José Paulo Teixeira Pinto

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

Desenvolvimento de Equipamento personalizado para Ensaios Mecânicos de Fadiga por Flexão Rotativa

Dissertação para obtenção de Grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Orientadora: Doutora Catarina Isabel Silva Vidal, Professora Auxiliar, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Coorientador: Doutor Telmo Jorge Gomes dos Santos, Professor Associado com Agregação, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Abril de 2021

Desenvolvimento de Equipamento personalizado para Ensaios Mecânicos de Fadiga por Flexão Rotativa

Copyright © José Paulo Teixeira Pinto, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dada crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Aos meus pais, vai o meu maior agradecimento. O suporte familiar que sempre proporcionaram a mim, bem como aos meus irmãos, são a base de todas as nossas conquistas e de toda a nossa formação como seres humanos. Apesar de todas as conquistas que possamos atingir, não podemos esquecer todos os passos necessários até lá chegar, nem quem nos deu as condições necessárias para que fosse possível.

Aos meus Avós e padrinhos, um agradecimento especial por todo o impacto que tiveram no meu crescimento e desenvolvimento como pessoa, bem como de todos os ensinamentos que sempre me transmitiram. Ao meu Avô Zé, uma palavra de agradecimento ainda mais especial, que sempre teve um imenso orgulho nos netos, e que partiu a meio desta minha caminhada.

Aos meus Amigos agradeço toda a convivência que tivemos. Desde aos mais antigos que me acompanham desde as conquistas mais elementares, até aos que foram surgindo ao longo de toda a vida, porque em algum momento crescemos e aprendemos juntos.

Ao Eng. Paulo Relvas e ao Dr. José Coelho tenho a agradecer toda a amizade, conselhos e experiências partilhadas comigo, para que pudesse tomar as melhores decisões.

Aos meus Colegas de Curso agradeço todo o companheirismo e entreajuda existente entre colegas. Ao longo de todo o curso houve momentos de brincadeira e de descompressão, e também de aflição e stress, mas havia sempre alguém disposto a ajudar, onde o grande objetivo era que todos conseguimos atingir os objetivos. Uma caminhada que fez com que muitos colegas deixassem de ser apenas colegas e se tornassem amigos.

À Professora Catarina Vidal e ao Professor Telmo Santos agradeço todo o apoio, partilha de conhecimento e orientação necessária para a realização deste trabalho. Ao Professor Pamies Teixeira, uma palavra de agradecimento especial, que mesmo não sendo meu orientador sempre se mostrou disponível para ajudar no que fosse necessário.

Resumo

O ensaio de fadiga por flexão rotativa é um ensaio destrutivo no qual um provete, em rotação, é deformado por ação de um momento de flexão. Os esforços a que o provete está sujeito são quantificados, bem como, o número de rotações até à rotura do mesmo, de modo a que seja possível caracterizar o material através da curva S-N. As soluções de equipamentos comercializados no mercado para a realização deste ensaio variam entre diversas formas de provetes, tipo de cargas induzidas no material, bem como em diversas gamas de velocidade de rotação. O presente trabalho é um primeiro passo para o desenvolvimento de um protótipo funcional de um equipamento personalizado para a realização de ensaios de fadiga por flexão rotativa. O equipamento a ser desenvolvido permite o estudo de provetes adquiridos por processos convencionais, e ainda por processos alternativos e/ou emergentes, os quais exigem ensaios personalizados que permitam uma maior adaptação a diferentes provetes, materiais e condições de ensaio.

Palavras-Chave:

Ensaio de fadiga por flexão rotativa

Provete

Curva S-N

Projeto

Equipamento

Abstract

The rotating beam fatigue test is a destructive test, in which a rotating specimen is deformed by the action of a bending moment. The stresses to which the specimen is subjected are quantified, as well as the number of rotations until its failure, so that it is possible to characterize the material through the S-N curve. The equipments available on the market for this test vary between different forms of specimen, type of loads induced in the material, as well as in different speed ranges. The present work is a first step for the development of a functional prototype of a customizable equipment for performing rotating beam fatigue tests. The equipment to be developed allows the study of specimen acquired by conventional processes, as well as by alternative and/or emergent processes, which require fully customizable equipment that allows a greater adaptation to different specimen, materials and test conditions.

Keywords:

Rotating beam fatigue test

Specimen

S-N Curve

Project

Equipment

Índice

Agradecimentos v

Resumo vii

Abstract ix

Índice xi

Índice de Figuras xiii

Índice de Tabelas xiv

Simbologia xv

Siglas.....xvi

1. Introdução 1

1.1 Motivação e Objetivos.....1

1.2 Ensaio de fadiga por flexão rotativa 1

1.2.1 Descrição 1

1.2.2 Equipamento.....3

1.2.3 Provete 4

1.3 Estrutura da dissertação 5

2. Fundamentação Teórica 6

2.1 Fadiga.....6

2.2 Métodos de estudo da Fadiga 7

2.2.1 Método Tensão-Vida (S-N) 7

2.2.2 Método Deformação-Vida (ε-N) 8

2.2.3 Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE) 9

2.3 Critérios de falha por fadiga 10

3. Estado de Arte 14

3.1 Soluções comercializadas 14

3.2 Aplicações Complementares 16

3.3 Contributo do trabalho realizado 21

4. Desenvolvimento do equipamento 22

4.1 Requisitos de projeto 22
4.2 Modelação e projeto 26
4.3 Seleção de componentes 30
4.3.1 Motor sem escovas e controlador 30
4.3.2 Rolamentos Radiais e Axiais 31
4.3.3 Carruagens e guias lineares 32
4.4 Instrumentação e controlo 33
5. Conclusões e desenvolvimentos futuros 35
Referências 37
Anexos 39
Desenhos técnicos dos componentes 39

Índice de Figuras

Figura 1.1 - Curva S-N resultante de ensaios de fadiga por flexão rotativa [1] 3

Figura 1.2 - Representação Simplificada de um Ensaio de Fadiga à Flexão Rotativa [3] 3

Figura 1.3 - Geometria do provete pela norma ISO 1143:2010 [4] 4

Figura 2.1 - Fases do fenómeno de fadiga: a) representação esquemática, b) imagem rea. [5]. 7

Figura 2.2 - Exemplo de uma Curva S-N [1] 8

Figura 2.3 - Representação gráfica dos parâmetros de um ciclo de tensões [1] 11

Figura 2.4- Variação da Curva S-N [6] 11

Figura 2.5- Critério de falha por fadiga [1] 12

Figura 3.1 - Exemplos de equipamentos para ensaios de fadiga por flexão rotativa. a) exemplo comercializado pela empresa ADMET, b) exemplo customizado desenvolvido por Rodrigo Gomes [3,7]. 14

Figura 3.2 - Exemplos de atuadores lineares. a) atuador linear com movimento do pistão e b) atuador linear de motor passo a passo com guias lineares [17,18] 17

Figura 3.3- Atuador hidráulico [19] 18

Figura 3.4 - Forno de alta temperatura AHTF 850-A [11] 18

Figura 3.5 - Mecanismo de Aquecimento através de lâmpada de halogénio [12] 19

Figura 3.6 - Mecanismo de aquecimento por indução térmica [20] 20

Figura 4.1 - Solução final em SOLIDWORKS do equipamento a ser desenvolvido 26

Figura 4.2 - Extremidade fixa 27

Figura 4.3 - Vista explodida da caixa de rolamentos 28

Figura 4.4 - Extremidade móvel 28

Figura 4.5 - Provete com abas 29

Figura 4.6 - Sistema de fixação do provete 29

Figura 4.7 - Componentes comercializados pela empresa Scorpion. a) Motor HK-3536-510KV, b) controlador TRIBUNUS 06-80A (SBEC) ESC 3-6S e c) cabo de conexão ao computador [22] 31

Figura 4.8 - Carruagens e guias lineares [24] 32

Figura 4.9- Funcionamento do controlar para obtenção do número de rotações e velocidade de rotação ... 34

Índice de Tabelas

Tabela 1.1 - Relação entre os diâmetros do provete [4]…… 5

Tabela 3.1 - Lista de equipamentos comercializados…….. 15

Tabela 4.1 - Requisitos funcionais do equipamento…… 23

Tabela 4.2 - Propriedades dos materiais passiveis de serem testados [21]…… 24

Simbologia

d	Diâmetro da secção reduzida do provete [mm]
D	Diâmetro da zona de fixação do provete [mm]
F	Força aplicada [N]
I	Momento de inércia de área [mm^4]
l	Braço da força aplicada [mm]
L	Comprimento da secção reduzida do provete [mm]
L_1	Comprimento da zona de fixação do provete [mm]
L_2	Comprimento total do provete [mm]
M	Momento fletor [N.mm]
N_f	Número de ciclos [ciclos]
r	Raio da secção reduzida do provete [mm]
r_1	Raio de redução do filé do provete [mm]
R	Razão de tensões
R_a	Rugosidade média [µm]
S_e	Limite de resistência à fadiga [MPa]
S_f	Resistência à fadiga [MPa]
S_{ut}	Resistência à tração [MPa]
S_y	Resistência de escoamento [MPa]
$\Delta\varepsilon$	Gama de deformação
ΔK_1	Gama do fator de intensidade de tensões [$MPa.m^{0,5}$]
σ	Tensão aplicada [MPa]
σ_a	Amplitude de tensão [MPa]
σ_m	Tensão média [MPa]
$\sigma_{máx}$	Tensão máxima [MPa]
σ_{min}	Tensão mínima [MPa]
σ_r	Gama de tensões [MPa]

Siglas

NTI	Núcleo de Tecnologia Industrial
DEMI	Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial
FCT	Faculdade de Ciências e Tecnologia
UNL	Universidade Nova de Lisboa
ISO	*International Organization for Standardization*
LabView	*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*
MFLE	Mecânica da Fratura Linearmente Elástica

1. Introdução

1.1 Motivação e Objetivos

Na constante procura de aumentar a diversidade de equipamentos disponíveis nos laboratórios do Núcleo de Tecnologia Industrial (NTI) do Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial (DEMI) da Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT) da Universidade Nova de Lisboa (NOVA), dando a possibilidade de aumentar a variedade de ensaios nele realizado, e ainda complementar alguns trabalhos realizados, surgiu a necessidade de desenvolver um equipamento para ensaios de fadiga por flexão rotativa.

O presente trabalho remete para o desenvolvimento de um protótipo funcional do equipamento mencionado. Nele serão apresentadas todas as características do equipamento, as gamas de funcionamento das diversas solicitações, e as dimensões e características dos provetes admitidos. De modo a poder complementar a utilidade dos ensaios, toda a informação adquirida com os mesmos, será tratada com o auxílio do *software* LabVIEW.

O objetivo deste trabalho é justificado pela possibilidade de desenvolvimento de um equipamento personalizado de custo reduzido por parte da faculdade, que consiga dar resposta às necessidades dos trabalhos nela realizada, e ainda perspetivar um complemento para trabalhos futuros, em que apenas com um equipamento customizado é passível de ser adaptado consoante as necessidades dos trabalhos a realizar. Por outro lado, o desenvolvimento de um projeto com estas características permite a consolidação de conhecimentos inerentes aos comportamentos dos materiais e de projeto de máquinas, bem como, a metodologias de trabalho científico, quer do ponto de vista dos procedimentos de desenvolvimento experimental, como de todo o registo literário do trabalho desenvolvido.

1.2 Ensaio de fadiga por flexão rotativa

1.2.1 Descrição

O ensaio de fadiga por flexão rotativa é um ensaio destrutivo onde um provete, em rotação, é deformado por ação de momento de flexão.

O princípio de funcionamento deste ensaio é baseado no funcionamento de um eixo rotativo, em que o provete funciona como uma viga simples, que sofre um carregamento em dois pontos simétricos. Posto isto, em apenas uma rotação, o provete é submetido a carregamentos de tração e de compressão.

Os ensaios, de um modo geral, permitem caracterizar os materiais que são testados, pelo que, o ensaio de fadiga por flexão rotativa tem como objetivo a obtenção da Curva S-N, que relaciona a intensidade das tensões aplicadas com o número de ciclos até à rotura do material. Esta curva que caracteriza o material testado, permite obter uma previsão da resistência à fadiga do material quando sujeito consecutivamente ao mesmo carregamento, com as mesmas condições de teste. De notar que as solicitações a que os materiais são sujeitos neste ensaio poderão ser bastante inferiores às tensões de cedência, fazendo com que seja possível estabelecer uma relação entre a importância do número de solicitações com a intensidade das mesmas.

Deste modo, para que seja possível caracterizar o material através da Curva S-N é necessário quantificar os carregamentos existentes no ensaio. Para ensaios de fadiga, cujos carregamentos sejam apenas de flexão, a tensão aplicada σ [MPa] é dada pela equação (1.1).

$$\sigma = \frac{M \times r}{I} \tag{1.1}$$

Onde M [N.mm] representa o momento fletor aplicado no provete. Tipicamente, para ensaios desta natureza, os provetes têm forma cilíndrica. Posto isto, r [mm] representa o raio do provete cilíndrico e I [mm^4] representa o momento de inércia de área, o qual é descrito pela equação (1.2), também para provetes cilíndricos.

$$I = \frac{1}{4}\pi r^4 \tag{1.2}$$

De acordo com o princípio de funcionamento deste ensaio, o carregamento no provete é simétrico, pelo que se pode descrever o momento fletor M [N.mm] em função da força aplicada F [N], que é aplicada em dois pontos equidistantes do provete, e a distância l [mm] entre o ponto de aplicação da força e a fixação do equipamento.

$$M = \left(\frac{F}{2}\right) \times l \tag{1.3}$$

A Figura 1.1 ilustra um exemplo de uma Curva S-N, traçada com base nos resultados obtidos com um ensaio de fadiga por flexão rotativa.

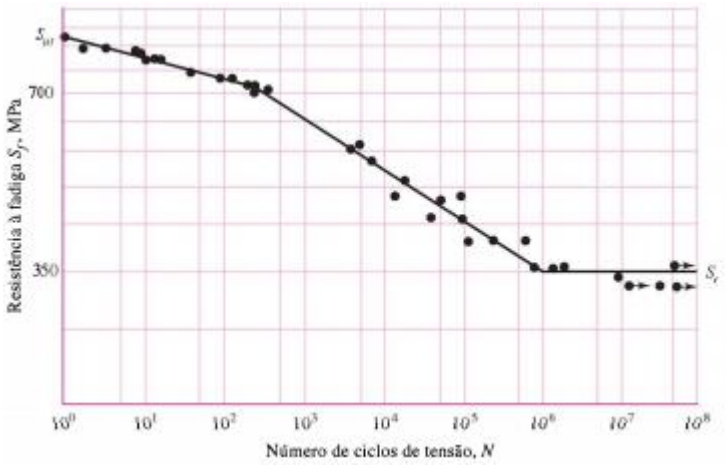


Figura 1.1 - Curva S-N resultante de ensaios de fadiga por flexão rotativa [1].

1.2.2 Equipamento

O equipamento característico para a realização de ensaios de fadiga por flexão rotativa é constituído por um motor de alta rotação, que é responsável pelo movimento rotacional imposto durante todo o ensaio. Este motor é acoplado a um veio de transmissão que fica inserido numa caixa de rolamentos, que permite o movimento rotacional do veio no seu interior e permite que a mesma tenha um segundo grau de liberdade de rotação perpendicular ao movimento de rotação do veio. Dada a simetria da flexão existente no ensaio, o equipamento é constituído por duas caixas de rolamentos e dois veios de transmissão, onde o provete é acoplado aos dois veios através de buchas de fixação. Por outro lado, os carregamentos existentes no ensaio são feitos através de pesos livres, que são fixos também nas caixas de rolamentos, de modo, a que a rotação não seja afetada com as cargas aplicadas. Por fim, o equipamento dispõe de um contador de rotação, que permite caracterizar o ensaio. A Figura 1.2 representa de uma forma simplificada a constituição de um equipamento para ensaios de fadiga por flexão rotativa.

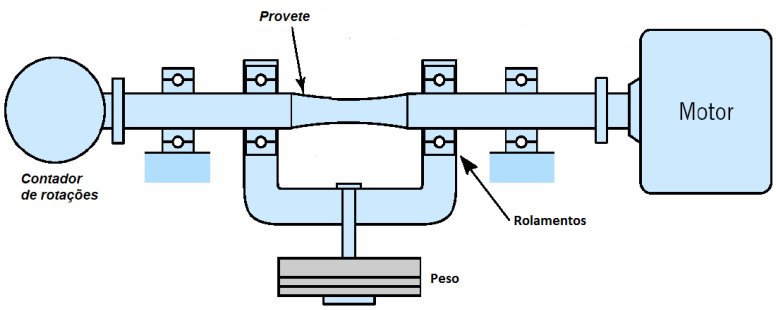


Figura 1.2 - Representação Simplificada de um Ensaio de Fadiga à Flexão Rotativa [3].

1.2.3 Provete

O ensaio de fadiga por flexão rotativa é descrito na norma ISO 1143:2010. Nesta são descritos os princípios de funcionamento do ensaio, as características dos provetes e os procedimentos a adotar durante o ensaio.

Relativamente ao provete a ser testado, a norma especifica quais os formatos e dimensões mais adequados para a realização do mesmo. De acordo com a preparação dos provetes, a norma também especifica quais os processos de fabrico, tratamentos superficiais e térmicos, e acabamentos superficiais admitidos para este ensaio. A Figura 1.3 ilustra um provete para o ensaio de fadiga por flexão rotativa.

