



Projeto e desenvolvimento de equipamento para ensaio à fadiga em biomateriais

UMinho | 2019

Pedro Manuel Silva



**Universidade do Minho**  
Escola de Engenharia

Pedro Manuel Silva

**Projeto e desenvolvimento de  
equipamento para ensaio à fadiga  
em biomateriais**

dezembro 2019





**Universidade do Minho**

Escola de Engenharia

Pedro Manuel Oliveira da Silva

**Projeto e desenvolvimento de equipamento  
para ensaio à fadiga em biomateriais**

Dissertação de Mestrado

Mestrado em Engenharia do Produto

Trabalho efetuado sob a orientação do

**Professor Doutor Nuno Miguel Magalhães Dourado**

dezembro 2019

---

## COPYRIGHT AND TERMS OF USE OF WORK BY THIRD PARTIES

---

This is an academic work that can be used by third parties as long as the internationally accepted rules and regulations as well as good practices with regard to copyright and related rights are respected.

Thus, the present work can be used under the terms provided in the license indicated below.

Should you need permission to use the work under unforeseen conditions in the indicated licensing, please contact the author through the RepositóriUM of the University of Minho.

### *The license granted to users of this work*



Atribuição-NãoComercial-SemDerivações  
CC BY-NC-ND

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

---

## AGRADECIMENTOS

---

Ao meu orientador, Professor Nuno Miguel Magalhães Dourado, por todo o apoio e orientação, pelas palavras de motivação e aconselhamento, pela sua análise e sábias sugestões que contribuiram para o desenvolvimento desta dissertação.

A todos os meus amigos que com os seus comentários e sugestões, proporcionaram-me uma evolução sustentada e objectiva sobre o tema.

Aos meus familiares que não deixaram de manifestar o seu apoio e em especial aos meus pais, à minha esposa e filhos, que se manifestaram sempre disponíveis para cooperar.

O autor desta Dissertação está agradecido à Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) pelo apoio financeiro concedido na execução deste trabalho, através do projeto “BoFraPla”, PTDC/EME-SIS/28225/2017, intitulado “Desenvolvimento de um sistema compósito inovador para estabilização de fraturas ósseas cominutivas”.

Este trabalho foi suportado pela FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia -, através do projeto com referência PTDC/EME-SIS/28225/2017, intitulado “Desenvolvimento de um sistema compósito inovador para estabilização de fraturas ósseas cominutivas” BoFraPla, através do programa operacional de incentivo à competitividade e internacionalização e o programa de operacional da região de Lisboa, suportado pelo FEDER.

---

## **DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE**

---

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração. Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

# RESUMO

Neste trabalho desenvolveu-se um projeto para equipamento de ensaios à fadiga no modo I (DCB), modo II (ENF) e modo misto (MMB), em provetes de biomateriais. O referido equipamento terá também a capacidade de resistir à corrosão provocada pelos fluídos empregues no ensaio. Embora com diferentes objectivos, revela-se uma solução alternativa e inovadora face aos equipamentos existentes.

A iniciação e a propagação do dano em muitos materiais utilizados no fabrico de componentes estruturais, bem como em alguns materiais de base biológica, caracteriza-se pela formação de uma zona de processo de fratura, de dimensões não negligenciáveis, que se desenvolve na frente de fenda (1). Esta região, que é caracterizada pela formação de micro - fendas, e, em alguns destes materiais, pela formação de pontes de fibras (aglomerados), impede a propagação instável da fenda (2), traduzindo-se no aumento da resistência à propagação da fenda, i.e., aumento da tenacidade à fratura. Esta propriedade, que é avaliada em ensaios de fratura em condições de carregamento específicas, requer que a zona de processo de fratura se mantenha imperturbável em condições de carregamento e decorrentes dos limites do provete (3). Em ensaios de caracterização à fadiga de alguns destes materiais (designados quase-frágeis), como por exemplo a madeira, o tecido ósseo cortical, muitos dos materiais compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras (carbono, vidro, Kevlar®), rocha e betão, a zona de processo de fratura é impedida de se propagar caso o ensaio decorra em controlo de deslocamento (i.e., com deslocamento imposto). Nessas condições, os provetes adquirem uma vida infinita, impossibilitando a caracterização rigorosa dos coeficientes da lei de Paris (i.e., relação entre o fator de intensidade de tensão e a taxa de crescimento da fenda) (4). Por este motivo, os equipamentos usados na caracterização à fadiga destes materiais terão de permitir a realização dos ensaios em controlo de força.

Outro requisito importante na caracterização à fadiga de alguns materiais de base biológica (e.g., madeira, tecido ósseo cortical e esponjoso), prende-se com o controlo da concentração de água na amostra, no decurso dos ensaios de fadiga. Este aspeto adquire especial importância no contexto da fadiga, atendendo a que estes ensaios se prolongam no tempo. Dado que a resposta destes materiais resulta de um compromisso entre as condições de equilíbrio da amostra e o estado de tensão a que estão sujeitos, torna-se imprescindível garantir a manutenção das condições ambientais, designadamente da temperatura e da humidade, ao longo do ensaio.

**Palavras chave:**

Biomateriais; Controlo de força e deslocamento; Equipamento de teste; Modo misto; Fadiga



# ABSTRACT

In this work, a project will be developed for fatigue testing equipment in Mode I (DCB), Mode II (ENF) and mixed mode (MMB), in biomaterial specimens. It will also have the ability to resist corrosion caused by the fluids used in the test. Although with different objectives, an alternative and innovative solution to existing equipment is revealed.

The initiation and propagation of damage in many materials used in the fabrication of structural components, as well as in some biologically based materials, is characterized by the formation of a non-negligible fracture zone, which develops in front of slit [1]. This region, which is characterized by the formation of micro-cracks, and in some of these materials, by the formation of fiber bridges (agglomerates), prevents the unstable propagation of the crack [2], resulting in increased resistance to the propagation of crack, ie, fracture toughness increase. This property, which is evaluated in fracture tests under specific loading conditions, requires that the fracture zone remain undisturbed under loading conditions and due to the limits of the specimen [3]. In fatigue characterization tests of some of these materials (called quasi-fragile), such as wood, cortical bone tissue, many fiber-reinforced polymer composites (carbon, glass, Kevlar®), rock and concrete, the fracture process zone is prevented from propagating if the test is in displacement control (ie, displacement imposed). Under these conditions, the test pieces acquire an infinite life, making it impossible to rigorously characterize the coefficients of the Paris law (i.e., relationship between the stress intensity factor and the crack growth rate) [4]. For this reason, the equipment used in the fatigue characterization of these materials will have to allow the tests in force control.

Another important requirement in the fatigue characterization of some biologically based materials (e.g., wood, cortical and spongy bone tissue) relates to controlling the concentration of water in the sample during the fatigue tests. This aspect acquires special importance in the context of fatigue, given that these tests extend over time. Taking into account that the response of these materials results from a compromise between the equilibrium conditions of the sample and the state of stress to which they are subjected, it is essential to ensure that the environmental conditions, namely temperature and humidity, are maintained throughout the test.

**Keywords:**

*Biomaterials; Control of strength and displacement; Test equipment; Mixed mode; Fatigue*

# ÍNDICE

AGRADECIMENTOS .....	iii
RESUMO .....	v
ABSTRACT .....	vii
SIMBOLGIA e ACRÓNIMOS .....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xi
OBJETIVOS .....	1
1. Revisão bibliográfica .....	2
2. Mecânica da fratura .....	4
2.1 Fenómeno de fadiga .....	5
2.2 Fadiga de Baixo número de ciclos (Low Cycle Fatigue) .....	5
2.3 Fadiga de Alto Número de Ciclos (High-Cycle Fatigue) .....	5
2.4 Variáveis do processo de fadiga .....	6
2.4.1 Número de ciclos – N .....	7
2.4.2 Fator de intensidade de tensão – K .....	7
2.4.3 Taxa de libertação de energia – G .....	9
2.4.4 Lei de Paris Erdogan .....	10
3. Ensaios de fratura e de fadiga .....	12
3.1 Ensaio DCB .....	13
3.2 Ensaio ENF .....	14
3.3 Ensaio no modo I+II, Mixed-Mode Bending (MMB) .....	15
4. Descrição do dispositivo .....	21
4.1 - Software utilizado para modelação e dimensionamento .....	22
4.2 - Definição da malha para simulação de elementos finitos .....	23
4.3 - Máquina de ensaio .....	24
4.3.1 - Máquina de ensaio – Estrutura .....	28
4.3.2 - Máquina de ensaio - Base horizontal .....	33
4.3.3 - Máquina de ensaio – Base vertical .....	38
4.3.4 - Máquina de ensaio – Sistema MMB .....	43
4.3.5 – Mesa linear + motor de passo .....	44
4.3.6 Suporte móvel .....	46
4.3.7 Suporte fixo .....	47
4.3.8 Sela .....	48
4.3.9 Subconjunto da célula de carga .....	54
4.4 - Máquina de ensaio – Sistema DCB .....	56
4.5 - Máquina de ensaio – Sistema ENF .....	57
5 – Conclusões e trabalhos futuros .....	60
5.1 – Conclusões .....	60
5.2 – Trabalhos futuros .....	61
6 – Bibliografia .....	63
7. ANEXOS .....	65

# SIMBOLGIA e ACRÓNIMOS

*HCF* - Fadiga de elevado número de ciclos

*LCF* – Fadiga de baixo número de ciclos

*a* – Comprimento de fenda

*a<sub>0</sub>* – Comprimento de fenda inicial

*N<sub>r</sub>* – Número de ciclos até à rotura

*N<sub>i</sub>* – Número de ciclos de iniciação e de propagação

*S* - Área da fenda

*N<sub>p</sub>* – Número de ciclos de propagação

*K*- Fator de Intensidade de Tensão

*K<sub>c</sub>* - Fator de Intensidade de Tensão Crítica

*G* - Taxa de Libertação de Energia

*G<sub>I</sub>* - Taxa de Libertação de Energia crítica em modo I

*G<sub>II</sub>* - Taxa de Libertação de Energia crítica em modo II

*U* - Energia de Deformação Elástica

*W* - Densidade de Energia de Deformação

*σ<sub>r</sub>* – Tensão de rotura

*σ<sub>n</sub>* - Tensão normal

*τ* - Tensão de corte

*δ* - Deslocamento

*δ<sub>I</sub>* - Deslocamento em modo I

*δ<sub>II</sub>* - Deslocamento em modo II

*P* – Carga aplicada

*F<sub>a</sub>* – Força axial

*MEF* - Método dos Elementos Finitos

*Mt* – Binário do motor

$C, m$  - Constantes da Lei de Paris

$TV$  - Teoria de vigas

$E$  - Módulo de Young

$\Gamma$  - Contorno definido para Integral  $J$

$b$  - Largura do provete

$h$  - Altura do provete

$E_L$  - Módulo elasticidade longitudinal

$E_T$  - módulo elasticidade transversal

$G_{LT}$  - Módulo de corte

$XEFM$  - Extend finite element method

$r$  - raio do fuso de acionamento

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Biomateriais .....	3
Figura 2 - Fixação de dente a partir de biomaterial .....	4
Figura 3 – Regimes de fadiga nos metais .....	6
Figura 4 – Provedor metálico empregue num ensaio de fadiga .....	9
Figure 5 - Balanço energético decorrente do processo de propagação de uma fenda .....	10
Figura 6 - Gráfico da lei de Paris .....	11
Figura 7 - Modos puros de carregamento .....	12
Figura 8 - Esquema de ensaio DCB .....	13
Figure 9 - Curva de carga $P-\delta$ num ensaio DCB .....	13
Figura 10 - Esquema de ensaio ENF .....	14
Figura 11 - ASTM D 6671 – Pormenor de fixação .....	16
Figura 12 - Sistema MMB .....	17
Figura 13 - Sistema MMB - Gráfico força / deslocamento .....	17
Figura 14 - Adaptação de máquina de ensaio ao sistema MMB .....	21
Figura 15 - Mini sistema MMB - Mixed mode .....	22
Figura 16 - Estrutura com sistema MMB .....	22
Figura 17 -Estrutura com sistema DCB .....	26
Figura 18 - Estrutura com sistema ENF .....	26
Figur 19 - Pormenor dos três equipamentos de ensaio e a estrutura suporte .....	27
Figura 20 - Gráfico ' Ahsby ' .....	28
Figura 21 -Pormenor da estrutura .....	29
Figure 22 -Perfil da estrutura .....	30
Figure 23 -Pormenor da montagem da estrutura .....	31
Figura 24 -Montagem das bases e ventiladores .....	33
Figura 25 -Desenho de detalhe da base horizontal .....	34
Figura 26 - Convergência da malha – base vertical .....	38
Figura 27 - Desenho de detalhe base vertical . .....	39
Figure 28 - Equipamento de ensaio MMB .....	44
Figura 29 - Componentes para sistema de acionamento .....	45

Figura 30 - Sistema de acionamento .....	46
Figura 31 - Suporte móvel, sistema MMB .....	47
Figura 32 - Suporte fixo, sistema MMB .....	48
Figura 33 - Pormenor do apoio da sela, sistema MMB .....	49
Figura 34 - Desenho técnico – Sela .....	50
Figura 35 -Convergência de malha – Sela .....	53
Figura 36 -Sub-conjunto da célula de carga, montado .....	54
Figura 37 - Perspetiva da montagem da sela .....	55
Figura 38 - Célula de carga .....	55
Figura 39 -Equipamento de ensaio DCB .....	56
Figura 40 -Componentes DCB .....	57
Figura 41 - Equipamento de ensaio ENF .....	58
Figura 42 - Componentes ENF .....	58
Figura 43 -.Apoio livre ENF .....	59
Figura 44 - Postiço central ENF .....	59
Figura 45 - Esquema de bomba peristáltica .....	61
Figura 46 - Motor de passo para variar distância 'c' .....	62

# ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1- Propriedades Físicas do osso cortical húmido .....	20
Tabela 2 - Caracterização da malha no SolidWorks .....	24
Tabela 3 - Propriedades mecânicas do alumínio para a estrutura .....	30
Tabela 4 - Propriedades do alumínio para construção das bases .....	32
Tabela 5 - Análise MEF da base horizontal .....	37
Tabela 6 - Análise MEF da base vertical .....	43
Tabela 7 - Análise MEF da sela .....	52

# OBJETIVOS

O objetivo desta Dissertação é a concepção e construção de um equipamento eletromecânico destinado à realização de ensaios de fadiga com controlo de força, dotado de uma câmara ventilada que permita assegurar a manutenção de condições ambientais específicas de temperatura e de humidade relativa. Atendendo a que os referidos ensaios normalmente se prolongam no tempo, pretende-se desenvolver um conjunto de dispositivos mecânicos, a instalar neste equipamento, por forma a possibilitar a realização simultânea de vários ensaios de fadiga. O equipamento deverá registar, individualmente, as solicitações aplicadas a cada um dos provetes a ensaiar, bem como o respetivo número de ciclos até à rotura. Será igualmente importante dotar o equipamento de um circuito que permita a hidratação contínua de provetes, com soluções salinas, possibilitando assim a realização de ensaios de fadiga em provetes de tecido ósseo. Este equipamento deverá possibilitar a regulação individual da frequência de carregamento para um máximo de 0.5KN, bem como da razão de carga a aplicar a cada provete. Na fase de concepção do equipamento eletro-mecânico, dever-se-á ter em atenção a resistência à corrosão dos materiais a selecionar, dado que se tem por objetivo utilizar soluções salinas PBS (Polybutylene succinate), para assegurar a manutenção das condições de preservação de alguns materiais de base biológica (e.g., tecido ósseo e estruturas fibrosas de base polimérica e hidrogel) que se pretende ensaiar.

Neste trabalho vai ser realizado uma introdução ao domínio da mecânica da fratura, caracterizando as variáveis presentes. Uma análise teórica aos ensaios de fadiga, bem como aos equipamentos comerciais existentes. Seguidamente foi desenvolvido um equipamento que combina os ensaios em modo I, modo II e modo misto. Foi tido em conta no equipamento para além dos requisitos mencionados anteriormente, as dimensões dos provetes em biomateriais a ensaiar, provete mínimo com dimensões 70x6x3mm e o provete máximo 300x30x20mm. O atravancamento e o dimensionamento foram definidos principalmente por ensaios e simulações, prevendo-se um deslocamento e uma força de 20mm e 0,5KN, respetivamente.

O projeto apresentado ao longo deste trabalho revela uma solução alternativa a equipamentos de fadiga convencionais, na medida em que permite a realização de ensaios de fadiga em modo I, modo II e modo misto I+II, dotado de um dispositivo de lubrificação e controlo da temperatura permanente.



# 1. Revisão bibliográfica

## 1.1 Biomateriais

Biomaterial é uma substância ou uma mistura de substâncias, natural ou artificial, que atua nos sistemas biológicos (tecidos, órgãos) parcial ou totalmente, com o objetivo de o substituir, aumentar ou tratar e possuir propriedades biomecânicas capazes de responder dinamicamente e estaticamente a esforços durante a sua vida útil.

Alguns exemplos de biomateriais são próteses, implantes e lentes de contacto entre muitos mais. A presença de biomateriais é imprescindível para a fabricação destes utensílios. Um biomaterial é diferente de um material biológico, como o osso, que é produzido por um sistema biológico. Além disso, deve haver cuidado na definição de um biomaterial como biocompatível, uma vez que é específico da aplicação. Um biomaterial que seja biocompatível ou adequado para um aplicativo pode não ser biocompatível em outro (5).

Os biomateriais, Figura 1, são definidos como dispositivos que entram em contato com sistemas biológicos (incluindo fluidos biológicos), com aplicações diagnósticas, vacinais, cirúrgicas ou terapêuticas, podendo ser constituídos de compostos de origem sintética ou natural, assim como de materiais naturais quimicamente modificados, tanto na forma de sólidos quanto de geles, pastas ou mesmo líquidos. A utilização de biomateriais tem vindo a crescer, essencialmente na área médica em implantes, próteses, substituição de tecidos de pele, ossos e até em tendões.

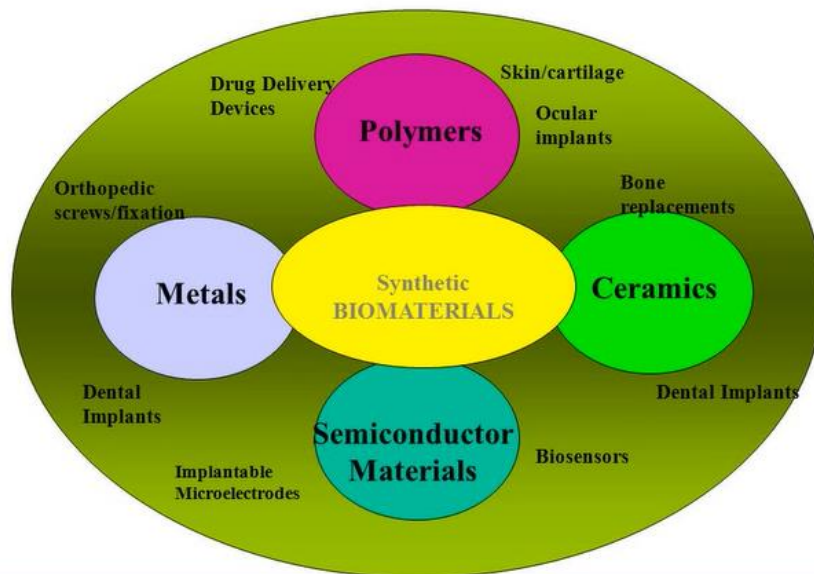


Figura 1 - Biomateriais

Ciências como a nanotecnologia, engenharia de materiais e engenharia de tecidos têm vindo a desenvolver em conjunto importantes avanços no ramo dos biomateriais. Todo o processo de produção engloba várias etapas importantes: desde a seleção de material, onde existe uma vasta gama de opções, tendo em conta que podem ser utilizados metais ou ligas metálicas, materiais cerâmicos, compósitos, tecidos ou malhas de poliéster e polímeros de natureza variada; análise de quantidades (onde a medição e cotagem é fundamental); possíveis reações no organismo (onde se requer uma cuidada análise química, fisiológica e mecânica da relação biomaterial-organismo); etapas estas onde o papel das ciências referidas anteriormente tem uma importância crucial. É então fundamental um processo, todo ele meticuloso, para que o resultado seja o esperado e conseqüentemente para que o consumidor fique satisfeito (5).



*Figura 2 - Fixação de dente a partir de biomaterial*

## 2. Mecânica da fratura

O domínio da mecânica da fratura está amplamente ligado a estudos da resistência dos materiais, quando sujeitos a esforços cíclicos e é cada vez mais importante conhecer o comportamento dos biomateriais, principalmente a forma como é a evolução de fissuras e a sua propagação. Os critérios de rotura da Mecânica dos Meios Contínuos estabelece que o material é ideal, ou seja não apresenta defeitos, comportando-se como o corpo contínuo. Ora, isto não é a realidade pois existe defeitos associados aos processos de obtenção, maquinação, corrosão e outros, sendo necessário fazer análises no domínio da Mecânica da Fratura.

Fendas, fissuras e dano encontram-se muito presentes nos materiais, sendo responsáveis pela instalação de tensões e de deformações de amplitude não negligenciável, podendo conduzir à rotura do material. Com a aplicação dos conceitos da mecânica da fratura é possível avaliar se durante o ciclo de vida de um dado componente permanece inalterado ou se ultrapassam as dimensões críticas, colocando em causa um elemento ou estrutura.

Para estudar a evolução dos defeitos na mecânica da fratura estabelece dois critérios baseados no seu valor crítico, um critério que é baseado no fator de concentrações de tensão indicado para metais, e outro baseado em conceitos energéticos.

## 2.1 Fenómeno de fadiga

O dano por fadiga é um processo que ocorre sob a influência de tensões cíclicas, que são normalmente de menor intensidade do que as forças que provocam a cedência do material. Este dano pode ocorrer em três etapas: (a) iniciação, (b) propagação estável e (c) rotura abrupta e descontrolada. Uma importante característica do projeto de engenharia é a vida em solitação de fadiga, que é medida em função do número de ciclos de carga que um material pode suportar antes da manifestação do dano. A fase de propagação estável do dano apresenta uma maior importância no processo de fadiga, pelo facto de o controlo ser feito pela variação do fator de intensidade de tensão (6).

A presença de defeitos pode reduzir ou eliminar a fase de iniciação do dano por fadiga, que pode ocupar mais de 90% da vida cíclica prevista pelos ensaios clássicos em provetes perfeitos. Na presença de defeitos preexistentes, a vida útil é principalmente dependente da velocidade de propagação do dano (fissura) e incorpora principalmente a fase de propagação de um defeito no material (7).

Na secção que se segue, distingue-se a fadiga de baixo número de ciclos e a fadiga caracterizada por um elevado número de ciclos.

## 2.2 Fadiga de Baixo número de ciclos (*Low Cycle Fatigue*)

Nos metais, este regime caracteriza-se por um número dos ciclos inferior a  $10^5$  (Figura 3), traduzindo-se numa deformação plástica muito significativa, que exibem vidas curtas. Neste regime, a estrutura elementar (grão) deforma-se, plasticamente, de uma forma homogénea, onde o início da primeira fissura ocorre muito cedo e a maior parte da restante está no estágio de propagação.

## 2.3 Fadiga de Alto Número de Ciclos (*High-Cycle Fatigue*)

Também nos metais, este regime é caracterizado por um número de ciclos mais elevado do que  $10^5$  ciclos (Figura 3), sendo responsável pela instalação de tensões abaixo do limite elástico onde o grão é solitado de uma maneira heterogéneo. O *HCF* é atribuído ao escorregamento que ocorre em

poucos grãos, que estão mal orientados. A fase de iniciação do dano (fissura) representa uma parte muito significativa da vida total à fadiga, sendo seguida da fase de propagação do dano de uma forma muito rápida (8).

É muito importante entender os fatores que afeta o processo de iniciação da fenda no HCF.

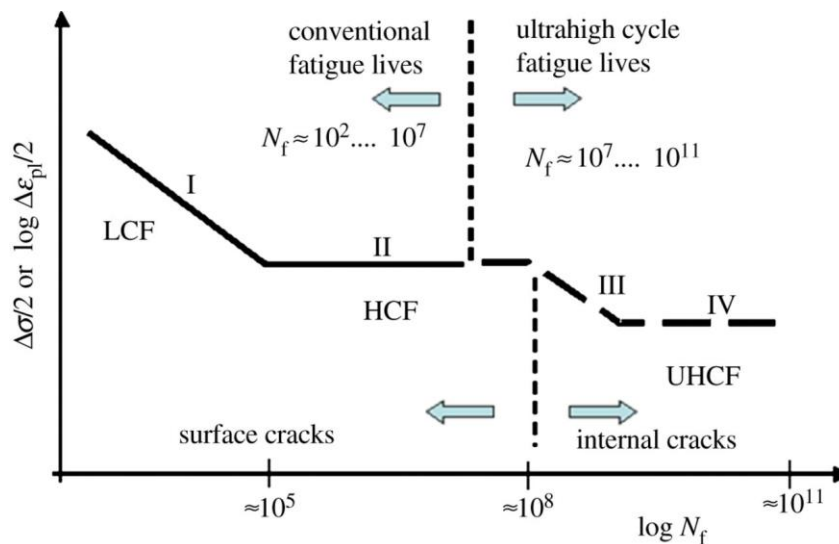


Figura 3 – Regimes de fadiga nos metais.

## 2.4 Variáveis do processo de fadiga

O projeto deve ter em conta critérios bem definidos quanto ao seu comportamento mecânico durante a sua vida, podendo ser classificado da forma que se segue:

**Projeto com vida infinita:** Tensões instaladas estão abaixo da tensão limite da fadiga.

**Projeto com vida finita:** Tensões instaladas não constantes e imprevisíveis, prevendo-se a existência de um coeficiente de segurança.

**Projeto com falha segura:** É considerada a possibilidade de surgimento do dano, mas sem ocorrer fratura. Neste sentido, prevê-se a reparação dos componentes assim que sejam detetadas fendas (dano).

**Projeto tolerante ao dano:** é uma filosofia semelhante à anterior, só que é considerado no projeto uma fenda inicial, sendo devidamente controlada para evitar o seu crescimento para evitar a falha total do componente.

#### 2.4.1 Número de ciclos – $N$

O processo de fratura engloba a fase de nucleação e a iniciação de uma fenda, bem como a fase de propagação, sendo possível quantificar-se o número de ciclos correspondente a cada fase. O número de ciclos de fratura ( $N$ ) resulta da soma do número de ciclos na fase de nucleação e iniciação da fenda ( $N_i$ ) com o número de ciclos na fase de propagação ( $N_p$ ) (8).

$$N = N_i + N_p \quad (1.1)$$

A relação estabelecida entre o número de ciclos de cada uma das fases dependerá do tipo de defeito inicial. Um defeito de dimensões reduzidas é responsável por uma vida útil mais longa, com uma fase de iniciação de fenda dominante em que o número de ciclos será mais elevado. Caso o defeito seja de grande dimensão, o componente mecânico terá uma vida útil reduzida, a que corresponde um baixo número de ciclos até à rotura, com uma fase de propagação de fenda dominante. A fase de propagação apresenta uma maior importância no processo de fadiga, pelo facto de o controlo ser feito pela variação do fator de intensidade de tensão.

#### 2.4.2 Fator de intensidade de tensão – $K$

A resistência à fratura é uma propriedade importante do material (na indústria), qualquer que seja o seu tipo de aplicação, uma vez que a presença de defeitos no material não é totalmente evitável. O fator de intensidade de tensão  $K$  é calculado em função do tamanho, geometria e força atuante na vizinhança da fenda, sendo usado para determinar a resistência à fratura de um material (9). Este parâmetro é determinado a partir da intensidade da tensão nominal aplicada, tendo em consideração as dimensões do provete/componente, os fatores geométricos de concentração de tensões e o comprimento da fenda (defeito) presente numa estrutura ou componente.

$$K = \sigma_r \sqrt{\pi a} \quad (1.2)$$

Em que  $\sigma_r$  representa a tensão nominal aplicada,  $a$  é o tamanho da fenda. A este valor de  $K$  está associado outro, representado por  $K_c$ , conhecido por tenacidade à fratura, que representa um valor crítico do fator de intensidade de tensão, que, uma vez atingido, determina a ocorrência de rotura catastrófica do material, ou fratura frágil. A sua determinação segue normas devidamente enquadradas pela *ASTM* ou pela *ISO*. Este valor é estimado pela expressão,

$$K_c = F \sigma_r \sqrt{\pi a} \quad (1.3)$$

sendo  $F$  uma quantidade adimensional definida em função do tamanho da fenda e da largura do provete, bem como da distribuição da carga, encontrando-se tabelado para os provetes empregues na caracterização à fadiga de metais. Na prática, enquanto a intensidade de tensão na extremidade da fenda de um provete não igualar a tenacidade à fratura do material, a fenda não se propagará. A diferença entre a tenacidade à fratura,  $K_c$ , e o fator de concentração de tensão,  $K$ , é que a tenacidade é uma propriedade mecânica do material (quantidade intrínseca), enquanto o fator de concentração de tensão, é um parâmetro que depende do tipo de solicitação e geometria da fenda e do componente mecânico onde se propaga a fenda. Uma das desvantagens da aplicação deste critério é a dificuldade da determinação e da medição do fator de concentração de tensão. Ou seja, a sua medição, visto que não é possível medir com exatidão o seu valor quando a fenda se propaga numa interface, pois nesta zona o seu valor oscila.

O método de determinação do fator de concentração de tensões no domínio da Mecânica da Fratura é mais frequentemente utilizado em materiais metálicos.

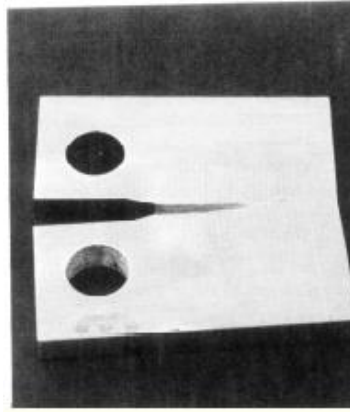


Figura 4 – Provete metálico empregue num ensaio de fadiga.

