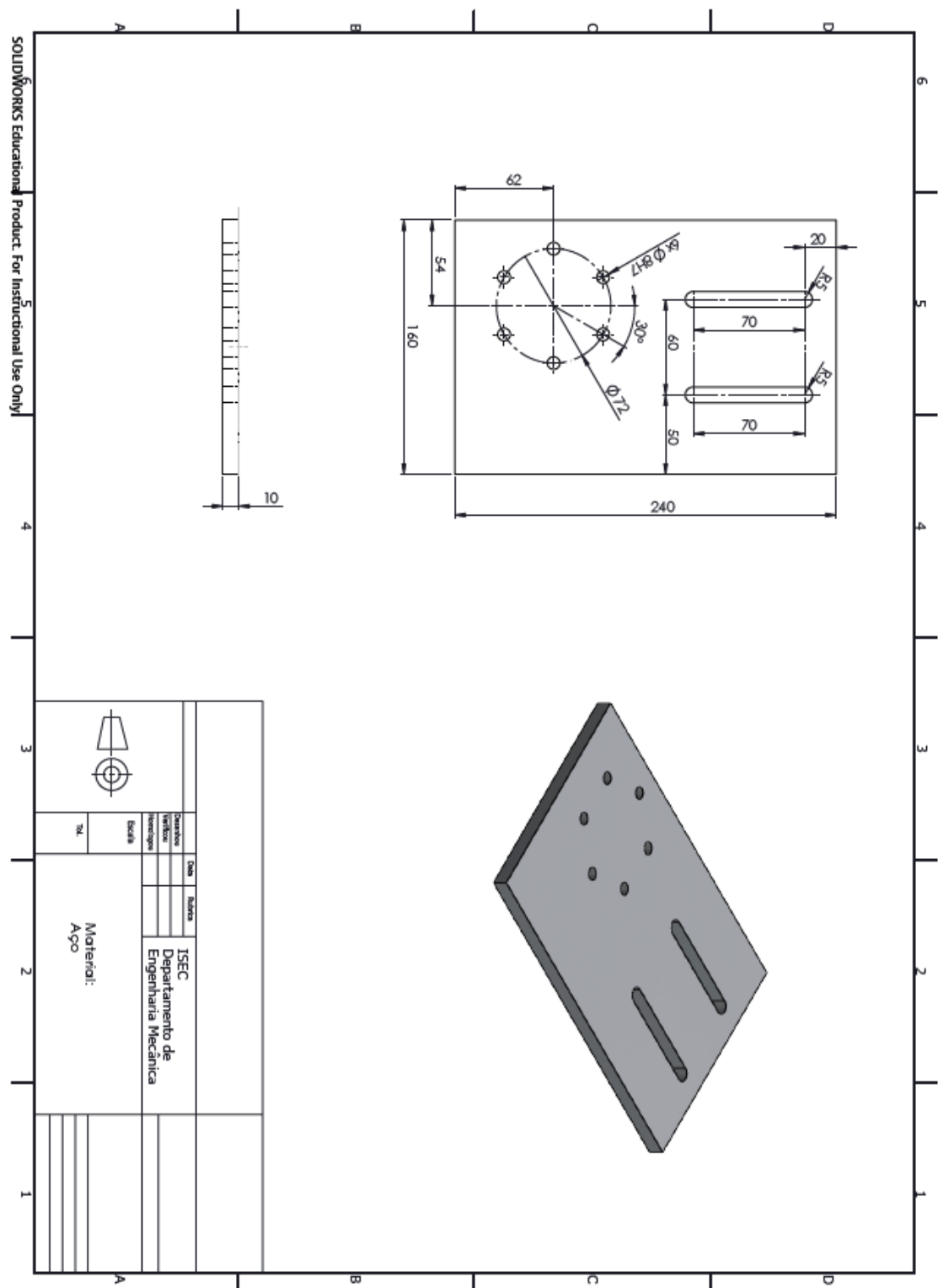


Figura A-1 - Base do mecanismo de ensaio

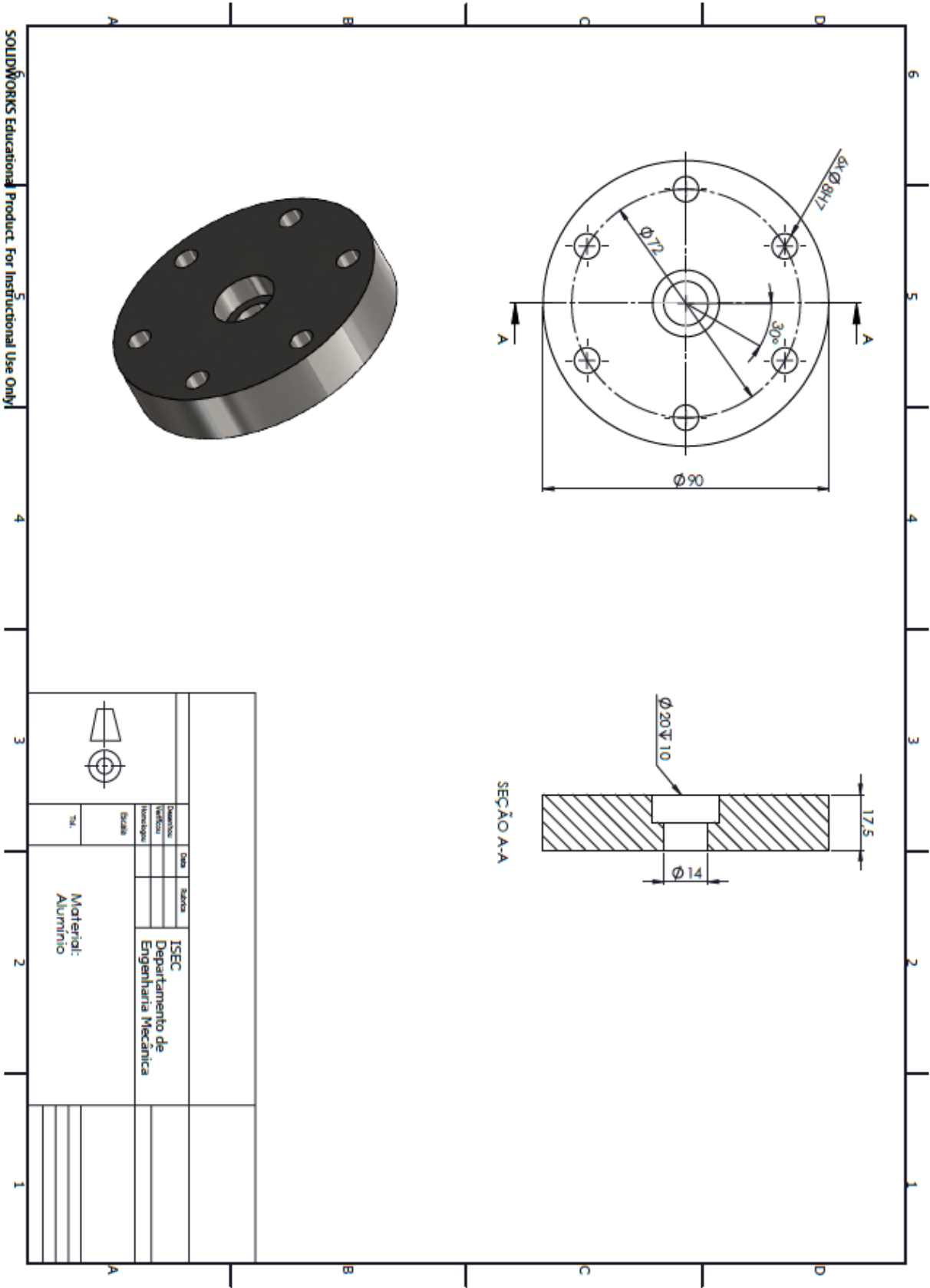


Figura A-2 - Bolacha 1 do projeto