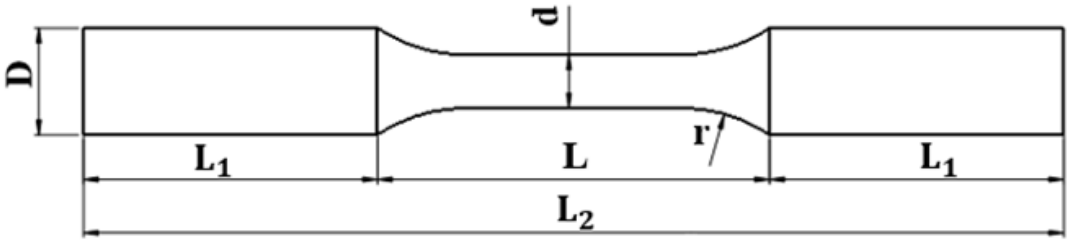


Figura 1.3 - Geometria do provete pela norma ISO 1143:2010 [4].

O provete deverá ter um comprimento da secção reduzida de teste L [mm] com 40% da totalidade do comprimento do provete L_2 [mm]. De acordo com a simetria do provete, o comprimento da secção de fixação do provete L_1 [mm] é de 30% do comprimento total. A relação entre o diâmetro da secção reduzida de estudo do provete d [mm] e o diâmetro da secção de fixação do provete D [mm], é de 0,5. Sendo que o raio do filé de redução de diâmetro r_1 [mm] é de três vez ou superior ao diâmetro da secção reduzida de estudo. A Tabela 1.1 apresenta as dimensões recomendadas pela norma ISO 1143:2010. Relativamente ao acabamento superficial, a norma recomenda uma rugosidade R_a [µm] inferior a 0,32 µm na secção reduzida de teste, e inferior a 0,8 µm para a secção de fixação do provete.

Tabela 1.1 - Relação entre os diâmetros do provete [4].

d [mm]	$r_1 \geq 3$ [mm]	D [mm]
6	18	12
7,5	22,5	15
9,5	28,5	19

1.3 Estrutura da dissertação

O presente trabalho está dividido em cinco capítulos.

O primeiro capítulo apresenta uma breve introdução sobre em que consiste o trabalho, o que será apresentado ao longo do mesmo, bem como, o problema a que pretende dar resposta.

O segundo capítulo remete para a fundamentação teórica do trabalho desenvolvido, onde é apresentada uma abordagem teórica sobre em que consiste a fadiga nos materiais, os vários métodos de estudar este fenómeno e alguns modelos que permitem prever a resistência à fadiga dos materiais.

O terceiro capítulo remete para o estado de arte, onde são apresentadas as soluções existentes no mercado para a realização de ensaios de fadiga por flexão rotativa.

No quarto capítulo é apresentada a solução idealizada para a realização dos ensaios, onde serão descritas todas as funcionalidades da mesma, os componentes constituintes, as gamas de funcionamento e os provetes admitidos.

Por fim, o quinto capítulo remete para as conclusões obtidas sobre o trabalho realizado e sobre os objetivos propostos inicialmente. Algumas sugestões sobre trabalhos futuros e melhorias a realizar ao equipamento também serão mencionadas.

2. Fundamentação Teórica

2.1 Fadiga

Os componentes mecânicos são frequentemente submetidos a carregamentos e a variação das suas condições de serviço, tais como, sucessivas alterações no seu estado de tensão, o que leva que ao longo do tempo as propriedades dos materiais, sejam alteradas. Ao longo de toda a sua vida útil, todos os componentes devem manter-se íntegros e funcionais, como tal é necessário estudar as alterações das propriedades ao longo do tempo e prever quando um determinado componente irá falhar ou deixar de suportar todas as solicitações a que está sujeito [1],[3].

A grande parte da inoperacionalidade dos componentes mecânicos provém de falhas causadas por fadiga, que é o fenómeno de rutura progressiva ou propagação de defeitos nos materiais causado pela aplicação cíclica de tensões ou deformações. Do ponto de vista da intensidade dos carregamentos a que os componentes estão sujeitos, este fenómeno pode ocorrer em estados de tensão bastante inferior à tensão de cedência dos materiais [1].

De um modo geral, o processo de falha por fadiga pode ser caracterizado em três fases distintas: a iniciação da fissura, a propagação da fenda e a rotura final A primeira fase corresponde ao início da falha, nela acontece a nucleação de uma fissura e o crescimento microscópico da mesma. Esta primeira fase inicia-se num determinado ponto com elevada concentração de tensões, que frequentemente, para a maioria dos carregamentos a que os materiais são submetidos corresponde a superfície do mesmo. Alguns fatores que influenciam a iniciação de fissuras são: a composição do material e seu processo de fabrico, o acabamento superficial e existência de tensões residuais. A segunda fase, como o nome indica, corresponde à propagação das fendas nucleadas, as quais, com a continuidade dos carregamentos cíclicos se propagam pelo material. Nesta fase, é característica o aparecimento de “marcas de praia” ou “linhas de paragem”, que são registos no material dados pela propagação das fendas que se assemelham aos registos deixados pelas ondas na areia da praia. Com estas marcas é possível perceber onde se iniciam as fendas, bem como, a direção de propagação das mesmas. De notar que a distância entre cada marca não corresponde à distância propagada em cada ciclo de carregamento, mas que pode corresponder a variação dos tipos de carregamento. Por fim, a terceira fase ocorre, espontaneamente, quando a propagação da fenda atinge um limite critico, e a secção transversal resistente do material deixa de suportar as cargas aplicadas em cada ciclo, e sofre rotura. A Figura 2.1 ilustra uma representação esquemática das três fases da fadiga, e ainda uma imagem real deste fenómeno [1], [5].

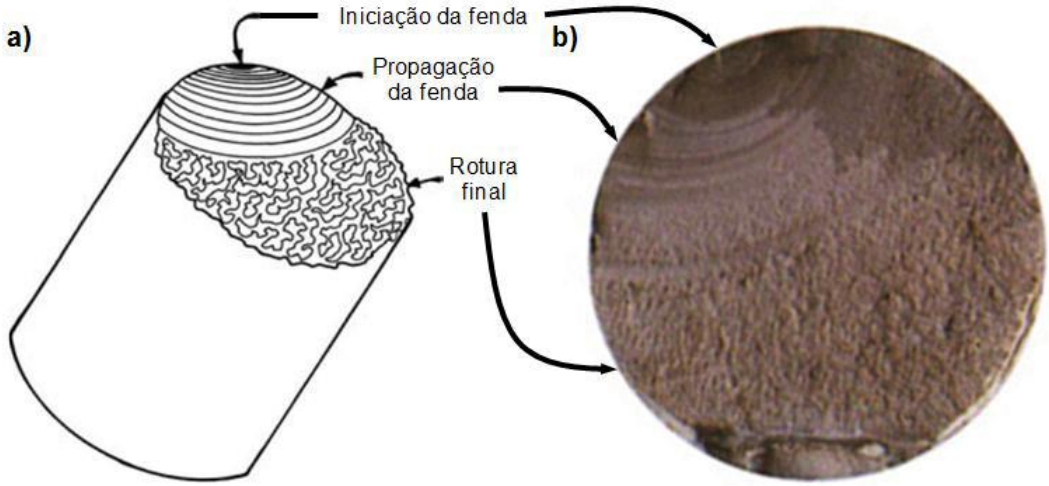


Figura 2.1 - Fases do fenómeno de fadiga: a) representação esquemática, b) imagem real [5].

2.2 Métodos de estudo da Fadiga

Para o estudo da fadiga foram desenvolvidos três métodos de análise, que permitem estudar o comportamento dos materiais quando sujeitos a carregamentos cíclicos e prever a vida útil dos mesmos até que sofram rotura, ou simplesmente percam parte das suas propriedades. Os métodos são: Tensão-Vida (S-N), Extensão-Vida (ε-N) e o método da mecânica da fratura linear elástica (MFLE). De um modo geral, estes métodos tentam, de acordo com as várias abordagens assentes em cada um, relacionar os carregamentos a que os materiais são submetidos com o número de ciclos N_f [ciclos] até que sofram rotura, que caracteriza a vida à fadiga dos materiais. A vida à fadiga pode ser classificada em fadiga de baixo ciclo para valores de N_f compreendidos entre 1 e 10^3 ciclos, enquanto para valores superiores a 10^3ciclos é denominada fadiga de alto ciclo [1], [5].

2.2.1 Método Tensão-Vida (S-N)

O método tensão-vida (S-N) é utilizado em análise de componentes em regime de fadiga de alto ciclo, não sendo muito preciso em regime de fadiga de baixo ciclo. Este método relaciona a tensão a que o componente está submetido com a sua vida à fadiga. Nele são contemplados apenas carregamentos e deformações em regime elástico [1].

A característica deste método é a caracterização dos materiais através da Curva S-N, que é uma curva experimental. Esta curva que relaciona a resistência à fadiga dos materiais S_f [MPa] com a vida à fadiga N_f, é traçada com a realização de sucessivos ensaios, nos quais provetes idênticos são submetidos a diferentes carregamentos até que sofram rotura. A Figura 2.2 apresenta um exemplo de o gráfico de uma curva S-N traçada para um aço [1].

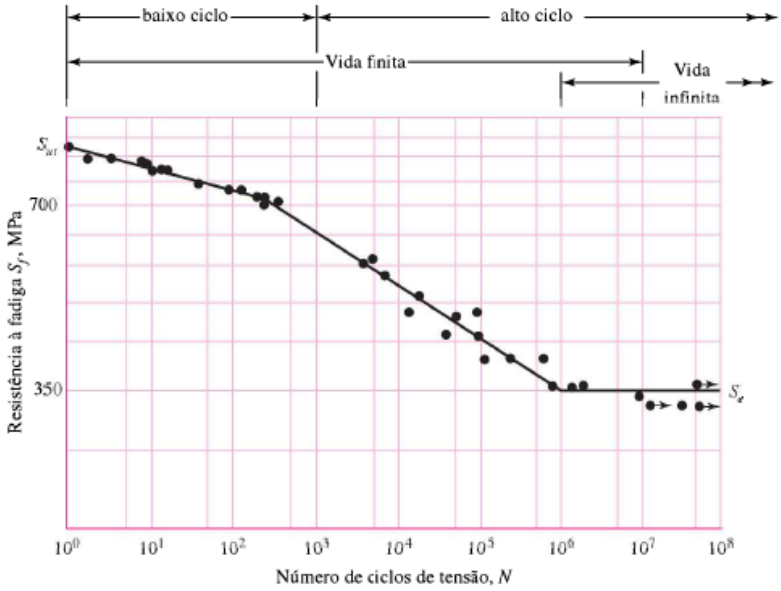


Figura 2.2 - Exemplo de uma Curva S-N [1].

Uma particularidade destas curvas é a possibilidade da determinação do limite de resistência à fadiga S_e [MPa]. Esta característica também denominada por vida infinita dos materiais, é definida como o limite de tensão a partir do qual podem ocorrer falhas por fadiga, que é visível no gráfico acima apresentado, onde a partir de um determinado valor de N_f a curva se torna horizontal. No entanto, a maioria dos metais não ferrosos não possuem esta característica, sendo que a curva S-N que os caracteriza é sempre decrescente [1], [2].

O equipamento projetado com este trabalho foi desenvolvido com base neste método, pelo que será mais aprofundado mais a frente no documento.

2.2.2 Método Deformação-Vida (ε-N)

O método Deformação-Vida (ε-N) é uma ferramenta de estudo da fadiga em regime de fadiga de baixo ciclo, com tal contempla estados de tensões que possam funcionar em regime plástico. Como o nome indica, este relaciona as deformações existentes com a vida à fadiga de um determinado componente. Este método é considerado uma abordagem de iniciação à fadiga, que ajuda a entender a natureza da mesma, no entanto, é um método que assenta em algumas pressuposições, o que leva a que os resultados tenham alguma incerteza [1].

Como foi apresentado no capítulo anterior, a fadiga inicia-se num determinado ponto em que haja uma elevada concentração de tensões. Quando a tensão nesse ponto excede o limite

elástico, ocorrem deformações plásticas no material. Posto isto, é necessário caracterizar o comportamento do material quando sujeito a estas deformações cíclicas [1],[2].

A relação de Morrow descrita na equação (2.1), estabelece a relação entre a deformação total e a vida à fadiga dos materiais [1].

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\sigma_F'}{E}\left(2N_f\right)^b + \varepsilon_F'\left(2N_f\right)^c \tag{2.1}$$

Onde $\Delta\varepsilon$ corresponde à gama de deformação do material. O coeficiente σ_F' e ε_F', e o expoente b e c, são valores tabelados [1].

Do ponto de vista do desenvolvimento de componentes mecânicos este método não é muito utilizado, devido ao facto de a determinação da deformação nas várias partes dos componentes ser de elevada dificuldade [1].

2.2.3 Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE)

O método da fratura linear elástica pode ser adaptado para estudar o comportamento dos materiais sujeitos a carregamentos cíclicos, e consequentemente, entender a influência destes na vida à fadiga dos materiais. Este princípio assenta no pressuposto que já foi detetado uma fenda ou um defeito no material, ou seja, considera que o material se encontra no início da segunda fase da fadiga, a propagação da fenda. Posto isto, a fenda inicial é caracterizada e o método estuda a evolução da mesma de acordo com os carregamentos cíclicos a que o material está sujeito até que sofra rotura [1], [5].

A evolução do crescimento da fenda a pelo número de ciclos N pode ser aproximada pela equação (2.2) denominada equação de Paris [1].

$$\frac{da}{dN} = C\left(\Delta K_1\right)^m \tag{2.2}$$

Onde ΔK_1 corresponde à gama do fator de intensidade de tensão por ciclo, que pode ser descrito pela equação (2.3). O coeficiente C e o expoente m são constantes empíricas do material [1].

$$\Delta K_1 = \beta\Delta\sigma\sqrt{\pi a} \tag{2.3}$$

Para se estabelecer uma relação entre a vida à fadiga e o crescimento de uma fenda, é necessário substituir a equação (2.3), na equação (2.2) e integrá-la, obtendo assim a equação (2.4) [1].

$$\int_0^{N_f} dN = N_f = \frac{1}{C}\int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{\left(\beta\Delta\sigma\sqrt{\pi a}\right)^m} \tag{2.4}$$

Onde a_i e a_f correspondem ao comprimento da fenda detetada inicialmente e ao comprimento da fenda quando o material sofre rotura, respetivamente [1].

Este método é frequentemente utilizado com recurso a programas computacionais, com modelos teóricos mais completos para prever a vida à fadiga dos materiais [1].

2.3 Critérios de falha por fadiga

A variação dos carregamentos a que os componentes mecânicos estão sujeitos, frequentemente, estão associados às falhas por fadiga dos mesmos. Portanto, a possibilidade de poder prever o comportamento mecânico e a vida útil dos materiais é de enorme importância [1], [2].

Foram desenvolvidas algumas formulações que permitem relacionar os carregamentos cíclicos a que os materiais estão sujeitos com o número de ciclos até que ocorra uma falha por fadiga. No entanto, estas formulações assentam em alguns parâmetros que permitem caracterizar os ciclos de tensão variáveis no tempo. A tensão média σ_m [MPa] descrita na equação (2.5), é definida como a média entre a tensão máxima $\sigma_{máx}$ [MPa] e tensão mínima σ_{min} [MPa] [1], [2].

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{máx} + \sigma_{min}}{2} \tag{2.5}$$

Outro parâmetro que caracteriza os ciclos de tensões é a gama de tensões σ_r [MPa], descrito na equação (2.6) [1],[2].

$$\sigma_r = \sigma_{máx} - \sigma_{min} \tag{2.6}$$

A amplitude de tensões σ_a [MPa] descrita na equação (2.7) é definida como metade da gama de tensões [1], [2].

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{máx} - \sigma_{min}}{2} \tag{2.7}$$

Por fim, a razão de tensões R, descrita na equação (2.8), é definida como a razão entre a amplitude da tensão mínima e máxima [1], [2].

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{máx}} \tag{2.8}$$

A Figura 2.3 ilustra a representação destes parâmetros, num gráfico que correlaciona as tensões ao longo do tempo [1].

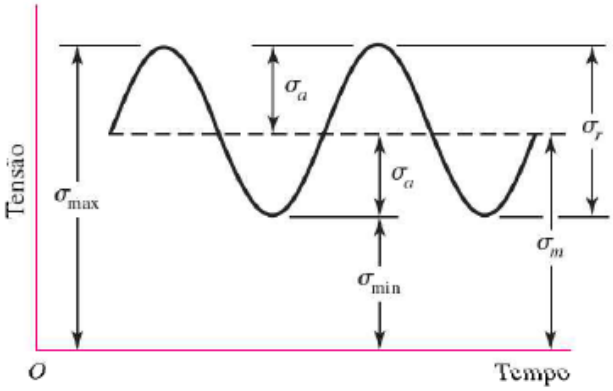


Figura 2.3 - Representação gráfica dos parâmetros de um ciclo de tensões [1].

Algumas particularidades apresentadas sobre estes parâmetros são: por convenção, as tensões de compressão têm o sinal negativo, o que em sentido contrário as tensões de tração têm sinal positivo, pelo que $R = -1$ representa um ciclo de tensão alternada, ou seja, a tensão média é nula. A variação da intensidade da tensão média é um fator preponderante na curva S-N, que faz com que a mesma oscile de acordo com o seu valor. Esta oscilação é ilustrada na Figura 2.4 [2], [6].

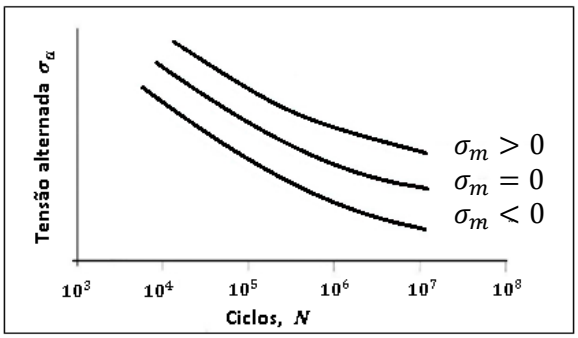


Figura 2.4- Variação da Curva S-N [6].