### 2.4.3 Taxa de libertação de energia – $G$

A taxa de libertação de energia, designada por  $G$ , é usada para definir o critério energético, sendo baseada na hipótese de que o dano ocorre sempre que a energia acumulada na extremidade de uma fenda é igual à energia necessária para fazer propagar essa fenda, sendo designada por taxa crítica de libertação de energia,  $G_c$ . Esta grandeza, tal como a tenacidade à fratura,  $K_{Ic}$ , é uma propriedade intrínseca do material. Na prática, para que a fenda não se propague, é necessário que a condição  $G \leq G_c$  seja satisfeita (10). A taxa de libertação de energia é estimada pela seguinte relação,

$$G = \frac{d(W - U)}{da} \quad (1.4)$$

sendo  $W$ , o trabalho realizado pelas forças exteriores que atuam no sistema (o provete),  $U$  a energia interna de deformação elástica e  $da$  a área infinitesimal da fenda. A maioria dos trabalhos que fazem uso da Mecânica da Fratura para prever o comportamento de materiais compósitos ou biomateriais recorrem ao critério da taxa de libertação de energia de deformação. Este critério apresenta algumas vantagens comparativamente com o critério do fator de concentração de tensões, nomeadamente pelo facto de se trabalhar com um critério que está relacionado com o armazenamento (e dissipação) de energia por parte da fenda, facto importante no estudo das propriedades do material (11).



Como se pode observar na figura 5, à medida que uma fenda se propaga, a dependência quadrática da energia de deformação elástica passa a dominar a energia de superfície que se dissipa, sendo que para além de um determinado comprimento (crítico) de fenda,  $a_c$ , o sistema pode sofrer uma redução de energia, traduzindo-se no crescimento adicional da fenda. Até ao ponto em que  $a = a_c$ , a fenda cresce somente se a tensão na extremidade da fenda aumentar. Para além desse ponto, o crescimento de fenda é espontâneo, e, por esse motivo, catastrófico. O valor do comprimento crítico de fenda pode ser encontrado ajustando a derivada da energia total  $S + U$  para zero (12).

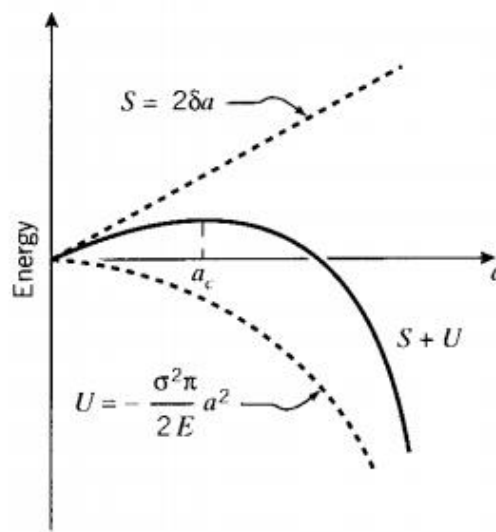


Figure 5 - Balanço energético decorrente do processo de propagação de uma fenda

#### 2.4.4 Lei de Paris Erdogan

A Lei de Paris Erdogan relaciona a taxa de libertação de energia de fratura com o crescimento da fenda, em condições de carregamento que induzem o fenómeno de fadiga. Assim, é o modelo matemático mais usual de descrição do crescimento da fenda em fadiga usado em Ciência dos Materiais. A expressão empregue é função da taxa de libertação da energia

$$\frac{da}{dN} = c(\Delta G)^m \quad (1.5)$$

sendo o termo do primeiro membro designado por taxa de propagação de fenda, representando o crescimento infinitesimal do comprimento da fenda por ciclo realizado. Os parâmetros  $C$  e  $m$  são constantes do material, avaliadas experimentalmente. A quantidade  $\Delta G$  representa a variação taxa de libertação de energia decorrente da propagação da fenda.

No comportamento típico dos materiais à fadiga identificam-se três regimes de propagação de fenda distintos (13) (Figura 6). O regime I, designado “sub-crítico”, é caracterizado por uma propagação lenta da fenda, que pode, inclusivamente, não ocorrer caso  $\Delta G$  não atinja um valor limiar. Para valores superiores de  $\Delta G$ , enquadrados no regime II, dito “estável”, a taxa de propagação da fenda cresce de forma estável de acordo com a Equação (1.5), e é aproximadamente linear quando se usa escala logarítmica em ambos os eixos. Por último, o regime III, permite enquadrar os casos em que a propagação da fenda é instável.

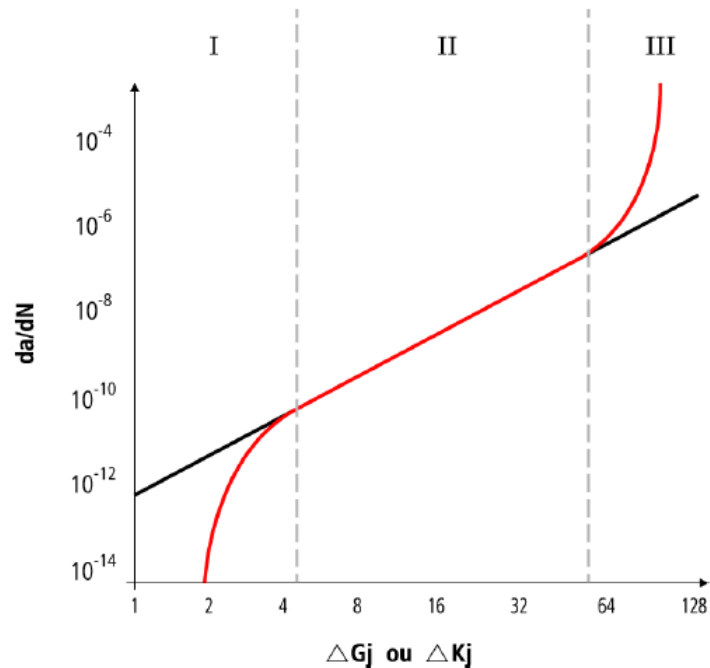


Figura 6 - Gráfico da lei de Paris

### 3. Ensaio de fratura e de fadiga

A fratura e a fadiga de um material podem ser induzidas através de ensaios de tração, flexão, torção, ou mediante a combinação destes ensaios. Estes podem ser realizados em ambientes específicos, com controlo de temperatura, de humidade, e/ou sob a ação de substâncias químicas, consoante o efeito ou material que se pretenda estudar.

Os principais fabricantes de equipamentos laboratoriais para avaliação do comportamento à fadiga de biomateriais são a Instron®, Testresources®, a MTS® e a Zwick®. Alguns destes equipamentos foram adaptados no sentido de possibilitarem a caracterização à fadiga de biomateriais empregues no fabrico de produtos de substituição de ossos, tecidos biológicos e dentes.

As normas ISO ( *International Standard Organization* ) e ASTM ( “*American Society for Testing and Materials*” ) estabelecem vários tipos de ensaios de tenacidade à fratura, sendo que em ensaios de biomateriais existe somente o ensaio ASTM – D5045, que estabelece condições para medir a tenacidade à fratura e a taxa de libertação de energia em biomateriais. Na literatura encontram-se igualmente referências a ensaios de biomateriais realizados de acordo com a norma ISO 13586, que estabelece as condições para medir a tenacidade à fratura em polímeros, no domínio linear elástico.

Tanto nos ensaios destinados à medição da tenacidade à fratura, como nos ensaios em que se pretende medir a resistência à fadiga, empregam-se provetes dotados de uma pré-fenda. O carregamento induzido na extremidade da fenda (Figura 7) pode ser em modo de abertura (modo I), em modo de corte no plano (modo II), ou então em modo de corte fora do plano (modo III). Nos ensaios em que se pretende medir a tenacidade à fratura o carregamento é induzido por uma carga monotónica, enquanto nos ensaios destinados à medição da resistência à fadiga a carga é aplicada ciclicamente.

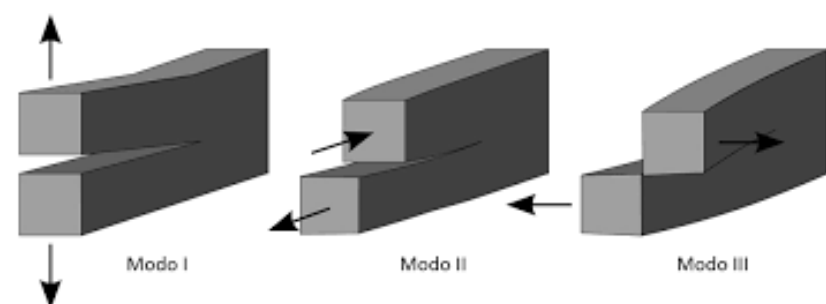


Figura 7 - Modos puros de carregamento.

### 3.1 Ensaio DCB

O ensaio DCB (Double Cantilever Beam) foi concebido para medir a tenacidade à fratura em modo I, tendo sido estabelecido através da norma ASTM D6115 (Figura 8). Tem sido usado de forma muito eficaz também em ensaios de fadiga (Benbow e Roesler (14) e Gilman (15)).

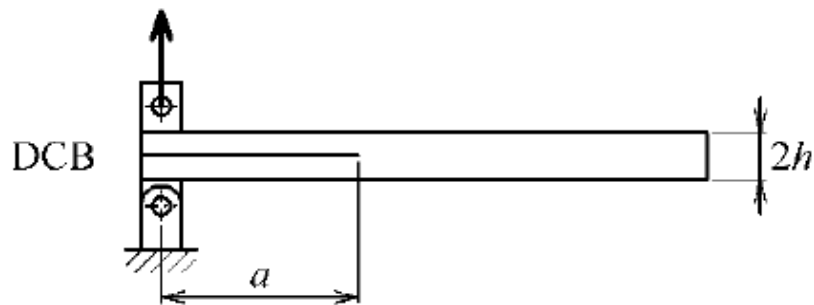


Figura 8 - Esquema de ensaio DCB

A montagem deste provete numa máquina de ensaios faz-se através de um par de cavilhas, devidamente apoiadas em dispositivos devidamente estabilizados mecanicamente nas amarras da máquina de ensaios. As grandezas a medir são a força  $P$ , o deslocamento  $\delta$ , e, de acordo com alguns protocolos experimentais baseados na Mecânica da Fratura Linear Elástica ( *LEFM* ) (16), também o comprimento de fenda,  $a$ , durante o ensaio (Figura 9).

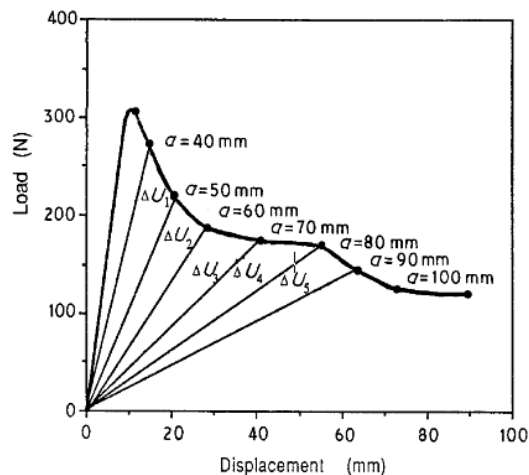


Figure 9 - Curva de carga  $P$ - $\delta$  num ensaio DCB.

Num gráfico semelhante ao da Figura 9, mas em biomateriais, os valores da força não passam os 0.1kN e os 20mm de deslocamento.

Nos métodos baseados na medição do comprimento de fenda ( $a$ ) a taxa de libertação de energia de fratura  $G$  é avaliada diretamente a partir da equação de Irwin-Kyes (17). Neste método a flexibilidade,

$$C = \frac{\delta}{P} \quad (1.6)$$

é utilizada na medição  $G$ , fazendo

$$G_I = \frac{P^2}{2b} \frac{dC}{da} \quad (1.7)$$

A obtenção do valor de  $G_I$ , simultaneamente com o comprimento de fenda  $a$ , possibilita traçar a curva de Resistência do material, a partir do qual é feita a estimativa da tenacidade á fratura (assímtota horizontal dessa função).

### 3.2 Ensaio ENF

O ensaio ENF (End Notched Flexure) (Figura 10) é um dos ensaios mais utilizados na caracterização à fratura em modo II, devido à sua simplicidade. Este ensaio foi desenvolvido em 1977 por Barret e Foschi (18) com o objetivo de determinar a taxa crítica de libertação de energia em modo II de uma espécie de madeira.

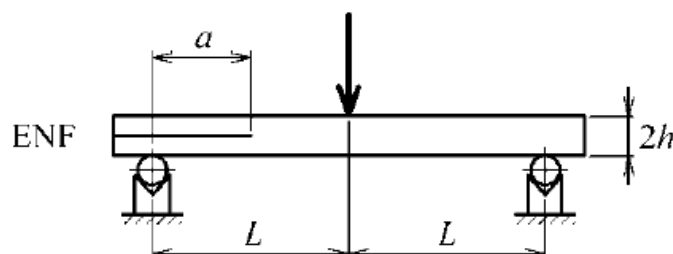


Figura 10 - Esquema de ensaio ENF

O ensaio é efetuado aplicando uma carga vertical, a meio vão do provete, que se encontra simplesmente apoiado nas extremidades. De acordo com esforço de Segundo a equação de *Irwin-Kies* o cálculo da taxa de libertação de energia crítica,  $G_{II}$ , é de acordo com o Direct Beam Theory (DBT):

$$G_{II} = \frac{9P^2 a^2}{16b^2 E h^3} \quad (1.8)$$

Onde  $P$  é a carga aplicada,  $a$ , o comprimento da fenda,  $b$  e  $h$  comprimento e altura da secção do provete e  $E$ , o módulo de elasticidade transversal do material do provete.

### 3.3 Ensaio no modo I+II, Mixed-Mode Bending (MMB)

O Mixed-Mode Bending é um ensaio normalizado pela norma *ASTM D 6671*, sendo um dos ensaios mais utilizados e o único normalizado para determinação da taxa de libertação de energia de factura em Modo Misto para materiais compósitos, tendo sido desenvolvido a partir da combinação dos principais ensaios utilizados em Modo I e Modo II, nomeadamente o *DCB* e o *ENF* respectivamente.

Este sistema utiliza uma alavanca na qual é possível promover esforços normais e de corte simultaneamente no provete de ensaio, sendo apenas aplicada uma só carga. Este sistema surge como uma evolução do ensaio *ENF*, que vai provocar um modo de abertura do provete, fazendo com que desta forma a fenda esteja também sujeito a esforços em modo I.

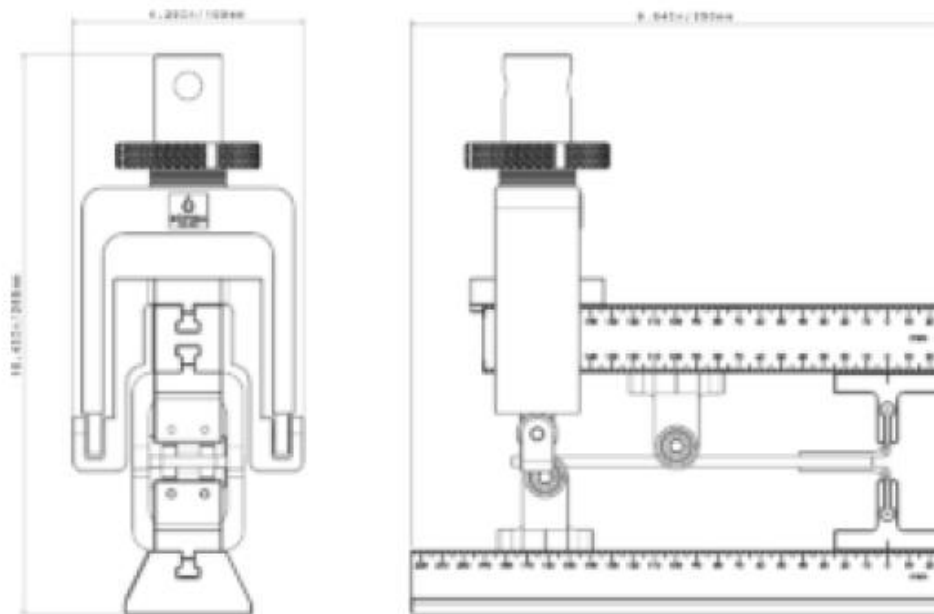


Figura 11 - ASTM D 6671 – Pormenor de fixação

O teste de fadiga em modo misto (*MMB*) mostrado na *Figura 11*, combina o ensaio padrão em modo I (*DCB*), com o teste de flexão entalhada modo II (*ENF*). Embora originalmente projetado para testar a resistência à fratura estática de compósitos, os pesquisadores estenderam seu uso ao carregamento de fadiga e ao teste de resistência de adesivos. Por causa do número de laboratórios que usam este teste, é importante que a padronização do procedimento de teste se concretize para que os testes futuros sejam realizados de maneira uniforme tornando os dados resultantes diretamente comparáveis. A proporção de carregamento do Modo I e do Modo II em um teste *MMB* é controlada definindo a posição de carga da alavanca, *C*, mostrada na *Figura 12* ). O teste *MMB* tem várias vantagens sobre outros testes de fratura de modo misto, incluindo o uso de um único provete para testar quase todo o intervalo do Modo I ao Modo II para vários rácios, um modelo de formulário fechado que é usado para calcular os valores de resistência de quantidades medidas e uma relação do modo misto que permanece essencialmente constante durante o crescimento da fratura. O dispositivo original do *MMB*, mostrou uma não-linearidade na curva de carga devido à rotação da alavanca (19).

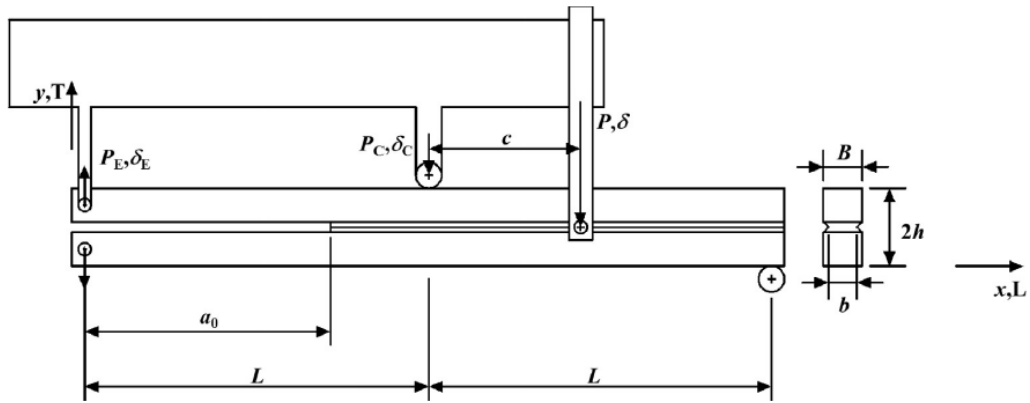


Figura 12 - Sistema MMB

Essa não-linearidade causou erros significativos nos valores de tenacidade calculados e alterou a relação do modo misto. Verificou-se que este problema poderia ser largamente evitado mudando a forma como em que a alavanca foi carregada, e o aparelho modificado é mostrado na Figura 12 ( 11 ). Durante o teste *MMB*, o deslocamento e o deslocamento do ponto de carga são registrados como mostrado no gráfico da Figura 13.

O aparelho *MMB* é carregado no controle de deslocamento até que a fratura começa a crescer.

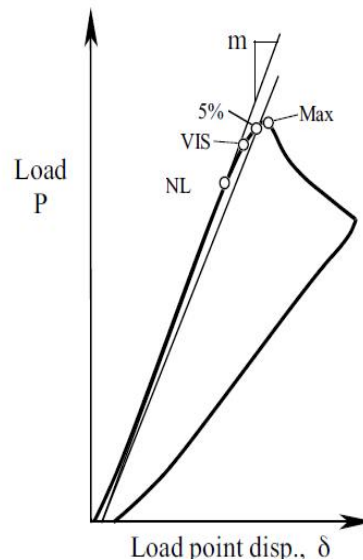
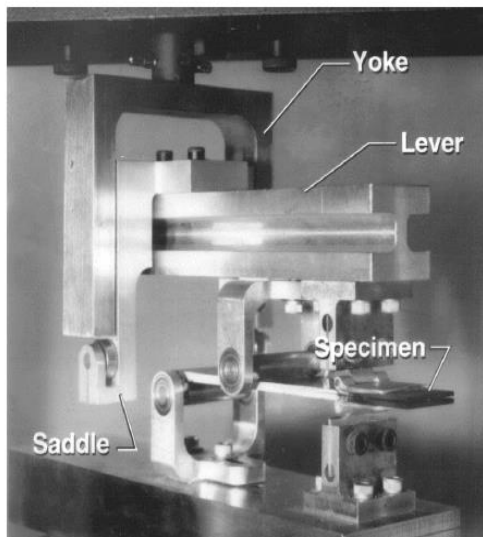


Figura 13 - Sistema MMB - Gráfico força / deslocamento

Diversas cargas diferentes podem ser tiradas da curva carga versus deslocamento a associar ao início da fratura.



As cargas inclui: o ponto em que a curva de carga se desvia da linearidade, NL; o ponto onde a fratura é visualmente observada para crescer, VIS; e a carga associada com um aumento de 5% na conformidade, P5%; e o ponto de carga máxima, MAX. O NL fornece informação de valores conservadores repetitivos de tenacidade no ensaio em Modo I, e é recomendado para o teste de *MMB* também (20). Dependendo da proporção de modo misto e do material a ser testado, a fratura pode crescer de forma estável ou uma maneira instável.

A tenacidade pode ser calculada de várias maneiras. Sendo o teste *MMB* uma combinação dos testes de modo I e II, uma maneira de calcular a taxa de libertação de energia de tensão é separar o carregamento nos componentes Modo I e Modo II. Este modo puro de cargas podem então ser usadas em equações para tenacidade desenvolvida para os testes em modo puro. Os componentes do modo puro são dados pelas equações 1.9 e 1.10.

$$P_I = P \left( \frac{3c-L}{4L} \right) \quad (1.9)$$

$$P_{II} = P \left( \frac{c+L}{L} \right) \quad (1.10)$$

Da mesma forma, o deslocamento em modo puro pode ser combinado para calcular o deslocamento no ensaio *MMB* (21):

$$\delta = \left( \frac{3c-L}{4L} \right) \delta_I + \left( \frac{c+L}{L} \right) \delta_{II} \quad (1.11)$$

Pela análise simplificada da teoria das vigas, os testes de modo puro ignoram tensões de corte e tensões de deformação que ocorrem sobre a ponta da fenda. Kinloch (22) (23) sugeriu corrigir essas deformações adicionando um termo de correção ao comprimento da fratura como mostrado nas seguintes equações:

$$G_I = \frac{12P_I^2(a+Xh)^2}{b^2h^3E} \quad (1.12)$$

$$G_{II} = \frac{9P_{II}^2(a+0,42Xh)^2}{16b^2h^3E} \quad ( 1.13 )$$

Obtemos também as equações da flexibilidade  $C_0$  nos diferentes modos de solitação ,

$$C_I = \frac{\delta_I}{P_I} = \frac{8(a+Xh)^3}{bh^3} \quad ( 1.14 )$$

$$C_{II} = \frac{\delta_{II}}{P_{II}} = \frac{2L^3+3(a+0,42Xh)^3}{8b^2h^3E} \quad ( 1.15 )$$

Onde o factor de correcção  $X$  é dado pela equação 1.16,

$$X = \sqrt{\frac{EL}{11G_{LT}} \left\{ 3 - 2 \frac{\Gamma}{(1+\Gamma)} \right\}} \quad \text{onde :} \quad \Gamma = 1.18 \frac{\sqrt{E_L \cdot E_T}}{G_{LT}} \quad ( 1.16 )$$

$b$  é a largura do provete,  $E_L$ ,  $E_T$  o módulo elasticidade longitudinal e transversal respetivamente e  $G_{LT}$  o módulo de corte do material que controla a flexão do provete de teste.

A alteração da mistura do modo é facilmente realizada no teste *MMB*, alterando o comprimento da alavanca do equipamento (parâmetro na Fig. 11 ). A relação  $G_I / G_{II}$  também é função da rotação da

viga na ponta da fissura que é verificada no modo I e a deformação de corte nos dois modos. As correções de comprimento da fenda para considerar estes efeitos foram propostas por Wang e Williams (24) para testes de *DCB* e *ENF* e usados para estimar a taxa do modo misto.

$$\frac{G_I}{G_{II}} = \frac{4}{3} \left( \frac{3c-L}{c+L} \right)^2 \left( \frac{a_0+hX}{a_0+0,42Xh} \right)^2 \quad (1.17)$$

Desta forma o Modo I e Modo II são combinados, em que a posição do suporte da carga final C determina as proporções correspondentes de Modo I e Modo II.

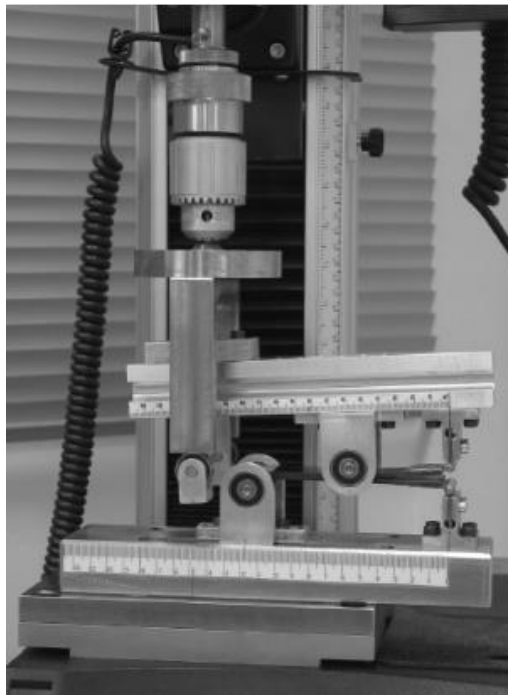
Propriedade	Valor p/ Humano 20-60 anos
Força Elástica Máxima (MPa)	174 ± 1.2
Deformação Máxima (%)	1,50
Módulo de Elasticidade na Tração (GPa)	18,4
Densidade – Tecido ósseo esponjoso	1,3g/cm <sup>3</sup>
Densidade – Tecido ósseo compacto	1,8g/cm <sup>3</sup>
Força para Perfurar – compacto	12-17 N (avanço = 2 mm/s e rotação 3300 rev/min)
Força para Perfurar – esponjoso	3-5 N (avanço = 2 mm/s e rotação 3300 rev/min)

Fonte: Adaptada de Shimano (2001).

Tabela 1- Propriedades Físicas do osso cortical húmido

## 4. Descrição do dispositivo

Os principais fabricantes de máquinas de ensaio não possuem um equipamento específico para realizar testes em modo misto em biomateriais devido principalmente à necessidade de dotar o provete de condições reais de ensaio como a lubrificação contínua do provete e o controlo da temperatura do provete. Os sistemas de ensaio *MMB* existentes são adaptadas a partir de máquinas existentes que permitem de uma forma geral realizar ensaios de tracção e/ou compressão, com movimento linear vertical como mostra a *figura 17*.



*Figura 14 - Adaptação de máquina de ensaio ao sistema MMB*

O dispositivo que foi desenvolvido nesta tese partiu do pequeno sistema *MMB* desenvolvido em artigo científico para caracterizar a fratura em osso cortical de um bovino.

Este equipamento possui duas partes uma móvel e outra fixa e o provete a testar. Uma parte serve de apoio e fixação do provete e tem que permitir a montagem de provetes dentro de um determinado intervalo de comprimentos definindo o atravancamento da máquina. Além de apoiar e fixar o provete terá também uma escala para informar a distância entre apoios pretendida.

A outra parte tem como função principal realizar os movimentos que provocam as forças de ensaio em modo I e modo II em simultâneo. Isto consegue-se utilizando um movimento de rotação entre a sela e um suporte que está fixo à estrutura da máquina de ensaio. Outra capacidade deste subsistema é poder variar a distância  $C$ , figura 18, possibilitando ensaios no mesmo provete com diferentes relações de modo misto sem desmontar o provete. A figura mostra as três partes do sistema *MMB*, a parte fixa o provete de ensaio e a parte móvel constituída pela sela ( Saddle ), forqueta com apoio rotativo ( Yoke ) e apoio regulável ( Fulcrum ) da distância  $C$ .

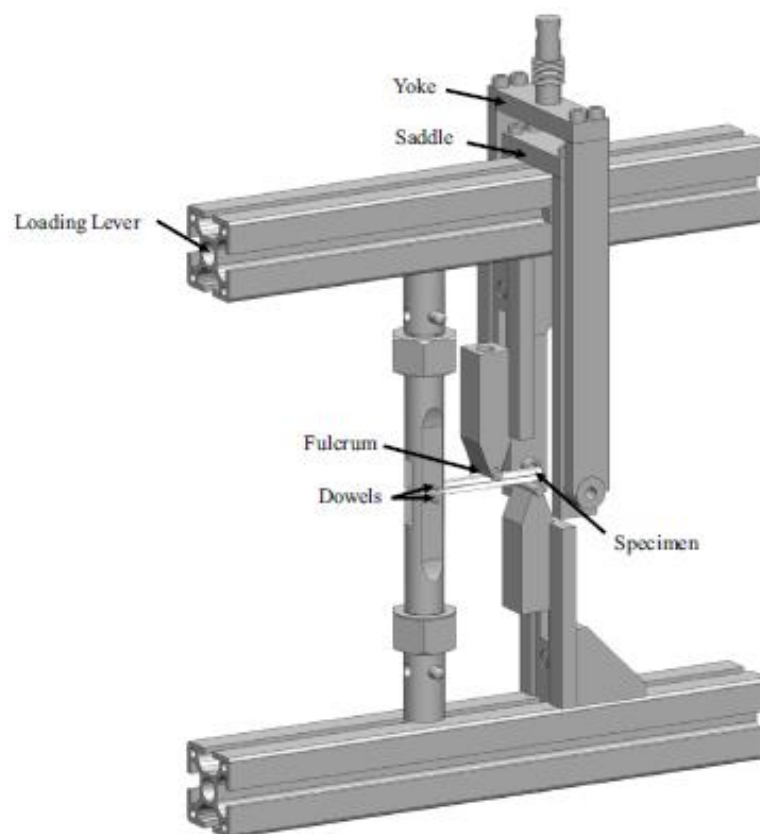


Figura 15 - Mini sistema MMB - Mixed mode

#### 4.1 - Software utilizado para modelação e dimensionamento

Para desenhar, projectar e simular as forças que actuam nos elementos que compõe a máquina foram escolhidos dois softwares, o Solidworks® e o Maytec®, sendo este um software da empresa com o mesmo nome, dedicando-se à fabricação de perfis de alumínio e acessórios.