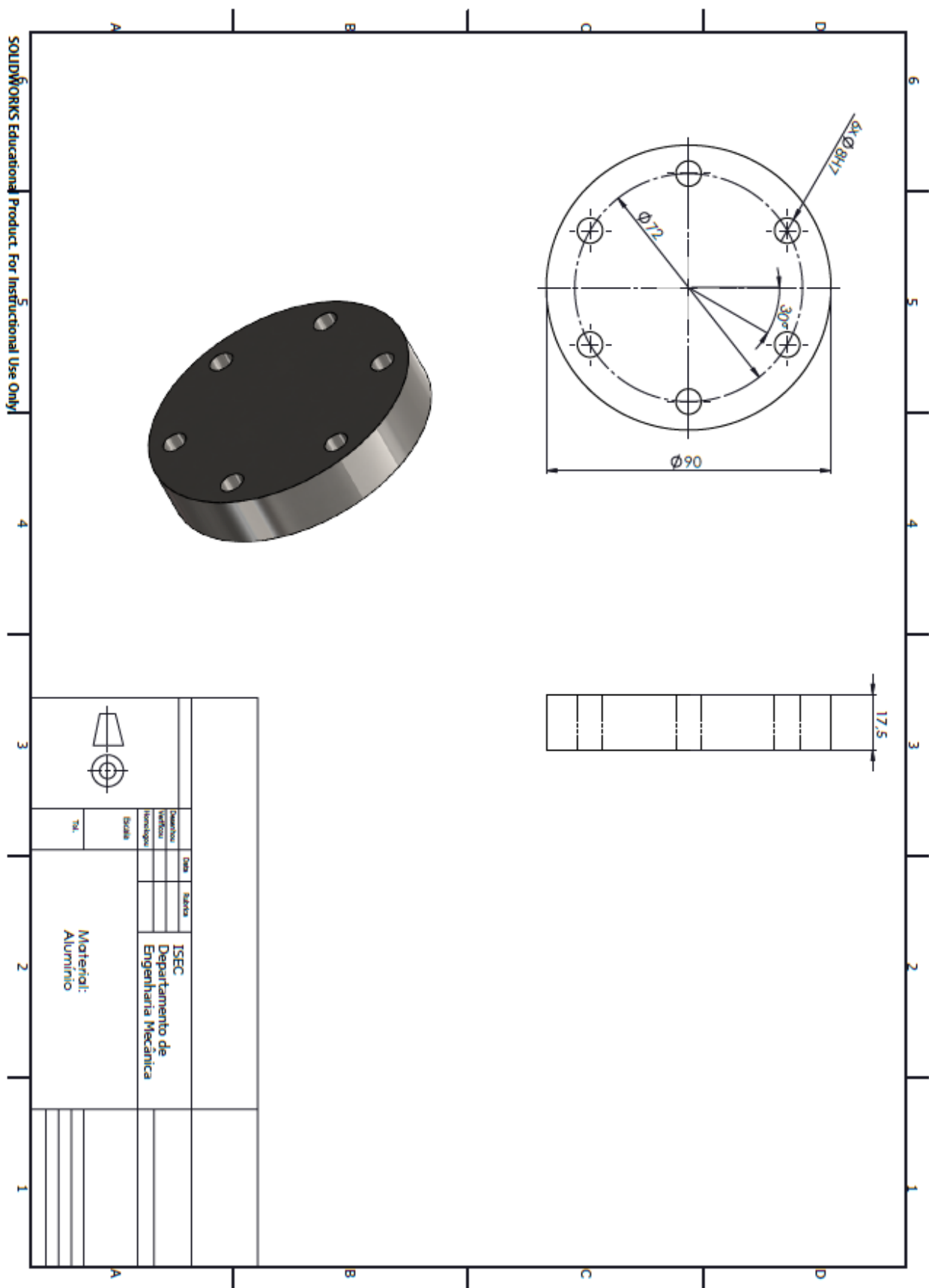


Figura A-3 - Bolacha 2 do projeto

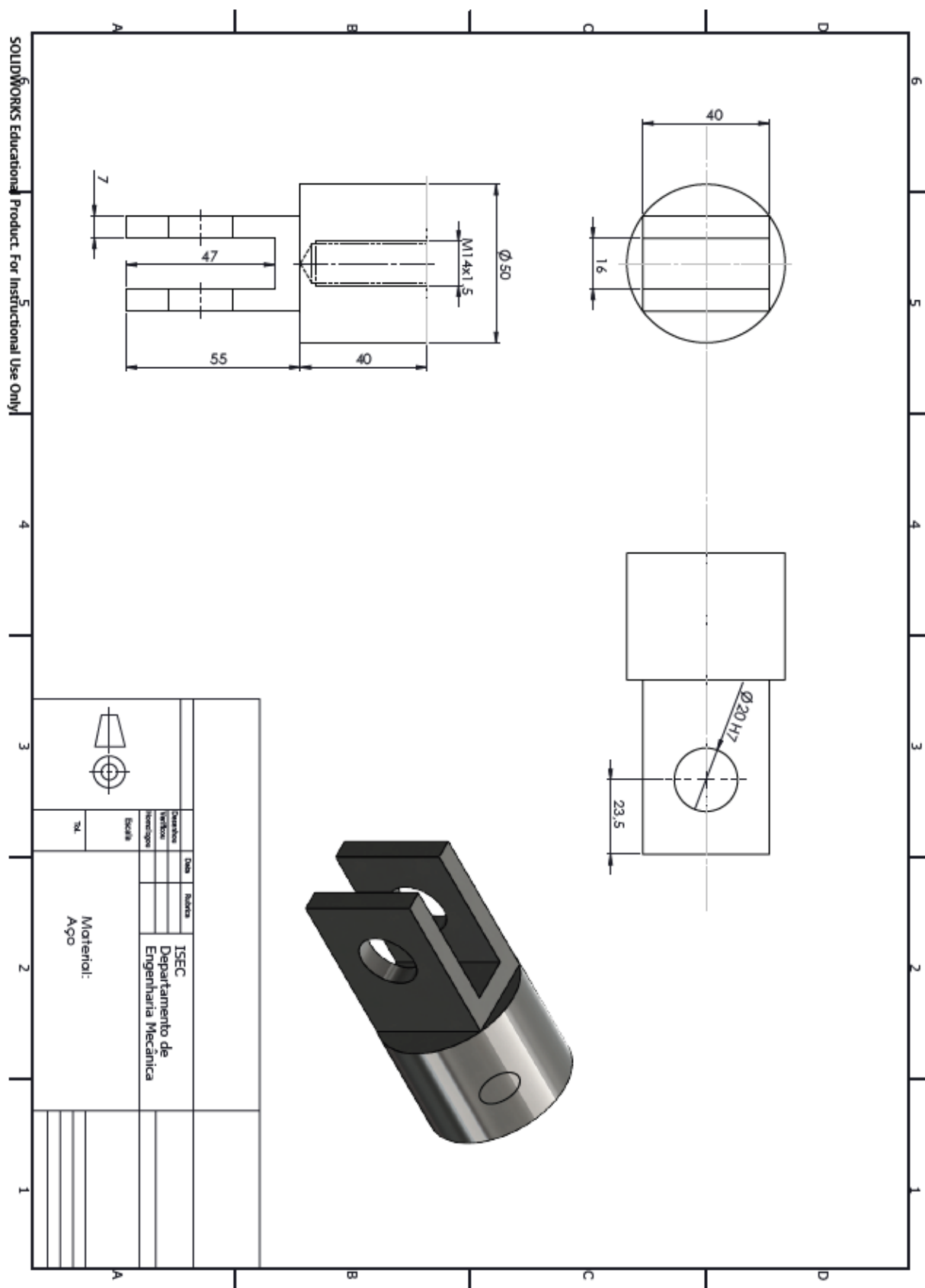


Figura A-4 - Cabeçote do projeto