A relação da vida à fadiga de um material com a tensão média e a tensão alternada foi descrita em quatro critérios distintos. Os critérios são: Soderberg, Goodman modificado, Gerber e ASME-elíptico. Estes desenvolveram critérios em que permitem traçar graficamente uma linha que estima o comportamento dos materiais quando sujeitos aos carregamentos. De acordo com os carregamentos a que os materiais estão sujeitos, é possível localiza-los no gráfico, com base nos valores dos seus parâmetros. Alguns dos critérios são mais conservadores que outros, no entanto, consoante o critério escolhido, todos os pontos que fiquem abaixo das linhas traçadas permitem prever que o material não irá sofrer falha por fadiga até atingir vida infinita. A Figura 2.5 ilustra a representação gráfica de todos estes critérios [1].

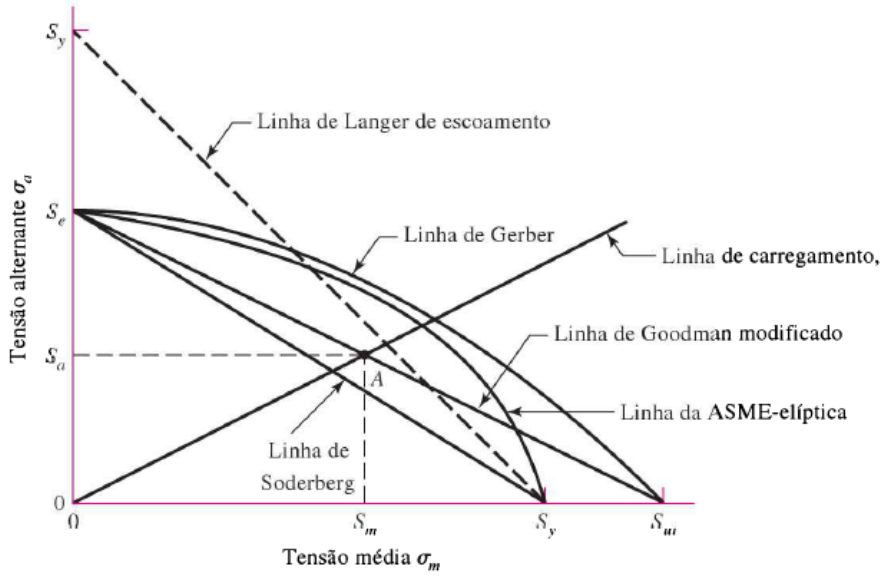


Figura 2.5- Critério de falha por fadiga [1].

De acordo com o gráfico apresentado, os critérios também estão estabelecidos numericamente. O critério de Soderberg e de Goodman modificado são descritos pelas equações (2.9) e (2.10), respetivamente. De salientar que estes critérios são os mais conservadores de todos os apresentados [1].

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_y} = \frac{1}{n} \tag{2.9}$$

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = \frac{1}{n} \tag{2.10}$$

De igual modo, as equações (2.11) e (2.12) descrevem os critérios de Gerber e ASME-elíptica, respetivamente [1].

$$\frac{n\sigma_a}{S_e} + \left(\frac{n\sigma_m}{S_{ut}}\right)^2 = 1 \tag{2.11}$$

$$\left(\frac{n\sigma_a}{S_e}\right)^2 + \left(\frac{n\sigma_m}{S_y}\right)^2 = 1 \tag{2.12}$$

Os parâmetros descritos como S_e, S_y e S_{ut} correspondem ao limite de resistência à fadiga, resistência de escoamento (tensão de cedência) e resistência de tração (tensão de rotura), respetivamente. De salientar que estes valores são conhecidos para os materiais. De notar, n representa o fator de segurança do componente [1].

Com o auxílio destes critérios é possível prever vida à fadiga dos materiais, através da equação (2.13) [1].

$$N_f = \left(\frac{S_f}{a}\right)^{1/b} \tag{2.13}$$

Onde a e b são constantes dos materiais e podem ser descritos pelas equações (2.14) e (2.15), respetivamente [1].

$$a = \frac{(fS_{ut})^2}{S_e} \tag{2.14}$$

$$b = -\frac{1}{3}\log\left(\frac{fS_{ut}}{S_e}\right) \tag{2.15}$$

O parâmetro f corresponde à fração de resistência à fadiga, e também corresponde a uma característica do material [1].

Nos critérios acima mencionados, um dos parâmetros é o limite de resistência à fadiga, para vida infinita. No entanto, para prever a resistência à fadiga em vida finita ($S_f > S_e$), basta substituir S_e por S_f nas equações e determinar qual o valor da mesma. Por fim, através da equação (2.13) é possível determinar a vida à fadiga dos materiais [1].

3. Estado de Arte

3.1 Soluções comercializadas

O equipamento característico de um ensaio de fadiga por flexão rotativa foi apresentado no subcapítulo 1.2.2, no entanto, existe um vasto leque de soluções disponíveis no mercado. Estas soluções que apesar do princípio de funcionamento ser o mesmo, apresentam diferentes gamas de funcionamento, nomeadamente, velocidades de rotação e intensidade das cargas aplicadas, e diferentes tipos de provete admitidos. Geralmente, todos os equipamentos utilizados para a caracterização de materiais, têm um elevado custo de aquisição, pelo que serão apresentadas algumas soluções customizadas, desenvolvidas em algumas instituições académicas, completando assim o leque de soluções apresentadas por algumas entidades especializadas em desenvolvimento de equipamentos desta natureza. Na Figura 3.1 são apresentadas duas soluções de equipamentos para a realização de ensaios de fadiga por flexão rotativa, em que a) ilustra uma solução comercializada pela empresa norte americana ADMET, e b) ilustra uma solução customizada, desenvolvida por Rodrigo Gomes, na Universidade Católica, no Rio de Janeiro.

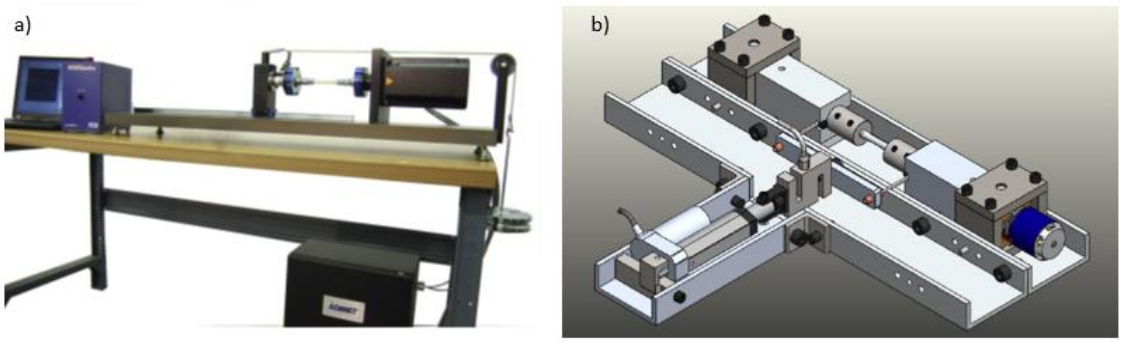


Figura 3.1 - Exemplos de equipamentos para ensaios de fadiga por flexão rotativa. a) exemplo comercializado pela empresa ADMET, b) exemplo customizado desenvolvido por Rodrigo Gomes [3,7].

Como referido anteriormente, o princípio de funcionamento dos dois equipamentos apresentados na Figura 3.1 é semelhante, no entanto, a solução apresentada em b) tem um custo de aquisição muito inferior, comparativamente, com a solução apresentada em a). O que permite que, sobretudo, algumas instituições académicas consigam o desenvolvimento e aquisição de equipamentos que permitam equipar os seus laboratórios com uma maior facilidade, e assim comtemplar uma maior variedade de estudos e testes realizados.

A Tabela 3.1 apresenta algumas das soluções comercializadas e algumas soluções customizadas. De modo a estabelecer algumas comparações entre os equipamentos, formam apresentadas algumas das suas principais especificações técnicas.

Tabela 3.1 - Lista de equipamentos comercializados.

Fabricante	Modelo	Momento de Flexão [Nm]	Velocidade de Rotação [rev/min]	Observações
ADMET	eXpert 9910	máx 5	3000	
ADMET	eXpert 9911	máx 10	3000	
ADMET	eXpert 9912	máx 25	1500	
Walterbai	UBM 20	0,1 - 20	200 - 15000	
Walterbai	UBM 60	1 - 60	100 - 5000	
Walterbai	UBM 100	2 - 100	100 - 5000	
Walterbai	UBM 200	5 - 200	200 - 5000	
Walterbai	UBM 500	10 - 500	200 - 5000	
Advance Instrument Inc.	RRM	2,45 - 24,50	10 -- 60	
Tecquipment	SM1090V	Não apresentado	Não apresentado	
Zwick Roell	ARBM 120	2,5 - 120	500 - 5000	
Yamamoto	YRB 200	máx 79,4	1000-5000	
Yamamoto	YRB 300L	máx 52,5	500-4000	
Spranktronics	09	máx 10	1000-3000	
Instron	RRM-A2	0,25 -2,3	500-10000	Descontinuado
PA Hilton	HSM19D	Não apresentado	1400-5600	Carga eletrónica
Rodrigo Gomes	NA	0,00645-3.23	60-20000	Customizado Carga eletrónica
Luiz Tronco	NA	Não apresentado	Não apresentado	Customizado
Rodrigo Brandão	NA	Não apresentado	Não apresentado	Customizado
Instituto Federal	NA	Não apresentado	Não apresentado	Customizado

De salientar que as soluções apresentadas, na sua generalidade correspondem a soluções que contemplam o ensaio tradicional de fadiga por flexão rotativa, onde os carregamentos que provocam flexão no provete são feitos através de pesos livres, no entanto, duas das soluções apresentadas utilizam o carregamento com recurso a equipamentos eletrónicos, onde é possível variar o carregamento ao longo de todo o ensaio.

3.2 Aplicações Complementares

O objetivo de um ensaio, de um modo geral, é a caraterização de algumas propriedades dos materiais. No entanto, em condições reais de aplicação dos diversos componentes mecânicos os resultados obtidos diferem dos resultados recolhidos em laboratório, no qual por vezes, não são contempladas a combinação de vários esforços das diversas solicitações que ocorrem em simultâneo, ou até mesmo a variação de temperatura que pode ter uma influência bastante significativa na resistência dos materiais. Posto isto, a possibilidade de aproximar as condições de teste às condições reais de serviço permite uma melhor e mais completa caracterização dos materiais, como por exemplo, a possibilidade da realização de vários ensaios em simultâneo, ou a possibilidade de testar não apenas provetes convencionais, mas também componentes mecânicos.

Os materiais de teste podem ir desde provetes normalizados, a ferramentas, componentes para equipamentos aerospaciais ou de automóveis (componentes de motores), ou até mesmo materiais biomédicos (próteses ou utensílios médicos). Dado o vasto leque de materiais, e consequentemente, as diversas condições de serviço a que são solicitados, esforços de cargas axiais (tração ou compressão), esforço de flexão, variação a altas temperaturas, entres outros, seria pertinente a possibilidade de consomar no mesmo ensaio o estudo da fadiga à flexão rotativa, com um equipamento convencional, e ainda estudar a fadiga à tração/compressão e caracterizar a fadiga térmica no mesmo ensaio, e ainda no mesmo equipamento.

De um modo mais elementar, as cargas existentes num ensaio de fadiga por flexão rotativa, podem simplesmente ser provocadas através de pesos livres, o que permite estabelecer uma gama de forças que se podem aplicar no início de cada ensaio, no entanto, estas mantêm-se constantes ao longo do decorrer do mesmo. Por semelhança, a aplicação de cargas axiais durante o ensaio também pode ser feita com recurso a pesos livres, no entanto, apesar da existência da dificuldade de fazer variar a intensidade das cargas ao longo do mesmo, a variação da direção desta também apresenta uma dificuldade, o que não permite oscilar entre cargas de tração e compressão. Outra dificuldade existente na variação de cargas aplicadas por meio de pesos livres é a monotorização das mesmas. Posto isto, a utilização de componentes eletrónicos ou hidráulicos

em deterioramento dos pesos livres permite a variação e o aumento da complexidade dos parâmetros de estudo ao longo dos ensaios, e consequentemente, permite uma maior proximidade das condições reias de serviço às condições de teste. Os componentes mais adequados para solucionar as dificuldades acima apresentadas são: os atuadores eletromecânicos e os atuadores hidráulicos.

O atuador eletromecânico, é a conjugação de um atuador mecânico com um motor elétrico. Um dos atuadores eletromecânicos mais adequados, é também denominado de atuador linear, e permite transformar o movimento circular do motor elétrico em movimento linear, através de um veio roscado ou parafuso de esferas. Estes tipos de atuadores podem ser conectados a controladores, o que permite o controlo e monotorização dos mesmos. A Figura 3.2 apresenta dois exemplos destes atuadores, em a) apresenta um atuador linear, no qual o movimento linear imposto move um pistão com o auxílio de um veio roscado, e em b) um atuador linear de parafuso de esferas com guias lineares e motor passo a passo.

Figura 3.2 - Exemplos de atuadores lineares. a) atuador linear com movimento do pistão e b) atuador linear de motor passo a passo com guias lineares [17,18].

O atuador hidráulico é um atuador que recorre às variações de pressão de um fluido líquido, por norma óleo, para a aplicação de forças ou movimentos. Uma das características dos fluidos é a sua incompressibilidade quase nula, o que permite obter forças de elevada intensidade com pequenas variações de pressão. Um dos atuadores mais adequados para este tipo de aplicações é o êmbolo cilíndrico, que com a variação de pressão do fluido permite obter o movimento linear de um pistão. Estes atuadores também podem ser conectados a controladores, que permitam o controlo e monotorização dos mesmos. A Figura 3.3 representa o exemplo de um atuador hidráulico (êmbolo cilíndrico).

Figura 3.3- Atuador hidráulico [19].

Como referido anteriormente, a caraterização da fadiga térmica dos materiais quando sujeito a variações de temperatura bastante significativas, é um objeto de estudo bastante pertinente por se aproximar da realidade das condições de serviço de alguns componentes. Alguns fornecedores de equipamentos de ensaios, já desenvolveram algumas soluções para este estudo.

A empresa Zwick Roell que desenvolveu um equipamento para ensaios de fadiga por flexão rotativa, mencionado na Tabela 3.1 também desenvolveu um equipamento complementar para a avaliação da influência da temperatura durante o ensaio, o forno de alta temperatura AHTF 850-A. Este equipamento permite estabelecer uma temperatura do ensaio compreendida entre os 200 e 850 ℃. A Figura 3.4 ilustra o equipamento desenvolvido pela Zwick Roell.

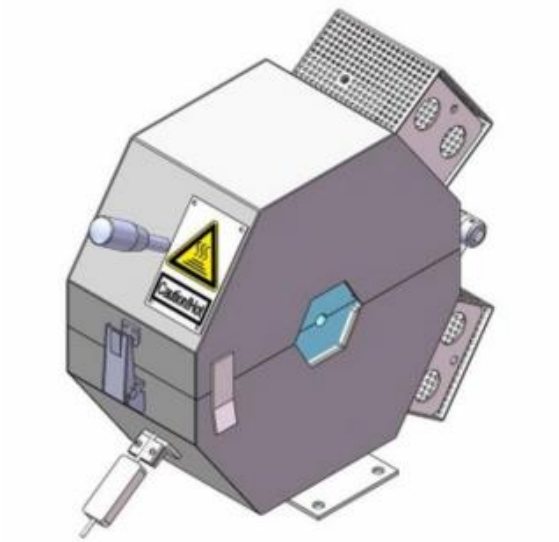


Figura 3.4 - Forno de alta temperatura AHTF 850-A [11].

Por semelhança do exemplo acima apresentado, a empresa Yamamoto, que também desenvolve equipamentos para ensaios de fadiga à flexão rotativa, desenvolveu um mecanismo para a avaliação da influência da temperatura durante o ensaio. Este mecanismo constituído por uma lâmpada de halogénio, uma câmara de aquecimento, um sensor de temperatura e um sistema de arrefecimento, permite incidir um feixe de luz na zona de teste do provete aumentando assim a sua temperatura, enquanto o sensor de temperatura vai controlando a temperatura a que o provete se encontra. Por outro lado, o sistema de arrefecimento não permite que o sistema de aquecimento e o restante equipamento sobreaqueça. Este mecanismo permite uma oscilação de temperatura máxima de 600 ℃. O mecanismo de aquecimento desenvolvido pela Yamamoto é ilustrado na Figura 3.5.

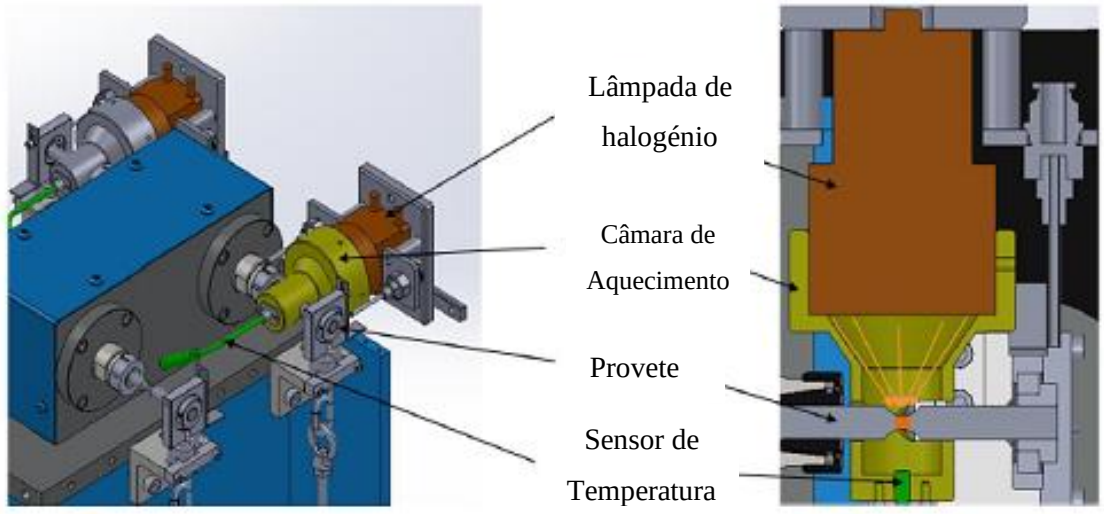


Figura 3.5 - Mecanismo de Aquecimento através de lâmpada de halogénio [12].