Inicialmente e depois de escolhido a forma e o material da estrutura, foi seguido a linha inicial de escolha do alumínio como material para estrutura. Para modular a estrutura foi escolhido um software ligado a fabricantes de alumínio, entre algumas opções, foi escolhido o Maytec® por já estar definido na construção do equipamento *MMB* da *figura 18*. Este não é um software comercial, sendo de livre utilização, bastando aceder à página da empresa. Com o Maytec® foi possível chegar à modulação da estrutura com componentes normalizados da mesma empresa. A forma como Maytec® executa as montagens dos vários elementos é bastante simples, sendo que para além da montagem fornece informações atualizadas dos custos da estrutura final.

Para o desenho e dimensionamento do dispositivo foi utilizado o Solidworks® 2017. Esta escolha foi considerada, uma vez que este programa permite a modelação 3D ( três dimensões ) e o dimensionamento relativo a comportamentos a esforços e deformações admissíveis, dando uma perspectiva espacial que de certa forma seria pouco clara numa construção em 2D. Este programa também tem a vantagem de ser pouco exigente ao nível do hardware do computador quando comparado com outros existentes. Como principal desvantagem encontrada ao dimensionar foi ao nível de obtenção de resultados precisos. A otimização dos resultados obtida foi de certa forma condicionada pelo refinamento da malha dos elementos, que para valores ideais torna demoroso o processo de simulação e cálculo.

## **4.2 - Definição da malha para simulação de elementos finitos**

Para as simulações efectuadas no Solidworks®, foram usados elementos sólidos 3D tetraédricos lineares de 4 nós com 29 pontos de Gauss (para verificação do Jacobiano). A qualidade da malha exerce um papel importante na precisão dos resultados. O Solidworks® permite alterar dois parâmetros muito importantes para variar a qualidade dos elementos de uma malha: a verificação de proporção e o número de pontos de Gauss.

Para obter uma melhor precisão numérica no cálculo foi feita simulações aumentando oito vezes o número de elementos até se obter convergência na tensão de cedência, isto acontece quando o erro é inferior o 1%. Devido a arestas e geometrias não lineares e cantos pronunciados, os elementos gerados podem ter arestas não uniformes. Quando as arestas de um elemento passam a ter comprimentos muito diferentes, a precisão dos resultados diminui drasticamente.

O número de pontos de Gauss tem como base um número de pontos traçados dentro de cada elemento. Aumentar este número de pontos permite aumentar a precisão da malha. Contudo, torna o cálculo muito mais moroso. Por essa razão foi escolhido o elemento de 29 nós. Para além de ser um cálculo mais rápido, também é menos complexo, sendo possível fazer os cálculos com o software existente. Na Tabela são apresentadas as características da malha que foi utilizada para fazer a simulação em Solidworks® dos elementos analisados.

<b>Tipo de malha</b>	Solid Mesh
<b>Malha usada</b>	Standard mesh
<b>Transição automática</b>	On
<b>Pontos de Gauss</b>	4 nós com 29 Points
<b>Tamanho dos elementos</b>	3.6243 mm
<b>Tolerância</b>	0.125 mm
<b>Qualidade da malha</b>	Critério máximo

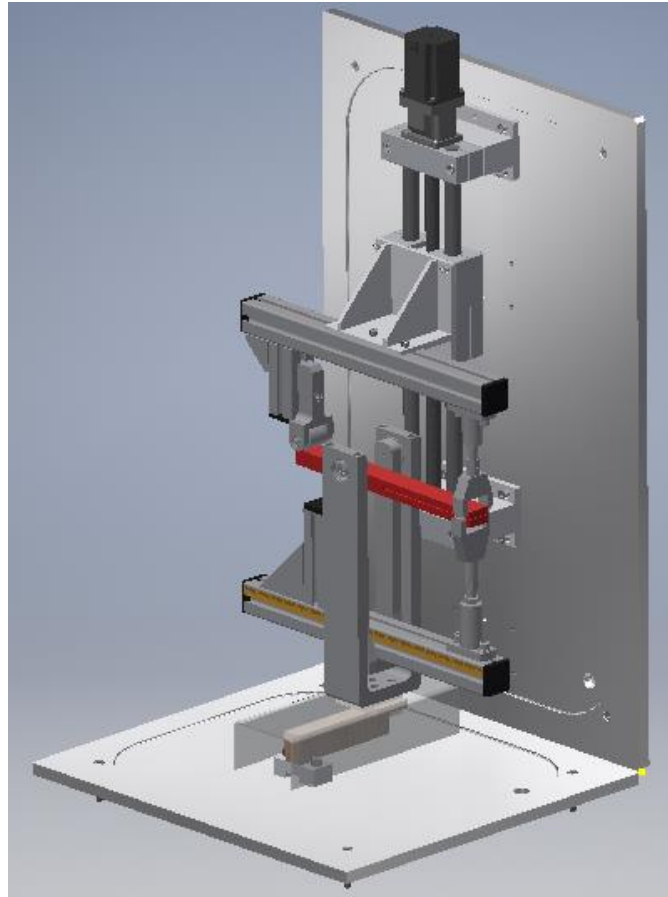
*Tabela 2 - Caracterização da malha no SolidWorks*

### 4.3 - Máquina de ensaio

O projecto da máquina de ensaio foi realizado tendo em conta as propriedades dos provetes a ensaiar, as condições de ensaio dos provetes com adição soluções salinas proporcionando ensaios realísticos relativamente às condições de humidade. Além de permitir ensaios no modo misto ( *MMB* ) esta máquina proporcionará ensaios em modo I ( *DCB* ) e em modo II ( *ENF* ), este tipo de flexibilidade é uma novidade relativamente a outros equipamentos existentes. Por último foi considerado que este sistema tivesse a capacidade dimensional de realizar ensaios em provetes de diferentes tamanhos. Foi considerado as dimensões para o provete pequeno de 70x6x3 ( mm ) e para o grande , 300x30x20 ( mm ).

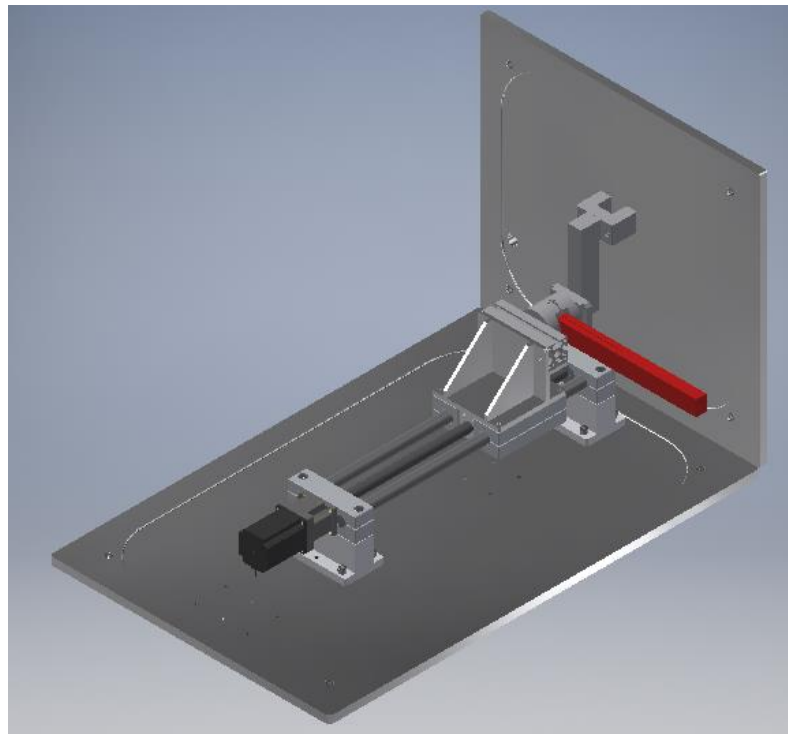
A máquina será constituída pela uma estrutura *figura 19*, que servirá de apoio dos sistemas de ensaio, três conjuntos de ensaio ( *MMB*, *DCB*, e *ENF* ). Estes conjuntos terão em comum um sistema de accionamento ( carro ) composto por um motor de passo acoplado a um sistema de guiamento linear onde será montado os componentes dos três sistemas e o provete. Este conjunto será fixo à estrutura da máquina.

A parte fixa vai ser constituída por o outro suporte do provete e rigidamente ligada a uma célula de carga que comunicará com uma base de dados e irá registar os valores da força a que o provete vai estar submetido pela acção do binário motor de passo durante os ciclos de teste.

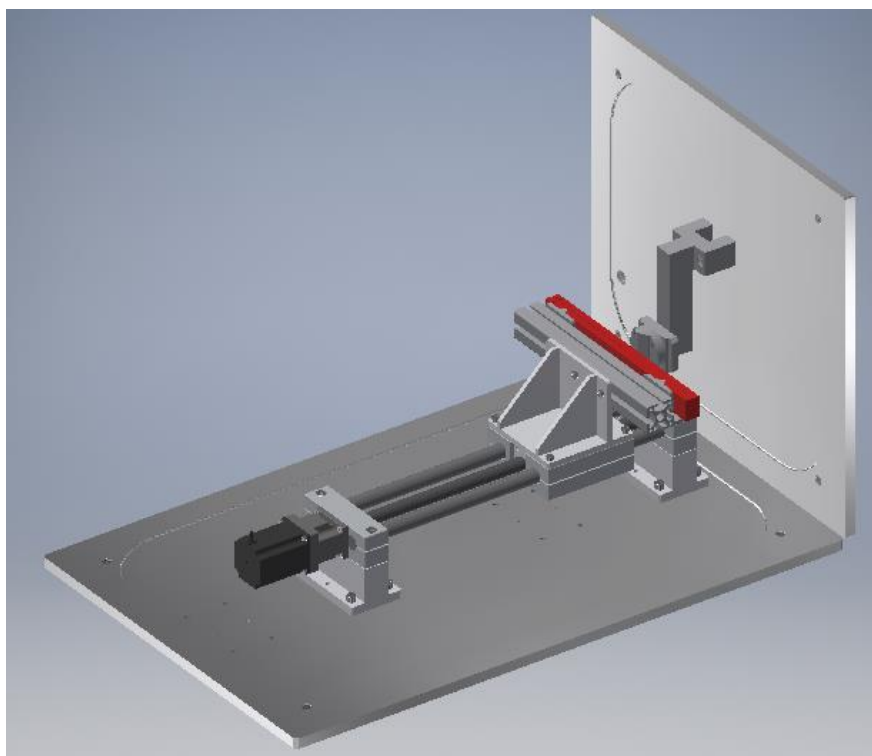


*Figura 16 - Estrutura com sistema MMB*

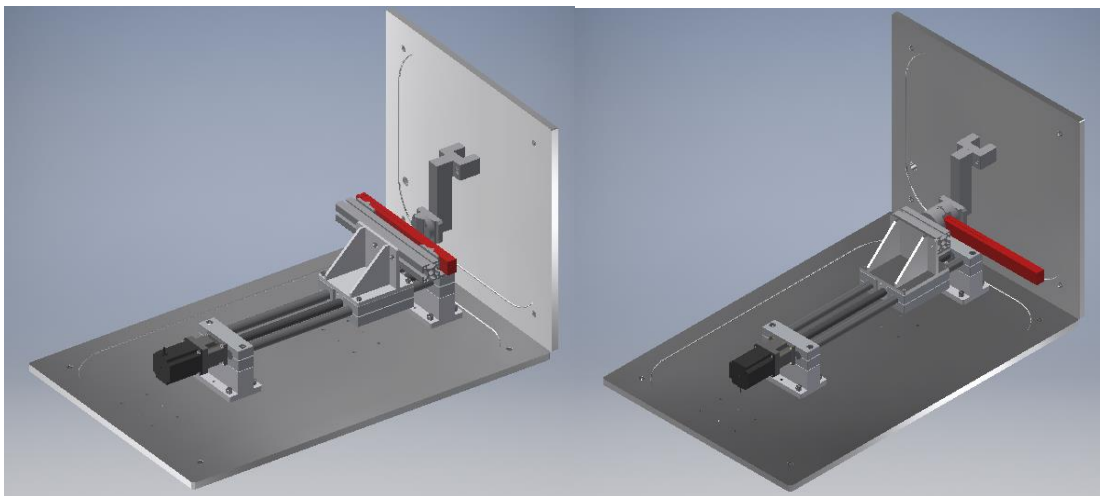
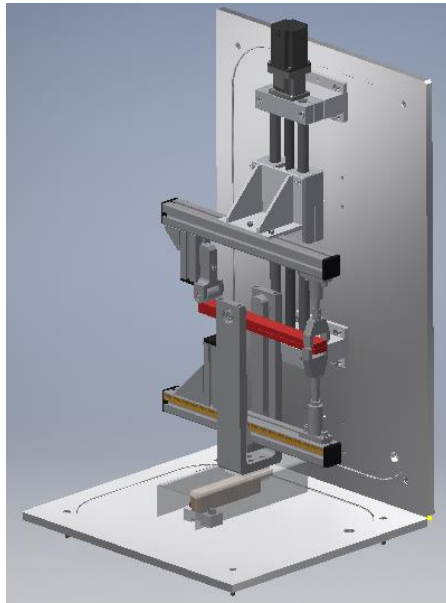




*Figura 17 -Estrutura com sistema DCB*



*Figura 18 - Estrutura com sistema ENF*



*Figur 19 - Pormenor dos três equipamentos de ensaio e a estrutura suporte*

### 4.3.1 - Máquina de ensaio – Estrutura

O dispositivo de ensaio foi projectado para permitir o uso de lubrificação permanente dos provetes e de controlo de temperatura, nesse sentido houve necessidade de adoptar materiais para a estrutura que garantissem protecção contra corrosão e envelhecimento da estrutura para além de suportar os esforços de ensaio e o peso dos componentes a fixar sendo inadmissível deformações da estrutura. Ao mesmo tempo desenvolver uma estrutura leve, de fácil montagem, movimentação e flexibilidade para montar sistemas diferentes sem grandes mudanças de componentes. Com esse objectivo para a construção da estrutura foi escolhido dos grupos dos materiais metálicos, o alumínio.

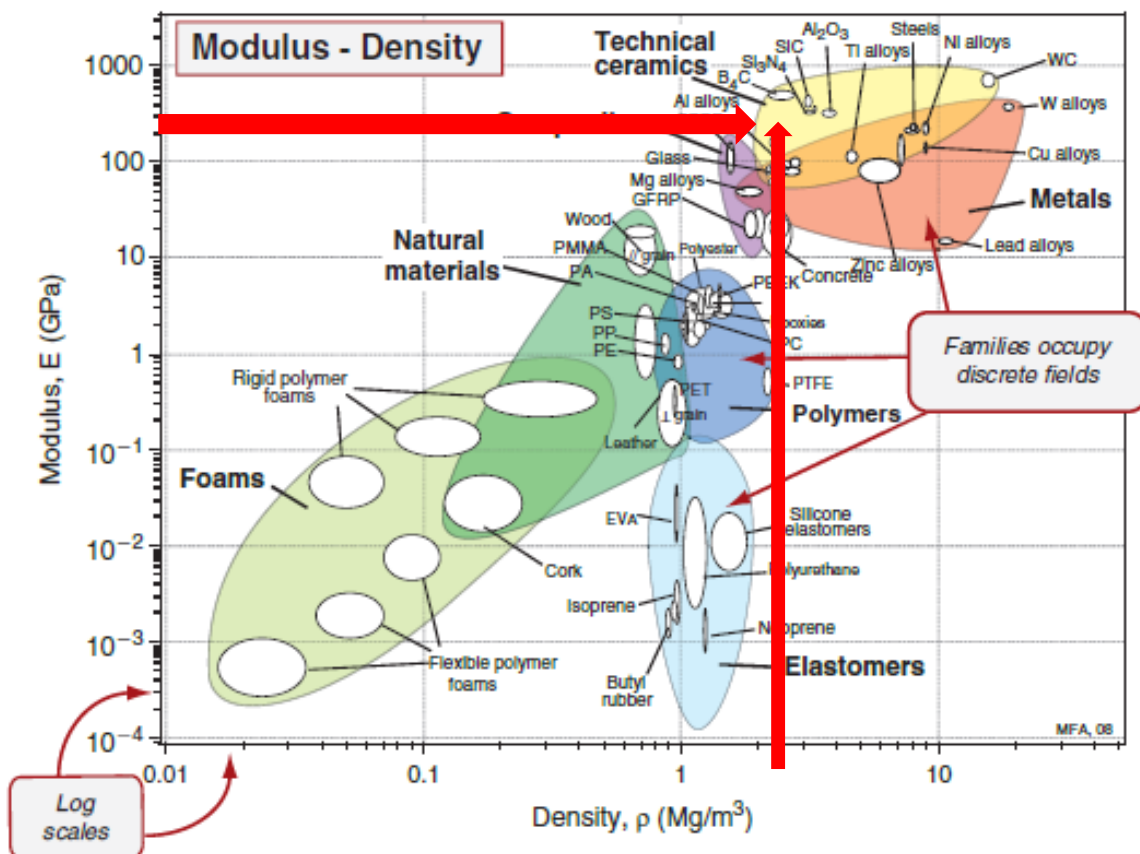


Figura 20 - Gráfico 'Ahsby'

Esta escolha teve também em conta aspectos económicos e de reciclagem do alumínio. Como vemos no gráfico, este material apresenta uma relação densidade versus rigidez, bastante interessante muito semelhante ao aço de baixa liga.

Irá existir duas portas para acesso ao interior, havendo a possibilidade de as remover, estas serão feitas em perfil 30x30 da Maytec® com painéis em PC ( policarbonato ) para resistir a impactos internos e externos. Nas partes laterais irá ser montado dois painéis em PC ( policarbonato ) de espessura 4mm. O alumínio possui os requisitos mencionados sendo relevante a capacidade de resistir ao peso dos sistemas de ensaio e às forças envolvidas nos mesmos. Esta estrutura tem um peso total de 36.5 Kgf e tem um custo aproximado de 1316 euros. A estrutura irá funcionar na vertical para montagem do sistema de ensaio em modo misto MMB e na horizontal para receber os sistemas *DCB e ENF*.



*Figura 21 -Pormenor da estrutura*

As portas serão montadas com dobradiças em PP ( polipropileno ) e fixas com parafusos em aço inoxidável. Os topos dos perfis serão fechados com tampas em PP. Os perfis da estrutura principal que servirão de apoio aos sistemas de ensaio serão feitos a partir de perfil de alumínio extrudido de acordo com a norma DIN EN 12020 do fabricante Maytec® com a designação comercial de liga de alumínio AL Mg Si 0.5 F25, com o número de material 3.3206.72, alumínio recozido a baixa

temperatura. As dimensões do perfil são 60x60mm 4E série ligeira e tem as seguintes características mecânicas:

**Propriedades mecânicas alumínio AL Mg Si 0.5 F25**

Tensão de rotura	250	MPa
Tensão de cedência	200	MPa
Tensão de compressão	95	MPa
Módulo de elasticidade	70	GPa
Dureza Brinell	75	HB

*Tabela 3 - Propriedades mecânicas do alumínio para a estrutura*

Os desvios das dimensões dependem da precisão com que o perfil é produzido da ferramenta de corte e da variação da extrusão. De acordo com tabela do catalogo do fabricante para a dimensão de 60x60 a variação do perfil é de  $\pm 0.4\text{mm}$ . Para otimizar a estabilidade de conexão as faces dos perfis são concavas, com isto é garantido o encosto dos perfis numa só aresta. É também estipulado tolerâncias geométricas de planeza, de paralelismo e também valores de deformação quando o provete está submetido a esforços de flexão.



*Figure 22 -Perfil da estrutura*

As dimensões da estrutura foram obtidas em função dos mecanismos de ensaio, depois da modelação 3D, e o enquadramento dos três sistemas de ensaio as dimensões exteriores da estrutura ficaram com 950mm de comprimento, 660mm de largura e 610mm de altura. As fixações dos perfis vão ser realizados com elementos normalizados pelo fabricante sendo fácil a sua montagem e ao mesmo tempo dão garantias de fixação plena da estrutura quer nos topos dos

perfis bem como nas ligações de canto. A estrutura terá como função principal a capacidade de aguentar os esforços de ensaio, o peso dos mecanismos de ensaio e o seu próprio peso sem haver deformações que coloquem em causa a veracidade dos testes. Para apoio, irão ser montados apoios em poliuretano anti-vibratórios com afinação de nivelamento. Na figura seguinte é ilustrado desenho técnico da estrutura com dimensões e uma perspetiva de montagem onde se pode ver todos os componentes. Os pormenores dos acessórios e modelação da montagem foram executados na totalidade com o software Maytec®.

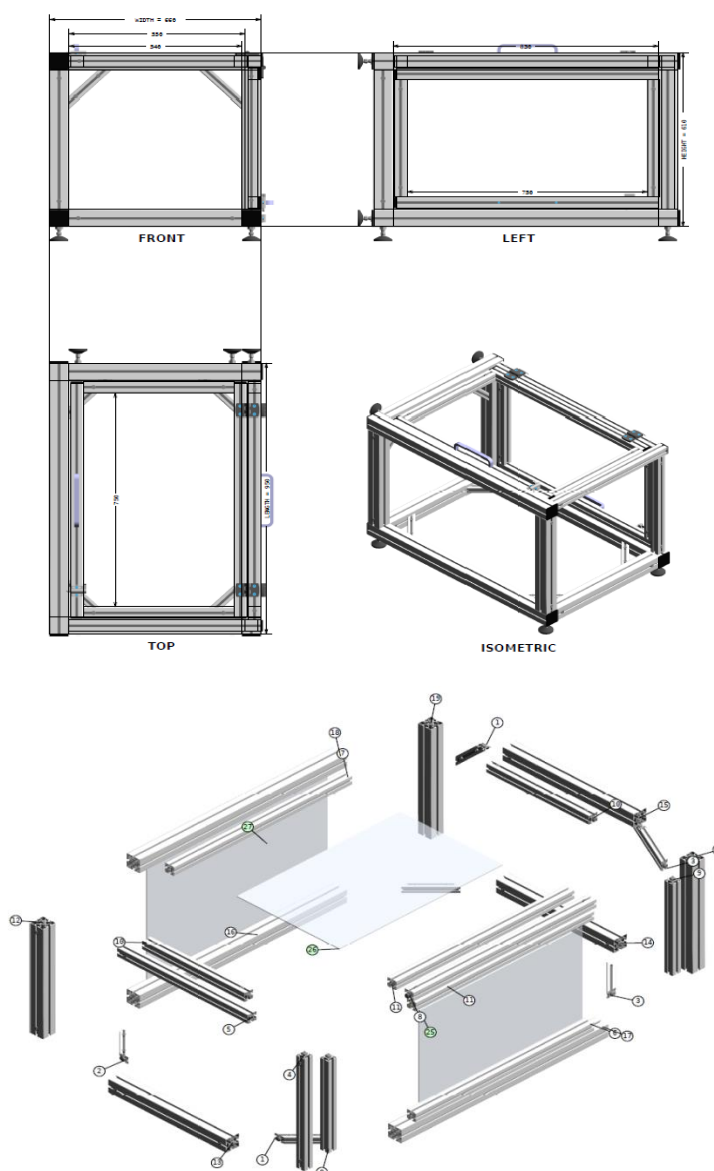


Figure 23 -Pormenor da montagem da estrutura

A estrutura será completada com a montagem de duas chapas que formarão as bases de apoio para fixar os

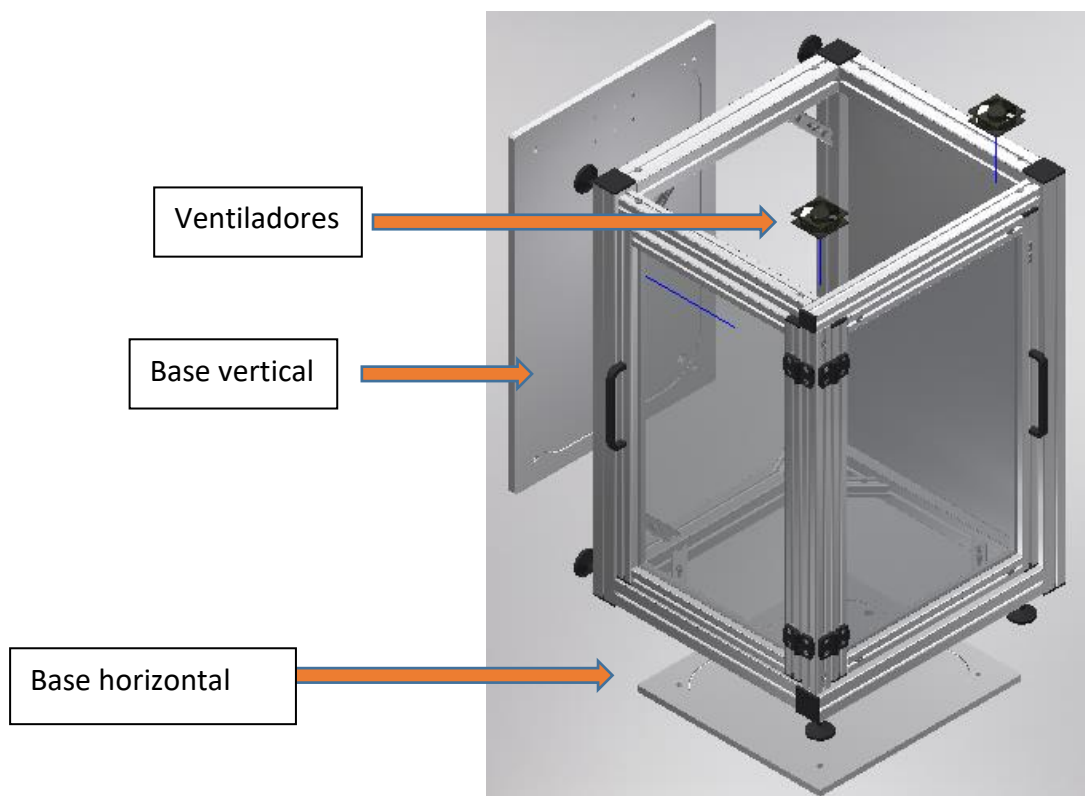
sistemas de ensaio, estas chapas terão que permitir a montagem de ensaios horizontais ( *DCB e ENF* ) e o ensaio vertical ( *MMB* ). Terão que conter furações para fixação e centragem dos elementos de ensaios a montar e possuir uma bacia onde o fluído de lubrificação seja retido e ao mesmo tempo veda-lo na bacia. Possuem um furo de drenagem para fazer escoamento para um recipiente que irá estar localizado em baixo da estrutura onde vai existir uma bomba de recirculação. As base irão estar apoiadas e fixas nos perfis de alumino diagonais pertencentes à estrutura normalizada Maytec® já tratada. Estes componentes tem que suportar as forças de ensaio o peso dos sistemas, dar estabilidade e ao mesmo tempo não adicionar massa exagerada à estrutura. O material escolhido foi a liga de alumínio 3003, sendo um alumínio comercial facilmente encontrado no mercado e com as seguintes propriedades mecânicas:

#### **Propriedades mecânicas da liga de alumínio 3003**

Tensão de rotura	110.3	MPa
Tensão de cedência	41.3	Mpa
Tensão de compressão	50	Mpa
Módulo de elasticidade	69	Gpa
Dureza Brinell	60	HB
Densidade	2680	Kg/m3

*Tabela 4 - Propriedades do alumínio para construção das bases*

Na extremidade aberta da estrutura, foram montados dois ventiladores axiais para realizar arrefecimento quando necessário. Estes serão fixos à estrutura, e acionados por um termoestato instalado na parte interna da máquina, quando atingido um determinado valor de temperatura. A potência e caudal destes ventiladores é omitida, por não haver registo nas pesquisas do calor libertado nos ensaios.



*Figura 24 -Montagem das bases e ventiladores*

#### **4.3.2 - Máquina de ensaio - Base horizontal**

Após a modelação tridimensional das chapas foi possível efectuar o dimensionamento das mesmas. Para dimensionar estes elementos foi feito um estudo estático considerando as condições de fronteira dos modelos. Inicialmente foi elaborado um desenho 2D de pormenor de cada base aplicando restrições dimensionais e geométricas. Depois foi realizada simulação estática em SolidWorks® para valores de tensão e deformação.