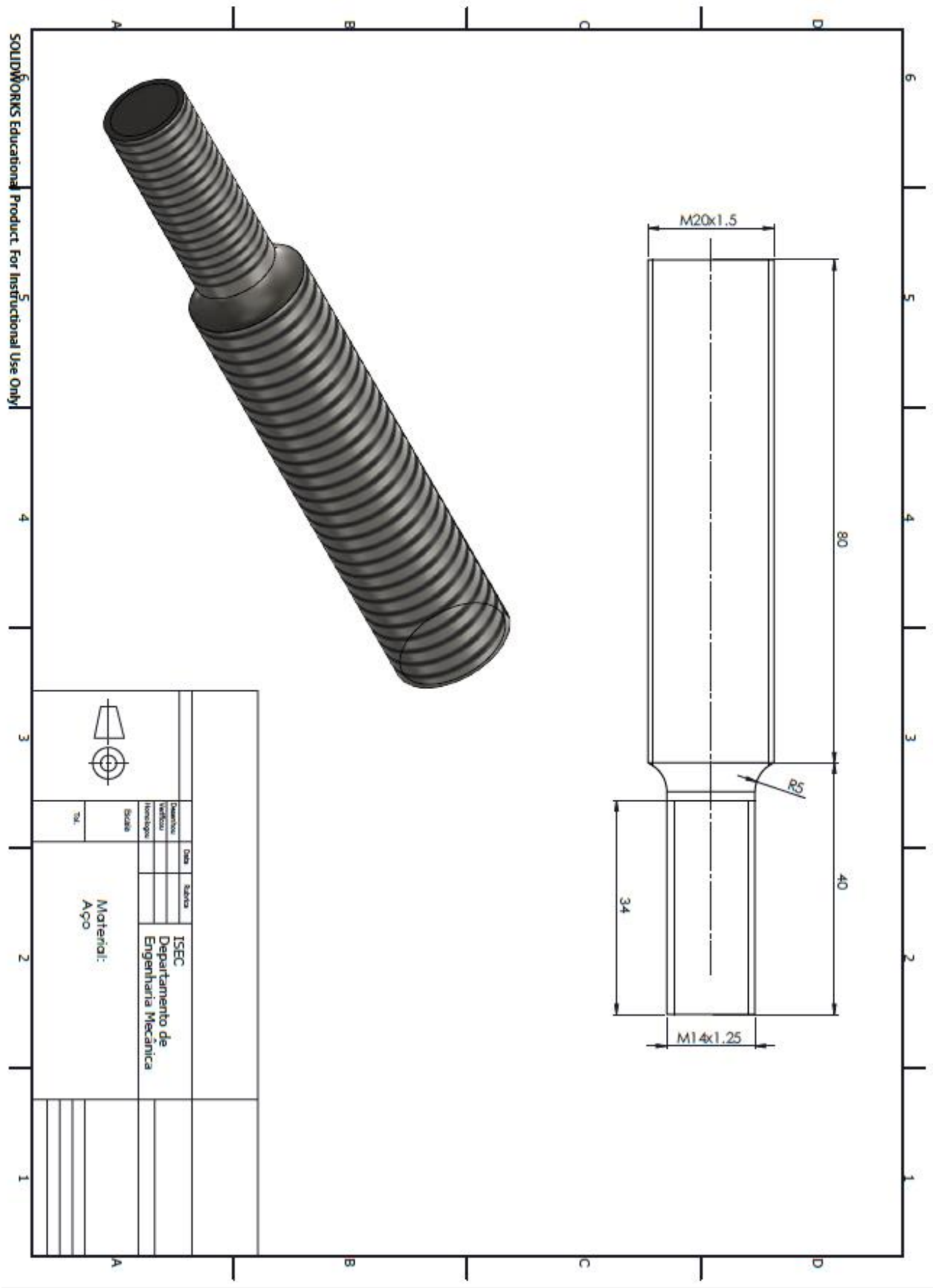


Figura A-5 - Eixo da pedaleira corrigido

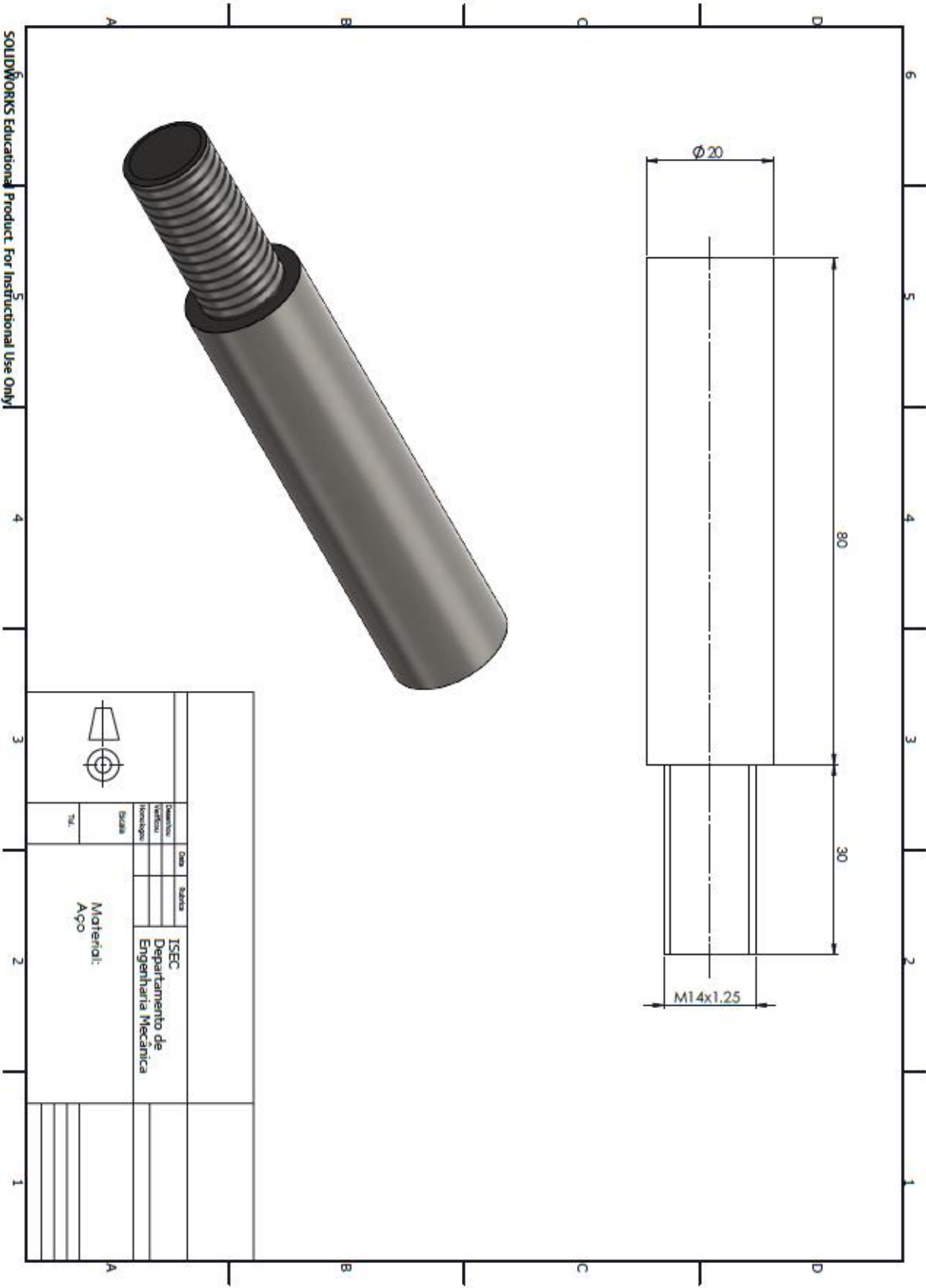


Figura A-6 - Eixo da pedaleira