A variação da temperatura ao longo do ensaio também pode ser efetuada través de indução térmica. A empresa TESTRESOURCES desenvolveu um equipamento para o estudo da fadiga térmica. Este equipamento é constituído por um aquecedor de indução, um sistema de arrefecimento e um sistema de controlo. No entanto, este mecanismo não foi desenvolvido para a utilização em ensaios de fadiga à flexão rotativa, mas para ensaios de fadiga axiais, no entanto, o princípio de funcionamento pode ser adotado para o ensaio desejado. A temperatura máxima admitida por este mecanismo é de 1200 ℃. Na Figura 3.6 é apresentado o mecanismo de indução térmica desenvolvido pela TESTRESOURCES.

Figura 3.6 - Mecanismo de aquecimento por indução térmica [20].

De salientar que os mecanismos apresentados para o estudo da variação da temperatura ao longo dos ensaios permitem a sua implementação ou remoção, consoante as necessidades do ensaio em curso.

Ao longo de todo este capítulo, foram apresentadas diversas soluções para a aplicação num equipamento de fadiga à flexão rotativa, dando assim a possibilidade de aumentar a quantidade de parâmetros estudados, bem como a complexidade dos mesmos. A seleção destes componentes e/ou do acrescento de parâmetros de estudo é determinada pelas necessidades dos laboratórios, objetivos de estudo e trabalhos realizados contrabalançados pelo custo de aquisição, custos de manutenção e condições necessárias pela sua implementação. Por exemplo, a aplicação de carregamentos ao longo dos ensaios com a utilização de pesos livres, apresenta uma solução eficaz, com baixo custo de aquisição e com custo de manutenção quase nulo. No entanto, a substituição dos pesos livres por atuadores eletromecânicos ou hidráulicos permite uma maior complexidade de carregamentos existentes, mas por outro lado, exige um maior investimento para aquisição dos mesmos. Comparativamente, os atuadores eletromecânicos são componentes mais simples, necessitam de menos custos de manutenção, mas não de sistemas complementares à sua operação, por outro lado, os atuadores hidráulicos são equipamentos que exigem uma instalação mais complexa, necessitando de sistemas de compressão e arrefecimento, e consequentemente, custos de manutenção. No entanto, os atuadores eletromecânicos permitem a aplicação de cargas de menor intensidade que os atuadores hidráulicos.

Posto isto, para a escolha dos equipamentos e complexidade dos mesmos é necessário que se analise as necessidades dos laboratórios, bem como, as pretensões do mesmo e complexidades dos estudos neles realizados.

3.3 Contributo do trabalho realizado

O equipamento personalizado a ser desenvolvido para equipar os laboratórios de NTI apresentam, de um modo geral, as mesmas funcionalidades dos equipamentos apresentados nos capítulos anteriores, no entanto, este apresenta um custo de aquisição, bastante inferior aos comercializados, e apresenta ainda a possibilidade de adaptação aos objetivos pretendidos. A possibilidade de caracterizar materiais provenientes de processos alternativos e/ou emergentes, provenientes de trabalhos de doutoramento e investigação do NTI, para além de materiais provenientes de processos convencionais, apresenta uma mais valia em relação aos equipamentos comercializados, sendo que apenas um equipamento customizado possibilita a capacidade de adaptação às particularidades de cada ensaio. No entanto, com o aumento e avanço dos estudos realizados nos laboratórios, o equipamento que neste momento consegue dar respostas a todas as necessidades, poderá não o conseguir fazer no futuro, pelo que a alteração ou melhoramento de alguns componentes poderá ser uma solução a adaptar ao longo do tempo. Esta solução permite que haja uma redução de custos, e os que equipamentos disponíveis nos laboratórios consigam sempre dar respostas às necessidades do mesmo.

4. Desenvolvimento do equipamento

4.1 Requisitos de projeto

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um equipamento personalizado para a realização de ensaios de fadiga à flexão rotativa. A realização deste ensaio é descrita através da norma ISO 1143:2010, na qual um provete com movimento de alta rotação, é submetido a esforços que provoquem flexão no mesmo, porém, o equipamento a ser desenvolvimento para além da aplicação dos esforços mencionados contempla ainda a aplicação de esforços axiais, os quais aplicam cargas de tração ou compressão no provete. Com este equipamento pretende-se a caracterização dos materiais testados através da Curva S-N. Posto isto, os ensaios realizados com este equipamento consistem na imposição do movimento de alta rotação no provete, em que são quantificados os esforços aplicados, e termina quando o provete sofre rotura.

Os dados experimentais retirados durante o ensaio que permitem caracterizar o mesmo são:

- O valor das cargas aplicadas no decorrer do ensaio, cargas que provoquem flexão e/ou cargas axiais;
- O número de rotações desde o início do ensaio até que o provete sofra rotura.

Através da realização de sucessivos ensaios, onde o valor das cargas aplicadas ao longos dos mesmo vai sendo alterado, e em que são retirados os dados experimentais acima mencionados no fim de cada ensaio realizado, é possível caracterizar o material testado através da Curva S-N. De acordo com parâmetros a estudar nos ensaios a realizar, foram descritos os seguintes requisitos funcionais que o protótipo do equipamento deve contemplar. Estes requisitos foram listados na Tabela 4.1.

Apesar dos requisitos funcionais estabelecidos na Tabela 4.1 que o equipamento a desenvolver deve contemplar, também é necessário estabelecer as gamas de funcionamento dos parâmetros de estudo a que o equipamento deve operar, nomeadamente, as gamas de velocidade de rotação, a amplitude de cargas aplicadas, de modo a que a seleção dos componentes constituintes do equipamento seja o mais eficiente e pertinente possível. De notar que estes parâmetros de funcionamento influenciam a escolha do motor, o sistema de fixação do provete e a estrutura do equipamento em geral.

Tabela 4.1 - Requisitos funcionais do equipamento.

Requisitos Funcionais	Detalhes
Fonte de rotação	Componente capaz de aplicar um movimento de alta rotação ao provete
Medição da velocidade de rotação	Integração de sensores que permitam a medição da velocidade de rotação do provete
Aplicação do momento de flexão e cargas axiais	Mecanismo capaz de aplicar um momento de flexão e cargas axiais no provete, que se encontra com um movimento de alta rotação
Contagem do número de ciclos	Integração de sensores que permitam a contagem do número de rotações do provete, até à sua rotura.
Sistema de fixação do provete	Afixação do provete tem que ser adequada para que não haja nenhum constrangimento ao seu movimento de rotação, e ainda que um dos lados da fixação não permita o seu deslocamento axial, enquanto o outro deve ser livre
Facilidade de utilização	A preparação de cada ensaio deve ser simples
Versatilidade e customização	O equipamento deverá possibilitar o ensaio com provetes de diferentes dimensões e materiais
Instrumentação e controlo	Integração de sistemas capaz de controlar todas as gamas de funcionamento do equipamento
Automatização	As operações na realização dos ensaios devem ser o máximo possível controladas por sistemas informáticos

A grande parte da inoperacionalidade dos componentes mecânicos que provêm de falhas causadas por fadiga, ocorrem quando os mesmos estão em condições de serviço bastante inferiores às condições de cedência, ou seja, é pertinente estudar as falhas de fadiga no domínio elástico. De acordo com a equação (1.1) que estabelece a tensão aplicada no provete em função do momento fletor aplicado, é possível estabelecer uma nova relação em que determina o momento fletor de cedência, substituindo a tensão aplicada pela tensão de cedência de cada material, e desenvolvendo-a em função dos diâmetros dos provetes a estudar. Esta nova relação é estabelecida na equação (4.1). Foi também realizado um levantamento das propriedades de alguns materiais que possam vir a ser estudados no equipamento, nomeadamente, o valor das tensões de cedência de cada material, de modo a que se possa estabelecer o momento fletor máximo admitido.

$$M_{ced} = \frac{\sigma_{ced} d^3 \pi}{32} \tag{4.1}$$

A Tabela 4.2 apresenta a informação recolhida referente aos materiais que possam vir a ser estudados no equipamento e os momentos fletores máximos estabelecidos para cada um, através da equação (4.1).

Tabela 4.2 - Propriedades dos materiais passiveis de serem testados [21].

Material		$\boldsymbol{\sigma_{ced}}$ $[\boldsymbol{MPa}]$	$\boldsymbol{M_{ced}}$ $[\boldsymbol{Nm}]$ $\emptyset \boldsymbol{6\ mm}$	$\boldsymbol{M_{ced}}$ $[\boldsymbol{Nm}]$ $\emptyset \boldsymbol{7,5\ mm}$	$\boldsymbol{M_{ced}}$ $[\boldsymbol{Nm}]$ $\emptyset \boldsymbol{9\ mm}$
Aço carbono	C1/EN S235JRC	235	4,98	9,73	19,78
	AISI 1045 /C45	530	11,24	21,95	44,61
	AISI 1015	325	6,89	13,46	27,36
Aço de liga	42CrMo6	940	19,93	38,93	79,12
	AISI 4140	675	14,31	27,96	56,82
	AISI 4340	972	20,61	40,26	81,82
	34CrNiMo6	900	19,09	37,28	75,76
Aço inox	302	240	5,09	9,94	20,20
	304	215	4,56	8,90	18,10
	316	290	6,15	12,01	24,41
Alumínio (ligas)	Al 7075 – T6	503	10,67	20,83	42,34
	Al 5050 – H38	200	4,24	8,28	16,83
	Al 8001 – H18	185	3,92	7,66	15,57
Magnésio	Sand cast / Extruded	21	0,45	0,87	1,77
Cobre	Annealed / cold worked / cold drawn	33,3	0,71	1,38	2,80
Zinco		45	0,95	1,86	3,79
Ferro Fundido	Meehanite GF-20 Flake Graphite Cast Iron (grey cast iron)	65,5	1,39	2,71	5,51
	Dura-Bar 60-40-18 Continuously Cast Ductile Iron Bar	276	5,85	11,43	23,23

	Stock ASTM A536, 4018 (alloy cast iron; ductile iron)				
Titânio (ligas)	Ti 6Al-4V (grade 5)	880	18,66	36,45	74,07
	Ti – 5Al-2.5 Sn (grade 6)	827	17,54	34,25	69,61
	Ti – 6Al-4V ELI (grade 23)	790	16,75	32,72	66,50
Níquel (ligas)	ANSI F562 / Carpenter MP35N* Ni-Co-Cr-Mo Alloy, 0% Cold Reduction	414	8,78	17,15	34,85
	Carlson C 400 Nickel-Copper Alloy	276	5,85	11,43	23,23
	Carlson C 600 Nickel-Chromium-*Iron Alloy*	241	5,11	9,98	20,29
NiTi	High – temperature phase	560	11,88	23,19	47,14
	Low – temperature phase	100	2,12	4,14	8,42
Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)	Extruded	45,1	0,96	1,87	3,80
Polylactic Acid (PLA)	-	47,8	1,01	1,98	4,02
Nylon	Nylon 6, extruded	71	1,51	2,94	5,98
Polyetheretherketone (PEEK)	Unreiforced	97,7	2,07	4,05	8,22
Polyethylene Terephthalate (PET)	-	56,4	1,20	2,34	4,75
Polyethylene Terephthalate Glycol (PETG)	-	48,2	1,02	2,00	4,06

4.2 Modelação e projeto

De acordo com os requisitos funcionais apresentados no subcapítulo anterior e com o princípio de funcionamento de um equipamento para ensaios de fadiga por flexão rotativa, descrito no subcapítulo 1.2.2, foram desenvolvidas várias modelações 3D com recurso ao programa SOLIDWORKS. Posto isto, e após um processo iterativo de melhoria continua, foi desenvolvida a solução final para o equipamento, que é apresentada na Figura 4.1.

A solução final apresenta uma configuração *table-top*, ou seja, uma disposição horizontal do equipamento, assente num chassis construído com perfil *Bosch* duplo de 40 *mm*. O ensaio contempla carregamentos através de momentos de flexão e ainda carregamentos axiais, pelo que toda esta estrutura necessita suportar estes esforços. A escolha das dimensões do perfil é justificada pela resistência aos esforços apresentados, e ainda pela possibilidade de reduzir algumas vibrações adjacentes ao funcionamento do equipamento. De acordo com as funcionalidades que o equipamento deve apresentar, este poderá ser dividido em duas secções distintas, que são conectadas através da fixação do provete e com a aplicação dos momentos de flexão simétricos com o recurso a tirantes, que assim permite o mesmo desempenho dos parâmetros de funcionamento ao longo de todo o equipamento.

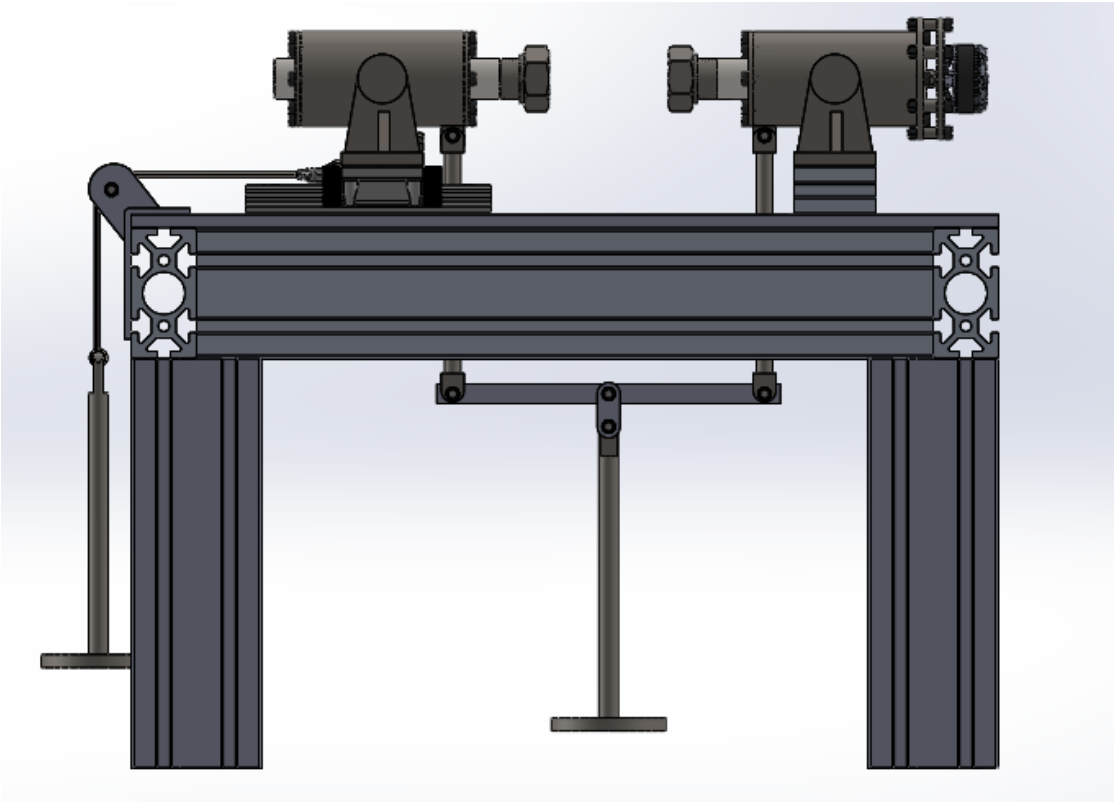


Figura 4.1 – Desenho do conjunto em SOLIDWORKS do equipamento a ser desenvolvido.

A primeira secção corresponde à extremidade do equipamento onde é acoplado o motor, responsável por todo o movimento de rotação do equipamento. Por sua vez, o motor esta acoplado a um veio de transmissão, que se encontra inserido numa caixa de rolamentos, constituída por dois rolamentos radiais e outro rolamento axial. A escolha do tipo de rolamentos aplicados assenta no tipo de solicitações a que o equipamento está sujeito, nomeadamente, as altas rotações de funcionamento e os carregamentos axiais. A extremidade do veio de transmissão oposta ao acoplamento com o motor, é também acoplada a um sistema de fixação do provete. Por fim, a caixa de rolamentos é anexada lateralmente em dois suportes, onde está encastrado um casquilho de bronze, dando a liberdade de movimento de rotação da mesma, mas restringindo deslocamentos axiais desta extremidade. Derivado à configuração da outra extremidade do equipamento, esta está elevada num patamar, também construído em perfil *Bosch*, mas de 30 *mm*, de forma a garantir a inexistência de diferença de cotas entre a linha funcional das duas extremidades, e consequentemente, a anulação de esforços indesejados. A Figura 4.2 ilustra esta extremidade, podendo-se denominar de extremidade fixa, facilitando assim o entendimento da conceção acima descrita.