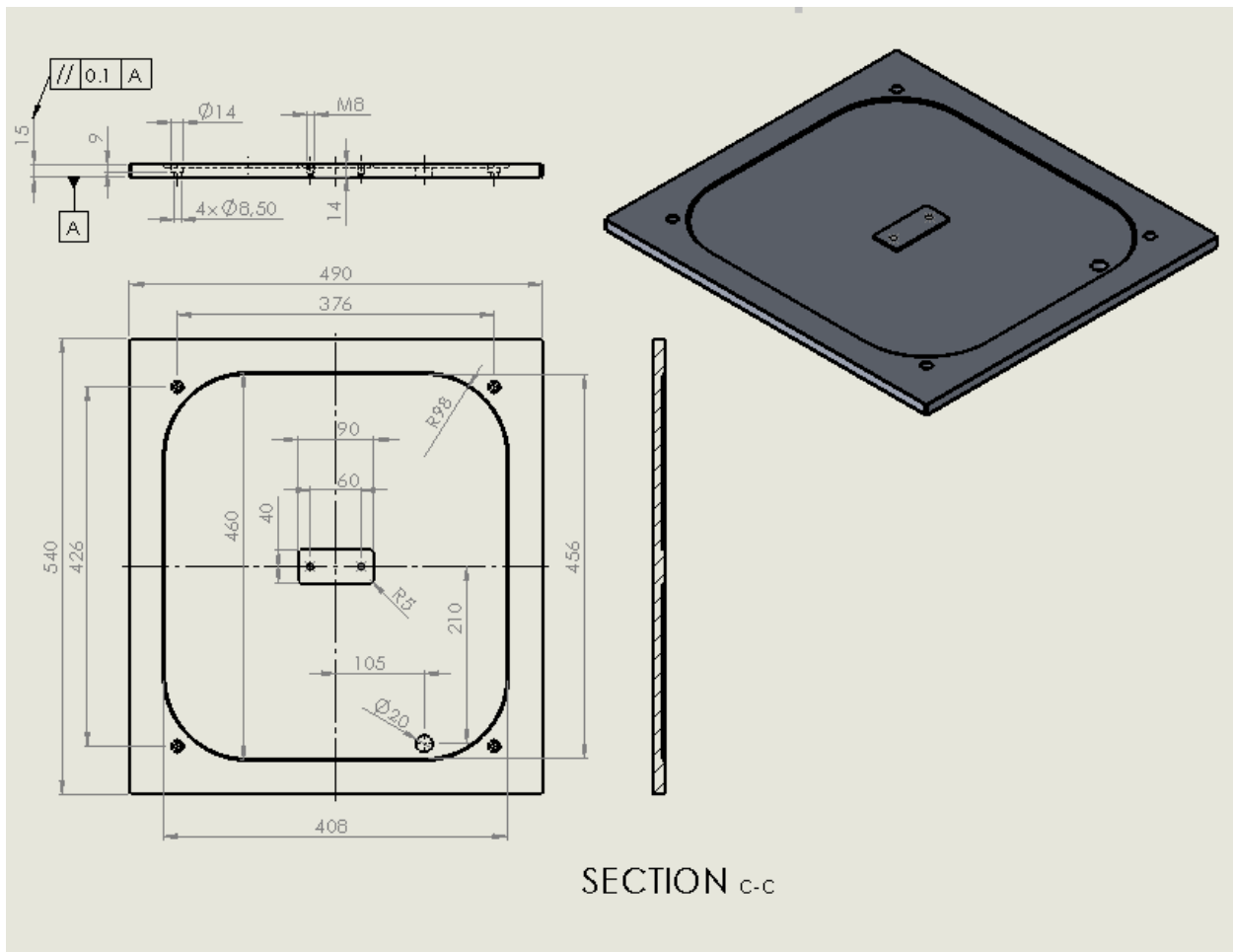
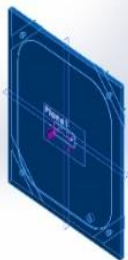
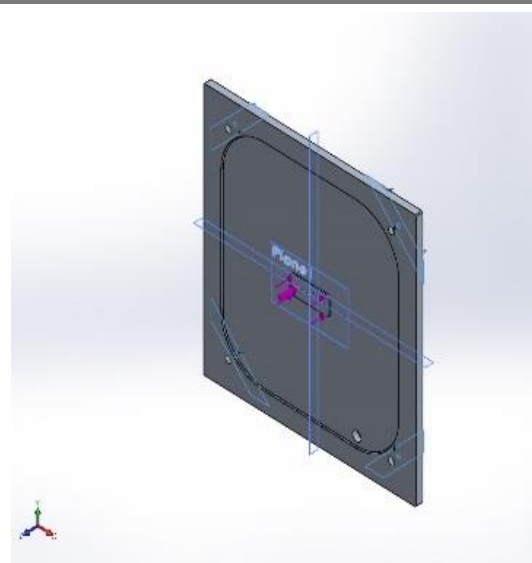


Figura 25 -Desenho de detalhe da base horizontal

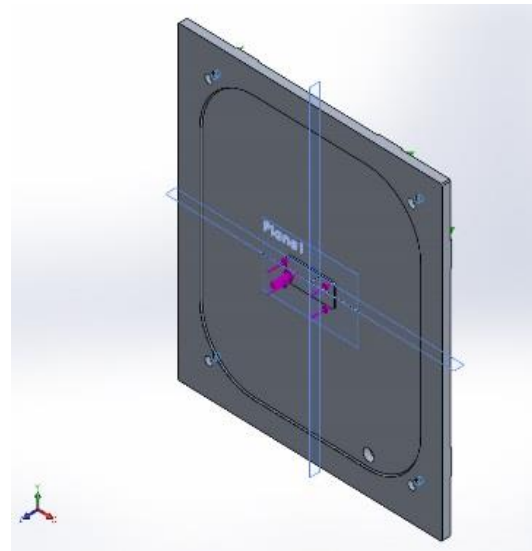
<p>Modelo : Base horizontal</p> 	<p>Massa:9.29192 kg          Volume:0.00346714 m<sup>3</sup>          Densidade:2700 kg/m<sup>3</sup>          Peso:91.0608 N</p>	<p>Material : <b>Liga de Alumínio 3003</b>          Critério análise tensões : <b>Von Mises</b>          Tensão de cedência: <b>41.3 MPA</b>          Tensão de rotura: <b>110.3 MPA</b>          Módulo de elasticidade: <b>69 GPA</b>          Módulo de corte: <b>27 GPA</b>          Coeficiente de expansão térmica: <b>2.3e-005 /Kelvin</b></p>
---	---	---

## Condições de fronteira

Fixação	Imagem	Detalhes
Apoio perfil 40x40		<p>Entidades: 4 face(s)                      Tipo: Deslizante</p>

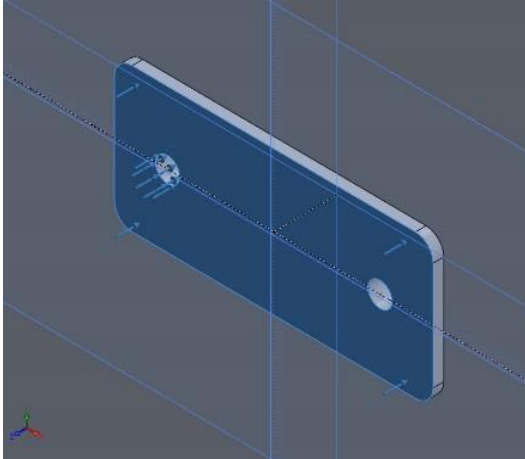
### Forças resultantes

Componentes	X	Y	Z	Resultante
Reacções N	-0.0218141	0.0192575	1306.01	1306.01
Momento de reacção N	0	0	0	0

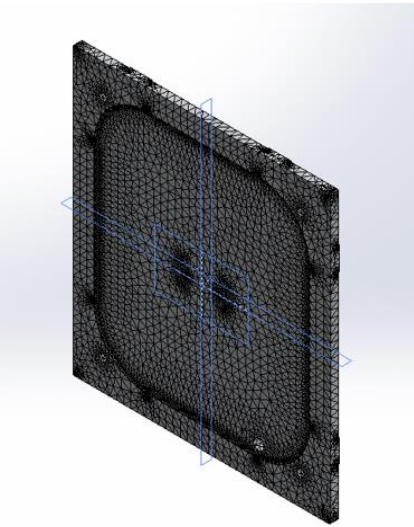
Fixação-1		<p>Entidades: 4 furos                      Tipo: Fixo</p>
-----------	---	---

### Resultant Forces

Componentes	X	Y	Z	Resultante
Reacções N	0.0171304	0.00582004	-284.121	284.121
Momento de reacção N	0	0	0	0

Nome da carga	Imagem	Detalhes da força
Força-1		<p>Entidades: 1 face(s)            Tipo: Força normal            Value: 1100 N</p>

Resultados obtidos

	Propriedades da malha	
	Total de nós	1486071
	Total de elementos	1005873
	Pontos Jacobianos	29
	Tamanho do elemento	0.69mm
	Tolerância	0.125mm
	Qualidade da malha	Alta
Análise de Tensões		

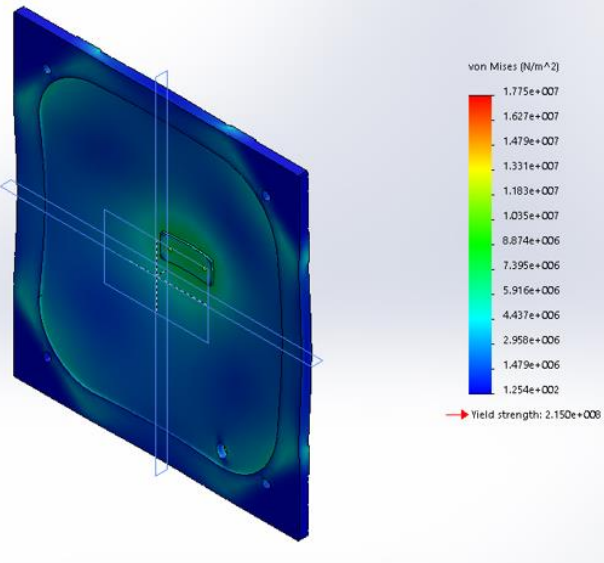
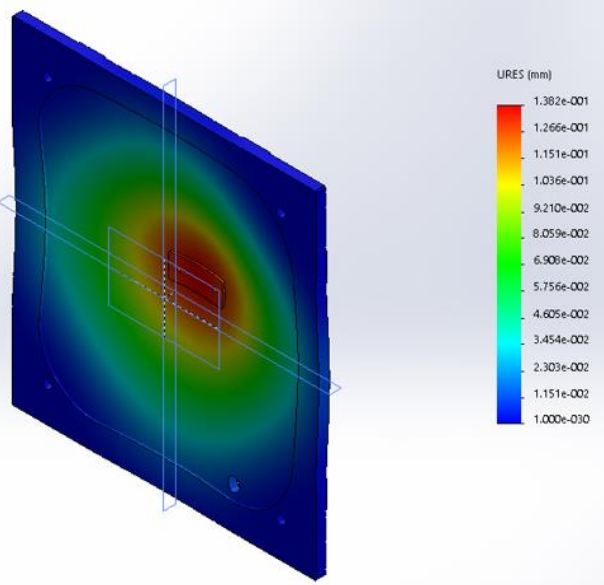
	Tensão máxima	34.07 MPA
	Tensão mínima	$91 \times 10^{-6}$
	Elemento finito utilizado	Elementos sólidos 3D tetraédricos
	Análise de deformações	
	Deformação máxima	0.155mm
	Deformação mínima	0.000mm
	Tamanho do elemento	0.69mm

Tabela 5 - Análise MEF da base horizontal

Com esta análise foi verificado, que aplicando uma força de 1000N, correspondente á força máxima permitida pela célula mais o peso da estrutura 100 N, que a tensão instalada na chapa ( 34.07 MPA )

não ultrapassa a tensão de limite elástico ( 41.3 MPA ) do material aplicado, sendo a deformação máxima de 0.155mm que se desenvolve na parte onde é aplicado a força. Há ainda a possibilidade de colocação de um travessão em perfil de alumínio para eliminar a deformação existente.

### 4.3.3 - Máquina de ensaio – Base vertical

A base vertical vai ter a função de suportar e fixar o sistema de guia linear ( carro móvel ) e recolher o fluido de ensaio. Esta base não terá o mesmo tipo de solicitações da base horizontal, as forças presentes serão o peso da guia linear e uma pequena componente de força nos parafusos de fixação originada nos ensaios dos provetes. O material escolhido foi o mesmo

alumínio da base horizontal, liga de alumínio 3003. Podia ser escolhido um alumínio comercial mais económico, por exemplo o 1060, mas como são só dois componentes para a mesma aplicação, optou-se por adquirir os dois com a mesma qualidade. Inicialmente foi realizado um desenho técnico da base com pormenores das furações para fixação à estrutura de alumínio e as furações para fixação da guia linear.

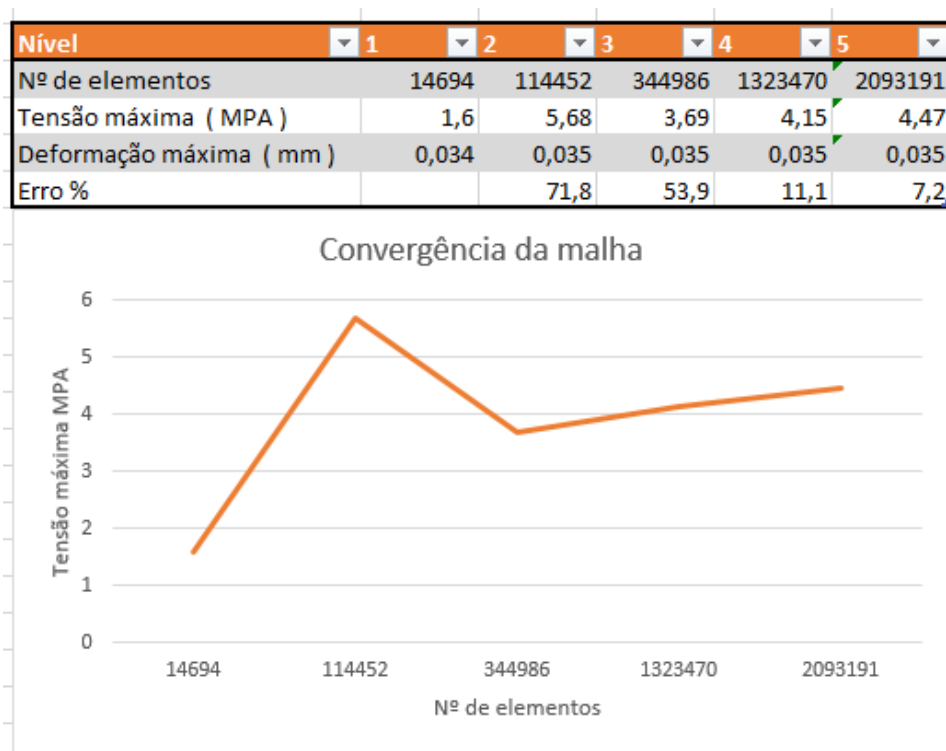


Figura 26 - Convergência da malha – base vertical

Para fixação da guia linear foi realizado duas furações para duas posições diferentes, uma furação para fixação do sistema *MMB* e outra furação para fixação dos sistemas *DCB* e *ENF*. Esta base da mesma forma da outra possui uma caixa para recolha de fluido que será encaminhado por um furo para o exterior da máquina onde existirá uma bomba para recirculação quando for aplicada numa posição horizontal. Foi realizada um estudo ao refinamento da malha na simulação desta peça. O objetivo seria encontrar um erro inferior a 1%, que na prática se tornou impossível devido a capacidade do computador em questão que apenas foi conseguido chegar a um erro de aproximadamente 7%. O gráfico mostra que foi chegado a um erro de 7,2% com uma simulação com 2093191 elementos aproximando o valor da tensão máxima instalada de 4.47 MPA, muito inferior aos 41.3 MPA, tensão de cedência do material. Mostrou também qua a deformação para o valor da tensão manteve-se nas 0.035mm.

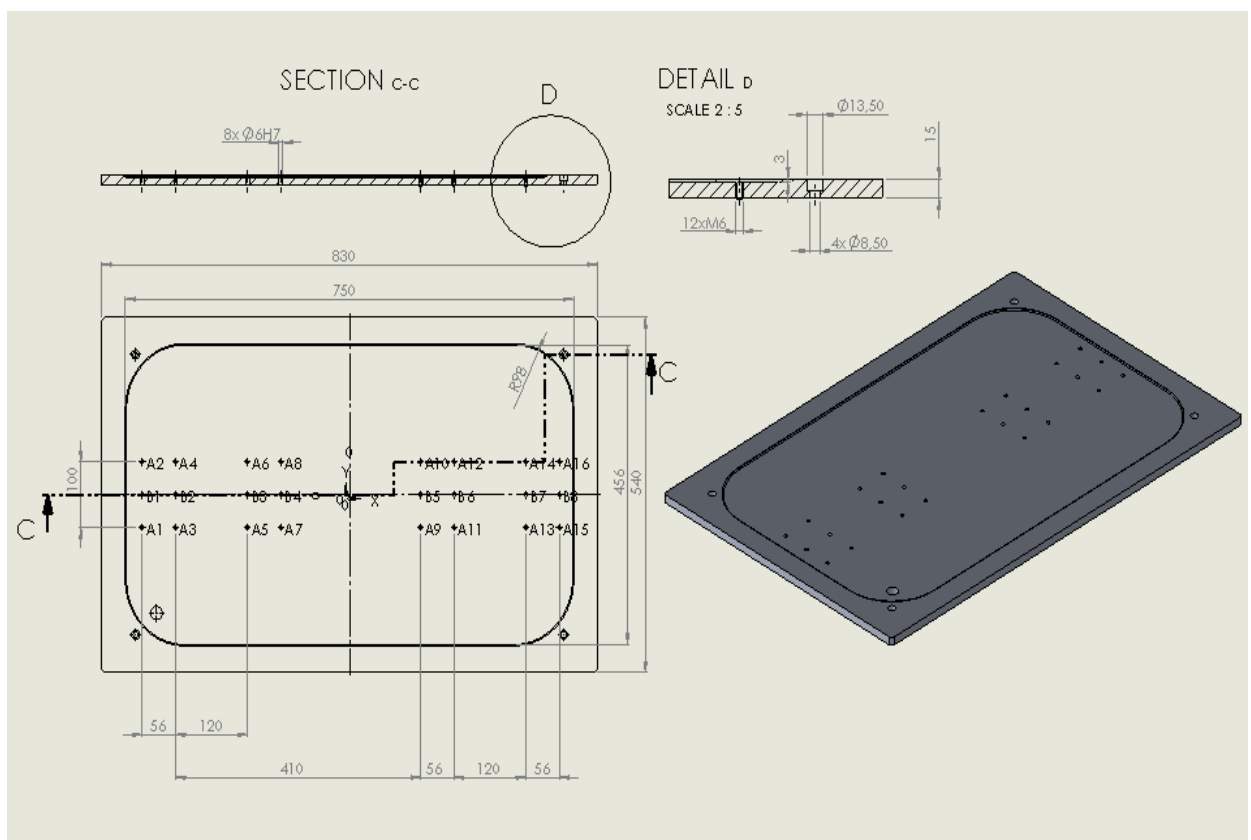
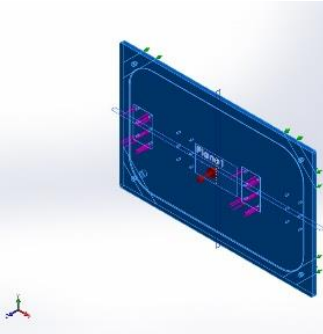
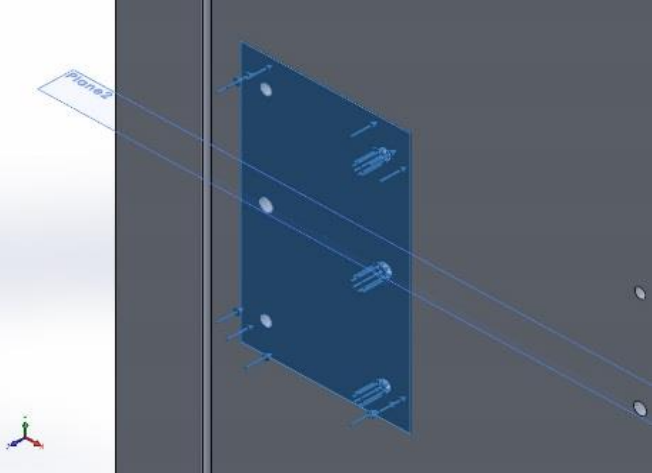


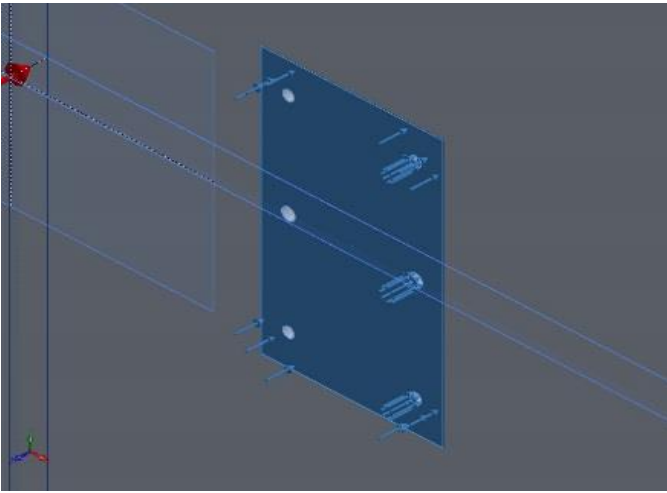
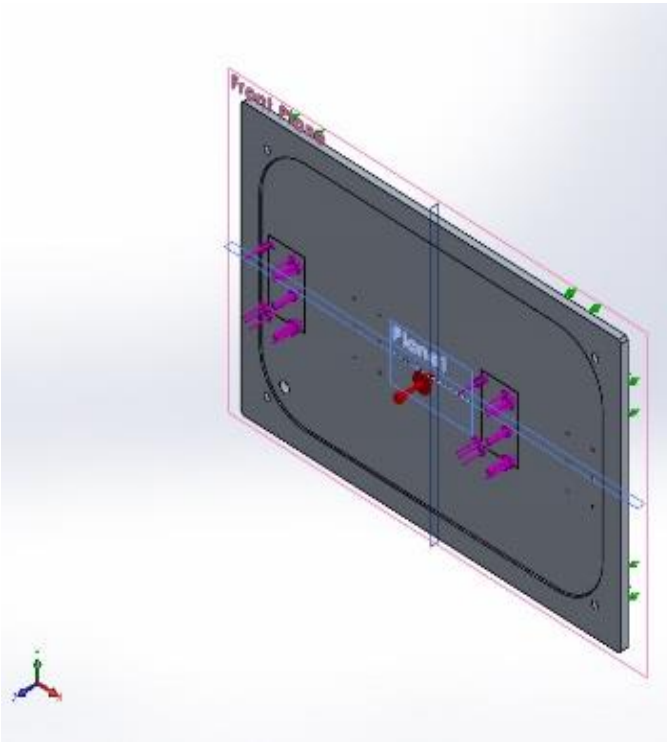
Figura 27 - Desenho de detalhe base vertical

## Resumo da simulação

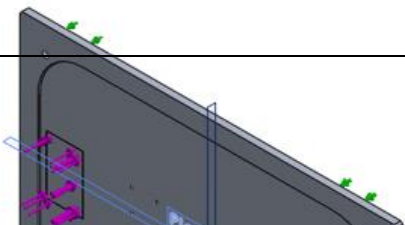
<p><b>Modelo : Base vertical</b></p> 	<p>                 Massa:15,404 kg                  Volume:0.00575 m<sup>3</sup>                  Densidade:2700 kg/m<sup>3</sup>                  Peso:150,959 N             </p>	<p>                 Material : <b>Liga de Alumínio 3003</b>                  Critério análise tensões : <b>Von Mises</b>                  Tensão de cedência: <b>41.3 MPA</b>                  Tensão de rotura: <b>110.3 MPA</b>                  Módulo de elasticidade: <b>69 GPA</b>                  Módulo de corte: <b>27 GPA</b>                  Coeficiente de expansão térmica: <b>2.3e-005 /Kelvin</b> </p>
--	---	---

## Resultados obtidos

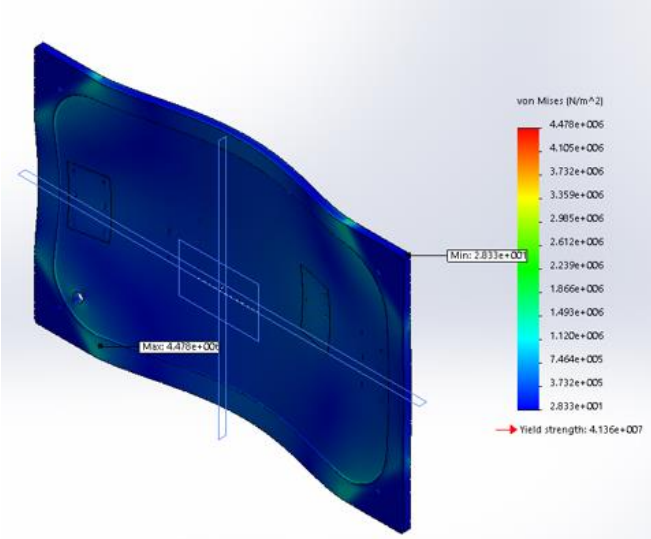
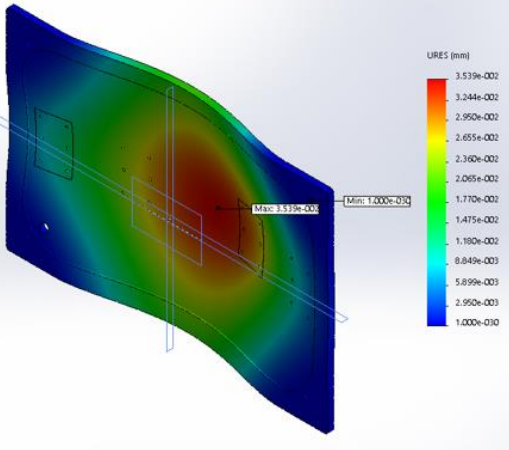
Nome da carga	Imagem	Detalhes da força
<p>Força - 1</p>		<p>                 Entidades: <b>1 face(s)</b>                  Tipo: <b>Força normal</b>                  Value: <b>60 N</b> </p>

Nome da carga	Imagem	Detalhes da força
Força - 2		<p>Entidades: 1 face(s)            Tipo: Força normal            Value: 60 N</p>
Gravidade		<p>Reference: Front Plane            Values: -0 0 -9.81            Units: SI</p>

Propriedades da malha





	Total de nós	3071306	
	Total de elementos	2093191	
	Pontos Jacobianos	29	
	Tamanho do elemento	0.71mm	
	Tolerância	0.125mm	
	Qualidade da malha	Alta	
	Análise de Tensões		
	Tensão máxima	4,47 MPA	
	Tensão mínima	0,0 MPA	
	Elemento finito utilizado	Elementos sólidos 3D tetraédricos	
	Análise de deformações		
	Deformação máxima	0.035 mm	
	Deformação mínima	0.000mm	

	Tamanho do elemento	0.71mm	
--	---------------------	--------	--

Tabela 6 - Análise MEF da base vertical

#### 4.3.4 - Máquina de ensaio – Sistema *MMB*

O sistema em modo misto vai ser composto por duas partes, um suporte móvel, com movimento linear ( carro ) na qual o provete vai estar fixo no suporte de fixação e uma parte fixa, suporte fixo ligado a célula de carga onde o provete vai estar sujeito aos esforços de abertura de fenda em modo *DCB* e modo *ENF*. Na execução dos componentes aplicou-se exclusivamente materiais com a capacidade de resistir à corrosão como o aço inoxidável e o alumínio sendo posta de parte a aplicação de materiais metálicos com probabilidade de oxidação devido à presença de soro nos ensaios. Optou-se também por aplicar sistemas de accionamento livres de lubrificação e com baixa taxa de ruído.

Outro aspecto que foi tido em conta, foi a aplicação de componentes normalizados para o conjunto evitando peças maquinadas com desenho específico, tornando o conjunto menos dispendioso e ao mesmo tempo mais fácil a substituição e aplicação de novos componentes. As dimensões de atravancamento forma definidas em função das dimensões dos provetes, máximo e mínimo. O provete mais pequeno tem uma secção de 6mmx3mm e um comprimento de 70mm, o provete grande tem uma secção de 30mmx20mm e um comprimento de 300mm. A largura do equipamento *MMB*, foi definida pelo comprimento do provete maior. Outro aspecto tido em conta foi a possibilidade de movimentar a distância de ensaio *MMB* de uma forma prática sem desmontar os componentes, isso foi possível com a aplicação de perfis de alumínio da Mytec®.