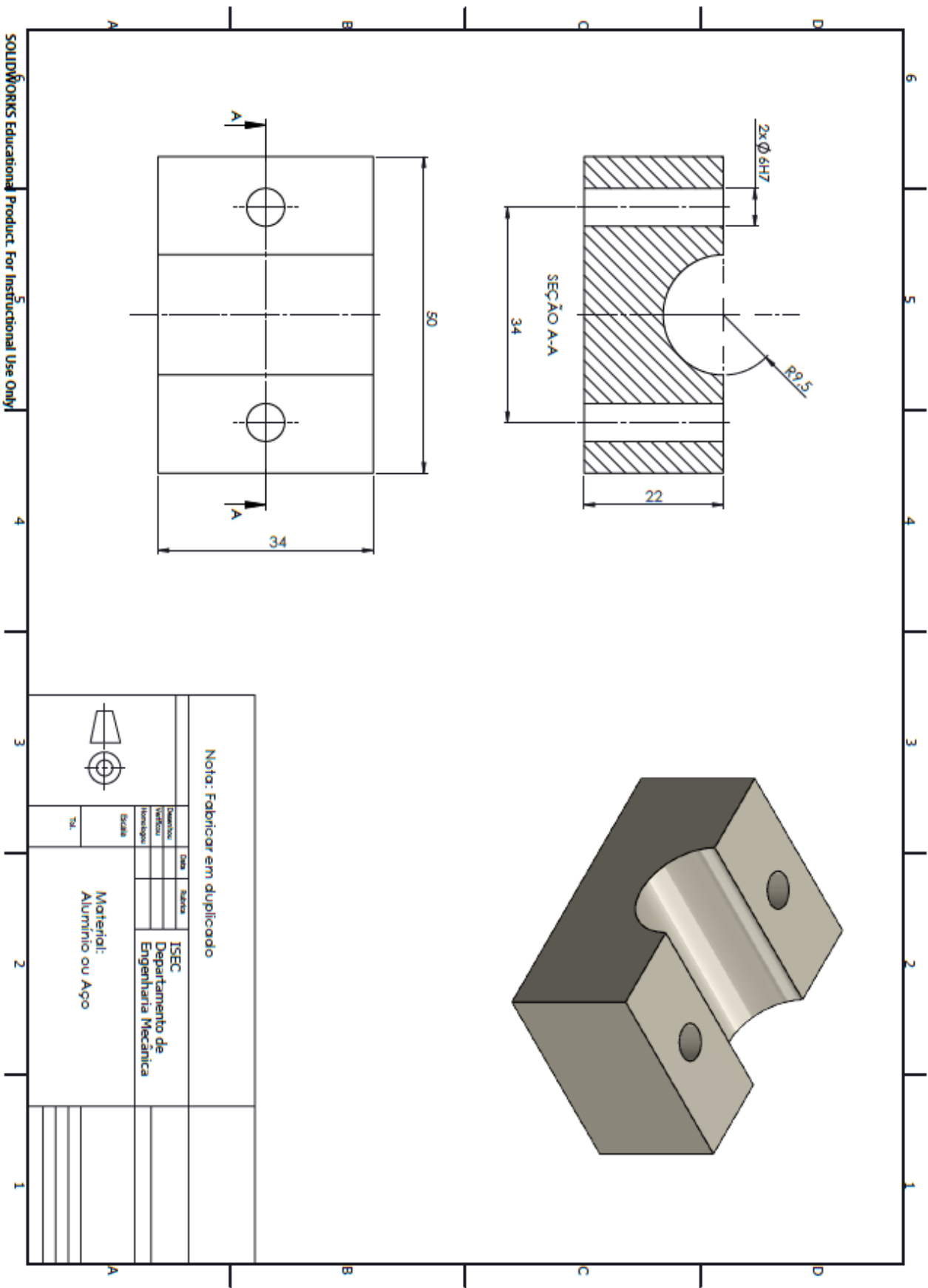


Figura A-7 - Suporte 1 & 2 do projeto

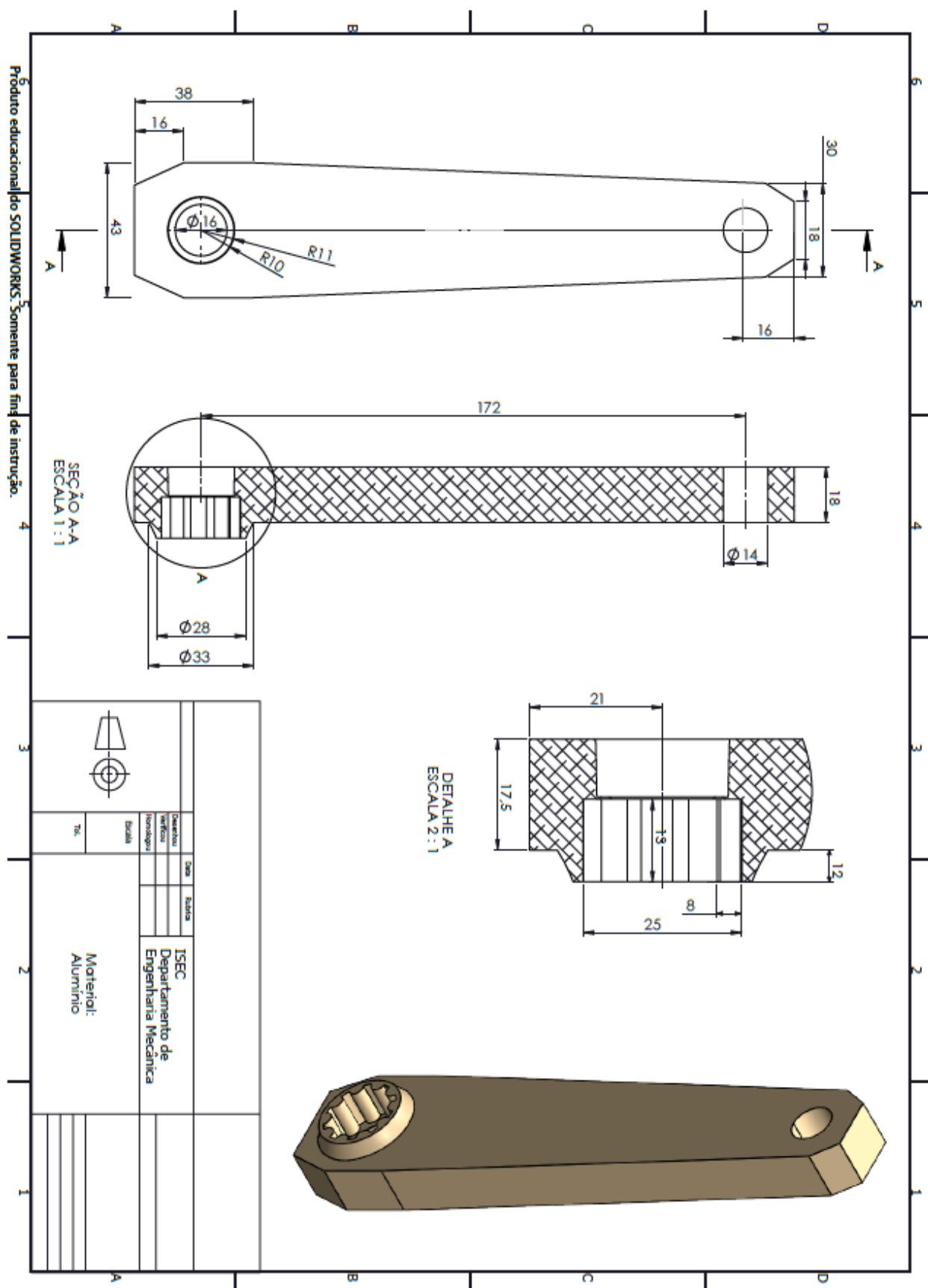
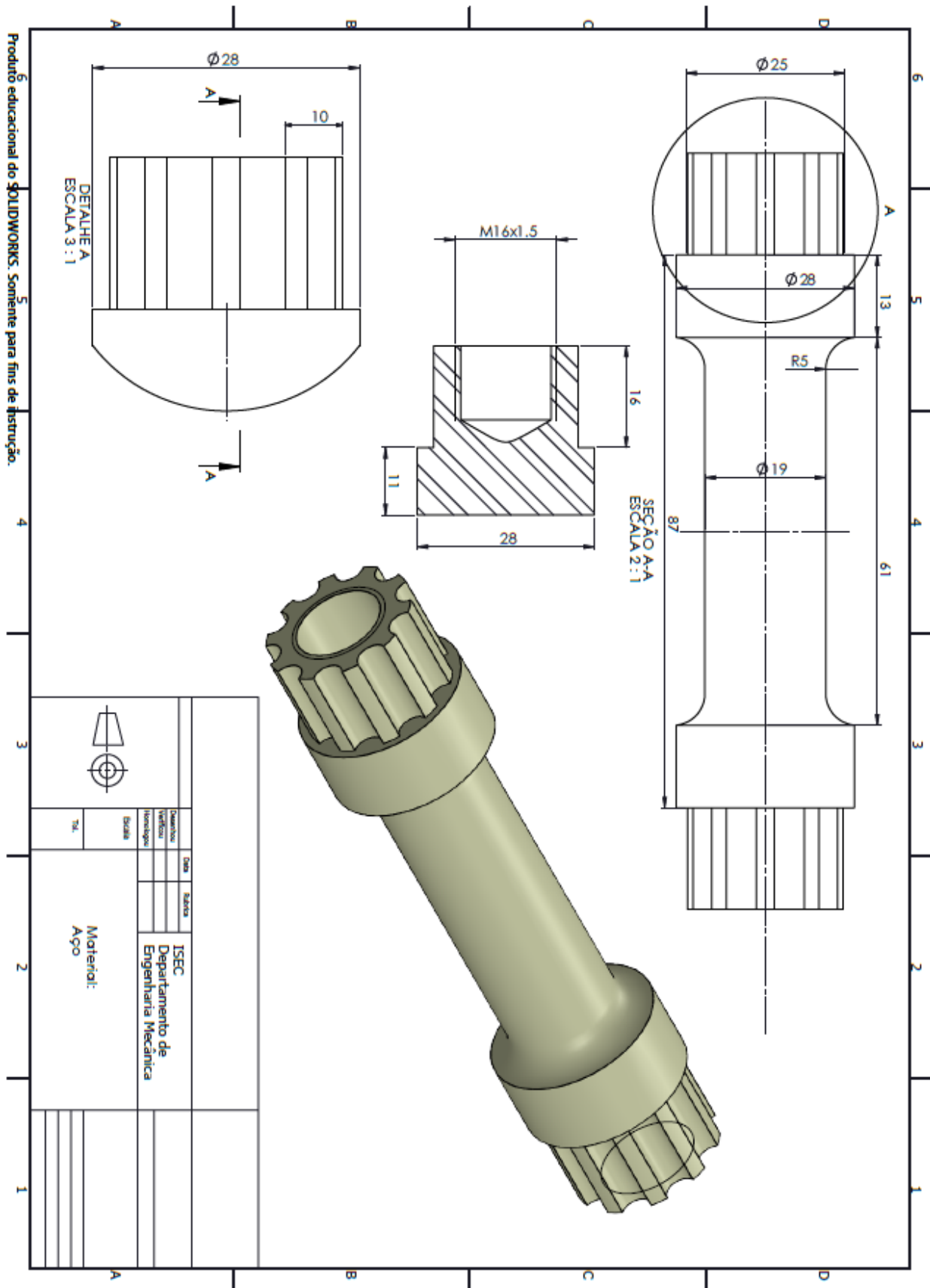