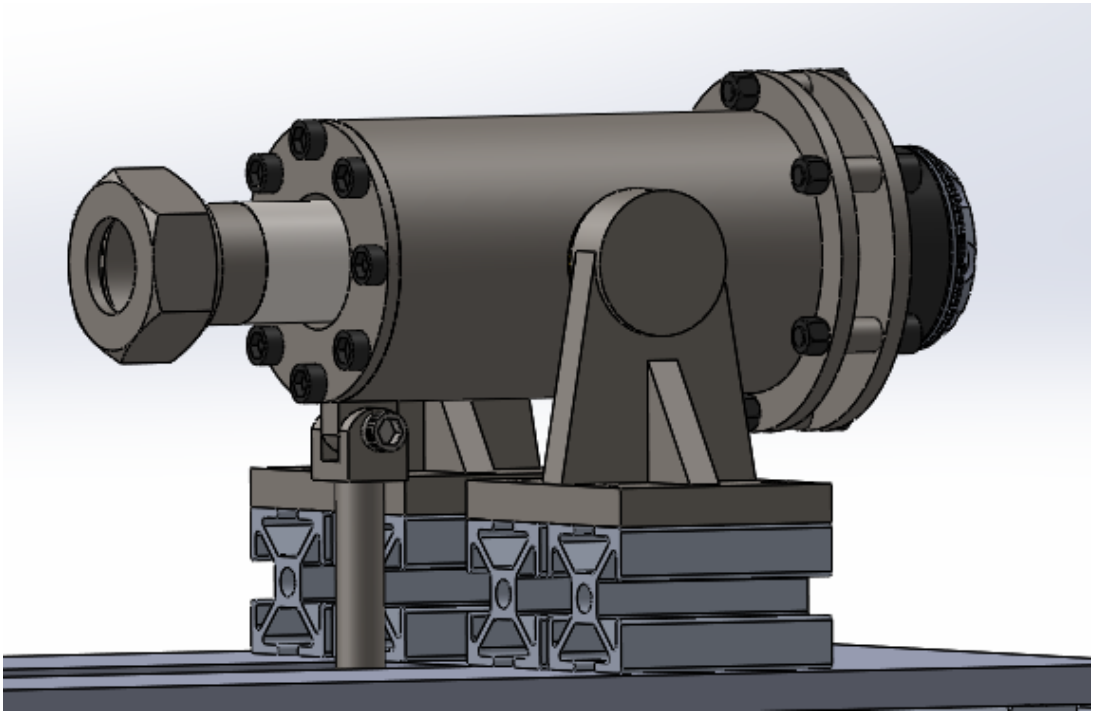


Figura 4.2 - Extremidade fixa.

A Figura 4.3 ilustra a vista explodida da caixa de rolamentos, de modo a que possível entender melhor a constituição da mesma.

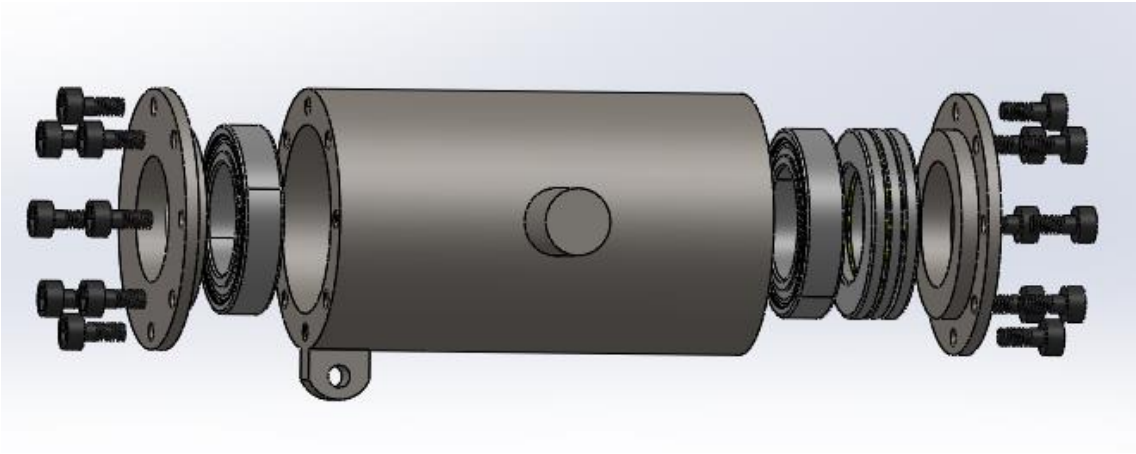


Figura 4.3 - Vista explodida da caixa de rolamentos.

A segunda secção, acima menciona, corresponde à extremidade móvel do equipamento. A constituição da mesmo é muito semelhante, mas com algumas particularidades. As principais diferenças coincidem com as restrições ao movimento que apresentam, pois esta, não é fixa, mas assente em carruagens e guias lineares que permitem o deslocamento axial de toda a secção. Esta liberdade de movimento está associada a duas funcionalidades do equipamento, a primeira é a possibilidade de estudo de provetes com diferentes comprimentos, que representa um dos requisitos funcionais do equipamento, a segunda funcionalidade é a possibilidade de estudar a influência de cargas axiais durante o ensaio, o que se todo o equipamento tivesse restringido não teriam tal efeito. Na Figura 4.4 está representada a extremidade móvel do equipamento.

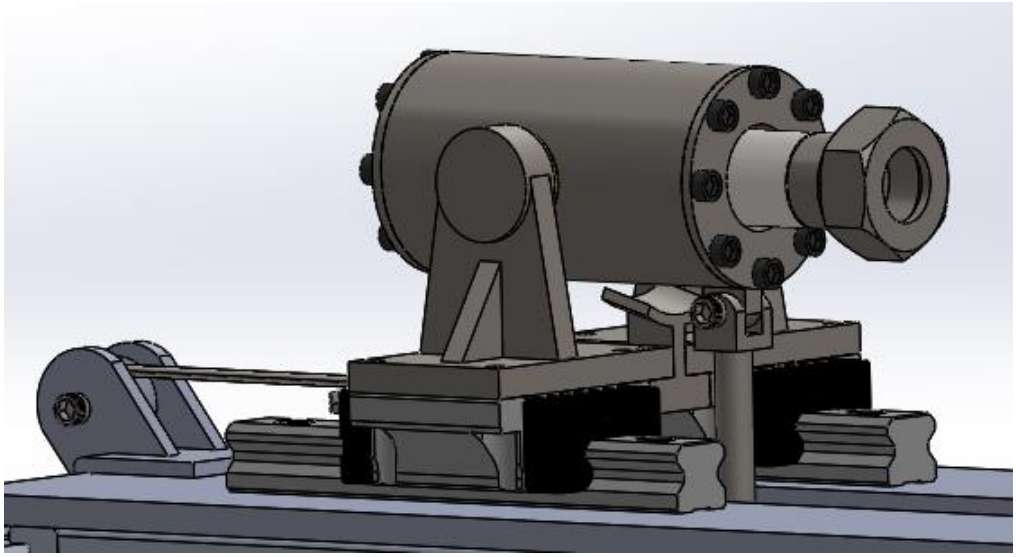


Figura 4.4 - Extremidade móvel.

Como referido no subcapítulo 3.2, a aplicação de esforços durante o ensaio é efetuada com recursos a pesos livre, nos quais, o momento de flexão é aplicado com os pesos suspensos a serem transmitidos ao equipamento com o recurso a dois tirantes fixos nas caixas de rolamentos de modo aos carregamentos serem simétricos. Por outro lado, os carregamentos axiais são transmitidos ao equipamento através de um cabo de aço. Os dois mecanismos para a aplicação de esforços durante o ensaio são visíveis na Figura 4.1.

Uma particularidade dos ensaios realizados com o equipamento a desenvolver, é o formato dos provetes. De acordo com os esforços pretendidos e as elevadas rotações, a que se pretende realizar os ensaios foi necessário adaptar o formato do provete, que está ilustrado na Figura 4.5.

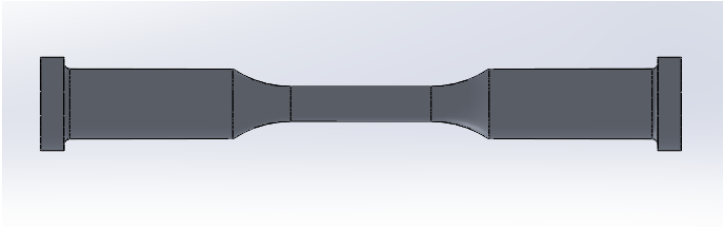


Figura 4.5 - Provete com abas.

Posto isto, foi desenvolvido um sistema de fixação do provete, no qual o mesmo é inserido num casquilho, e envolvido com duas meias luas, e por fim é apertado com uma porca de fixação que permite que o provete seja testado sem que ocorram escorregamentos, influenciando assim os resultados do ensaio. A Figura 4.6 ilustra o funcionamento deste sistema de fixação.

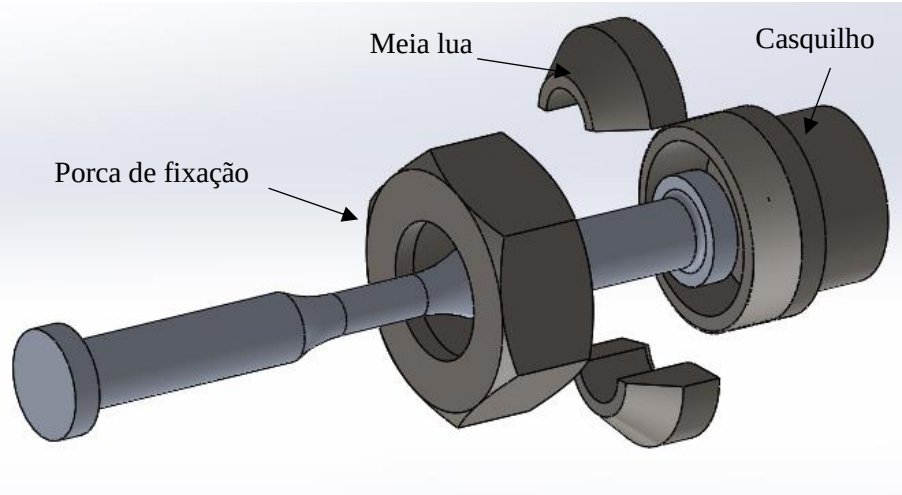


Figura 4.6 - Sistema de fixação do provete.

De notar, que o mecanismo de fixação do provete representado na figura 4.5, é acoplado ao veio de transmissão existente no interior da caixa de rolamentos. O casquilho é enroscado diretamente ao veio, no entanto, a direção da rosca é sempre contrária ao movimento de rotação do motor, para que esta nunca se desacople durante os ensaios.

De salientar também, que dada a configuração do equipamento, bem como, de todos os graus de liberdade dos componentes adjacentes ao funcionamento do mesmo, é necessária a realização de uma calibragem ao equipamento, eliminando assim, todas as cargas existentes provocadas pelo peso dos componentes, que afetarão os resultados obtidos.

4.3 Seleção de componentes

4.3.1 Motor sem escovas e controlador

O projeto do equipamento foi realizado assente nas diretrizes da norma ISO 1143:2010, na qual são contempladas as velocidades de rotação admitidas, que vão desde as 500 até às 10000 rev/min. Posto isto, a seleção do motor para o equipamento teve como principal requisito a gama de velocidades em que este poderia operar.

De acordo com pesquisa realizada sobre os motores existentes no mercado, o que mais se adequa aos requisitos pretendidos para o equipamento é o motor, sem escovas, HK-3536-510KV, da marca Scorpion. Este motor tem uma velocidade máxima de rotação de 5100 rev/min, e uma potência de 2900 W, podendo ter um pico de potência de 4150 W, durante 2 segundos. Outro fator preponderante para a escolha deste tipo de motor, é relação peso/capacidade mecânica, ou seja, é possível a aquisição de um motor relativamente leve que corresponda aos requisitos necessários, uma vez que o motor ficará acoplado ao equipamento, mas num componente que ficará suspenso, o que facilita a calibragem do mesmo.

Um dos requisitos funcionais para o equipamento a desenvolver é a capacidade de o sistema ser controlado por sistemas informáticos, pelo que é necessário também a seleção de um controlador compatível com o motor, para que seja possível automatizar o mesmo. Novamente, de acordo com a pesquisa realizada sobre os controladores existentes no mercado, o que mais se adequa aos requisitos necessários, é o controlador TRIBUNUS 06-80A (SBEC) ESC 3-6S, também da marca Scorpion. Este controlador tem uma gama de tensão de saída entre os 5,1 e 8,3 V, o que permite estabelecer velocidades de rotação no motor entre 2600 e 4230 rev/min.

A marca Scorpion também dispõe de um cabo que permite a conexão do controlador a um computador, o que facilita a monotorização deste componente do equipamento, dado que o

objetivo do trabalho também é o desenvolvimento de um programa em Labview para a controlo dos ensaios realizados.

A Figura 4.7 ilustra os três componentes comercializados pela empresa Scorpion, a) o motor sem escovas HK-3536-510KV, b) o controlador TRIBUNUS 06-80A (SBEC) ESC 3-6S e c) o cabo de conexão ao computador.

Figura 4.7 - Componentes comercializados pela empresa Scorpion. a) Motor HK-3536-510KV, b) controlador TRIBUNUS 06-80A (SBEC) ESC 3-6S e c) cabo de conexão ao computador [22].

4.3.2 Rolamentos Radiais e Axiais

O equipamento a ser desenvolvido terá gamas de funcionamento a altas rotações e ainda contemplará carregamentos ao longo do seu movimento de rotação, pelo que a seleção dos rolamentos para a constituição do equipamento é fundamental para a durabilidade do mesmo. A variedade de tipos de carregamentos a que o equipamento estará sujeito requer a combinação entre rolamentos radiais e axiais.

Uma empresa muito conceituada na comercialização destes componentes é a SKF, pelo que a escolha dos rolamentos passou pelos catálogos da mesma. O rolamento axial que mais se adequa aos requisitos do equipamento é o modelo 51105, com uma velocidade máxima admitida de 9.000 rev/min. Relativamente ao rolamento radial o que mais se adequa é o modelo 61905-2RZ, que contempla uma velocidade máxima de 18.000 rev/min.

As caixas de rolamentos, componentes desenvolvidas para a constituição do equipamento, são encaixadas lateralmente em dois suportes, de modo a que o seu movimento rotacional não seja constrangido, no entanto, as velocidades de rotação deste encaixe são bastante

reduzidas, pelo que, a substituição da aplicação de um rolamento, por um casquilho de bronze, é uma solução bastante eficaz. De acordo com as dimensões do encaixe, o casquilho de bronze que mais se adequa, é o modelo PSMF 152212 A51.

4.3.3 Carruagens e guias lineares

A utilização de carruagens e guias lineares é a solução apresentada no equipamento para dar resposta a dois requisitos. A necessidade que parte do equipamento apresente uma secção móvel é colmatada com o recurso a estes componentes. Com o recurso à utilização de carruagens e guias lineares o equipamento permite o estudo de provetes com diferentes comprimentos, e ainda possibilita a realização de ensaios de fadiga à flexão rotativa, onde sejam contemplados também carregamentos axiais, o que se todo o equipamento fosse fixo não seria possível. Posto isto, o equipamento foi desenvolvido com duas carruagens (tamanho 20) e duas guias lineares de $150\ mm$, dispostas paralelamente, produzidas pelo fabricante EWWLLIX, com as seguintes referências LLTHC20AT0P5 e LLTHR20TOP5, respetivamente. A Figura 4.8 apresenta as carruagens e as guias lineares selecionadas.

Figura 4.8 - Carruagens e guias lineares [24].

4.4 Instrumentação e controlo

O objetivo da realização de um ensaio é a caracterização do material testado, no entanto, para que essa caracterização seja possível é necessário a recolha de dados experimentais provenientes do ensaio. O presente capítulo pretende explicar quais os dados a retirar de cada ensaio e quais os métodos utilizados para tal. Como referido no capítulo 4.1, o objetivo da realização de um ensaio de fadiga à flexão rotativa é a caracterização do material testado através da curva S-N, e para tal, é necessário recolher alguns dados experimentais, mencionados também no capítulo 4.1.

A interface escolhida para o tratamento dos dados recolhido com o decorrer dos ensaios foi o programa informático LabView, no entanto, para a recolha de informação com a realização dos ensaios são necessários a aquisição de alguns controladores.

A quantificação dos valores das cargas a que os provetes são sujeitos pode ser determinada analiticamente, uma vez que, as mesmas serão provocadas com recurso a pesos livres, pelo que a sua variação no decorrer dos ensaios será considerada nula. No entanto, esta informação pode ser pré-definida e introduzida manualmente no programa para que juntamente com a informação recolhida no ensaio seja tratada. Para a caracterização deste dado experimental, não será necessária a implementação de instrumentação nem controlo para a caracterizar durante o ensaio.

Relativamente à recolha de dados referentes à velocidade de rotação durante o ensaio, este será efetuado com o auxílio de um controlador. Este equipamento foi descrito no capítulo 4.3.1, e permite controlar a velocidade imposta ao motor. Apesar de estar ligado a uma fonte de alimentação, é possível controlar a tensão de saída para o motor, e consequentemente, controlar a velocidade a que o mesmo está a trabalhar. Também foi apresentado um cabo para a ligação entre o controlar e o computador, para que facilite a monotorização e o controlo do processo.

O último dado experimental a caracterizar com o decorrer do ensaio, é a contabilização de rotações (ciclos) desde o início do ensaio até que o provete sofra rotura. Para adquirir esta informação é necessário a aquisição de um controlador para esse efeito. O princípio de funcionamento deste controlador passará pela implementação de um disco transparente envolvente a toda a volta do veio em rotação, em que o mesmo possui uma marca. A cada rotação completa, esta marca é detetada por um sensor, que emite um pulso. Através do desenvolvimento de uma placa de aquisição de dados, é possível a quantificação de todos estes pulsos emitidos pelo sensor e a transmissão de toda a informação para o computador. Este controlador também necessita da conexão a um *switch off*, que detetará quando o provete sofre rotura, e interrompe a contagem de rotações. Outra informação que poderá ser recolhida com este controlador é a confirmação da velocidade de rotação imposta pelo motor, que através do intervalo de tempo

entre cada pulso, permite determinar a velocidade de rotação. A Figura 4.9 apresenta, de forma esquemática, o funcionamento de todo este controlo.