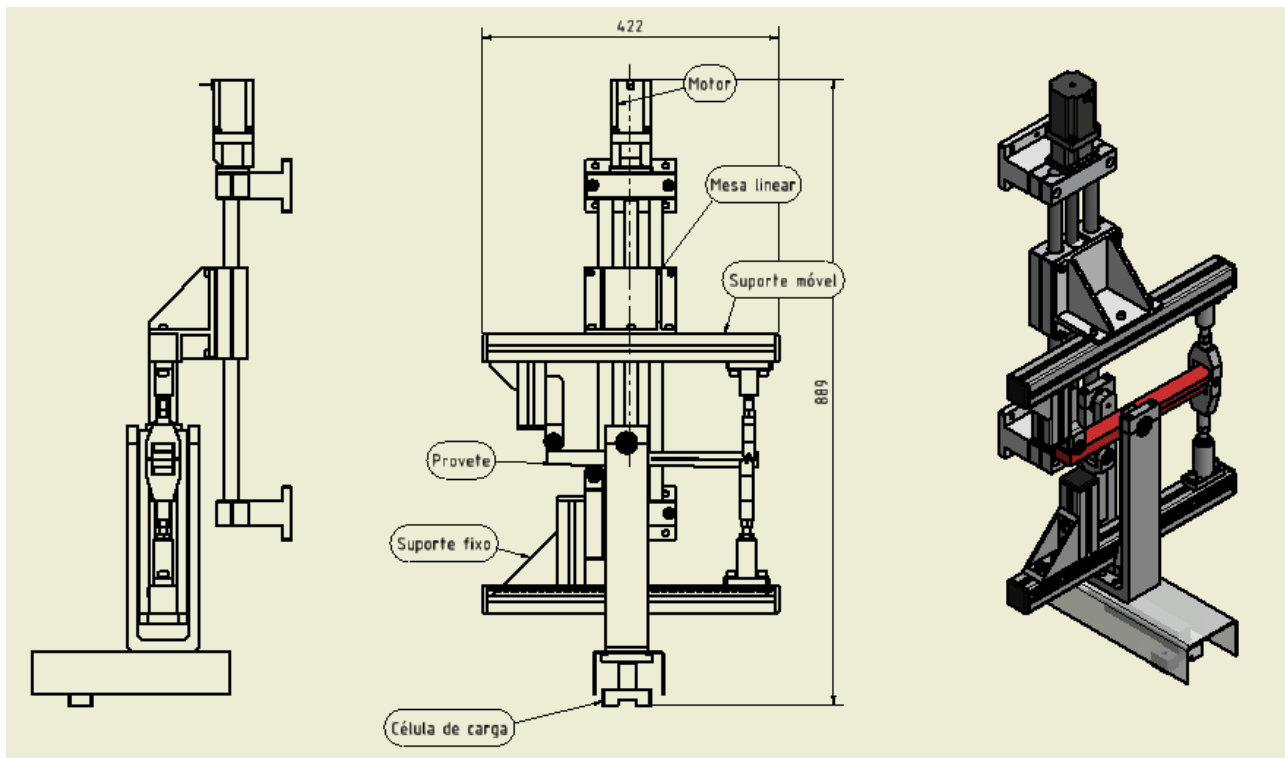


Figure 28 - Equipamento de ensaio MMB

#### 4.3.5 – Mesa linear + motor de passo

O motor de accionamento do carro onde irá ser fixo o provete foi dimensionado em função da força axial e a velocidade de ensaio. Para os provetes em biomateriais e com as dimensões atrás especificadas a força de ensaio foi escolhida tendo em conta estes factores mas também em simulações efectuadas em anteriores trabalhos de simulação (27). A força axial máxima será de 0,5KN e a velocidade máxima de ensaio será de 0,8 m/min, como foi dito estes valores foram obtidos tendo em conta trabalhos efectuados anteriormente, sendo considerados ideais para o ensaio MMB em biomateriais. Neste sentido o binário do motor será calculado em função da força axial, do diâmetro do fuso e do passo da guia linear através da decomposição da força axial. Iremos precisar do diâmetro do fuso e do passo da guia linear que será tratada mais à frente. A guia linear e motor de passo escolhido foi da marca comercial Iigus®, e fuso da guia linear é do tipo rosca redonda com diâmetro 18mm e passo de 4mm. Para calculo do binário foi utilizado a seguinte equação 1.20:

$$Mt = \frac{Fa \cdot \sin \alpha \cdot r}{0.5} \quad (1.20)$$

Onde  $Fa$  é a força axial exercida no fuso da guia linear,  $\alpha$  o ângulo do filete da rosca do fuso e  $r$  o raio do fuso da guia linear. Efectuando este cálculo obtemos o binário de 0,635 N.m. Foi considerado uma perda por atrito de 30% na rosca do fuso sendo o binário recalculado de 0.826 N.m. Consultando a tabela do fabricante verificamos que os motores com binário mais próximo encontrado tem um valor entre 0.5 N.m e 2 N.m. Desta forma foi escolhido o motor com a referência comercial do fabricante de 'NEMA23' com um binário de 2 N.m, tamanho da flange 56, tensão nominal de 24VDC, com possibilidade de colocar travão eléctrico. As restantes características técnicas encontram-se nos anexos. Este motor será equipado com um encoder para medir o posicionamento e controlar o deslocamento do carro. Para compensar desvios de montagem na fixação do motor na guia linear será montado um acoplamento elástico para permitir desvios de montagem. O encoder e o acoplamento são fornecidos juntamente com a guia linear.

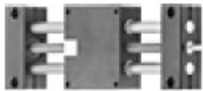


Pos.	Unidades	Nº de artigo/Descrição	Ilustração
1	1	<b>Mesa linear</b> Nº de artigo:: SHT-BB-20-AWM Comprimento do curso: 300 mm Comprimento do fuso: 527 mm Comprimento da extremidade do fuso: 26 mm Veios / Suporte de veio: Alumínio / Alumínio Comprimento do veio/guia: 502 mm Classe de precisão: 4	
2	1	<b>Kit de motor (motor, flange do motor, acoplamento, parafusos)</b> Nº de artigo:: MK-0036 Tipo de motor: NEMA23 Ligação: Fios flexíveis entrançados	
3	1	<b>Montagem e teste de funcionamento</b> Nº de artigo:: MONT0030000 Posição de montagem: 0º (standard)	

Figura 29 - Componentes para sistema de acionamento

A guia linear será da marca Iigus® com a referência SHT-BB-20-AWM. Os requisitos principais deste componente foi de resistir à corrosão, suportar as forças de ensaio que terá principalmente uma componente axial de 0,5 KN e ter precisão no fuso para garantir ensaios fiáveis. Desta

forma foi escolhido como materiais o aço inoxidável e o alumínio, a força axial admitida é de 1 KN e radial 4KN e a classe de precisão escolhida foi a classe 4. O diâmetro do fuso é de 18mm e o diâmetro das guias laterais de 20mm. Faz parte deste subconjunto um carro em alumínio que serve para fixar os suportes de ensaio. Este conjunto é fixado a dois apoios também em alumínio que por sua vez o ligam à estrutura. Entre os apoios e a estrutura irá ser montado o rings para não deixar passar fluido por os furos da fixação dos apoios, para isso os apoios terão umas caixas para alojamento dos o rings. Os diversos componentes de fixação serão em aço inoxidável.

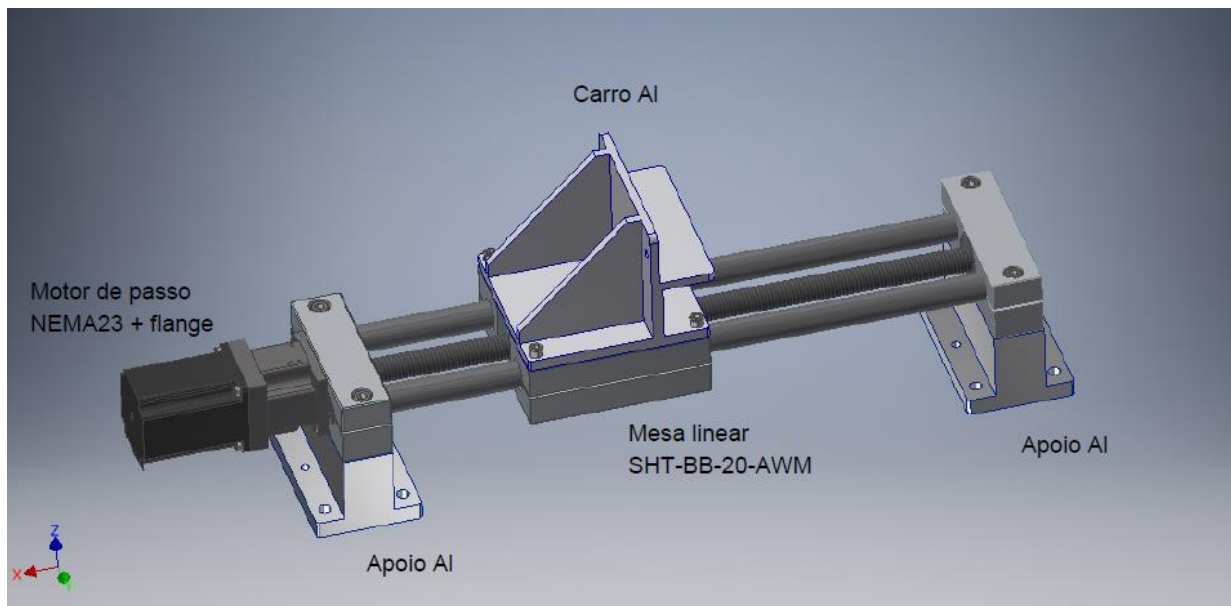


Figura 30 - Sistema de acionamento

#### 4.3.6 Suporte móvel

O suporte móvel vai ser fixado ao carro e terá a função de suportar a parte em que o provete está fixo. Este subconjunto é composto por componentes normalizados e alguns maquinados, os artigos normalizados são componentes adquiridos à empresa Mytec® sendo o seu material alumínio e estão numerados com os números 1, 2, 4 e 7 no desenho técnico apresentado. Os restantes componentes são feitos em aço inoxidável bem como os elementos de fixação presentes. No

suporte nº 8 existe o rolete que está apoiado em dois rolamentos refª DIN 625 – W626 em aço inoxidável, com a capacidade e carga estática de 0,58 KN.

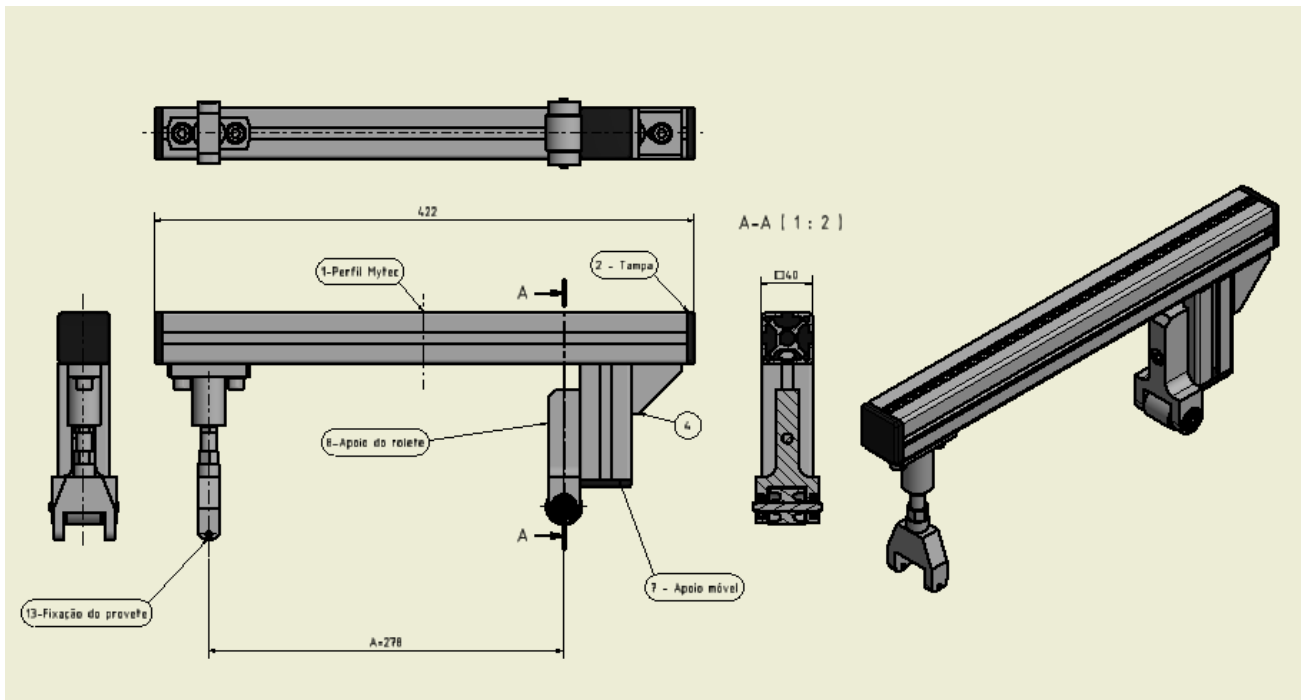


Figura 31 - Suporte móvel, sistema MMB

#### 4.3.7 Suporte fixo

O suporte fixo vai ter a função de simular o ensaio *DCB* e *ENF* num só elemento, para isso terá de ter um movimento linear e rotativo ao mesmo tempo. Para essa rotação acontecer, este suporte apoiará na sela através de dois rolamentos. Da mesma forma que o suporte móvel também vai ser composto por acessórios normalizado e peças maquinadas, será montado um suporte ajustável em altura para fixação do provete construído em alumínio 1060 e outro suporte ajustável que contem um rolete onde apoiará o provete, estes componentes possuem afinação transversal no perfil Mytec® onde estão fixados. Faz parte deste subconjunto uma barra em alumínio maquinado que terá a função de rotação para efectuar o ensaio em modo I. Esta barra está fixa ao perfil de alumínio, e terá ponto de rotação em dois rolamentos DIN-125 6301 de aço inoxidável. Vão ser estes rolamentos que irão estar em contacto com a sela e transmitir a força para a célula de carga. A barra rotativa, o suporte do provete e o suporte onde está montado o rolete ajustável podem ser afinados para permitir ensaios de provetes de dimensões diferentes e, também alterar a relação da

distância em modo misto. Estes componentes serão fixos ao perfil de alumínio com o sistema de fixação por fêmeas Mytec®.

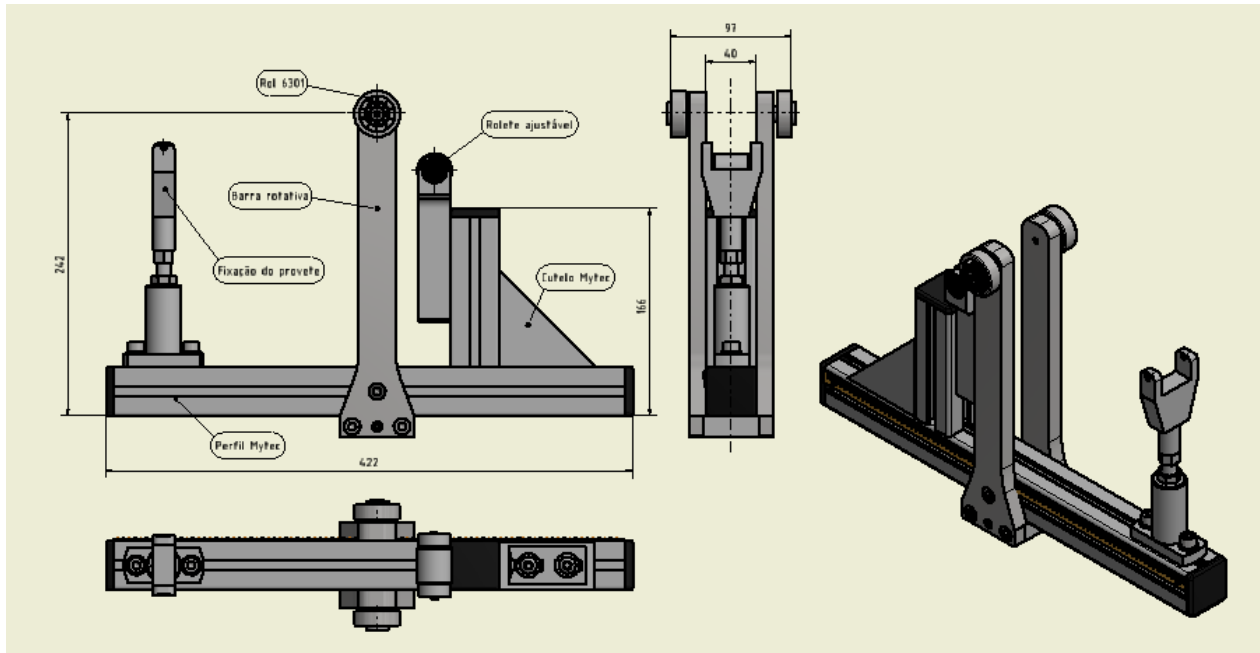


Figura 32 - Suporte fixo, sistema MMB

#### 4.3.8 Sela

Este componente desempenha a função de transmitir a força de ensaio para a célula de carga. É uma peça sujeita ao pleno esforço de ensaio, e devido à sua forma geométrica ( comprida e estreita ) foi necessário proceder a uma simulação por elementos finitos para validar o material escolhido inicialmente, alumínio 1060 que também foi aplicado na maioria dos componentes do sistema pela a sua resistência à corrosão baixa densidade e também fácil maquinação, não abdicando da resistência mecânica servindo para uniformizar os materiais do equipamento. Foi feito um desenho técnico da peça sendo de realçar o aspecto funcional que obrigará a um paralelismo entre a face de aperto da célula de carga e a face onde estarão apoiados os rolamentos do suporte fixo. Foi também executado na cavidade dos rolamentos um batente para servir de apoio e centragem do sistema, permitindo ensaios *MMB* na posição horizontal. Este pormenor além de permitir ensaios na horizontal que é uma inovação no ensaio em modo misto, garante também um correto alinhamento na posição vertical com a sela em contacto direto com a

pista exterior do rolamento. Na imagem em baixo é ilustrado o sistema montado na posição horizontal para realizar o ensaio em modo misto onde é possível ver a sela apoiada e centrada nos rolamentos de esferas marca SKF® em inox com a referência 6301. Embora os rolamentos de esferas montados no sistema sejam projectadas para esforços radiais, e que neste caso estejam sujeito a cargas axiais poderia ser levantada alguma incerteza relativa à capacidade dos rolamentos neste tipo de aplicação.

Isso não representa problema, pelo facto do rolamento em causa ( 6301-ZZ ) ter um capacidade de carga radial estática de 4,15 KN, e os fabricantes garantirem como carga axial estática de 25% da carga radial catalogada. Neste caso cada rolamento terá a capacidade de axial estática de 1,03 KN, aproximadamente 100 Kgf., que ultrapassa largamente os esforços presentes nos ensaios.

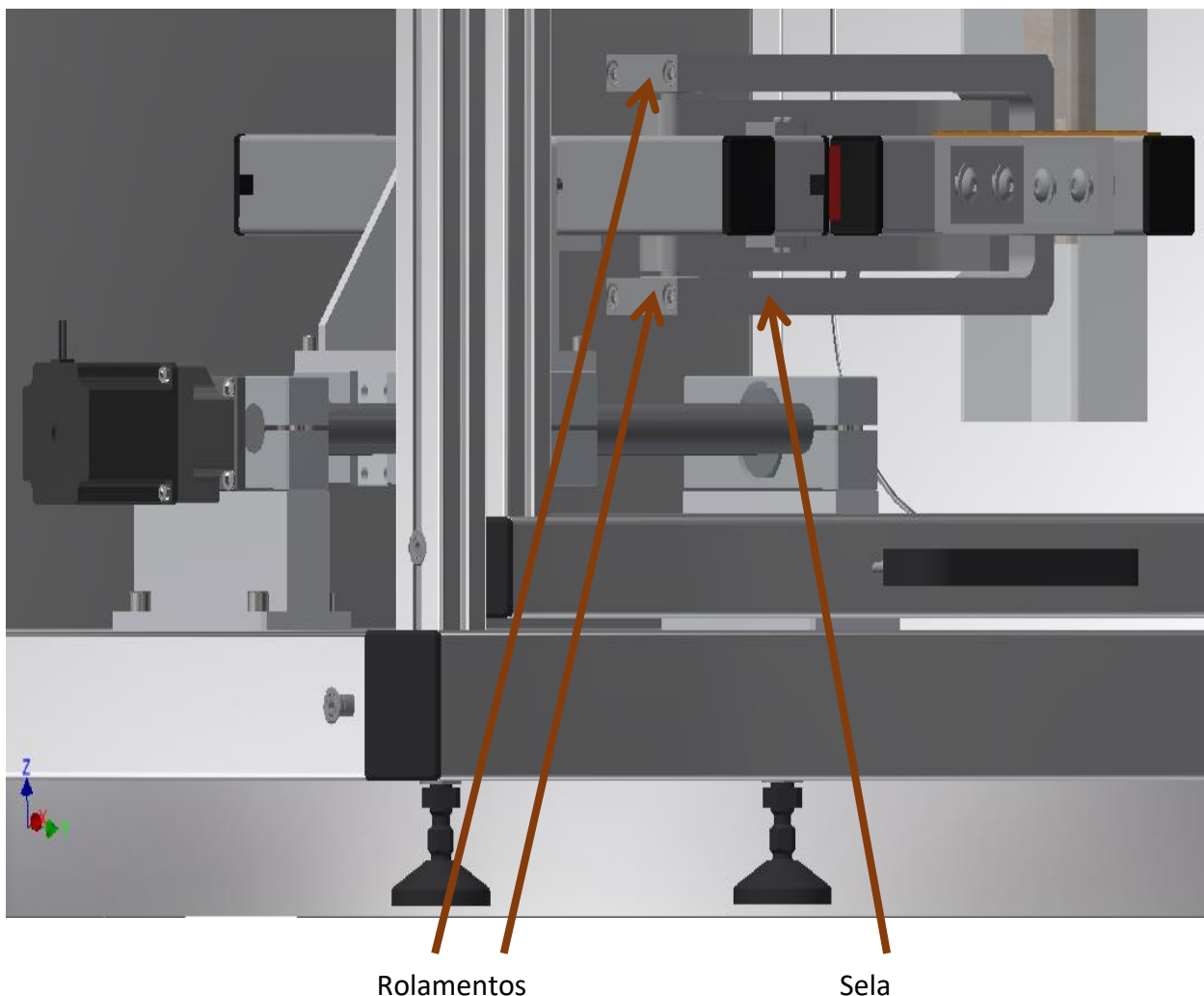


Figura 33 - Pormenor do apoio da sela, sistema MMB



Outro pormenor ilustrado na imagem é o apoio da sela nos rolamentos, este pormenor é possibilitado pelo uma pequena caixa interior na sela, que vai servir de alojamento da pista exterior do rolamento. Realçar o aspecto dimensional da caixa do rolamento que deve apresentar uma pequena folga e um acabamento polido para ser fácil montar a sela no conjunto.

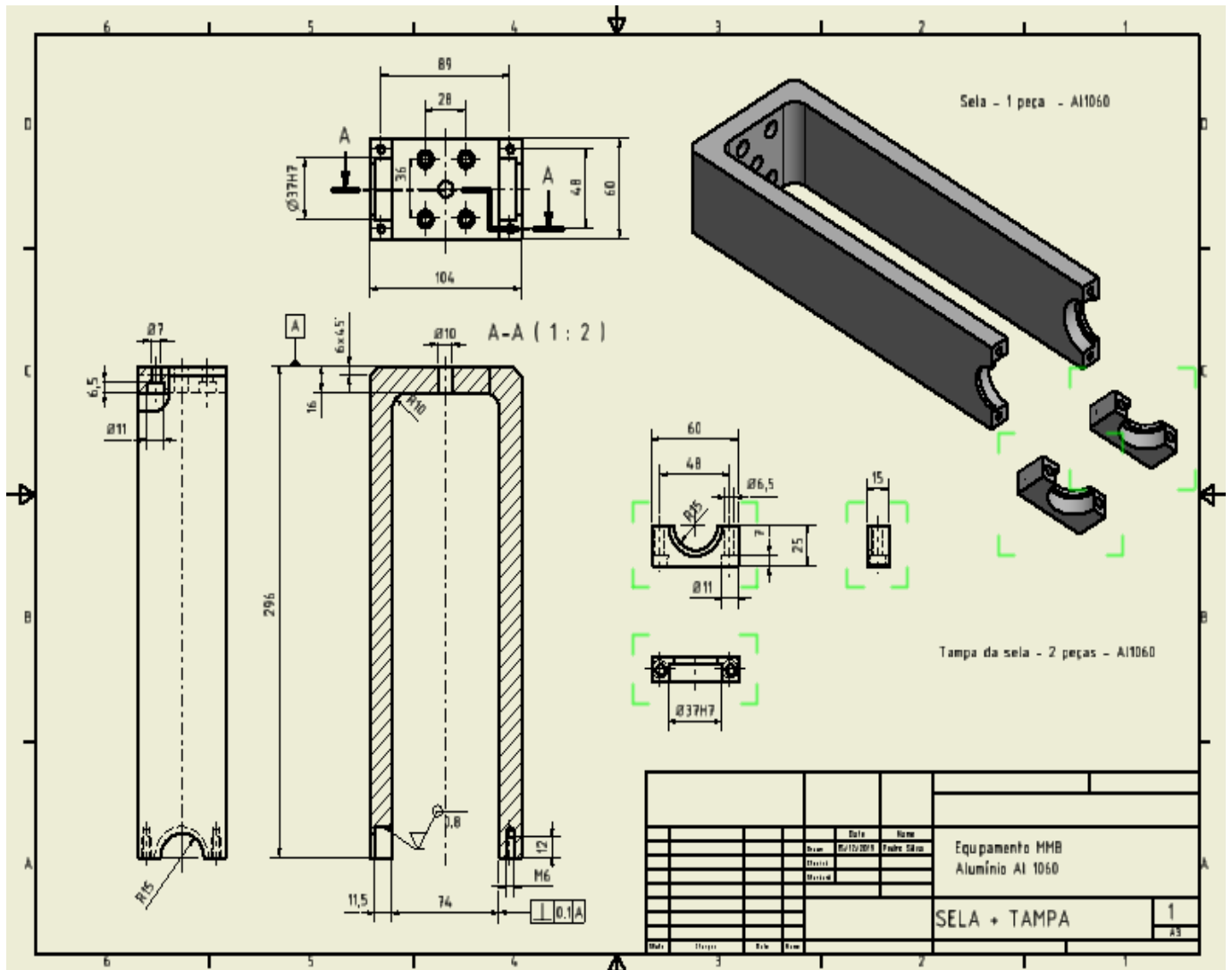
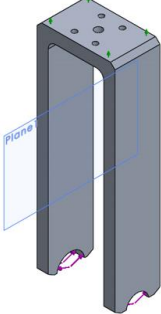


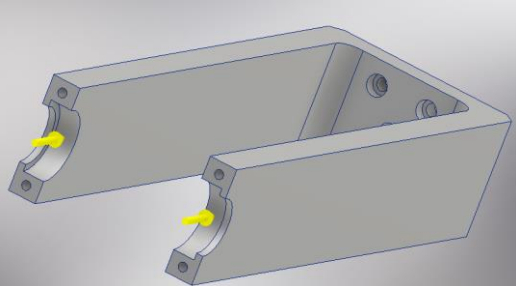
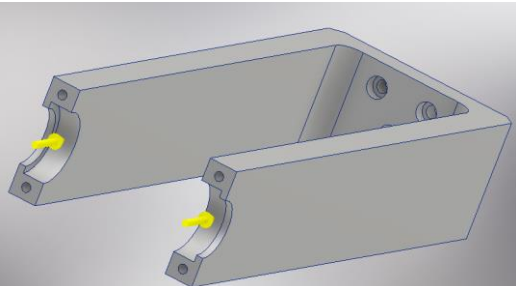
Figura 34 - Desenho técnico - Sela

Para simulação de elementos finitos para as condições de fronteira foram aplicadas duas forças na superfície onde serão apoiados os rolamentos. A força total aplicada tem o valor de 0,5 KN, no entanto a simulação estática foi realizado com o valor de 1 KN que corresponde à força máxima permitida pela célula de ensaio. Outra condição de fronteira foi a superfície onde está fixo o suporte com quatro parafusos ao subconjunto da célula de ensaio.

## Resumo da simulação

<p>Modelo : Sela</p> 	<p>Massa:1,575 kg          Volume:0.00058 m<sup>3</sup>          Densidade:2700 kg/m<sup>3</sup>          Peso:15,39 N</p>	<p>Material : <b>Liga de Alumínio 1060</b>          Critério análise tensões : <b>Von Mises</b>          Tensão de cedência: <b>27,5 MPA</b>          Tensão de ruptura: <b>68,9 MPA</b>          Módulo de - 51 -rotecção- 51 -de: <b>69 GPA</b>          Módulo de corte: <b>27 GPA</b>          Coeficiente de expansão térmica: <b>2.4e-005 /Kelvin</b></p>
--	--	---

## Resultados obtidos

Load name	Load Image	Load Details
Força-1		<p>Entities: <b>1 face(s)</b>            Type: <b>Força radial</b>            Value: <b>500 N</b></p>
Força-2		<p>Entities: <b>1 face(s)</b>            Type: <b>Força radial</b>            Value: <b>500 N</b></p>

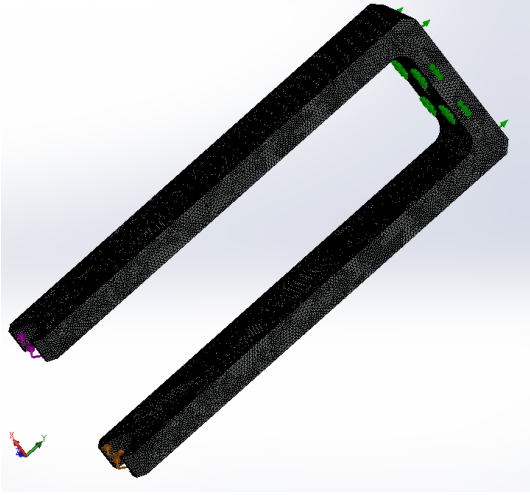
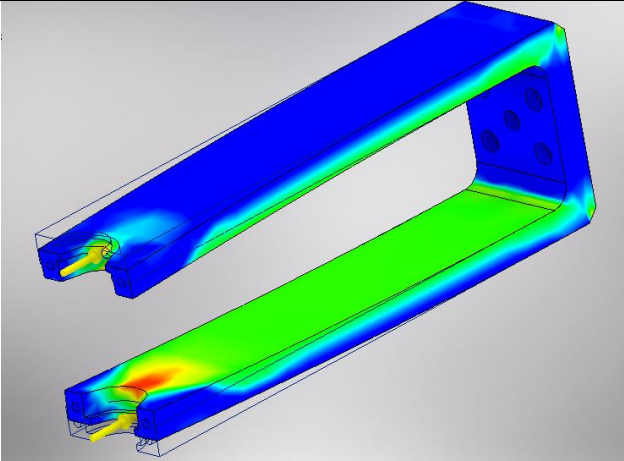
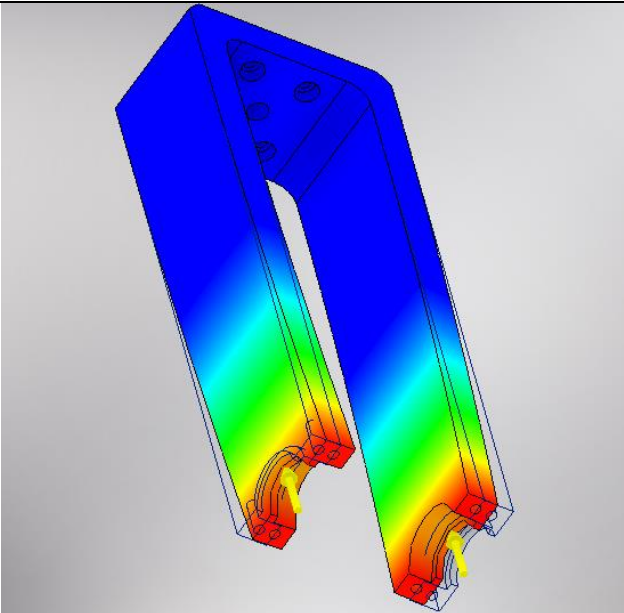
	Propriedades da malha	
	Total de nós	1423945
	Total de elementos	2893191
	Pontos Jacobianos	29
	Tamanho do elemento	0.87mm
	Tolerância	0.19mm
	Qualidade da malha	Alta
	Análise de Tensões	
	Tensão máxima	2,73 MPA
	Tensão mínima	0,0 MPA
	Elemento finito utilizado	Elementos sólidos 3D tetraédricos
	Análise de deformações	
	Deformação máxima	0.005 mm
	Deformação mínima	0.000mm
	Tamanho do elemento	0.87mm

Tabela 7 - Análise MEF da sela

Foi realizado uma análise da convergência da malha e na simulação obteve-se um erro na tensão de cedência de 4%, o objectivo seria menos de 1% para garantir convergência da malha. No entanto devido principalmente às características do computador se tornou impossível depois de algumas tentativas falhadas ou incompletas. Sendo assim para a sela chegou-se a uma tensão de cedência máxima de 2.73 MPa, que torna a liga de alumínio 1060 perfeitamente capaz para esta aplicação. Segue em baixo as cinco simulações realizadas até atingir o erro de 4% com o valor de tensão de 2.73 Mpa, ficando muito longe do valor de tensão de cedência do material, 27,5 Mpa .