Figura A-8 - Pedaleira original do projeto



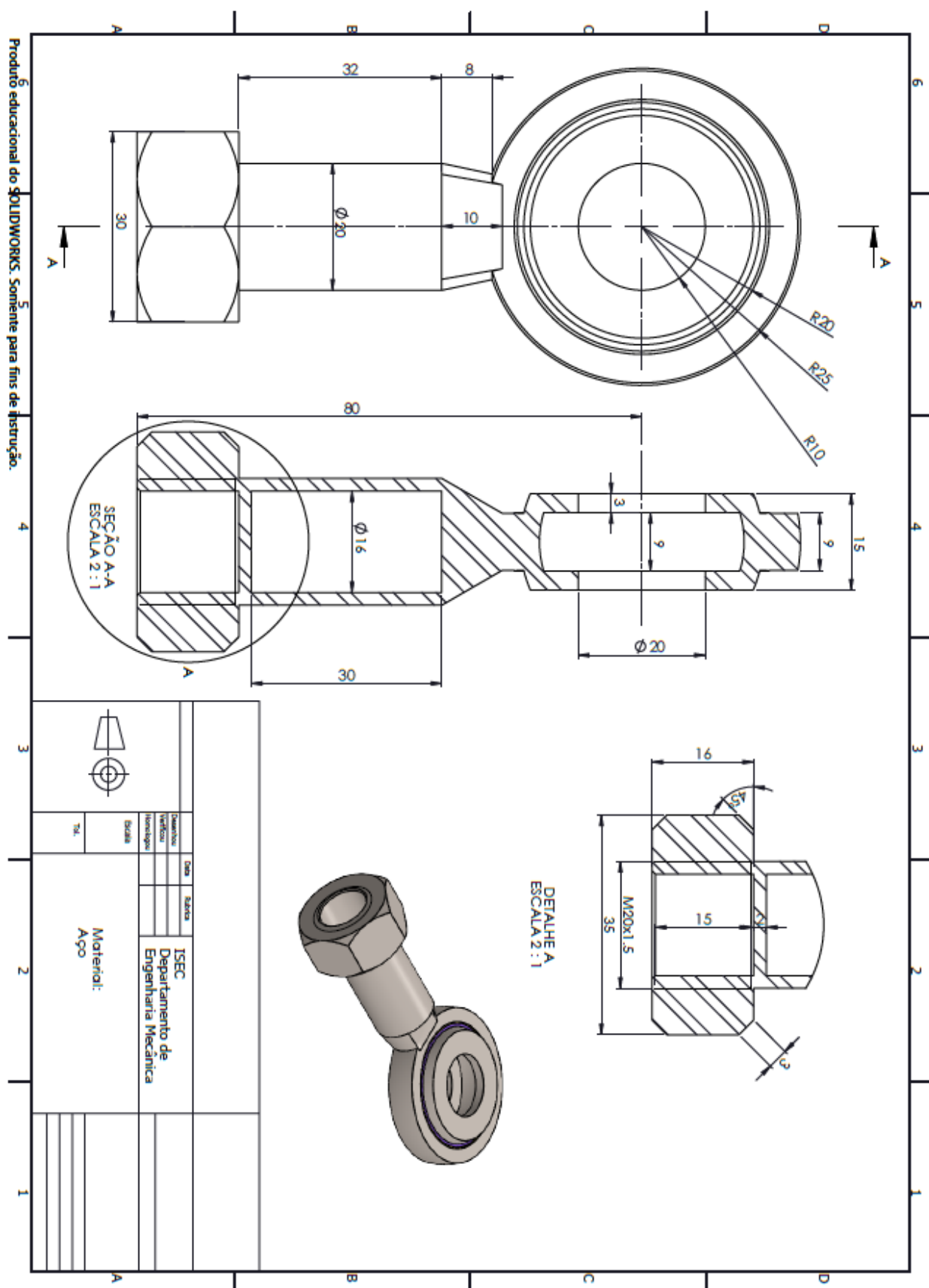


Figura A-10 - Rotula do projeto

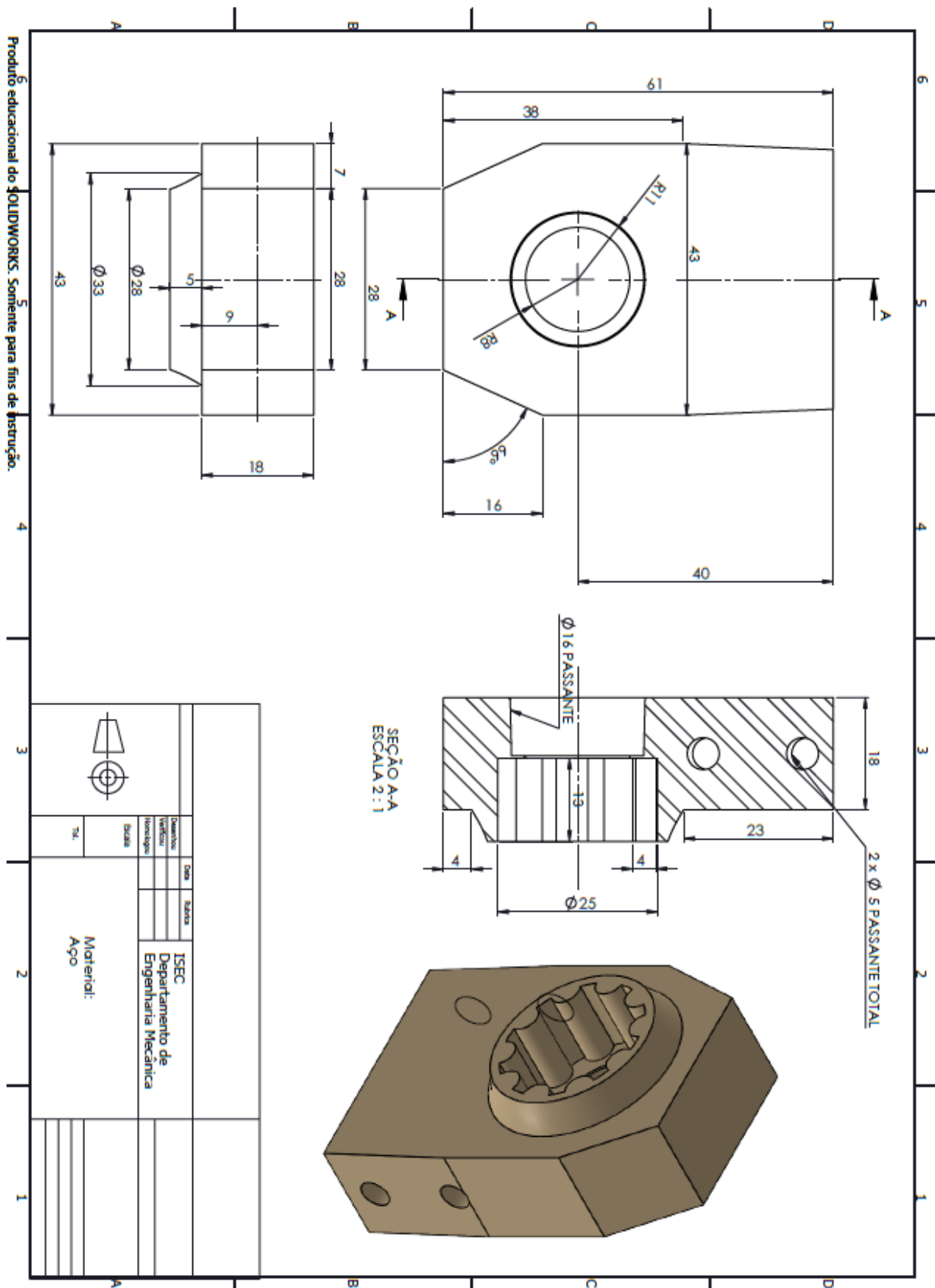