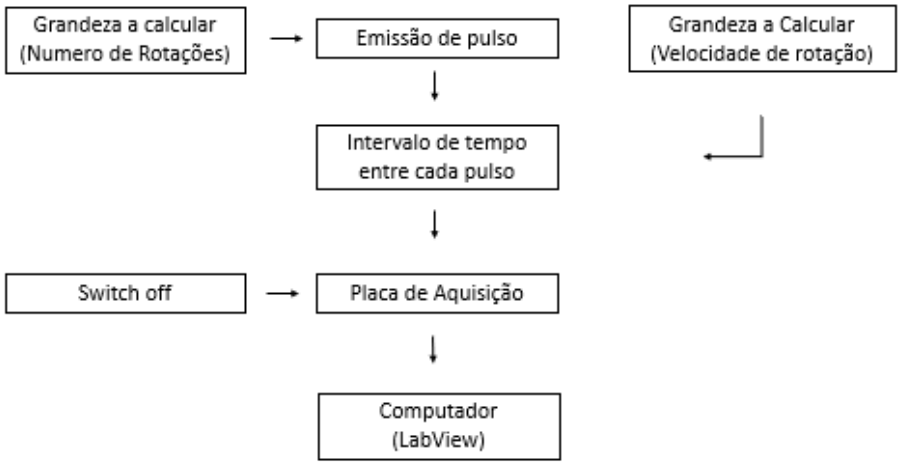


Figura 4.9- Funcionamento do controlador para obtenção do número de rotações e velocidade de rotação.

5. Conclusões e desenvolvimentos futuros

O presente trabalho visou o desenvolvimento de um protótipo funcional de um equipamento personalizado para a realização de ensaios de fadiga por flexão rotativa, resultante da necessidade continua em aumentar a quantidade de equipamentos disponíveis, e consequentemente a diversidade de trabalhos desenvolvidos nos laboratórios do NTI do DEMI.

De acordo com os objetivos estabelecidos inicialmente, é possível afirmar que estes foram cumpridos. O projeto do equipamento foi concluído com sucesso, sendo que, futuramente será possível a produção de um protótipo funcional para a realização destes mesmo ensaios.

A construção do equipamento será vital para a validação de todo o trabalho desenvolvido na elaboração deste documento, e para a realização dos ensaios. No entanto, com este trabalho faltou também o desenvolvimento de um programa para o controlo e monotorização dos ensaios, com recurso ao programa LabView, o qual seria possível apenas com a construção do equipamento.

No entanto, apesar de todo o trabalho já desenvolvido, é possível continuar a melhorar o mesmo, de acordo com as necessidades que o laboratório do NTI vá apresentando. Porém, algumas das modificações que poderão ser implementadas com a vista a aumentar o leque de estudos realizados com o equipamento desenvolvido são:

- O desenvolvimento de outros sistemas de fixação dos provetes, aumentando assim as dimensões dos provetes testadas, e aumentando também a diversidade de provetes admitidos;
- A realização de ensaios nos quais seja admitida a influência da temperatura, adaptando assim o equipamento para este procedimento;
- A realização de ensaios em atmosfera controlada, desenvolvendo um sistema que permita o controlo do meio envolvente ao provete durante os testes;
- A substituição dos carregamentos aplicados através pesos livres, por atuadores eletromecânicos ou hidráulicos, e consequentemente um programa de controlo mais sofisticado.

Referências

[1] SHIGLEY, Joseph E., *Projeto de Engenharia Mecânica* / Joseph E. Shigley, Charles R. Mischke, Richard G. Budynas; Tradução João Batista de Aguiar, José Manuel deAguiar, 7ª ed. Porto Alegre, Bookman, 2005.

[2] CALLISTER, William D. Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução. 7ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

[3] Nogueira, Rodrigo de Moura. *Máquina de Testes de Fadiga Mecânica por Flexão Rotativa.2014. 15f. Projeto* Final de Licenciatura – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 2014.

[4] ISO 1143:2010, Metallic materials – rotating bar bending fatigue testing.

[5] Cachão, Hugo. Avaliação do dano em fadiga de materiais a muito elevada frequência. 2012. 91f. Dissertação de Mestrado -Instituto Superior Técnico, Lisboa. 2012.

[6] Brandão, Rodrigo. Projeto mecânico de uma máquina de ensaio de fadiga por flexão rotativa. 2013. 76f. Projeto de graduação – Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2013.

[7] ADMET, "Fatigue testing systems", [Online]. Acedido a 29 de Outubro de 2020, em: https://www.admet.com/products/fatigue-testing-machines/

[8] Walterbai, "Series UBM", [Online]. Acedido a 29 de Outubro de 2020, em: https://www.walterbai.com/page/products/Materials_Testing_Systems/Rotary_Bending_Fatigue_Testing_Machines/Series_UBM.php

[9] Advance Instrument Inc., "Rotating Beam Fatigue Testing System", [Online]. Acedido a 29 de Outubro de 2020, em: http://www.advanceinstrument.com/products/6f3a57bb.php

[10] Tecquipment, "Rotating Fatigue Machine", [Onlines]. Acedido a 29 de Outubro de 2020, em: https://www.tecquipment.com/pt/materials-testing-and-properties/fatigue-testing

[11] Zwick Roell, "ARBM 120 Amsler Rotary Bending Machine", [Onlines]. Acedido a 29 de Outubro de 2020, em: http://www.zwick-ztt.com.cn/en/product_details.asp?id=3

[12] Yamamoto, "Rotating bending fatigue testing machine", [Online]. Acedido a 29 de Outubro de 2020, em: https://www.yama-kin.co.jp/english/products/index2.html

[13] Spranktronics, “High Temperature & Room Temperature Rotating Bending Fatigue Testing Machine”, [Online]. Acedido a 29 de Outubro de 2020, em: http://www.spranktronics.com/high-temperature-room-temperature-rotating-bending-fatigue-testing-machine-2461088.html

[14] PA Hilton, “ROTATING FATIGUE MACHINE (ELECTRONIC LOADING MECHANISM)”, [Online]. Acedido a 29 de Outubro de 2020, em: https://www.p-a-hilton.co.uk/products/strength-materials-hsm/rotating-fatigue-machine-electronic-loading-mechanism

[15] INSTRON. Rotating Beam Fatigue Testing System. Norwood.

[16] Tronco, Luiz. Desenvolvimento de Procedimento para a Realização de ensaio de fadiga por flexão-rotativa e obtenção da vida em fadiga da liga AA6063-T6. 2016. 96f. Universidade Tecnologia Federal do Paraná.2016.

[17] ELECTROFUN, [Online]. Acedido a 29 de Outubro de 2020, em: https://www.electrofun.pt/atuadores-lineares/atuador-linear-24v-200mm

[18] Banggood, [Online]. Acedido a 29 de Outubro de 2020, em: https://www.banggood.com/pt/HPV6-Linear-Module-SFU1204-Ball-Screw-Linear-Actuator-with-HGR15-Linear-Guides-with-NEMA23-2_8A-56mm-57-Stepper-Motor-p-1447547.html

[19] MTS, “MTS DuraGlide™ 201 Hydraulic Actuators,” [Online]. Acedido a 29 de Outubro de 2020, em https://www.mts.com/cs/groups/public/documents/library/mts_4036741.pdf.

[20] TESTRESOURCES, “Thermomechanical Fatigue (TMF) Test System”, [Online]. Acedido a 29 de Outubro de 2020, em: https://www.testresources.net/literature/thermomechanical-fatigue-test-system.pdf

[21] MatWeb, “Material Property data”, [Online]. Acedido a 29 de Outubro de 2020, em: http://www.matweb.com/.

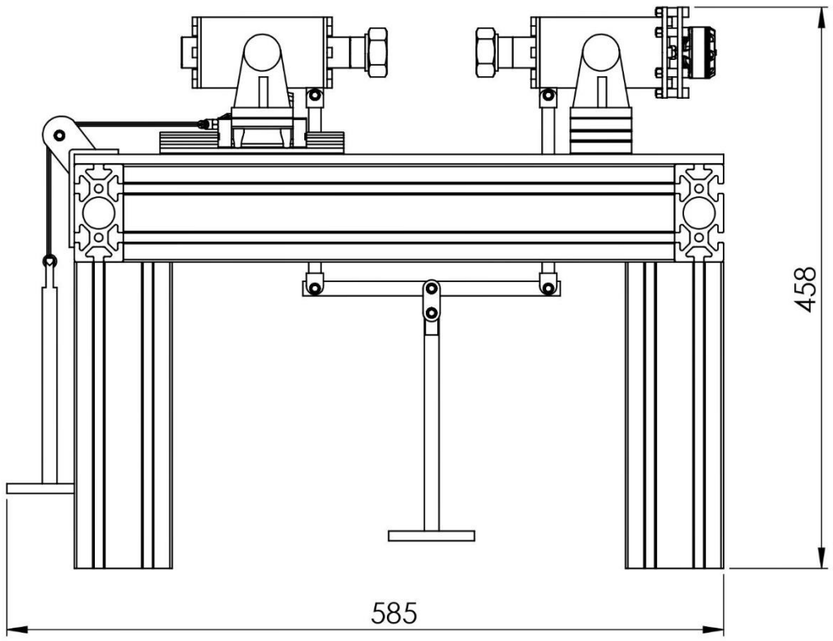
[22] rHeli-store, [Online]. Acedido a 29 de Outubro de 2020, em: https://www.rcheli-store.de/e-vendo.php?SessionId=

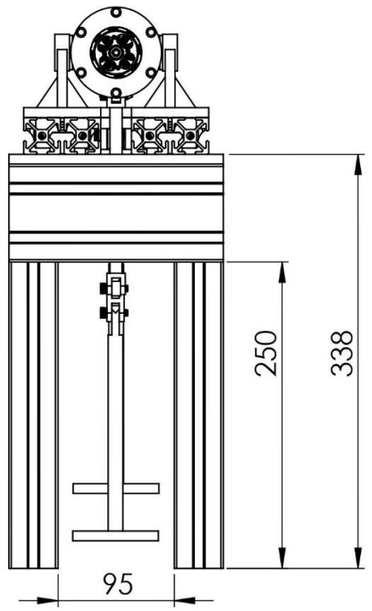
[23] SKF, [Online]. Acedido a 29 de Outubro de 2020, em: https://www.skf.com/pt

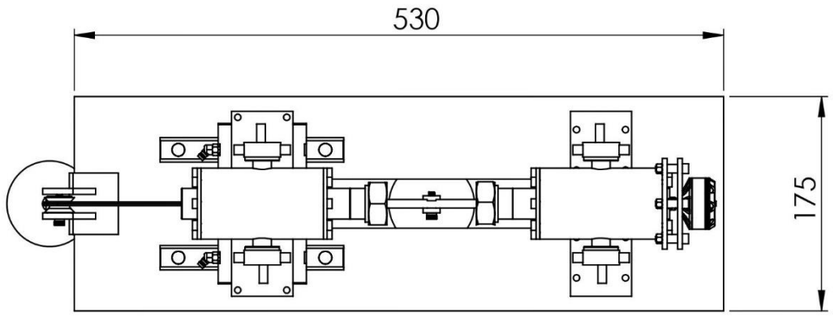
[24] EWLLIX, “Ball profile rail guides – LLT”, [Online]. Acedido a 29 de Outubro de 2020, em: https://www.ewellix.com/en/global/products/linear-guides/profile-rail-guides/ball-profile-rail-guides-llt?reload=true

Anexos

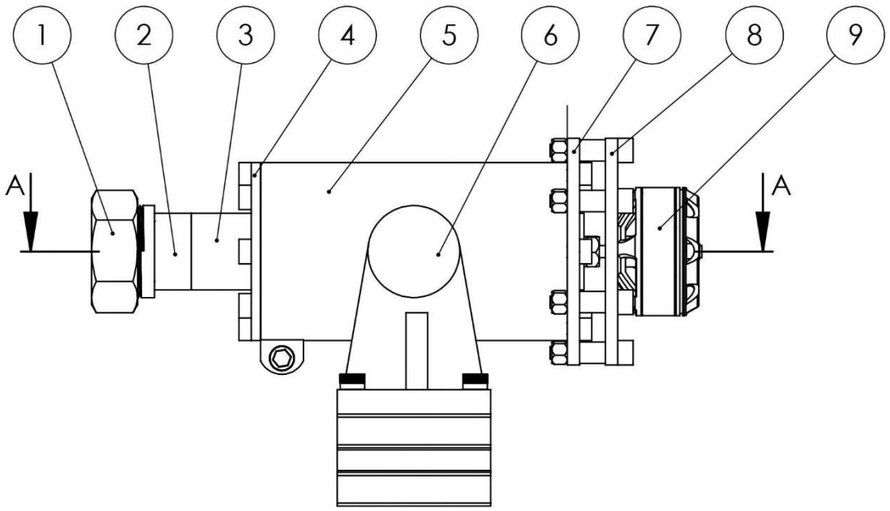
Desenhos técnicos dos componentes

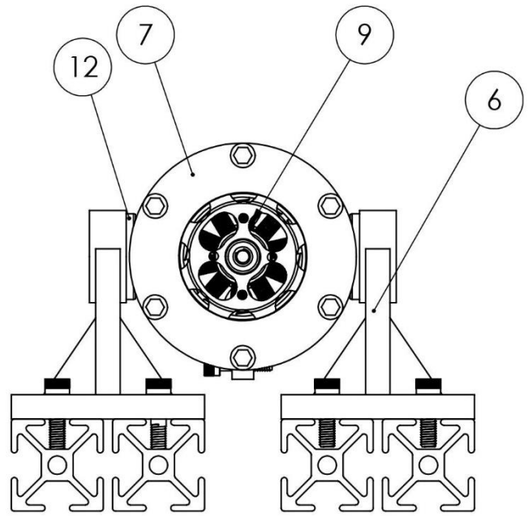


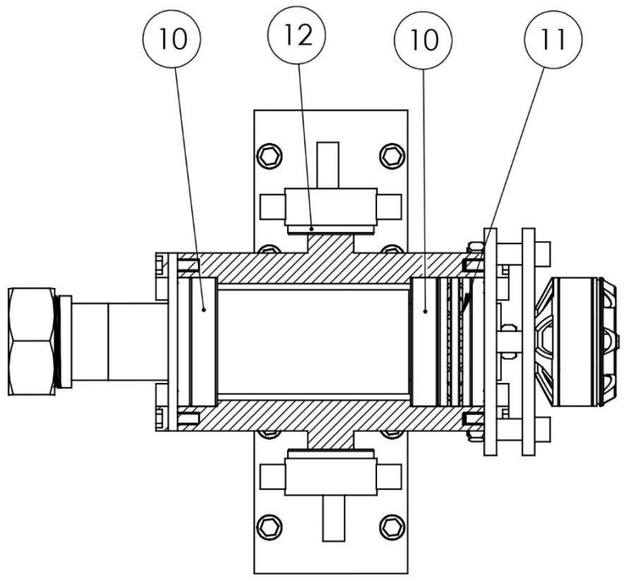




Proj.			F.C.T - U.N.L. Dissertação de Mestrado	José Pinto
Des.				
Copiou				
Visto				
Escala 1:5	Equipamento Completo			
Toleran.				



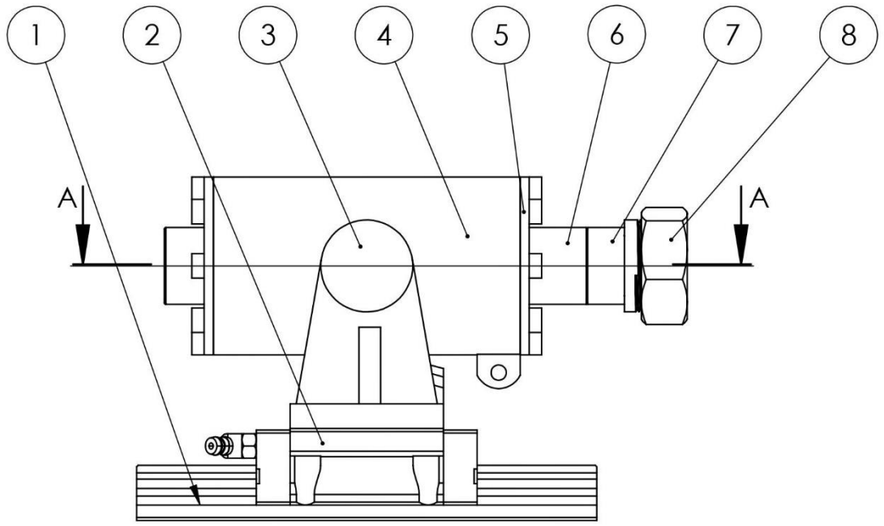


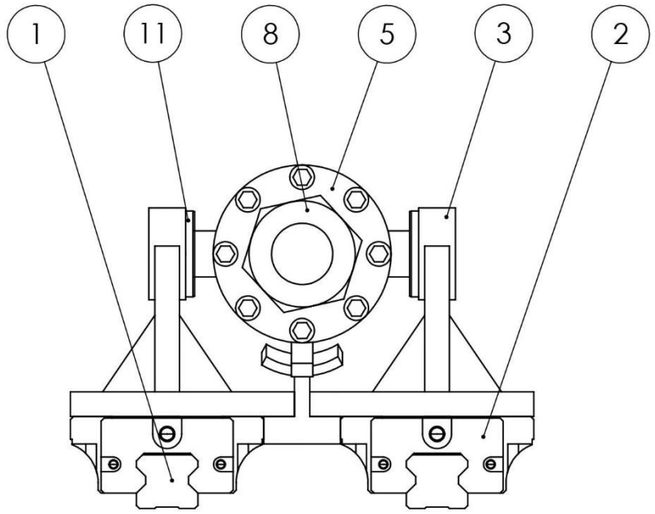


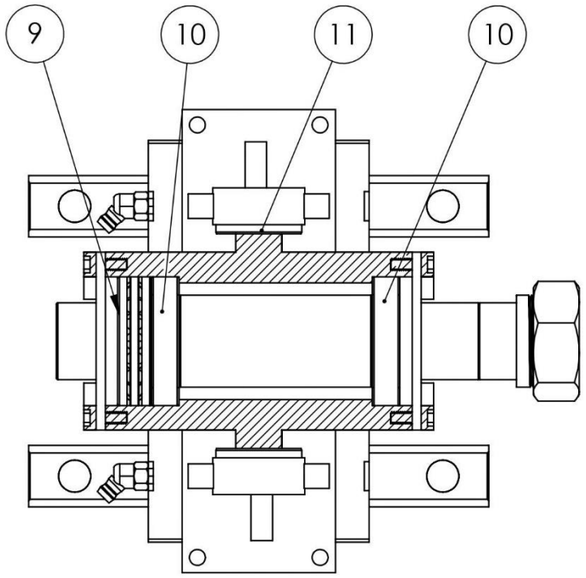
SECTION A-A

ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	Fixa/QTY.
1	PORCA_PROVETE_		1
2	CAS_PROVETE_	Casquilho	1
3	VEIO_MOTOR		1
4	TAMPA_CAIXA_ROLAMENTOS		1
5	CAIXA_ROLAMENTOS		1
6	Suporte_Lateral_MOTOR		2
7	TAMPA_CAIXA_ROLAMENTOS_MOTOR		1
8	ENCOSTO_MOTOR		1
9	MOTOR_BRUSHLESS		1
10	61905_2RZ	Rolamento de Esferas	2
11	51105	Rolamento Axial	1
12	BUCHA_BRONZE		2

Proj.		F.C.T - U.N.L. Dissertação de Mestrado	José Pinto
Des.			
Copiou			
Visto			
Escala 1:2		Extremidade Fixa	
Toleran.			