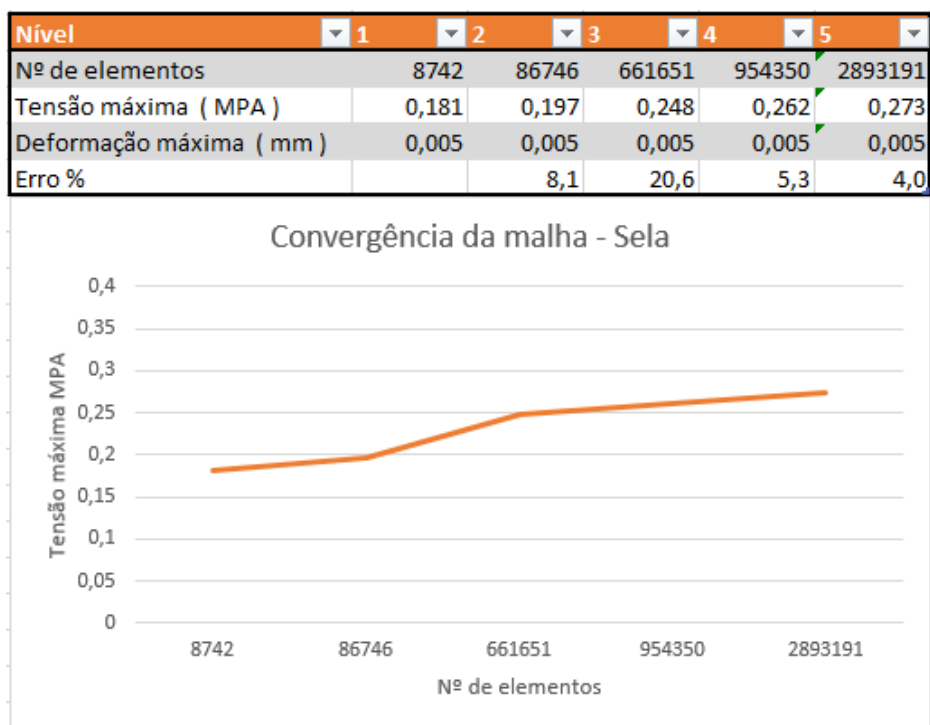


Figura 35 -Convergência de malha – Sela

#### 4.3.9 Subconjunto da célula de carga

Este conjunto é constituído por cinco componentes:

- 1 – chapa que faz a ligação à sela através de quatro para parafusos inox
- 2 – célula de carga, regista as forças de ensaio
- 3 – apoio da célula, que fixa a célula à estrutura
- 4 – dois oring's para vedação nos furos de fixação
- 5 – protector da célula de carga em acrílico

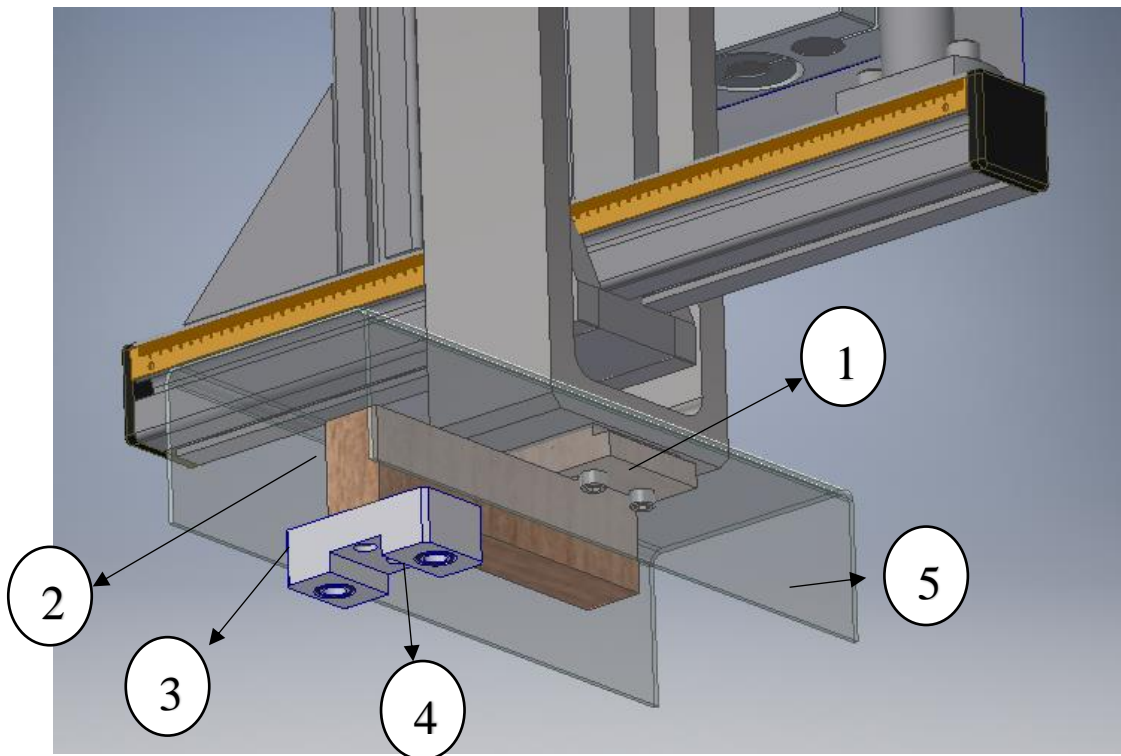


Figura 36 -Sub-conjunto da célula de carga, montado

Todos os componentes de fixação serão em aço inoxidável para garantir protecção contra a corrosão. Os desenhos técnicos das peças deste subconjunto encontra-se em anexo. A protecção em acrílico foi montada para proteger a célula de fluidos dos ensaios e está fixa entre a sela e a chapa de fixação, peça 1. No apoio da célula, peça 3 existe dois oring's ( peças 4) embutidos para

não deixar passar fluido de ensaio para fora da base. Na figura vemos em perspectiva explodida o conjunto.

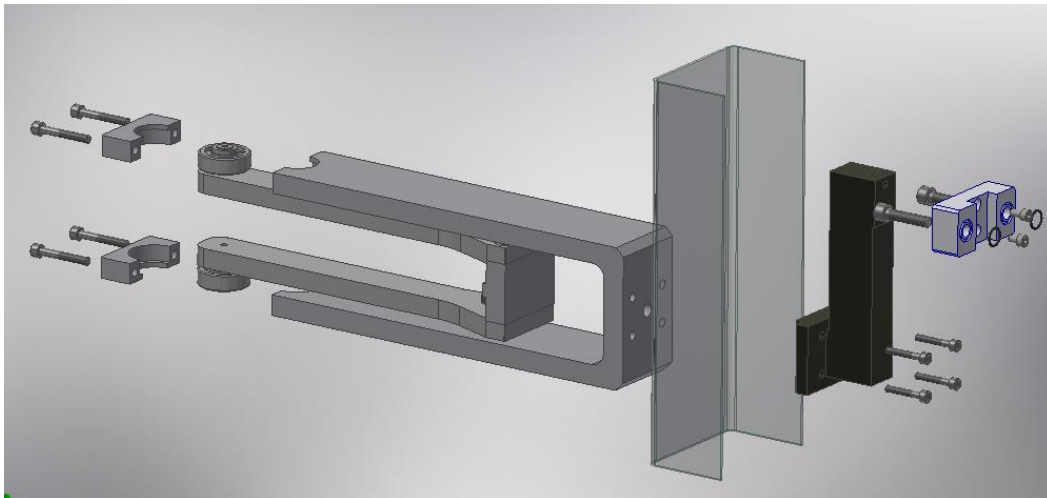


Figura 37 - Perspetiva da montagem da sela

A célula de carga foi escolhida em função da força máxima de ensaio escolhida ( 1 KN ) e ser construída por materiais resistentes à corrosão. No caso da célula escolhida é feita em alumínio anodizado possuem um revestimento opcional resistente à humidade para aumentar a estabilidade e duração, garante uma precisão de 0.0200 N. Para recolha dos valores de carga de ensaio a célula vai estar ligado com o software específico que está a ser desenvolvido em paralelo com esta tese. O esquema de ligação e as medidas de fixação exterior estão no anexo.



Figura 38 - Célula de carga

#### 4.4 - Máquina de ensaio – Sistema *DCB*

O sistema *DCB* vai ser fixo de igual forma ao sistema *MMB* na base maior, mas numa posição horizontal e mais próxima à célula devido ao seu menor atravancamento de ensaio, para isso foi realizada outra furação na base para fixar o subconjunto da guia mais o motor que servirá também para o ensaio *ENF*. Este equipamento permite realizar ensaios *DCB* e *ENF* na posição horizontal mas também na vertical ou lateral, permitindo um aumento na variedade de ensaios sendo uma inovação relativamente aos equipamentos mais tradicionais de testes à fadiga.

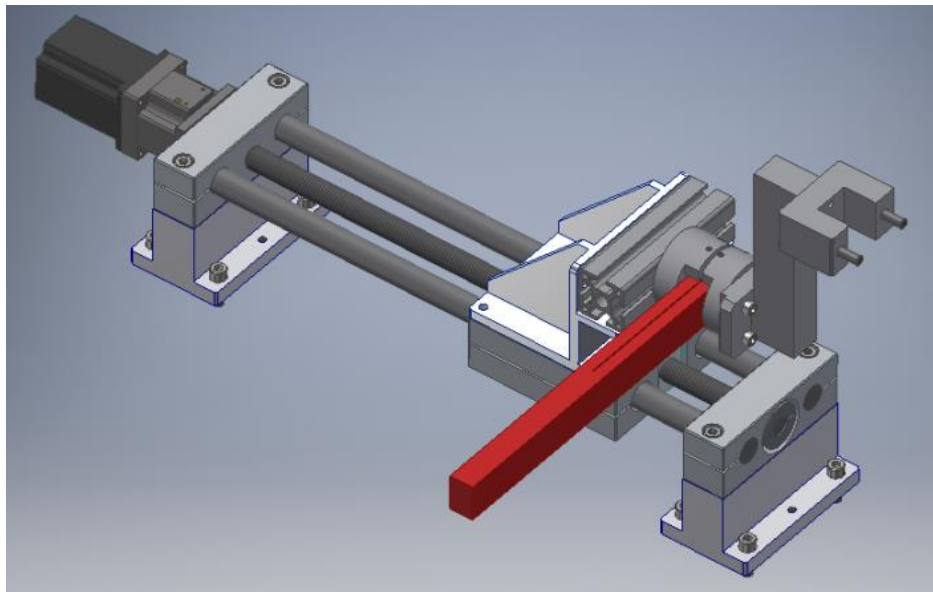


Figura 39 -Equipamento de ensaio *DCB*

O sistema *DCB* terá como accionamento os mesmos componentes do sistema *MMB*, o motor de passo, a guia linear, o carro e os apoios. Na prática para se mudar do ensaio *MMB* para este ensaio não será preciso mudar nenhum destes componentes, apenas desapertar os apoios e deslocar este subconjunto para a furação pretendida. Para compensar a distância da célula ao provete será necessário também a realização de um apoio da célula que servirá para os ensaios *DCB* e *ENF*. Para fixação do provete do lado do motor foi utilizado uma barra de alumínio Mytec 40x40 onde será apertado uma amarra em alumínio 1060 com furo para apertar o provete. Da lado da célula o provete será fixo a uma amarra também em alumínio 1060 que está ligado á célula de carga.

Para a realização deste ensaio é preciso ter em conta o alinhamento da furação do provete para não introduzir erros geométricos no provete durante o ensaio. Com a barra de alumínio Mytec é possível alinhar os furos do provete para garantir o correcto posicionamento deste entre a parte

móvel e a parte da célula. Será necessário executar alguns modelos de amarras com tamanhos diferenciados para fixação de provetes de diferentes tamanhos.

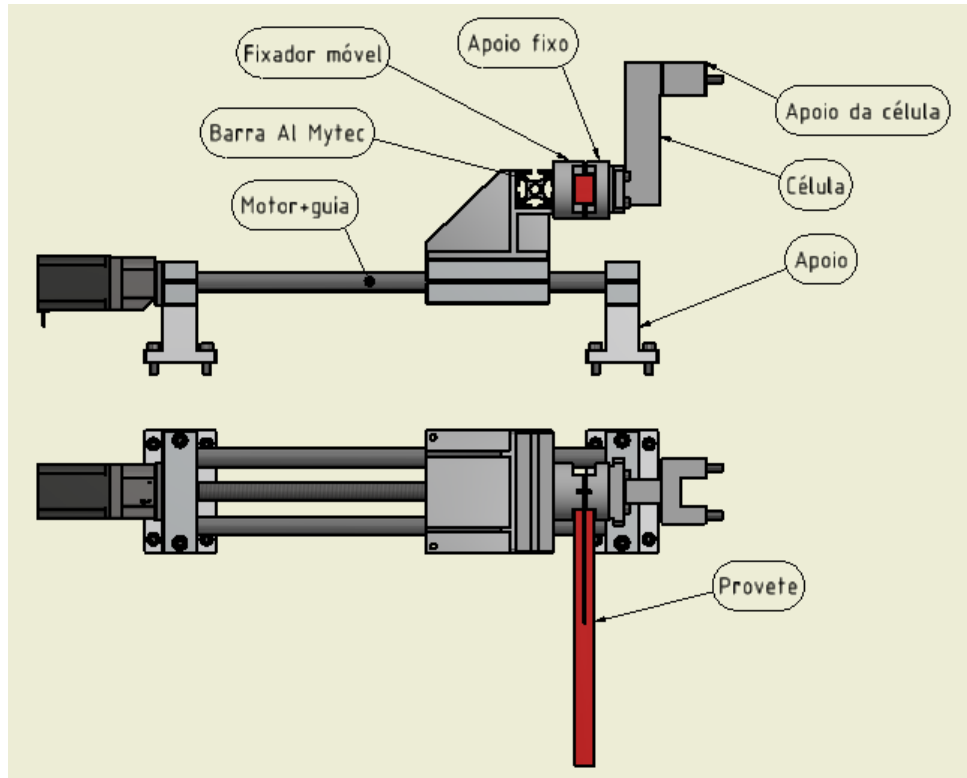


Figura 40 -Componentes DCB

#### 4.5 - Máquina de ensaio – Sistema ENF

Da mesma forma do sistema *DCB* o ensaio *ENF* será feito na posição horizontal mas com a força efectuada no avanço do motor. Esta força produzirá no provete um esforço de flexão, que será medido pela célula registando no software de aquisição de dados a força aplicada no provete e o seu deslocamento. Este sistema será constituído por o accionamento, uma barra de alumínio Mytec 40x40, semelhante à do sistema *DCB*, mas mais comprida para permitir apoios em provetes de maior dimensão. Na barra Mytec vão estar fixos dois apoios livres onde vai estar apoiado o provete de ensaio. Na célula vai estar fixa uma flange com cunha que servirá para efectuar a reacção no meio do provete. Na barra de alumínio onde estão fixos os apoios será fixo uma escala para posicionar e garantir a distância entre apoios.



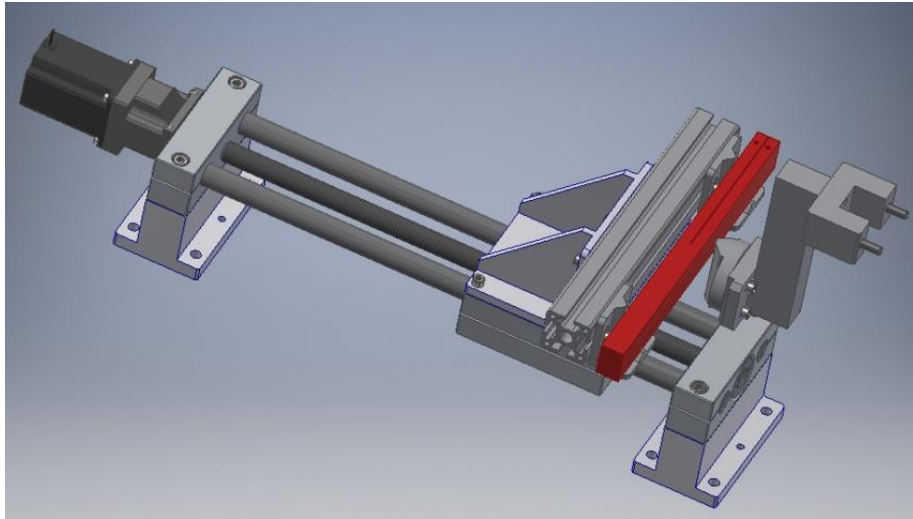


Figura 41 - Equipamento de ensaio ENF

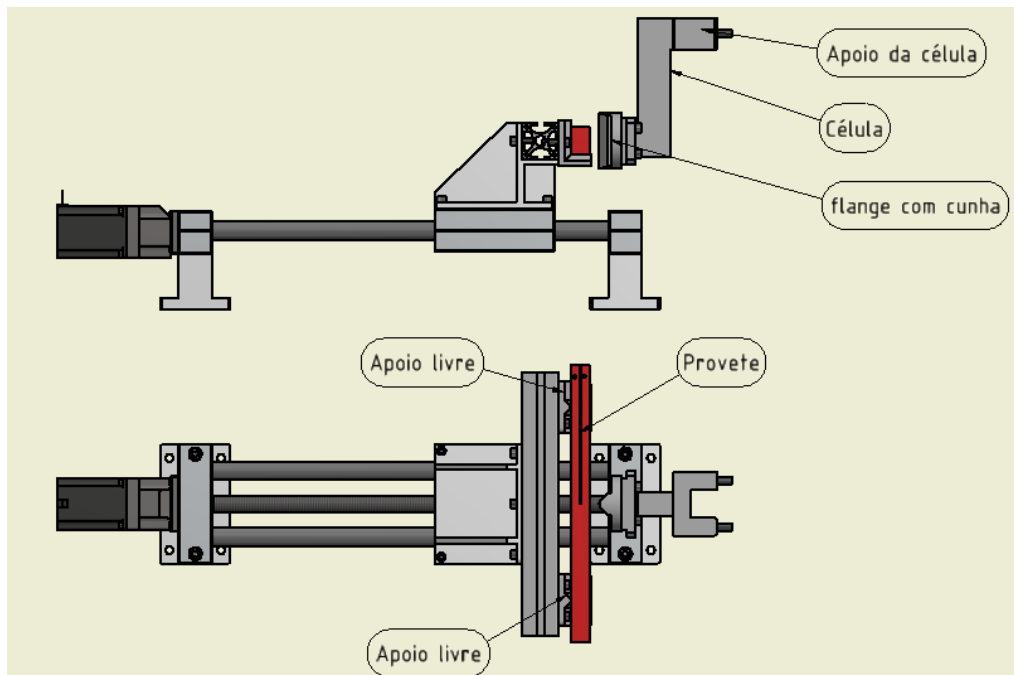


Figura 42 - Componentes ENF

Em baixo é apresentado o desenho técnico dos dois componentes que irão suportar o provete, estes componentes serão realizados em alumínio Al 1060 com maquinação em CAD-CAM devido à sua forma geométrica.

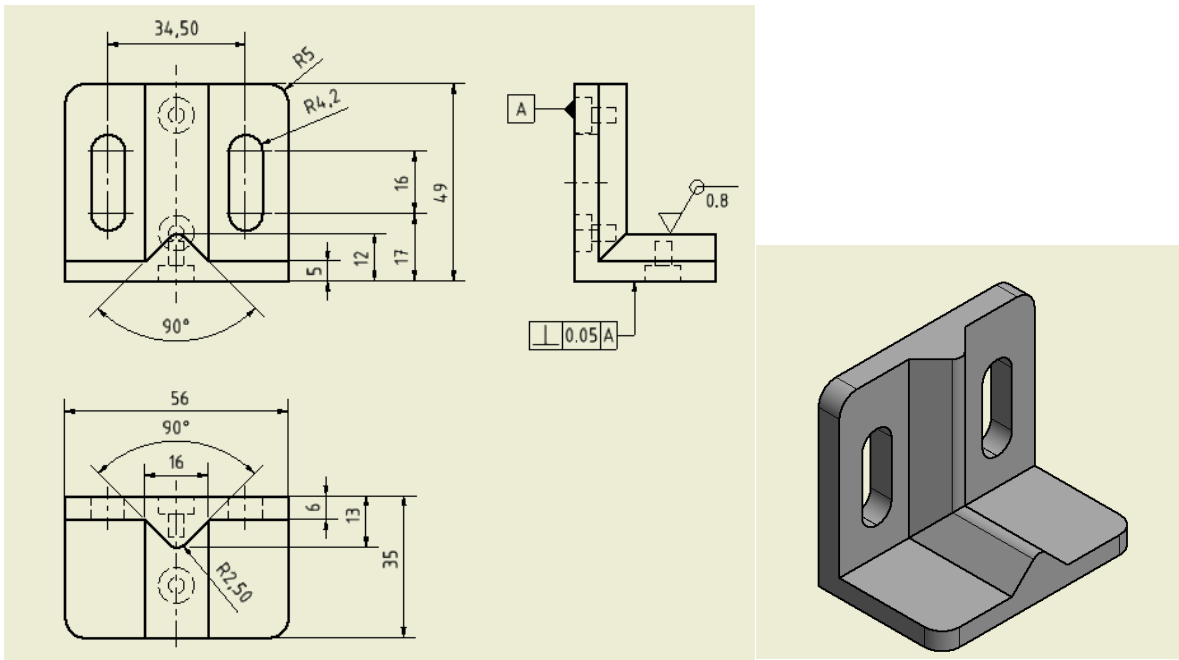


Figura 43 -.Apoio livre ENF

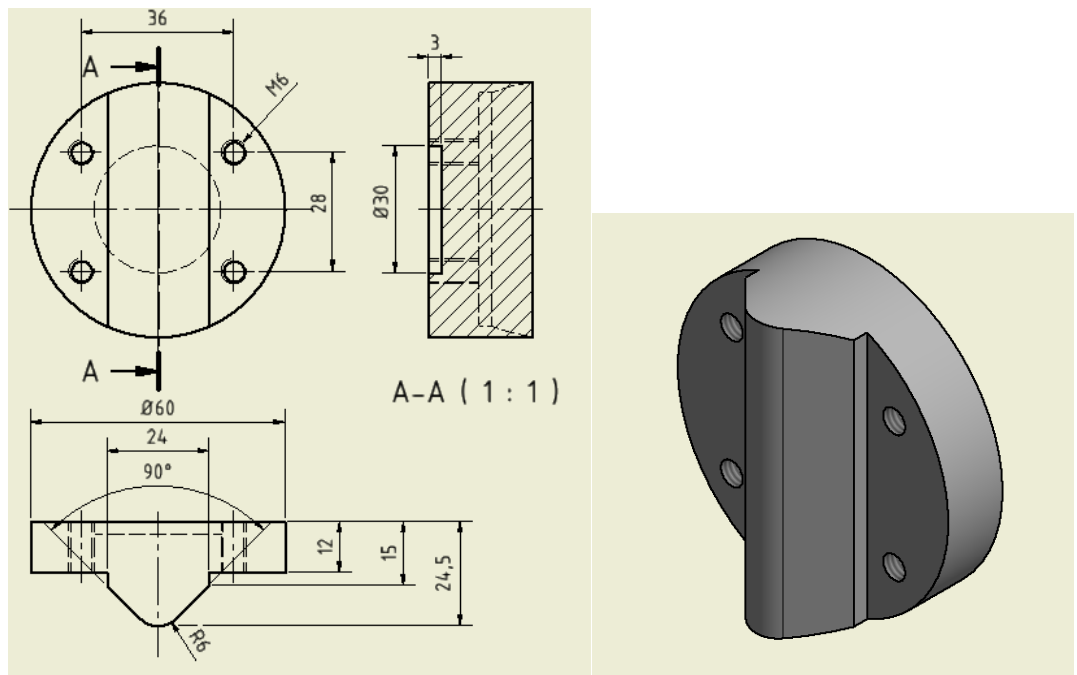


Figura 44 - Postiço central ENF

# 5 – Conclusões e trabalhos futuros

## 5.1 – Conclusões

Neste trabalho foi desenvolvido um equipamento para ensaio á fadiga de provetes em biomateriais principalmente no modo misto *MMB*, mas também ser possível a realização de ensaios *DCB* e *ENF*.

Para desenvolver o dispositivo foi realizado uma revisão bibliográfica ao domínio da mecânica da fratura, aos tipos de equipamentos comercializados para estes ensaios e aos softwares de simulação existentes que permitissem obter curvas de ensaio *S-N* para os materiais estudados.

Um dos requisitos principais deste equipamento surgiu da necessidade de fazer ensaios em biomateriais permanentemente lubrificados com fluidos corrosivos, atacando quimicamente os componentes do equipamento. Desta forma a escolha dos materiais para construção e montagem do equipamento foi um critério decisivo para a sua realização. Que fosse um sistema modular, permitindo a realização de ensaios no modo misto I + II, no mesmo provete variando a distância *c*, e que esta mudança fosse fácil de se concretizar. Fazer ensaios nos modos puro, I e II, e que também fosse uma estrutura ligeira e de fácil movimentação.

O desenvolvimento consistiu na avaliação de alguns equipamentos de fabricantes destes sistemas, depois foi feito um desenho do conjunto do sistema com as três montagens possíveis. Para a modelação do equipamento foi utilizado como software de trabalho o Maytec® no dimensionamento da estrutura e o SolidWorks® para o realização final do projeto. De seguida foi efetuado em alguns componentes avaliados como críticos e que estão sujeitos a forças que pudessem causar deformações, simulações numéricas pelo método de elementos finitos no software SolidWorks®. Com este método foi garantido que nos componentes projetados a tensão instalada por acção das forças atuantes estivesse sempre abaixo da tensão de cedência do material escolhido que maioritariamente foi o alumínio.

Na última fase foi feito orçamento e o desenho técnico pormenorizado de cada componente para maquinação, onde está descrito os materiais, dimensões e tolerâncias funcionais de cada elemento dos três sistemas.

## 5.2 – Trabalhos futuros

Durante a execução desta tese foi sugerido pelo orientador questões que não foram aprofundadas neste documento que merecem reflexão futura para dotar o equipamento de sistemas que o tornem mais eficaz.

Aspectos relevantes que foram discutidos de forma superficial e que devem ser objecto de considerações futuras são :

1. Implementar um sistema de lubrificação dos provetes com bombagem e circulação com aproveitamento do fluido ( soro ) através de uma bomba peristáltica. A aplicação no sistema deste tipo de bombas prende-se essencialmente pela capacidade de precisão no doseamento, impede o refluxo e as partes móveis da bomba não entram em contacto com as partes fixas, o que é relevante devido ao elevado grau corrosivo do fluído.

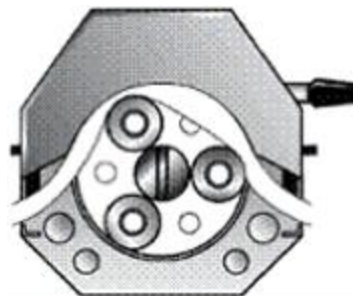


Figura 45 - Esquema de bomba peristáltica

2. Permitir regulação da cota  $c$  com a montagem de motor de passo na extremidade do travessão fixo juntamente com um fuso. Com este sistema será possível regular a posição do apoio que simula o ensaio *ENF*, com accionamento eléctrico evitando as afinações e ajustes manuais, que não é rigorosa e implica sempre realização de ajustes.
- 3.