Figura A-11 - Pedaleira cortada do projeto

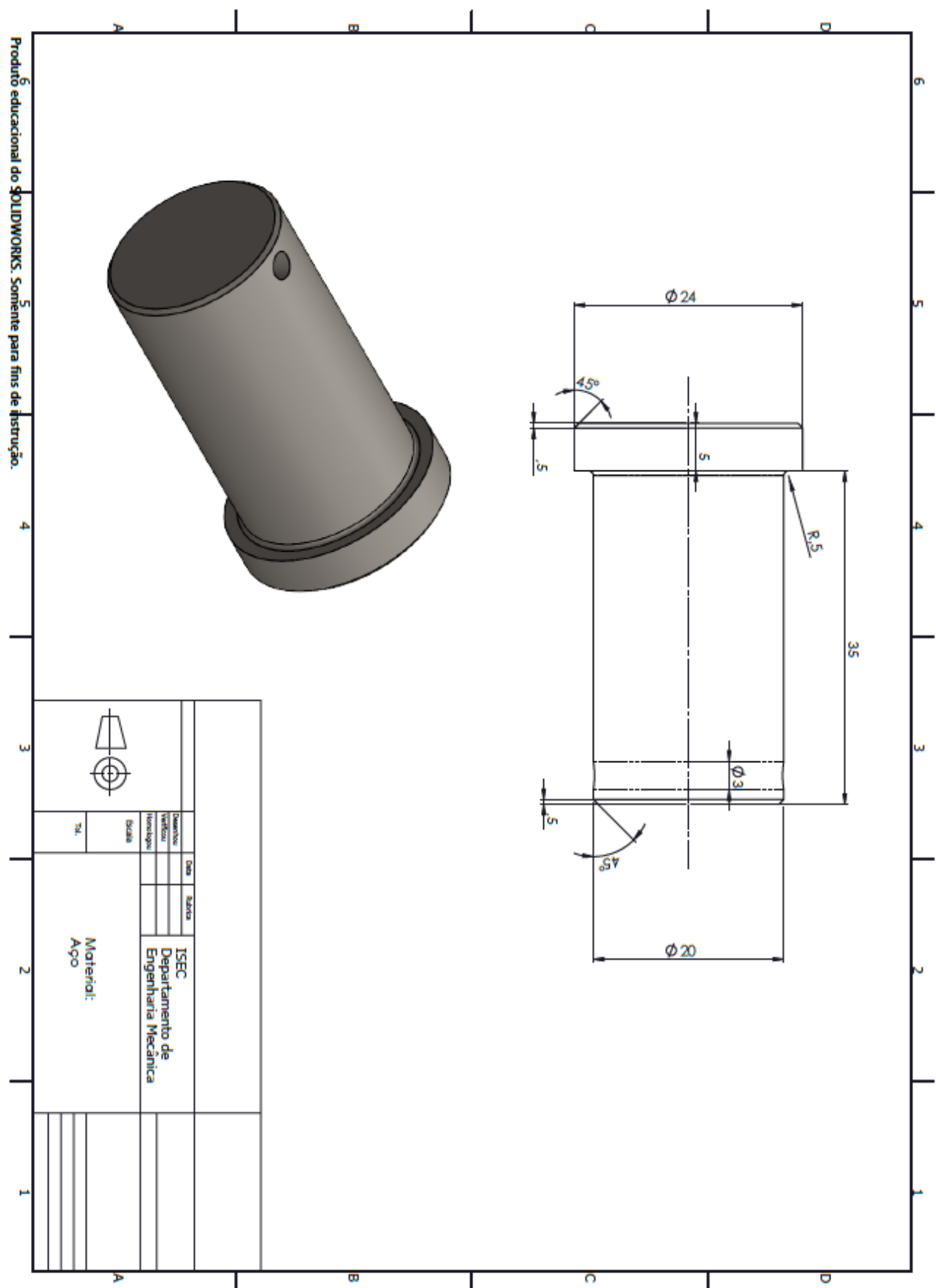


Figura A-12 - Pino do cabeçote

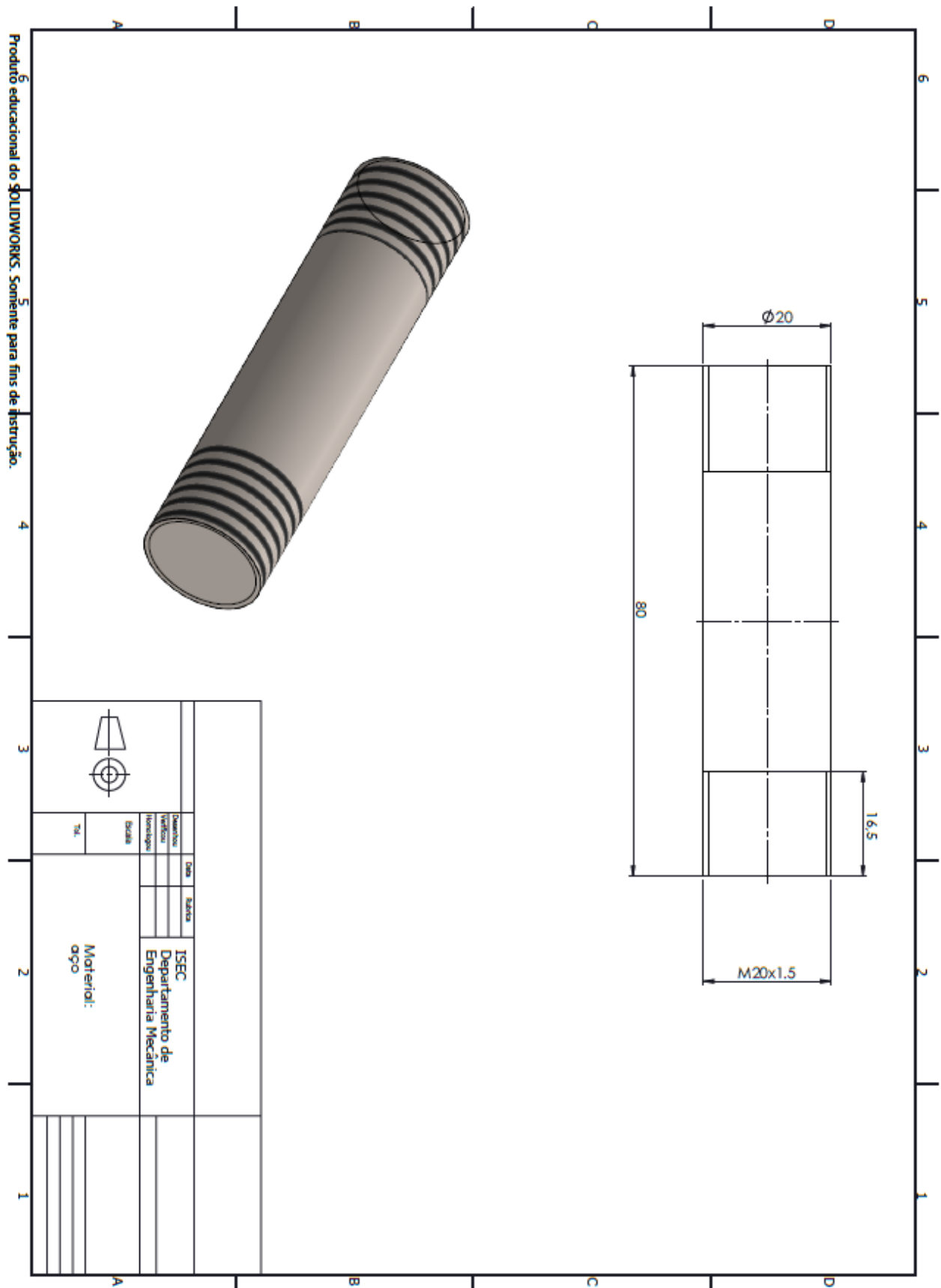


Figura A-13 - Eixo roscado da rotula