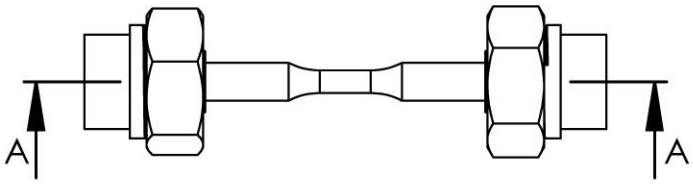


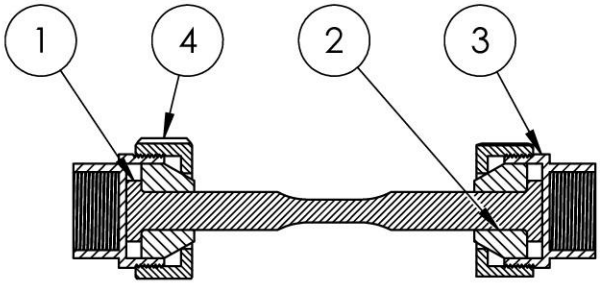


SECTION A-A

ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	MOVL/QTY.
1	Trail_Size20_150_FINAL	Calha	2
2	Carro_Size20_FINAL	Carruagem	2
3	Suporte_Lateral_TR		2
4	CAIXA_ROLAMENTOS		1
5	TAMPA_CAIXA_ROLAMENTOS		2
6	VEIO_TR		1
7	CAS_PROVETE_	Casquilho	1
8	PORCA_PROVETE_		1
9	51105	Rolamento Axial	1
10	61905_2RZ	Rolamento de esferas	2
11	BUCHA_BRONZE		2

Proj.		F.C.T - U.N.L. Dissertação de Mestrado	José Pinto
Des.			
Copiou			
Visto			
Escala 1:2		Extremidade Móvel	
Toleran.			

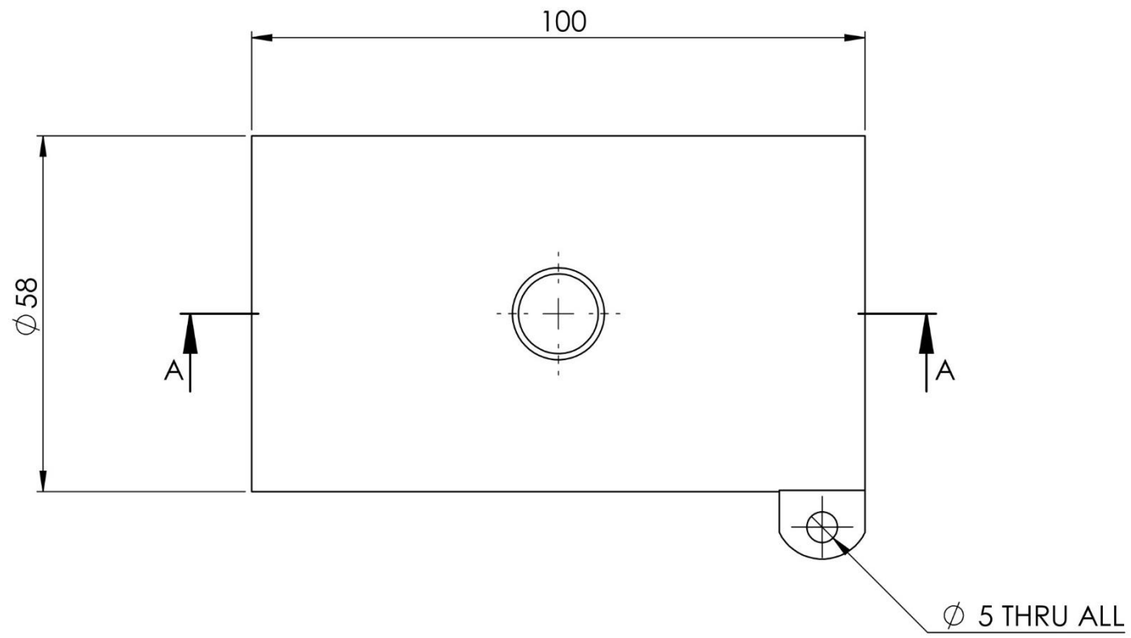


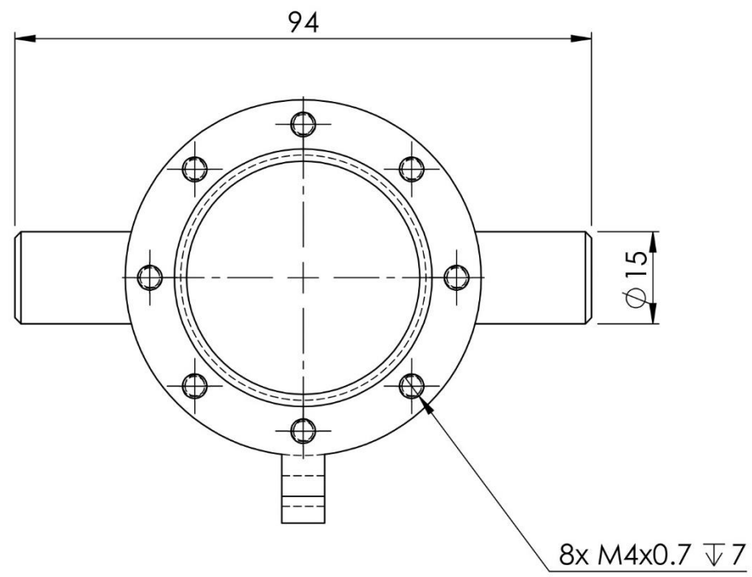


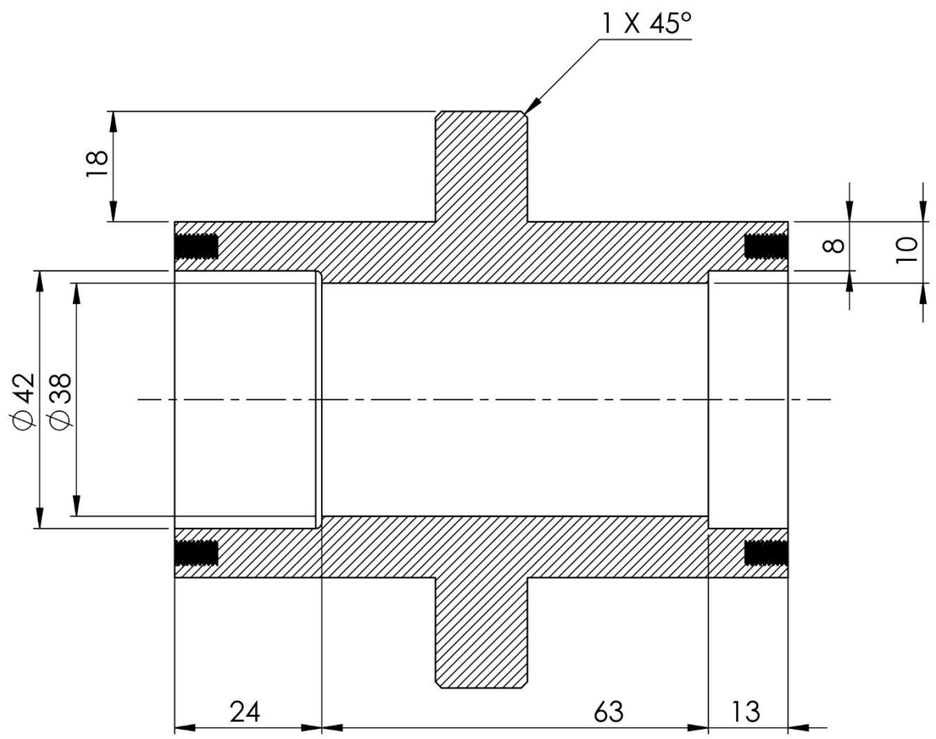
SECTION A-A

ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	PROVETE_C_ABAS_FINAL		1
2	MEIALUA_2X		4
3	Cas_Provete	Casquilho	2
4	Porca_Provete		2

Proj.			F.C.T - U.N.L. Dissertação de Mestrado	José Pinto
Des.				
Copiou				
Visto				
Escala 1:2	Fixação do Provete			
Toleran.				

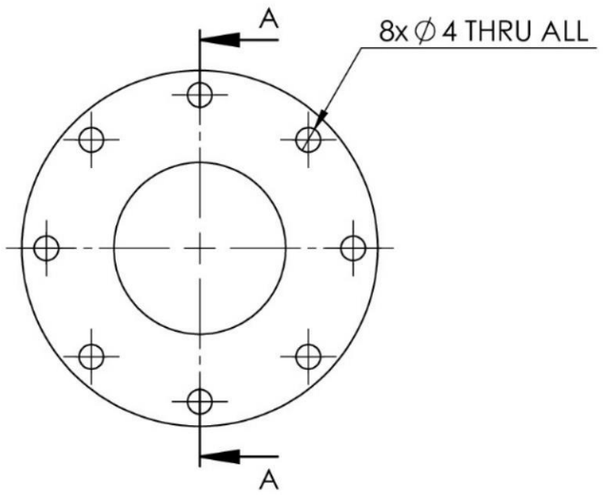


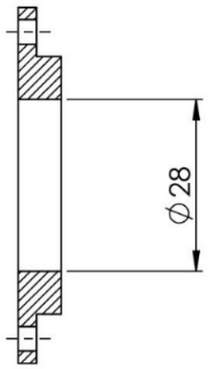




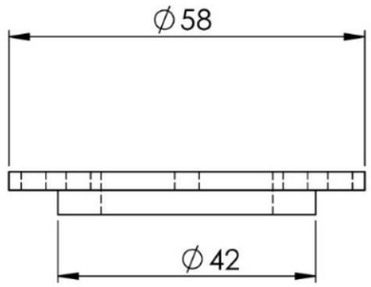
SECTION A-A

Proj.			F.C.T - U.N.L. Dissertação de Mestrado	José Pinto
Des.				
Copiou				
Visto				
Escala 1:1	Caixa de Rolamentos			
Toleran.				

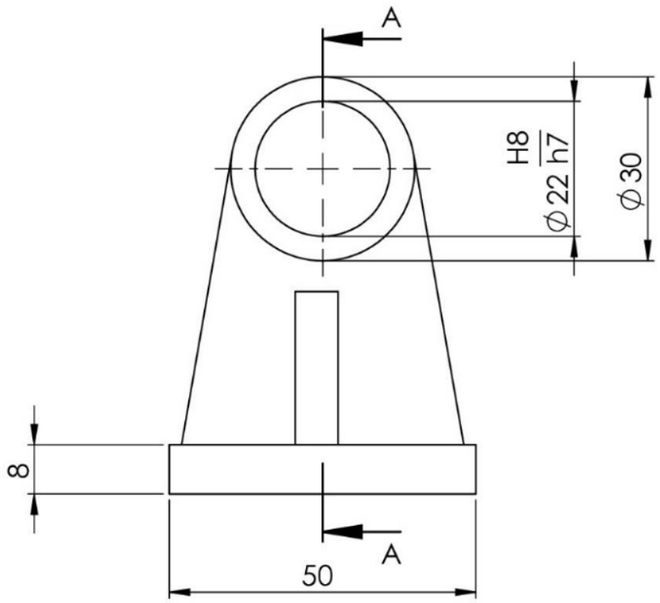


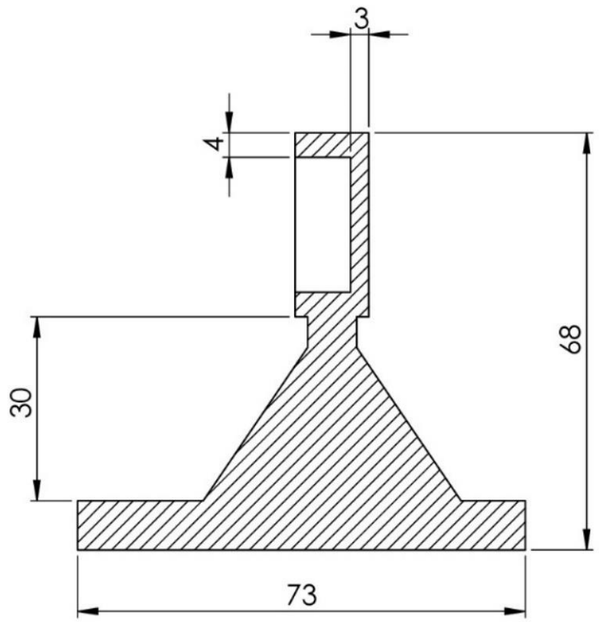


SECTION A-A

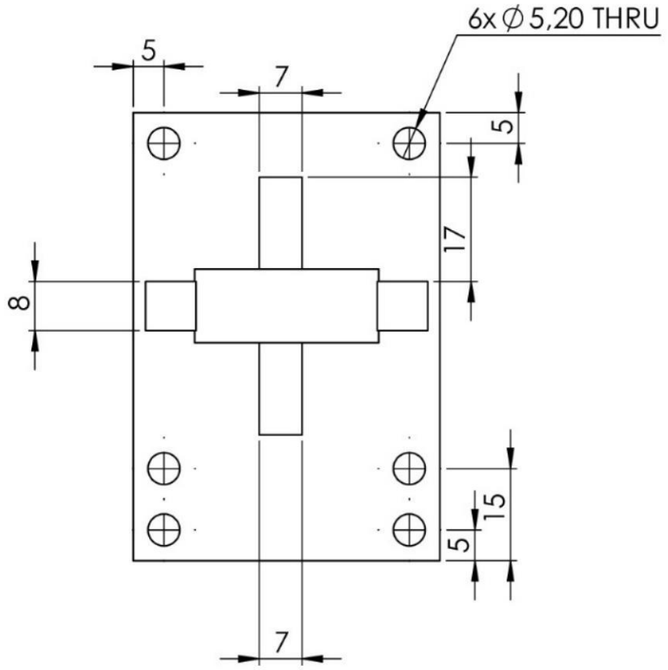


Proj.			F.C.T - U.N.L. Dissertação de Mestrado	José Pinto
Des.				
Copiou				
Visto				
Escala 1:1	Tampa caixa de rolamentos			
Toleran.				