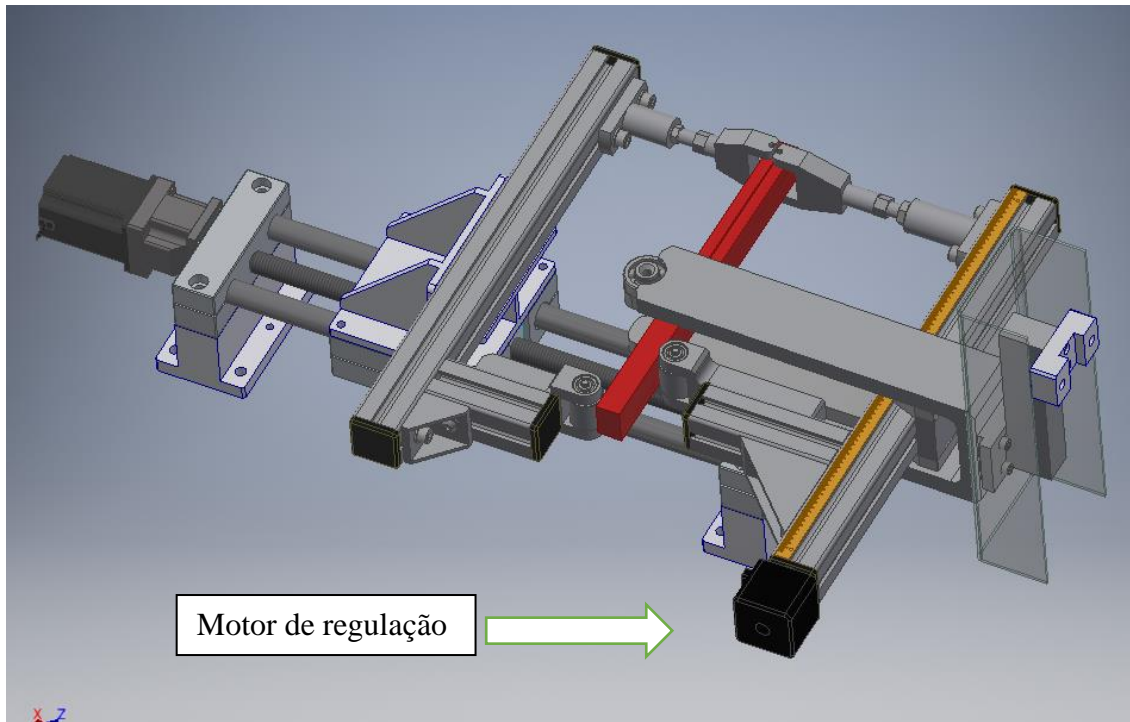


Figura 46 - Motor de passo para variar distância 'c'

## 6 – Bibliografia

1. *Comparison of fracture properties of two wood species through cohesive crack simulations. Composites: Part A 39:415-427. N. Dourado, S. Morel, M.F.S.F. de Moura, G. Valentin, J. Morais (2008).*
2. *Composites: Part A 39:415-427. N. Dourado, M.F.S.F. de Moura, J. Morais, M.A.L. Silva (2010).*
3. *Crack equivalent based method applied to wood fracture characterization using the single edge notched-three point bending test. Engineering Fracture Mechanics 77:510-520. M.F.S.F. de Moura, N. Dourado, J. Morais (2010).*
4. *Cohesive zone model for high-cycle fatigue of adhesively bonded joints under mode I loading. International Journal of Solids and Structures 51:1123-1131. M.F.S.F. de Moura, J.P.M. Gonçalves (2014).*
5. *Basic Aspects». Biocompatibility of Dental Materials. Schmalz, G. e Arenholdt-Bindslev, D. (2008).*
6. *The Free Encyclopedia. Disponível em <[http://en.wikipedia.org/wiki/Fatigue\\_\(material\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Fatigue_(material))>. Fatigue (material). 1 Dezembro, 2014. Wikipedia.*
7. *Fadiga de Estruturas Soldadas. 1ª Edição. Porto: Fundação Calouste Gulbenkian, 1986. BRANCO, C. M., FERNANDES, A. A. & DE CASTRO ,P. M. S. T.*
8. *Microstructural mechanisms of cyclic deformation, fatigue crack initiation and early crack growth.Phil. Trans. R. Soc. A 373:20140132. 2015, Mughrabi H.*
9. *Elementary Engineering Fracture Mechanics, 4th rev., M. Nijhoff;Distributors for the U.S. and Canada, Kluwer Academic, Dordrecht;Boston Hingham, Mass., U.S.A.,. Broek, D. (1986).*
10. *The Phenomena of Rupture and Flow in Solids, Philosophical Transactions of the Royal Society A221: 163 – 198. Griffith, A. A. (1921).*
11. *Adhesion and Adhesives: Science and Technology,Chapman & Hall, London. Kinloch, A. J. (1987).*
12. *MECHANICAL PROPERTIES OF MATERIALS. David Roylance, 2008.*
13. *Mechanical Behavior of Materials. Dowling, Norman E.*
14. *Experiments on Controlled Fractures Proceedings of the Physical Society, Section B, 70 (2): 201-211. Benbow, J. J., Roesler , F. C., (1957),.*
15. *in Fracture, Averback, B. L., et al. (editors),(1959) John Wiley, New York: 193-221. Gilman, J. J.*
16. *The calculation of adhesive fracture energies from double-cantilever beam test specimens,. Blackman, B., Dear, J. P., Kinloch, A. J., Osiyemi, S.*
17. *Critical Energy Rate Analysis of Fracture Strength”. Welding Journal (Research Supplement, Vol. 33), p. 193s. Irwin, G.R., Kies, (1954),.*

18. *Mode II stress-intensity factors for cracked wood beams.* **J.D.BarrettR.O.Foschi.**
19. *NASA Langley Research Center, Hampton, VA, 23681-2199.* **Reeder, James R.**
20. 1993. "Round robin testing for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Composite Materials," *J. of Comp. Tech. & Res.*, 15(4): 269-281. **O'Brien, T. K. and R. H. Martin.**
21. *Assessment of evaluation methods for the mixed-mode bending test. J Compos Technol Res* 1999;21:34–48. **Juntti M, Asp LE, Olsson R.**
22. "The Analysis of Interlaminar Fracture in Uniaxial Fibre-Polymer Composites," *Proceedings of Mathematical and Physical Sciences.* 427(1872): 173-199. **Hashemi, S., A. J. Kinloch, and J. G. Williams. 1990.**
23. "The Mixed-Mode Delamination of Fibre Composite Materials," *Comp. Sci. and Tech.*, 47(3): 225-237. **Kinloch, A. J., Y. Wang, J. G. Williams, and P. Yayla. 1993.**
24. *Corrections for mode II fracture toughness specimens of composites materials. Compos Sci Technol* 1992;43:251–6. **Wang Y, Williams JG.**
25. */English/SIMACAEANLRefMap/simaanl-c-crackpropagation.htm#simaanl-c-crackpropagation-t-SpecifyingAFractureCriterion-sma-topic6.* <https://abaqus-docs.mit.edu/2017>.
26. **D. S. Simulia, "Abaqus 6.14 Online Documentation," 2014.**
27. *Bone fracture characterization under mixed-mode I + II loading using the MMB test.* **F.A.M. Pereira, M.F.S.F. de Moura,N. Dourado,J.J.L. Morais,F.G.A. Silva,M.I.R. Dias.**

# 7. ANEXOS

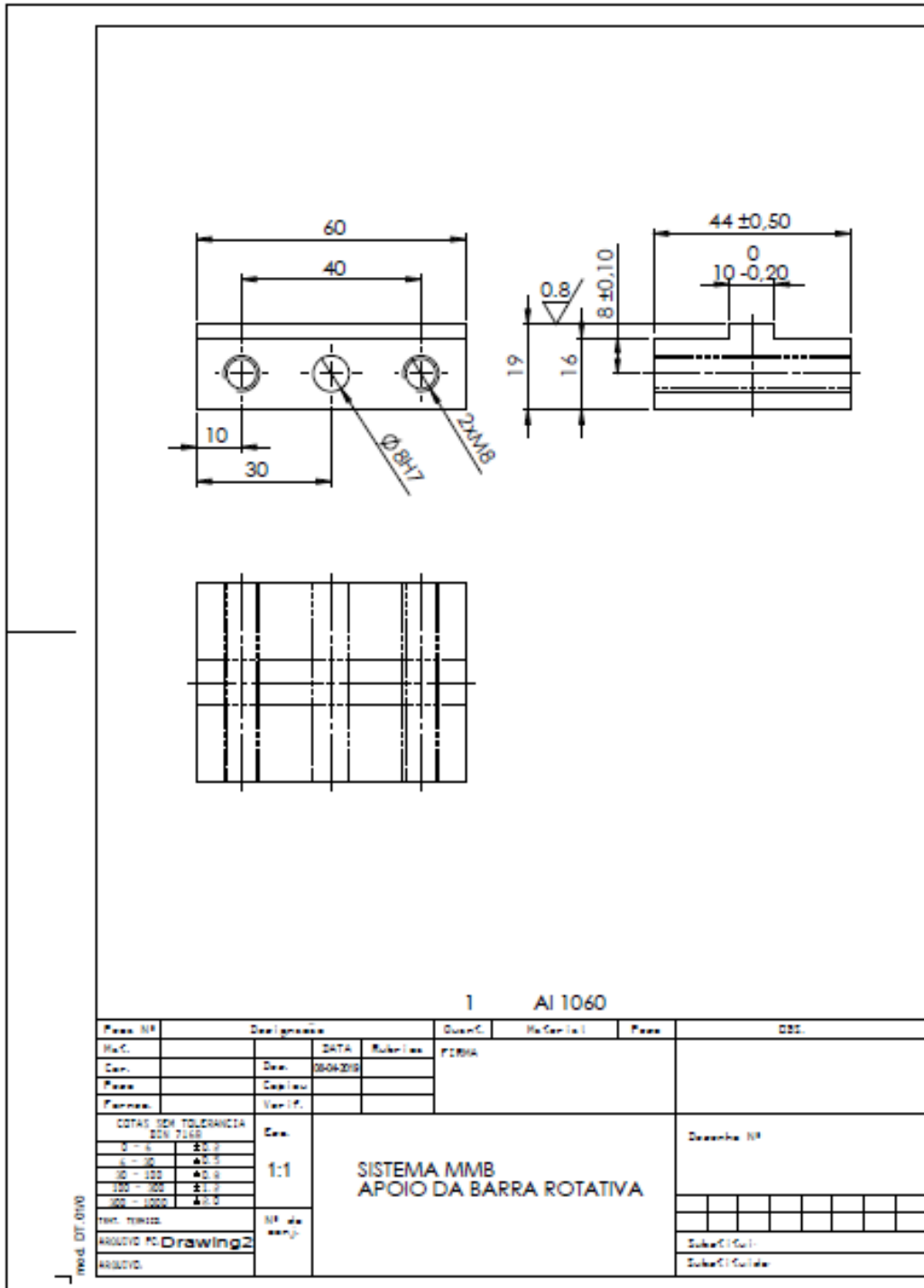
Orçamento da máquina com sistema MMB

Coluna1	Coluna2	Coluna3	Coluna4	Coluna5	Coluna6	Coluna7	Coluna8	Coluna9	Coluna10	Coluna11	Coluna12	Coluna13	Coluna14	Coluna15	Coluna16	Coluna17	Coluna18	
Orçamento para sistema MMB																		
							€/h		€/h		€/h		€					
							25		22		27							
Peça	n.º	Matéria prima	Cuto € / Kg.	Qt. ( Kg.)	Custo MP €	Maquinado	Fresadora	Horas F	Torno	Horas T	Retif.	Horas R	Outro	Obs	Custo MO €	Qt	Custo comp. €	
Apoio barra rotativa	1	AL 1060	3	0,18	0,54	Sim	12,5	0,5	0						12,5	1	13,04	
Apoio	2	AL 1060	3	1,9	5,7	Sim	37,5	1,5	0						37,5	2	86,40	
Cj. Motor de passo	3	IGUS			1000	Não	0		0						0	1	1000,00	
Guia linear SHT	4	IGUS			1650	Não	0		0						0	1	1650,00	
Correção o provete móvel	5	AL 1060	3,25	0,5	1,625	Sim	12,5	0,5	11	0,5					23,5	1	25,13	
Suporte do rolete fixo	6	AL 1060	3	0,5	1,5	Sim	31,25	1,25	0						31,25	1	32,75	
Travessão móvel	7	Al Mytec			0	Não	0		0				9,6		9,6	1	9,60	
Tampa	8	Al Mytec			0	Não	0		0				0,96		0,96	6	5,76	
Cutelo menor	9	Al Mytec			0	Não	0		0				3,13		3,13	1	3,13	
Barra do cutelo menor	10	AlMytec			0	Não	0		0				3,79		3,79	1	3,79	
Rol. 626 inox	11	Aço Inox			0	Não	0		0				2,5		2,5	4	10,00	
Roleta	12	PA6	3,2	0,03	0,096	Sim	0		6,6	0,3					6,6	2	13,39	
Eixo do rolete Ø6	13	Aço Inox			0	Sim	0		4,4	0,2			0,5		4,9	2	9,80	
Suporte do rolete móvel	14	AL 1060	3	0,63	1,89	Sim	37,5	1,5	0						37,5	1	39,39	
Rol. 6301 inox	15	Aço Inox			0	Não	0		0				5		5	2	10,00	
Casquilho de fix. do rol	16	Aço Inox	4	0,05	0,2	Sim	0		6,6	0,3					6,6	2	13,60	
Fixador do prov. móvel	17	Al 1060	3	0,3	0,9	Sim	25	1	0				2,5	Roscar	27,5	1	28,40	
Fixador prov. Fixo	18	Al 1060	3	0,61	1,83	Sim	25	1	0				2,5	Roscar	27,5	1	29,33	
Correção o provete fixo	19	Al 1060	3,25	0,63	2,0475	Sim	12,5	0,5	11	0,5					23,5	1	25,55	
Travessão fixo	20	Al Mytec			0	Não	0		0				9,6		9,6	1	9,60	
Barra de aperto da célula	21	AL 1060	3	0,225	0,675	Sim	12,5	0,5	0						12,5	1	13,18	
Barra cutelo maior	22	Al Mytec			0	Não	0		0				3,87		3,87	1	3,87	
Cutelo maior	23	Al Mytec			0	Não	0		0				7,83		7,83	1	7,83	
Fixador da célula	24	AL 1060	3	0,23	0,69	Sim	37,5	1,5	0				5		42,5	1	43,19	
Barra rotativo	25	AL 1060	3	0,73	2,19	Sim	50	2	0						50	2	104,38	
Sela	26	Al 1060	3	5,4	16,2	Sim	150	6	0		27	1			177	1	193,20	
Protecção da célula	27	PMMA	6	0,2	1,2	Não	0		0					Dobrar	5	1	6,20	
Carro de avanço	28	AL 1060	2,5	0,9	2,25	Sim	0		0				75	Soldar	75	1	77,25	
Femea Mytec	29	AL Mytec			0	Não	0								1,13	18	20,34	
Parafusos Inox	30	Aço Inox			0	Não	0								0,5	30	15,00	
Base maior	31	Al 3030	6	20,6	123,6	Sim	200	8							200	1	323,60	
Base menor	32	Al 3030	6	12,85	77,1	Sim	150	6							150	1	227,10	
Estrutura	33	Mytec			806	Não										1	806,00	
					<b>Total MP €</b>		<b>3696,2335</b>								<b>Total MO €</b>	<b>998,76</b>	<b>Total €</b>	<b>4859,79</b>
																		<b>2209,7895</b>

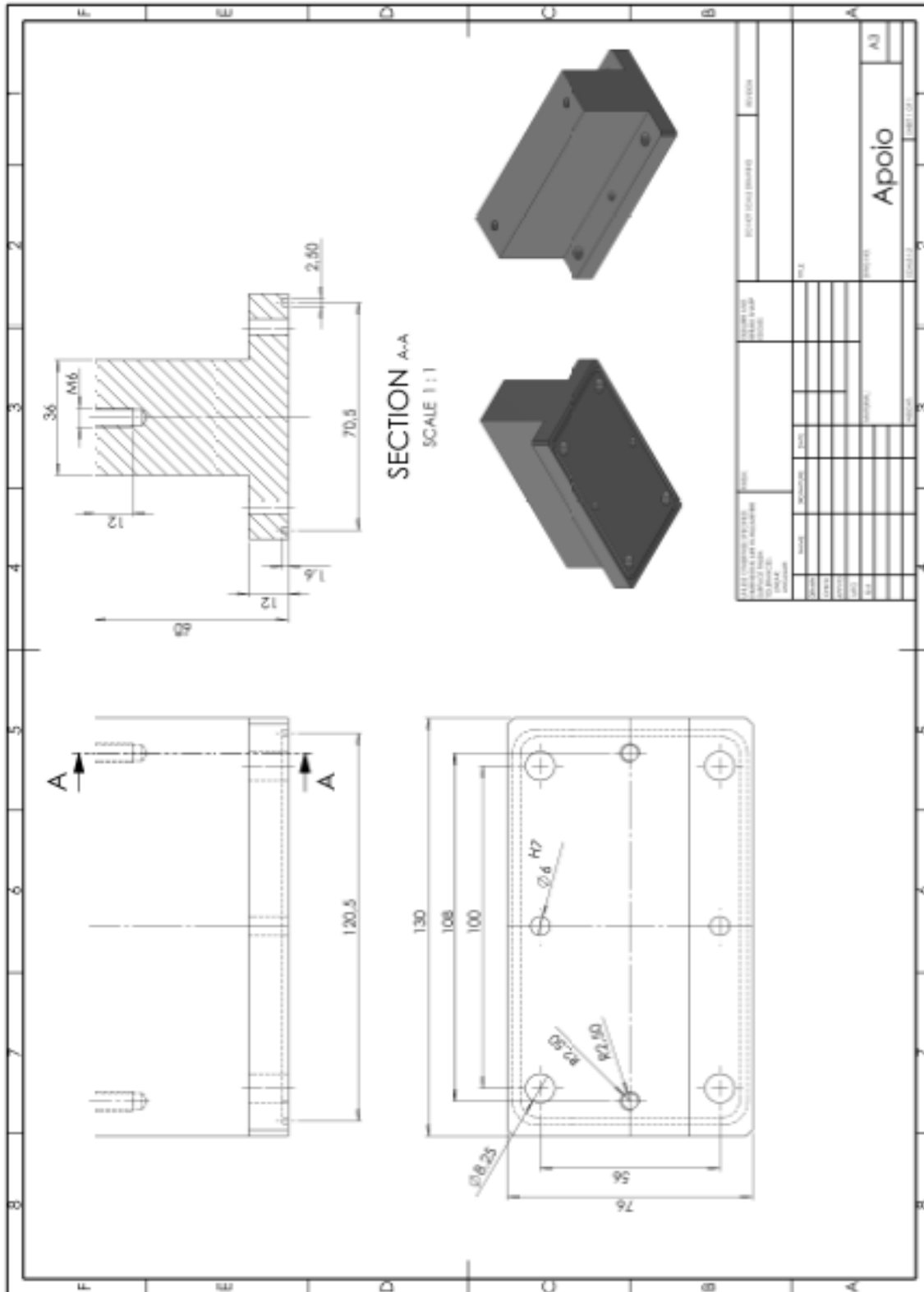


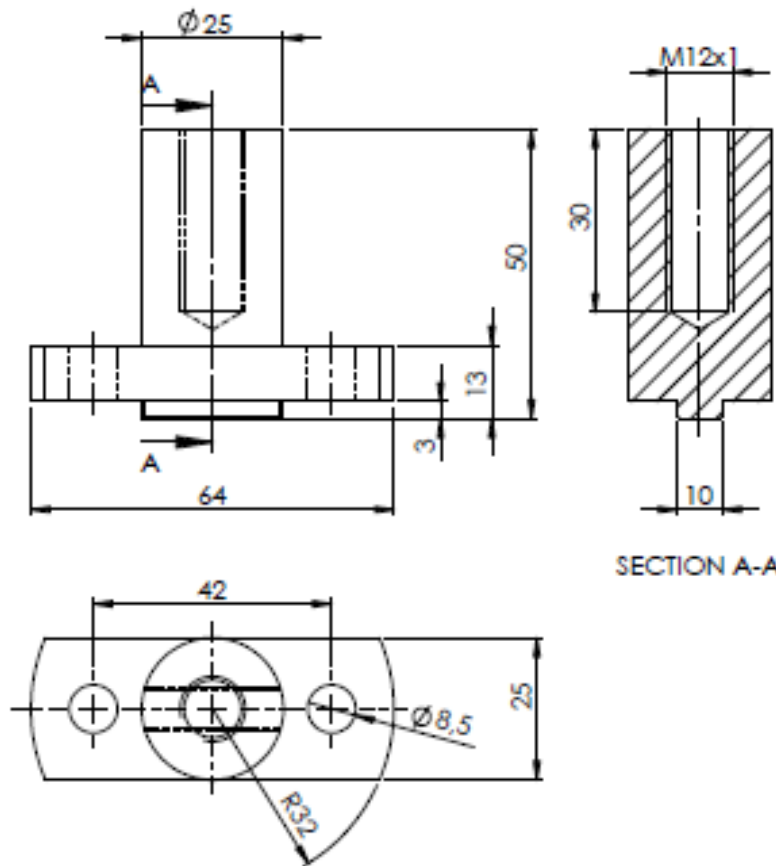
**Desenhos técnicos dos componentes :**

Apoio barra rotativa – Peça 1



Apoio - Peça 2

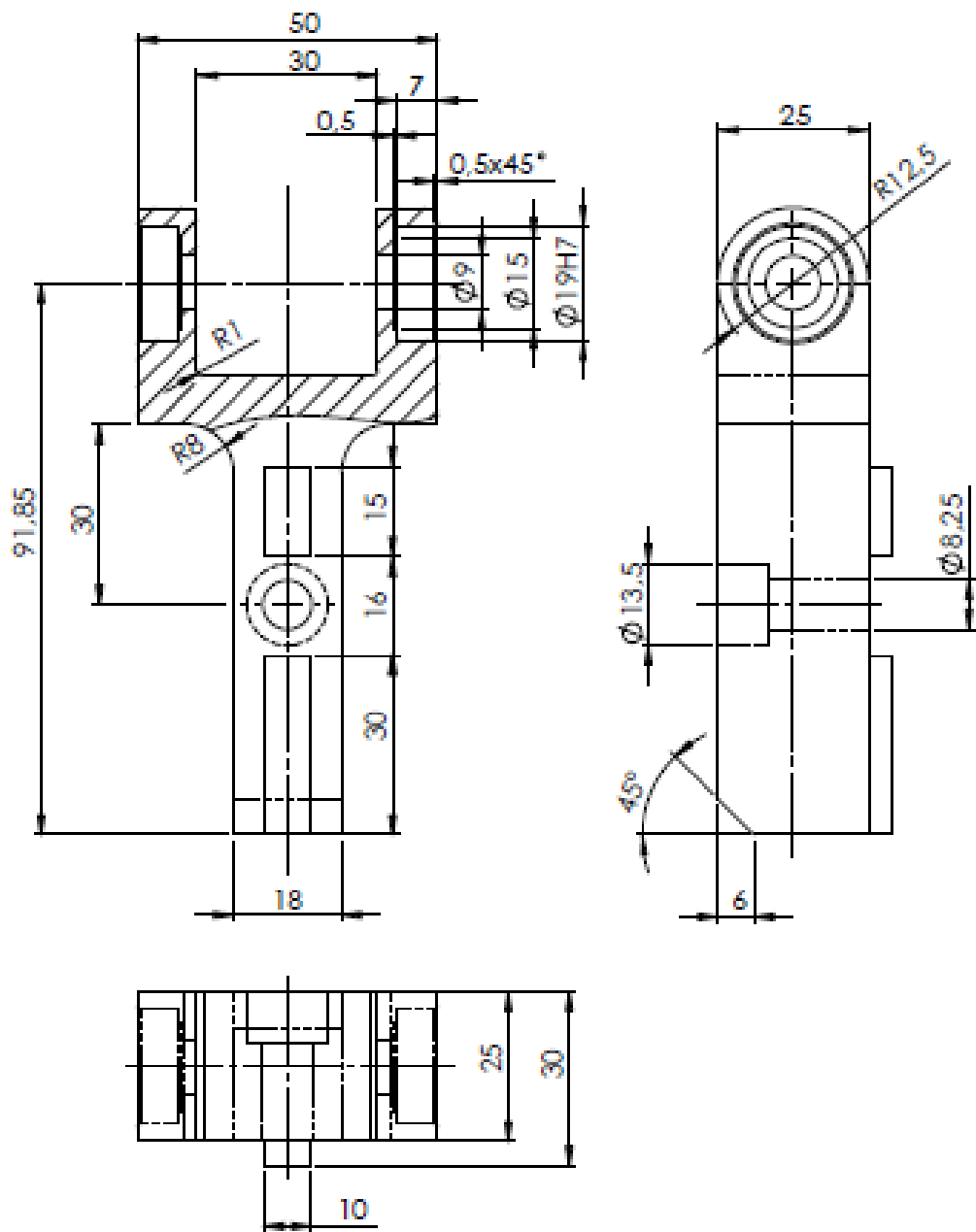




SECTION A-A

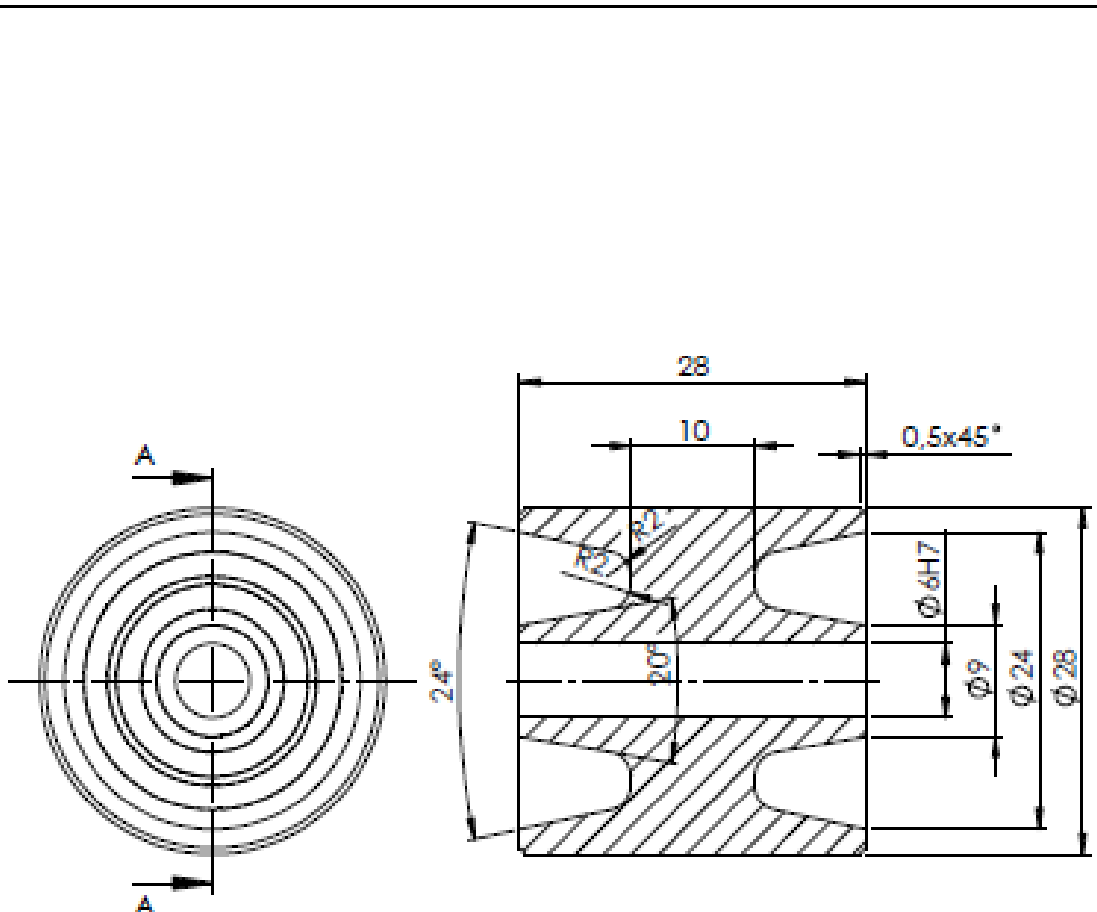
1 AISI304

Parte Nº	Designação			Quant.	Material	Parte	Obs.	
Mat.		DATA	Revisão	F010A				
Des.	Des.	3804209						
Exec.	Execu.							
Formas.	Verif.							
COTAS SEM TOLERANCIA DIN 7160		Esc. 1:1	SISTEMA MMB Correção do provete				Desenho Nº	
0 - 3	±0,1							
3 - 30	±0,15							
30 - 100	±0,2							
100 - 300	±0,3							
300 - 1000	±0,5							
TÍTULOS TÉCNICOS		Nº de revisão						
PROJETO							Substituído	
REVISÃO							Substituído	



1 A11060

Proj. Nº	Designação	Quant.	Material	Proj.	Obs.
Rev.	DATA	Revisão	F0101A		
Proj.	Des.	03/04/2019			
Proj.	Calib.				
Proj.	Verif.				
COTAS SEM TOLERANCIA DIN 7185		Esc. 1:1  Sistema MMB Suporte do rolete - fixo	Desenho Nº  Subst. Util. Subst. Util.		
0 - 4	±0,1				
5 - 30	±0,2				
30 - 100	±0,3				
100 - 300	±0,5				
300 - 1000	±0,8				
Proj. Revizão	Nº de				
PROJETO Nº	Proj.				
PROJETO					