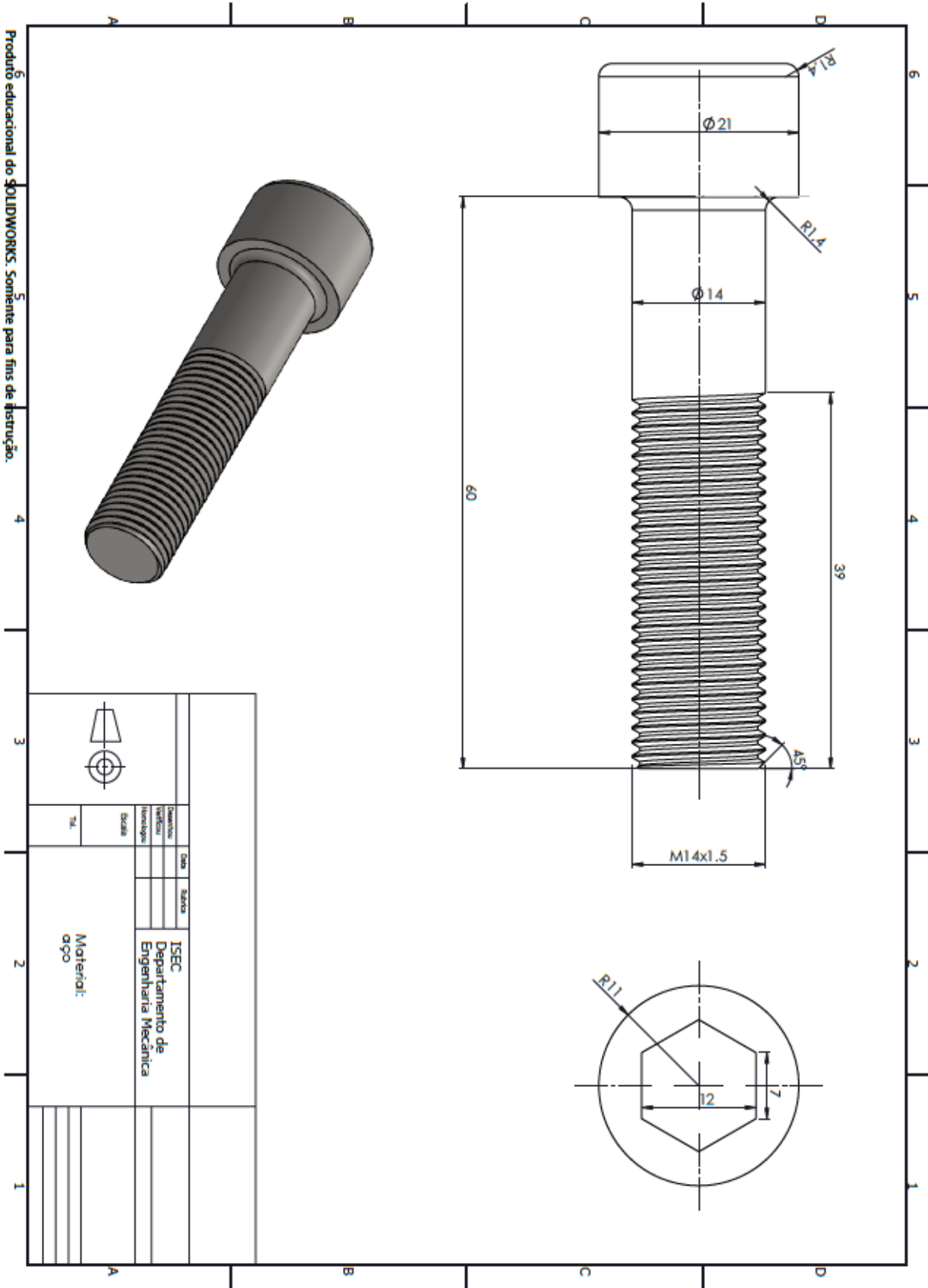


Figura A-14 - Parafuso Allen M14x1.5

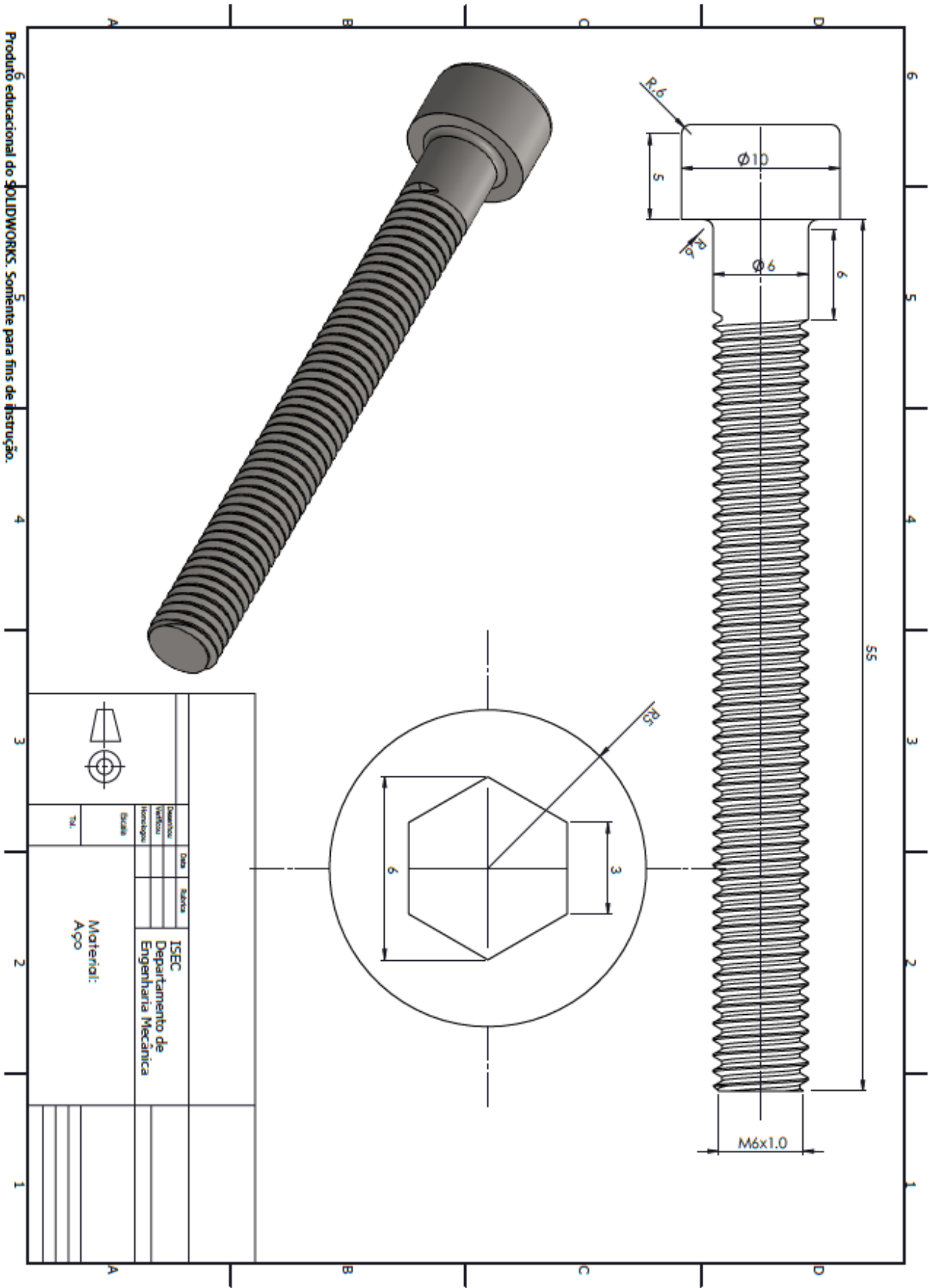


Figura A-16 - Parafuso Allen M6x1.0

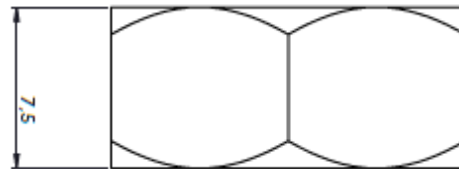