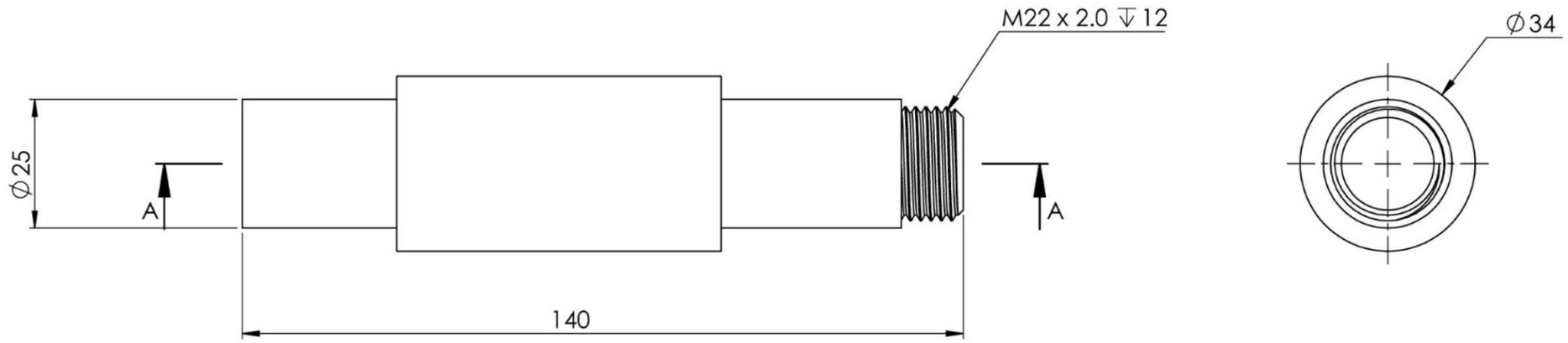


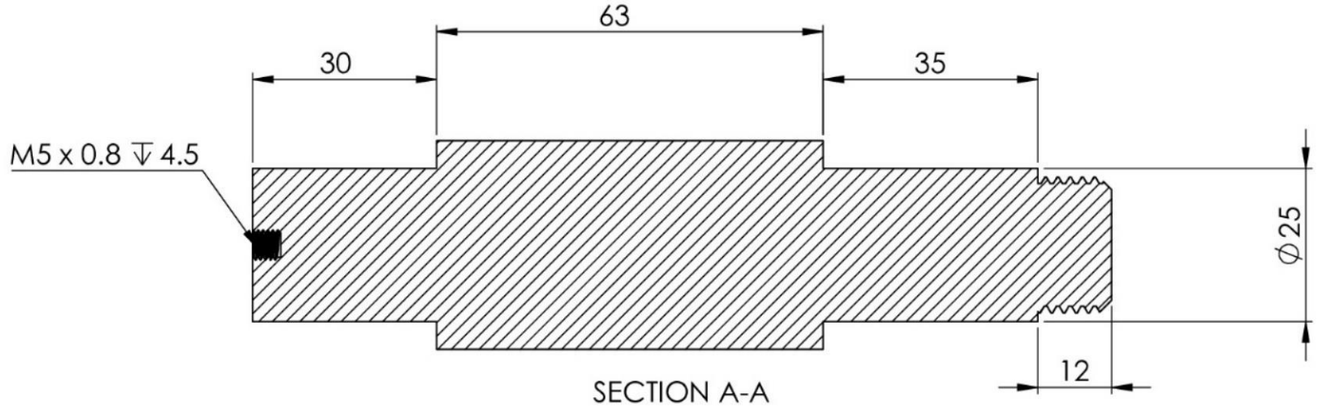


SECTION A-A

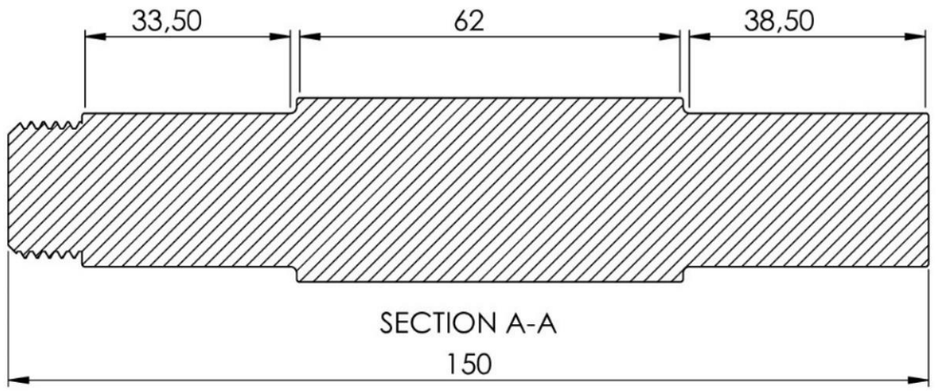


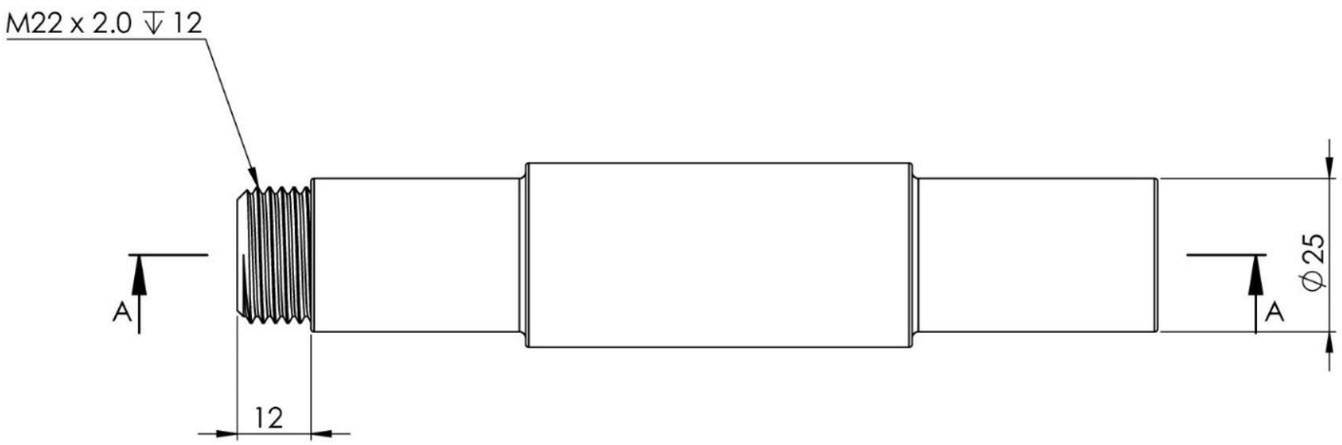
Proj.			F.C.T - U.N.L. Dissertação de Mestrado	José Pinto
Des.				
Copiou				
Visto				
Escala 1:1	Suporte Lateral			
Toleran.				

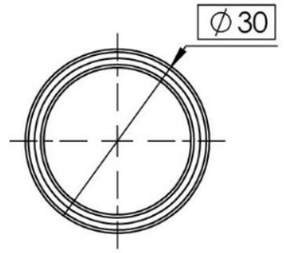




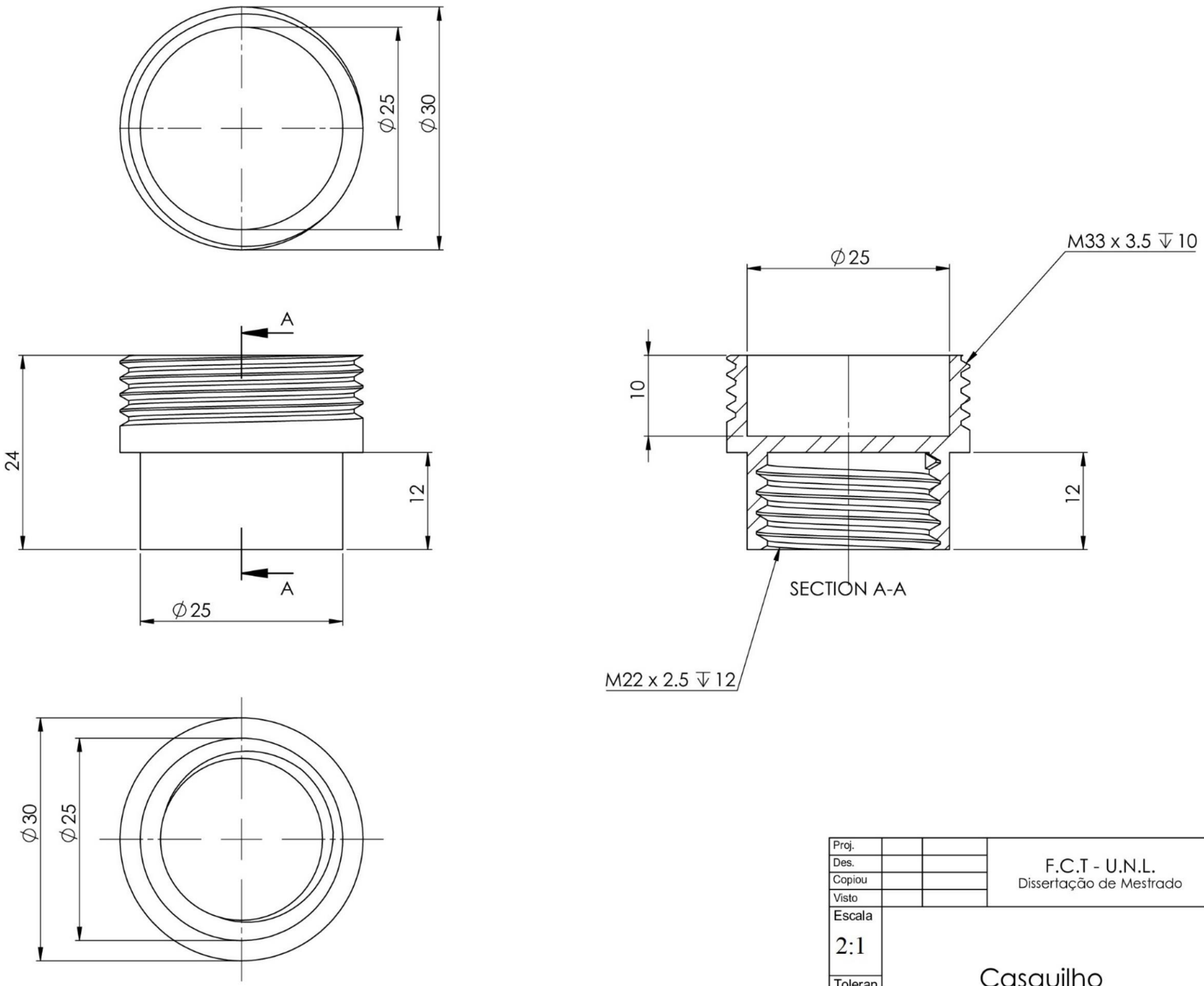
Proj.			F.C.T - U.N.L. Dissertação de Mestrado	José Pinto
Des.				
Copiou				
Visto				
Escala 1:1	Veio Extremidade Fixa			
Toleran.				



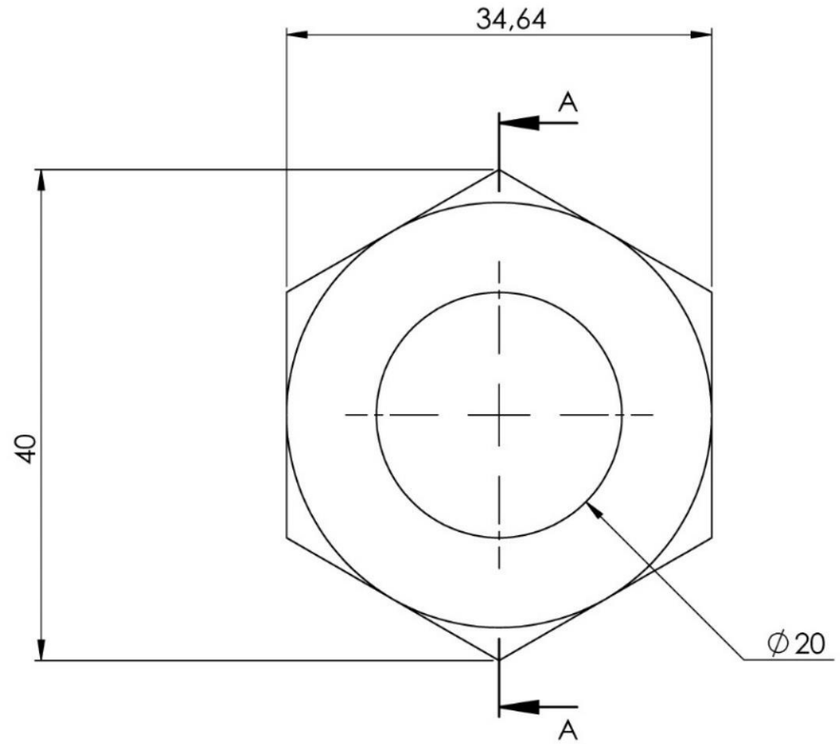


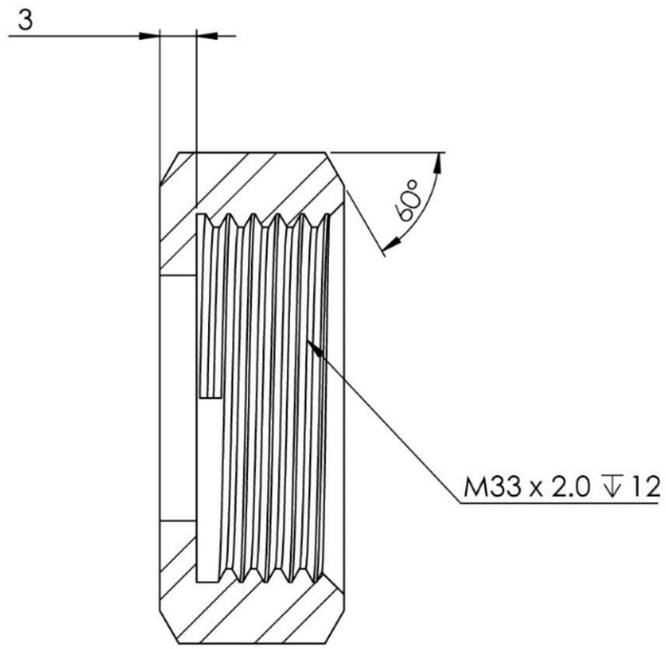


Proj.			F.C.T - U.N.L. Dissertação de Mestrado	José Pinto
Des.				
Copiou				
Visto				
Escala 1:1	Veio Extremidade Móvel			
Toleran.				

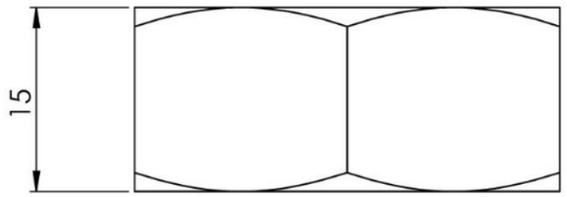


Proj.			F.C.T - U.N.L. Dissertação de Mestrado	José Pinto
Des.				
Copiou				
Visto				
Escala 2:1	Casquilho			
Toleran.				

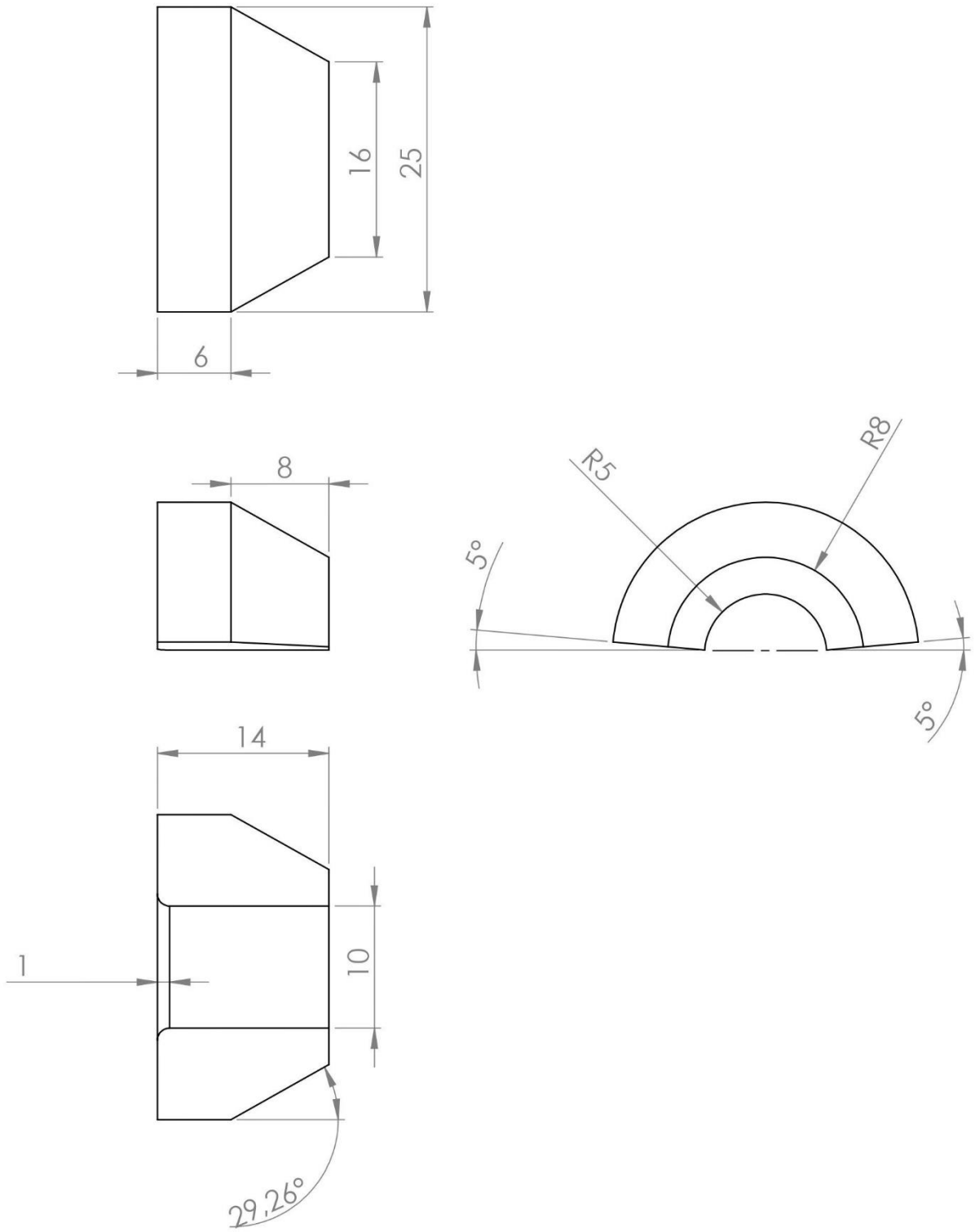




SECTION A-A



Proj.			F.C.T - U.N.L. Dissertação de Mestrado	José Pinto
Des.				
Copiou				
Visto				
Escala 2:1	Porca de Fixação do provete			
Toleran.				



Proj.			F.C.T - U.N.L. Dissertação de Mestrado	José Pinto
Des.				
Copiou				
Visto				
Escala 2:1	Meia Lua			
Toleran.				