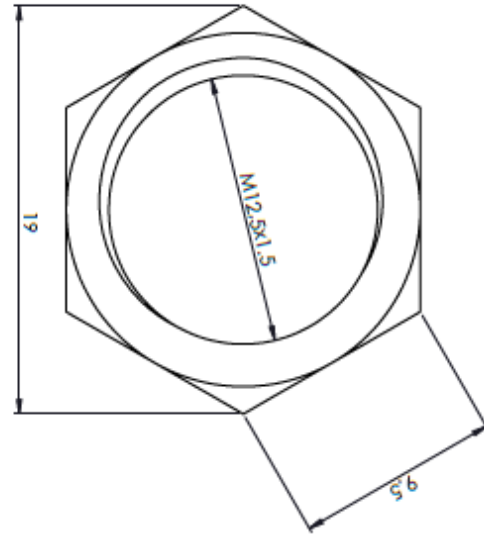
[illegible]

Figura A-17 - Porca M12

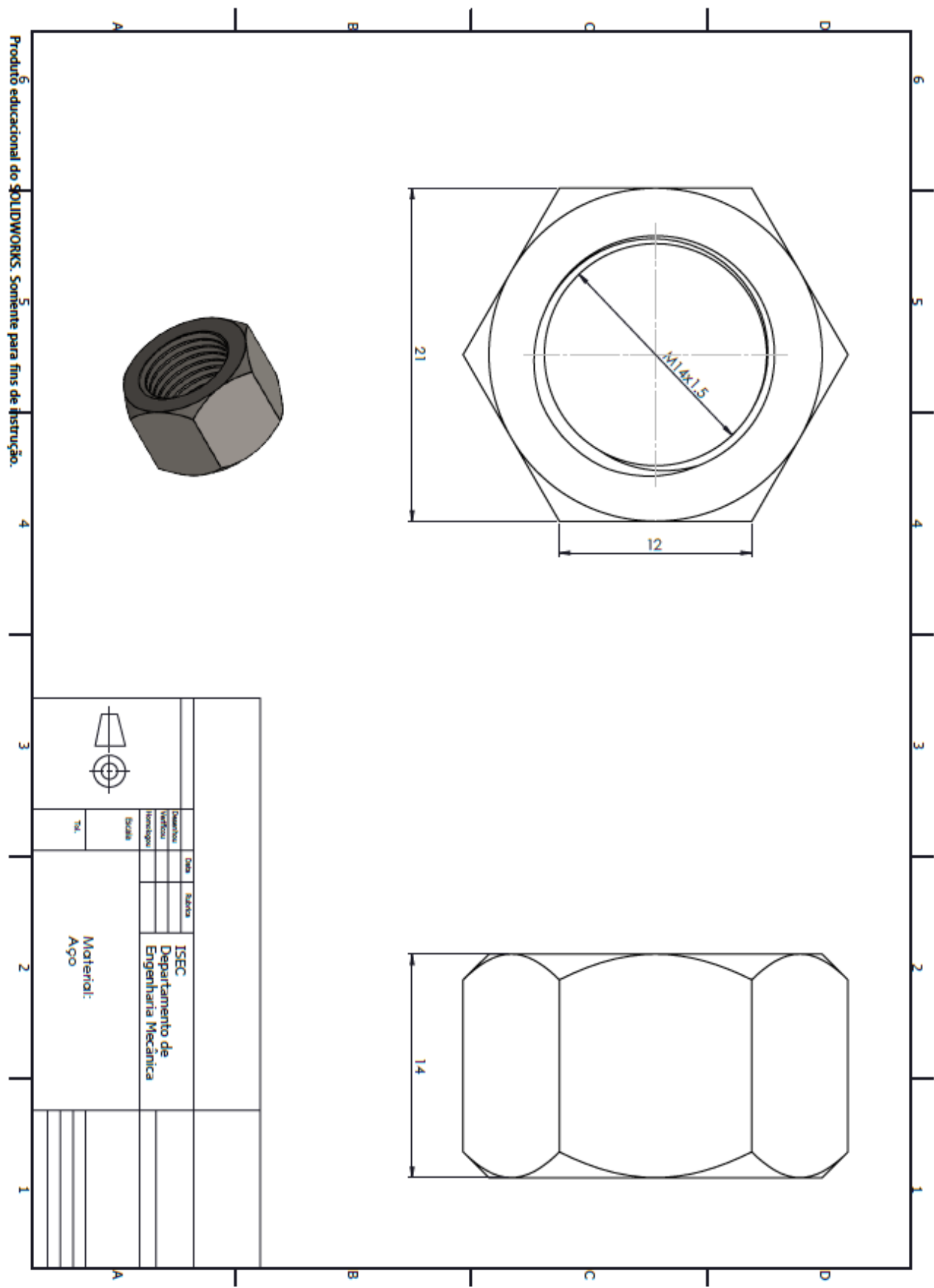


Figura A-18 - Porca M14

Figura A-19 - Anilhas M6