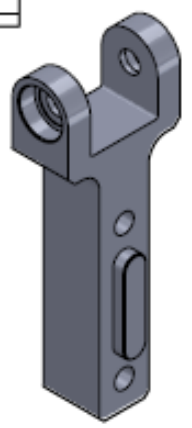
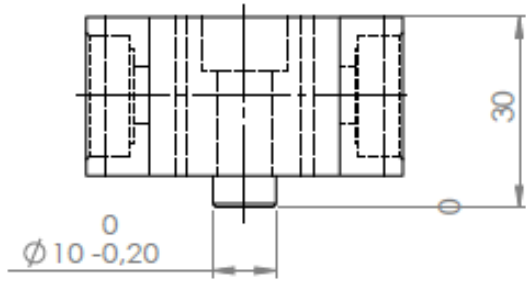
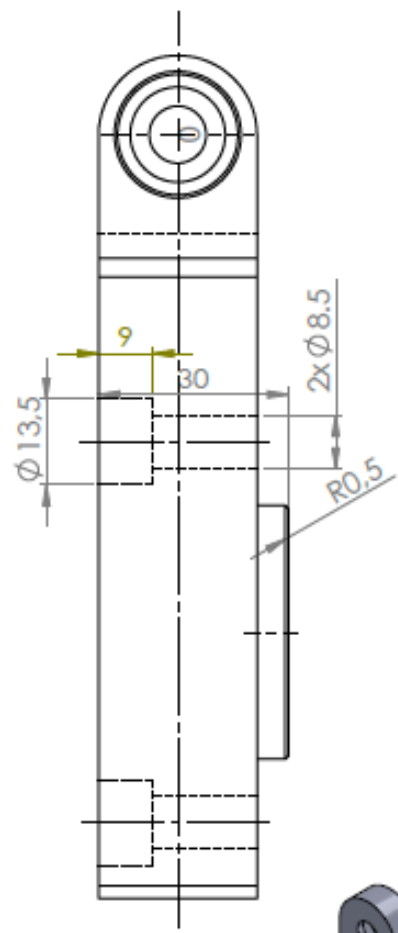
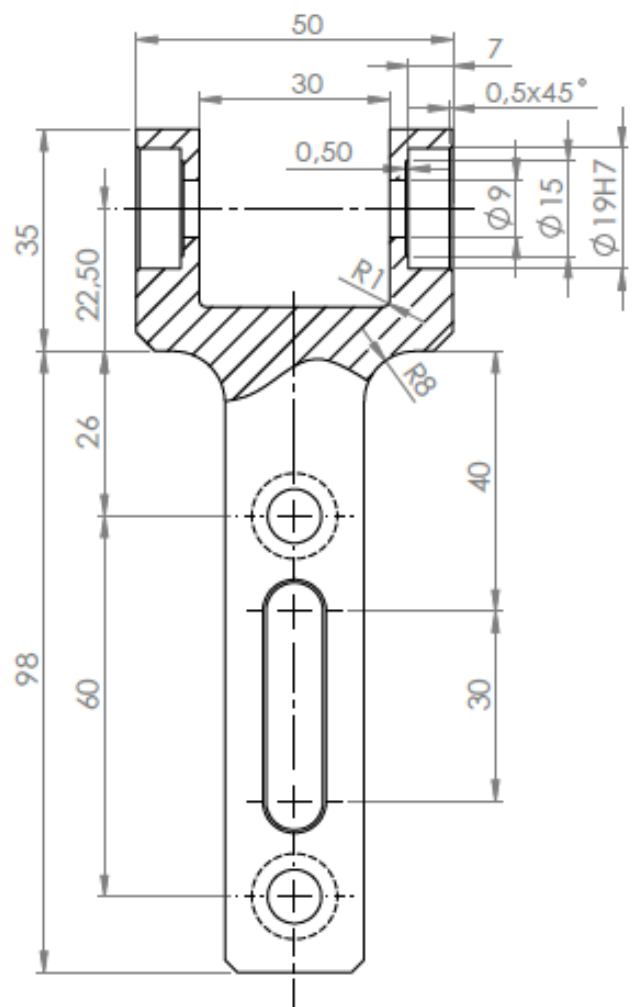


SECTION A-A

2 PA6

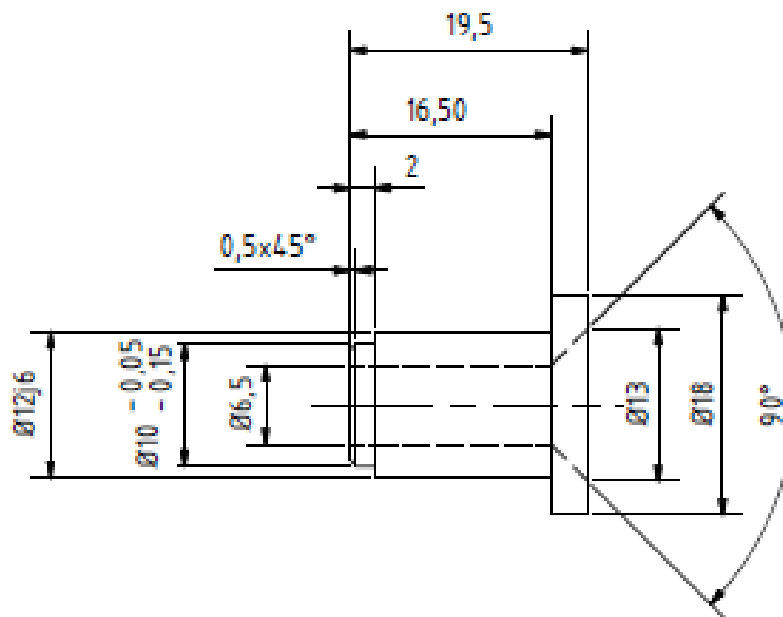
Part. N°	Designação			Quant.	Material	Parte	Obs.	
Rev.		DATA	Substitui	F1000				
Des.	Des.	08/04/2018						
Parte	Carimbo							
Formas.	Verif.							
COTAS COM TOLERANCIA		Esc.	1:1	SISTEMA MMB Rolete de apoio				Descrição N°
0 - 6	±0,1							
6 - 30	±0,3							
30 - 100	±1,0							
100 - 1000	±							
TRAT. TERMICO		N° de marg.						
ABRUCO PO							Substitui	
ABRUCO							Substitui	

mod. DT 01/0

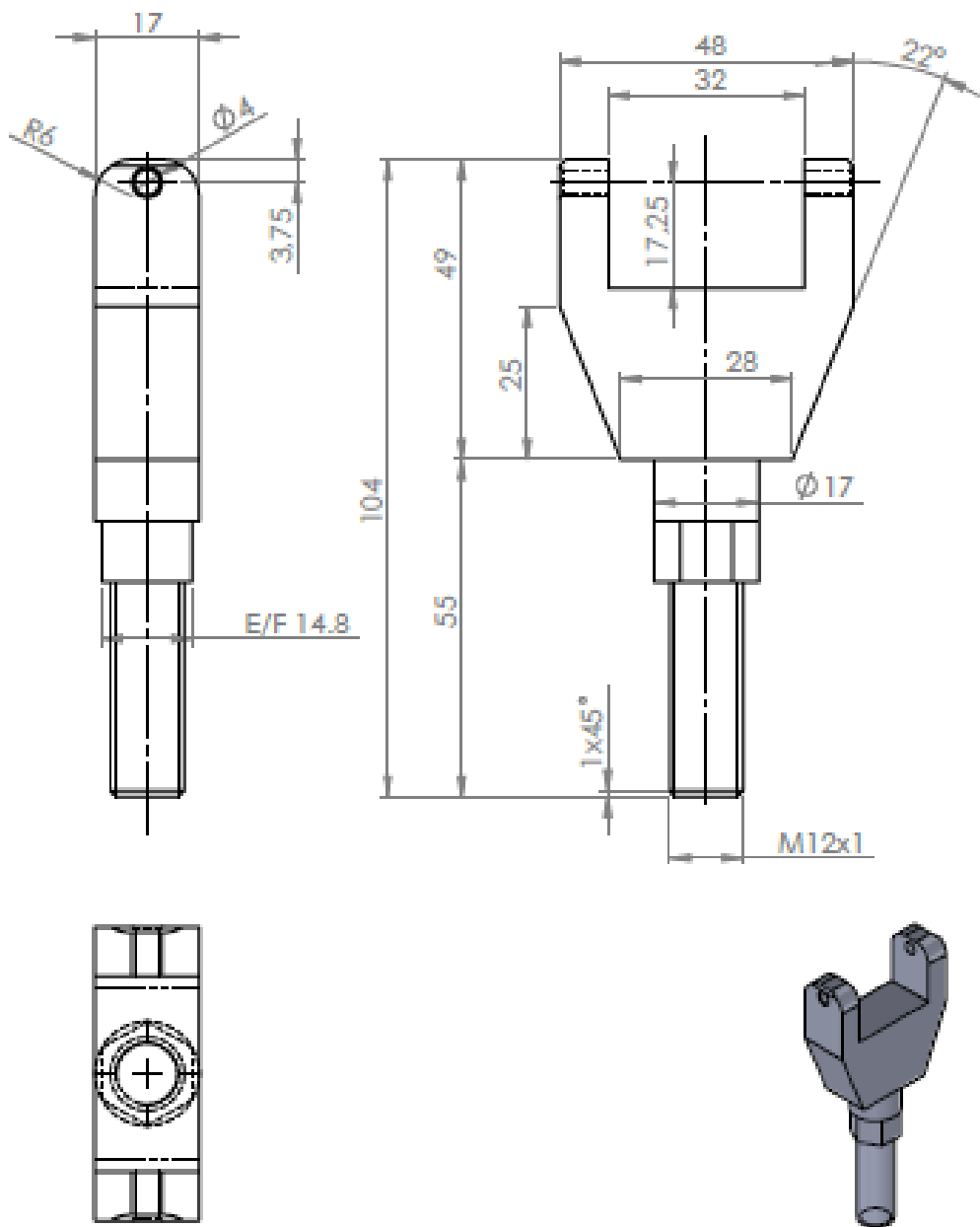


1 AL 1060

Peca Nº	Designação		Quant.	Material	Peso	OBS.	
Mat.		DATA	Rubrica		FIRMA		
Cor.		Des.					
Peso		Copiou					
Fornec.		Verif.					
COTAS SEM TOLERANCIA DIN 7168		Esc.	<p>SISTEMA MMB Suporte do rolete - parte móvel</p>				Desenho Nº
0 - 6	±0.2						
6 - 30	±0.5						
30 - 100	±0.8						
100 - 300	±1.2						
300 - 1000	±2.0						
TRAT. TERMICO	Nº do conj.						
ARQUIVO PD						Substituído:	
ARQUIVO						Substituído:	



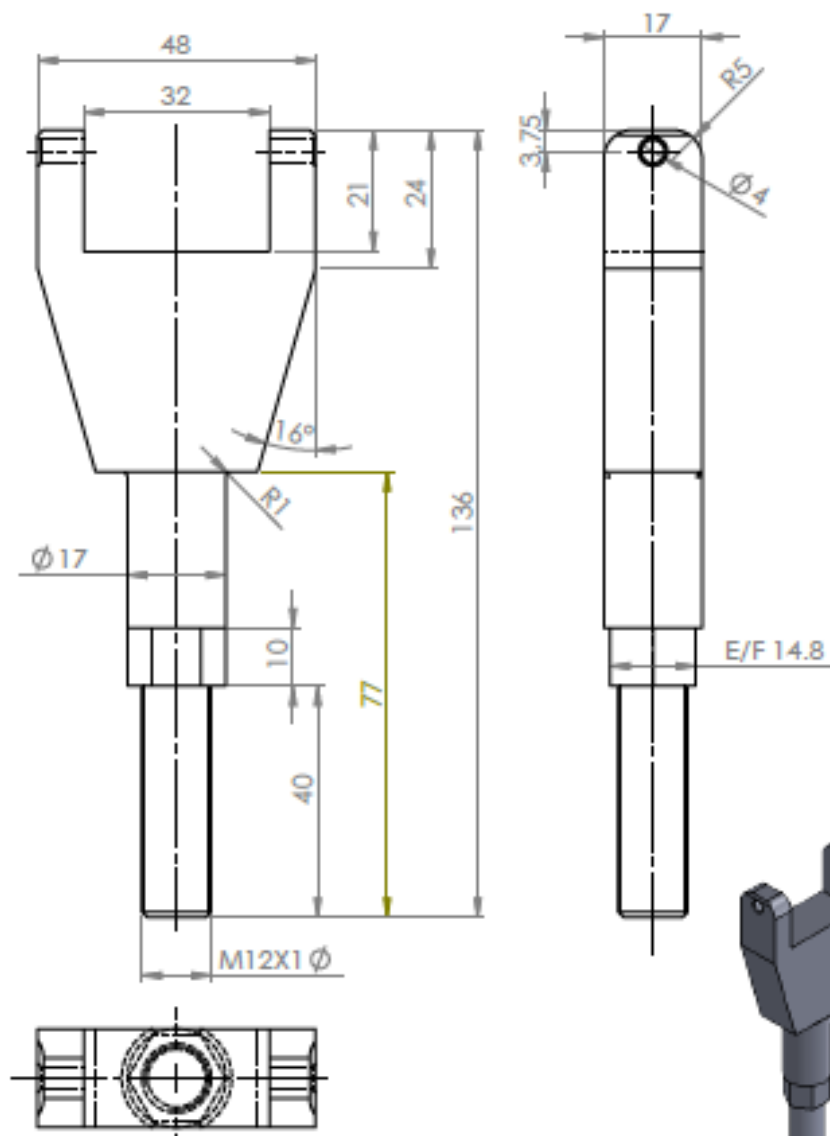
DRAWN				
User	13/07/2019			
CHECKED				
QA		TITLE		
MFG		Sistema MMB - Casquilho centrador		
APPROVED		2 peças Inox AISI 301		
		SIZE	DWG NO	REV
		A4	Casquilho centrador	
		SCALE	2 : 1	SHEET 1 OF 1



1 AL 1060

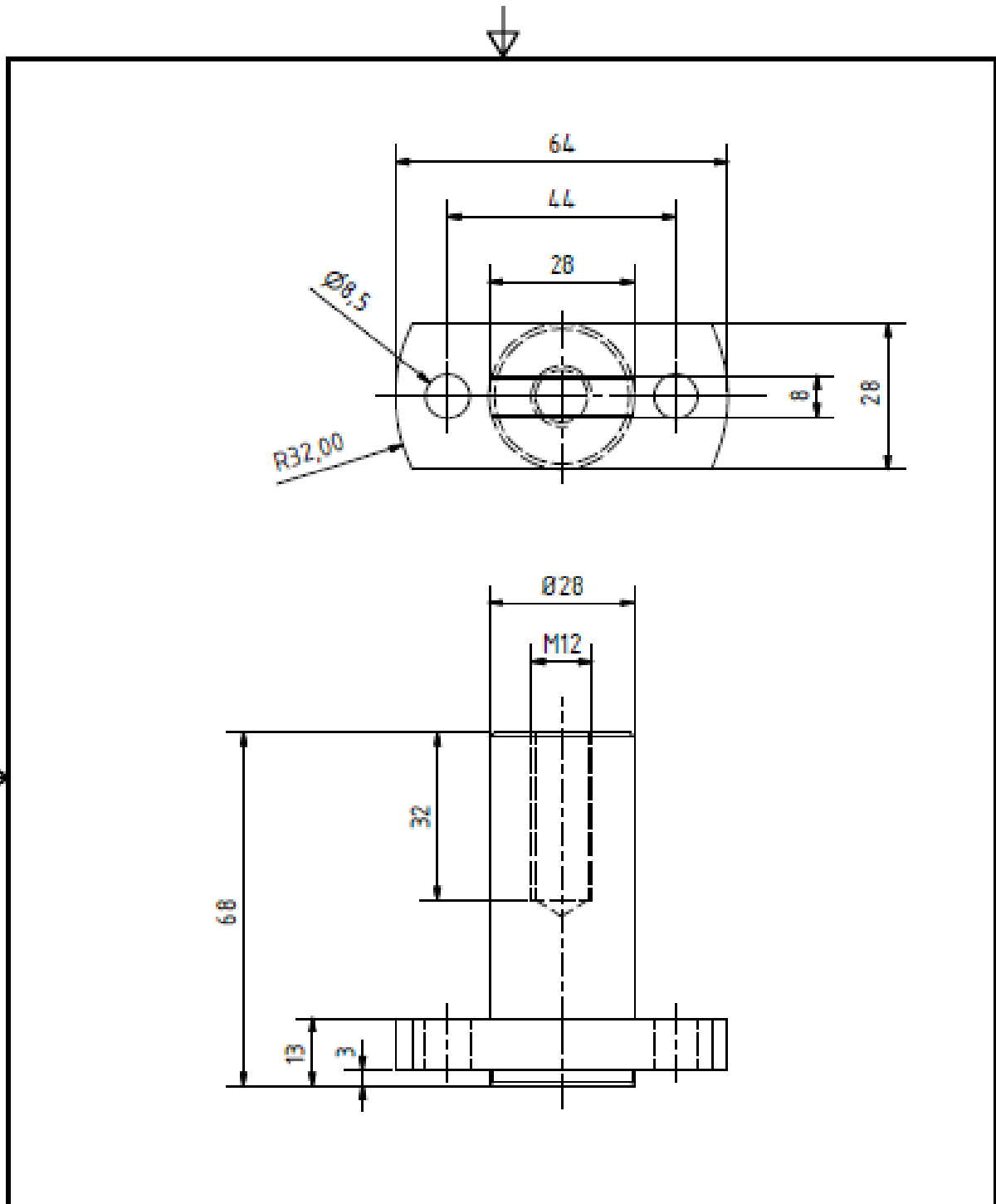
Part. N°	Designação	Quant.	Material	Parte	Obs.
Rev.	DATA	Elabor.			
Car.	Des.	20-04-2019			
Parte	Capit.				
Formas.	Verif.				
COTAS SEM TOLERANCIA DIN 7169		Esc. 1:1  <b>SISTEMA MMB</b> <b>Fixador do provete móvel</b>	Desenho N°		
0 - 5	±0,1				
6 - 30	±0,2				
30 - 100	±0,3				
100 - 300	±0,4				
300 - 1000	±0,5				
Atm. coberta	N° de man.	Substituído			
ARLINDO PC.		Substituído			
ARLINDO					



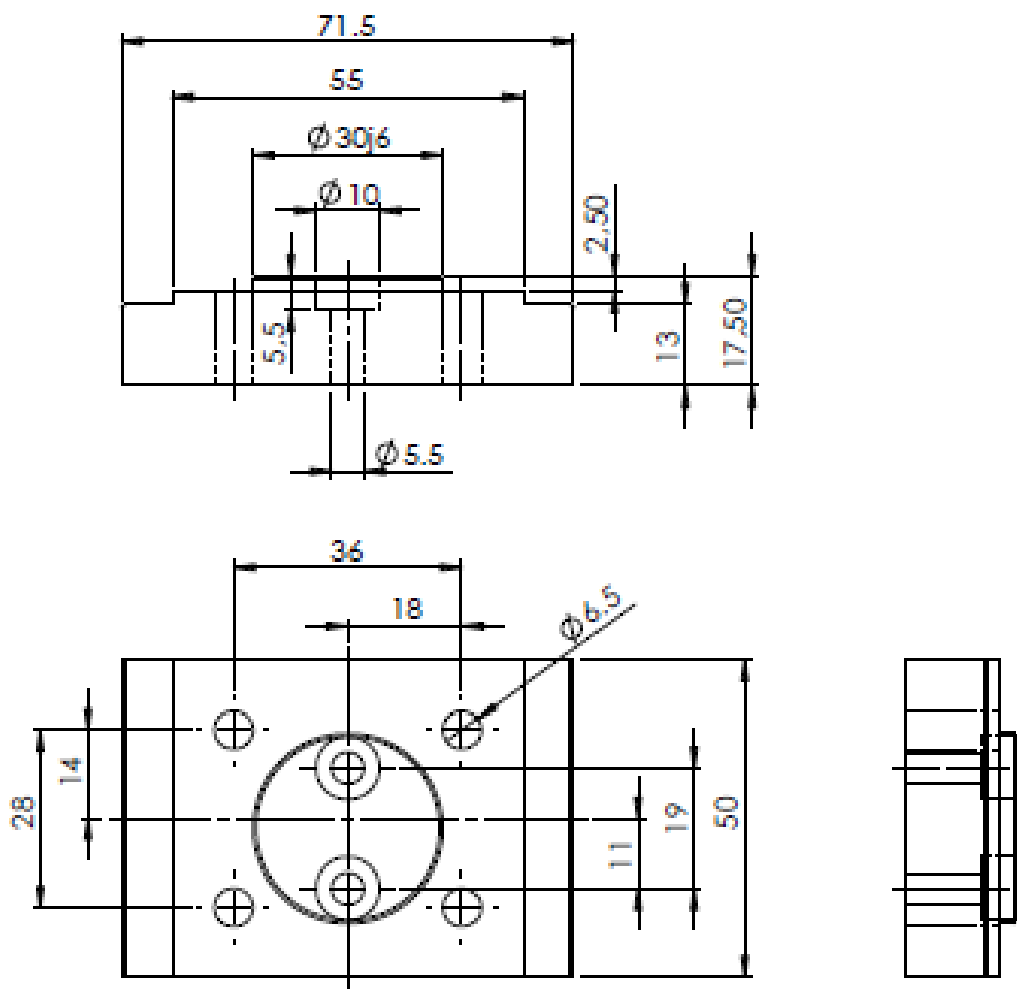


1 AI 1060

Peça Nº	Designação	Quant.	Material	Peça	Obs.	
Aut.	DATA	Rubrica	FIRMA			
Des.	Des.	26-11-2018				
Peça	Capiteu					
Ferrão	Verif.					
COTAS SEM TOLERANCIA DIN 7169		Escala	1:1	Sistema MMB Fixador provete fixo		Desenho Nº
0 - 6	±0,1					
6 - 30	±0,2					
30 - 100	±0,3					
100 - 300	±0,4					
300 - 1000	±0,5					
Verif. Verifica	Nº de					
ARQUIVO PG.	manj.					
ARQUIVO						
Substituído						
Substituído de						



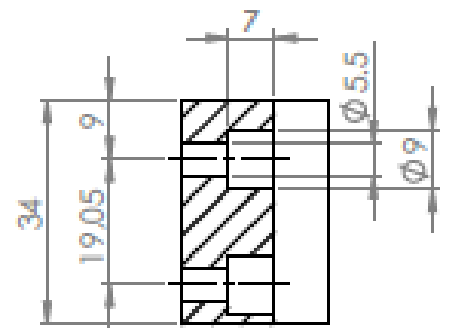
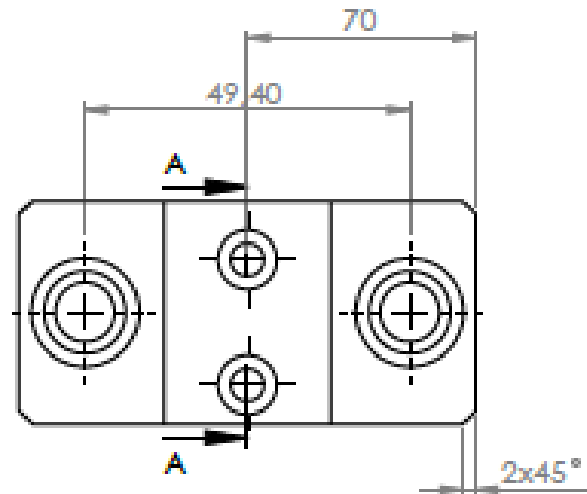
				Date	Name	1 Peça - Alumínio AL1060		
				Drawn	19/08/2019			User
				Checked				
				Standard				
						Corredixa do provete fixo		
						AA		
State	Change	Date	Name					



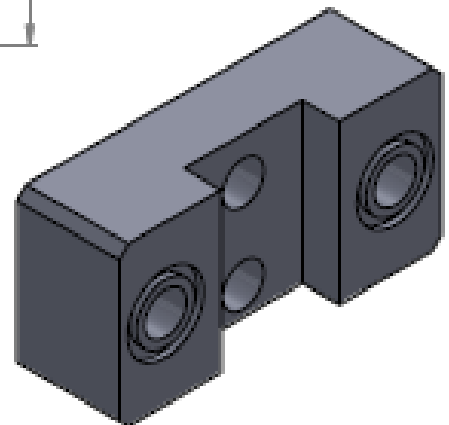
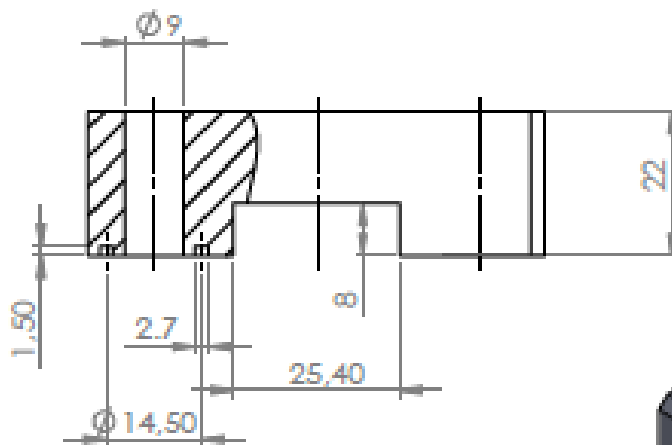
1 Al 1060

Phase Nº	Designação		Quant.	Material	Phase	Obs.
Rev.0		DATA	Revisões	F10004		
Exec.	Des.	28-10-2007				
Phase	Execucao					
Phase	Verif.					
COTAS COM TOLERANCIA SEM TIPO		Esc. 1:1	Sistema MMB Barra de aperto da célula			Desenho Nº
0 - 4	±0,05					
4 - 30	±0,1					
30 - 120	±0,2					
120 - 300	±0,3					
300 - 1000	±0,5					
TÍTULOS		Nº de cont.				
ARQUIVO PC: Drawing2						
ARQUIVO:						
						SubeC1/Col:
						SubeC1/Col:de

mod. DT-0100



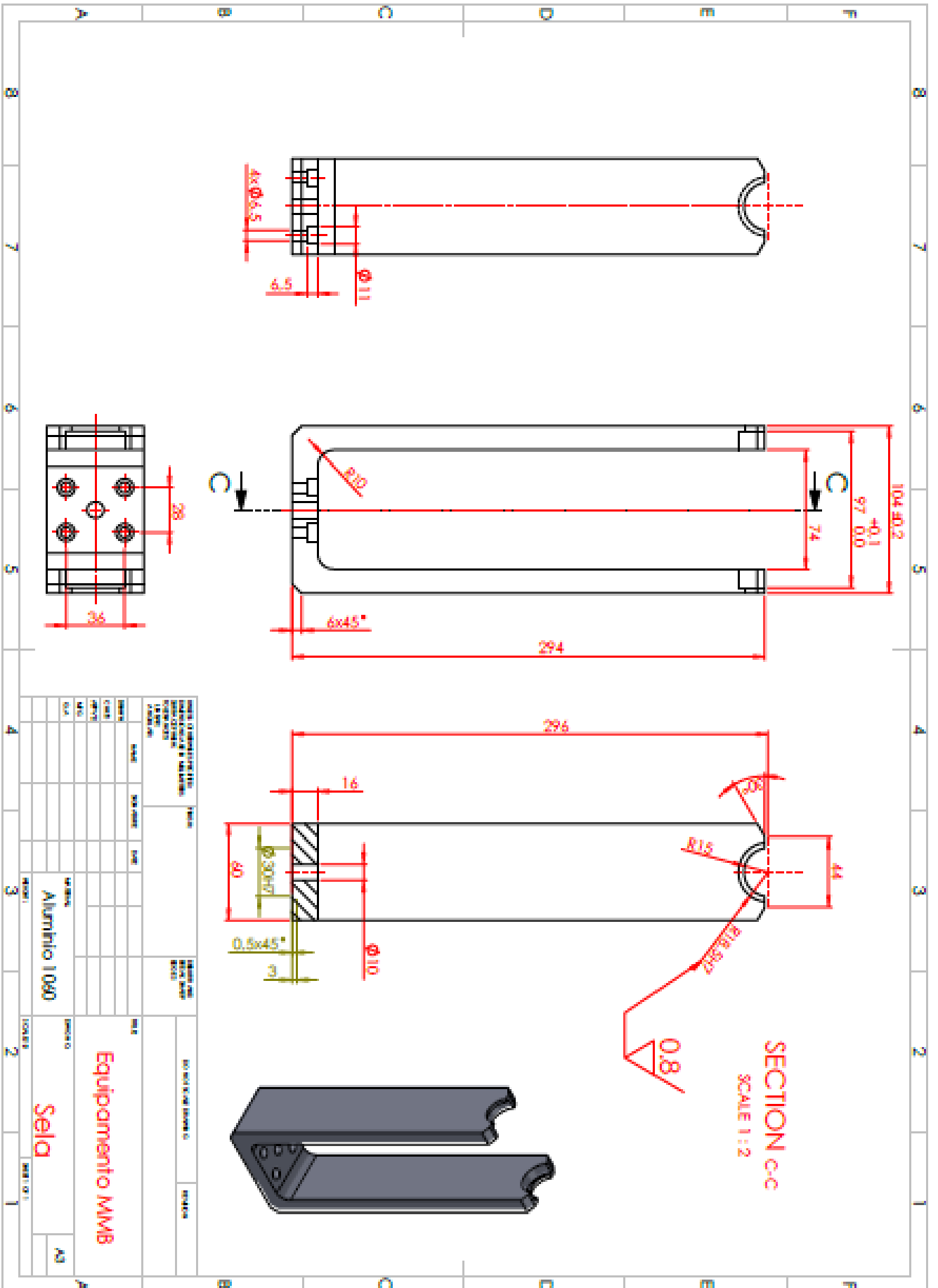
SECTION A-A



1 AISI 304

Part. Nº	Designación	Quant.	Material	Partes	Obs.		
H.C.	DATA	Revisión	FIRMA				
Car.	Des.						
Partes	Capitulos						
Ferramentas	Verif.						
COTAS SEM TOLERANCIA DIN 7182		Escala 1:1	SISTEMA MMB Fixador da célula		Desenho Nº		
0 - 5	±0.1						
6 - 30	±0.15						
30 - 100	±0.2						
100 - 300	±0.3						
300 - 1000	±0.5						
ARQUIVO PC: Drawing3		Nº de manj.			Substituído		
ARQUIVO					Substituído		







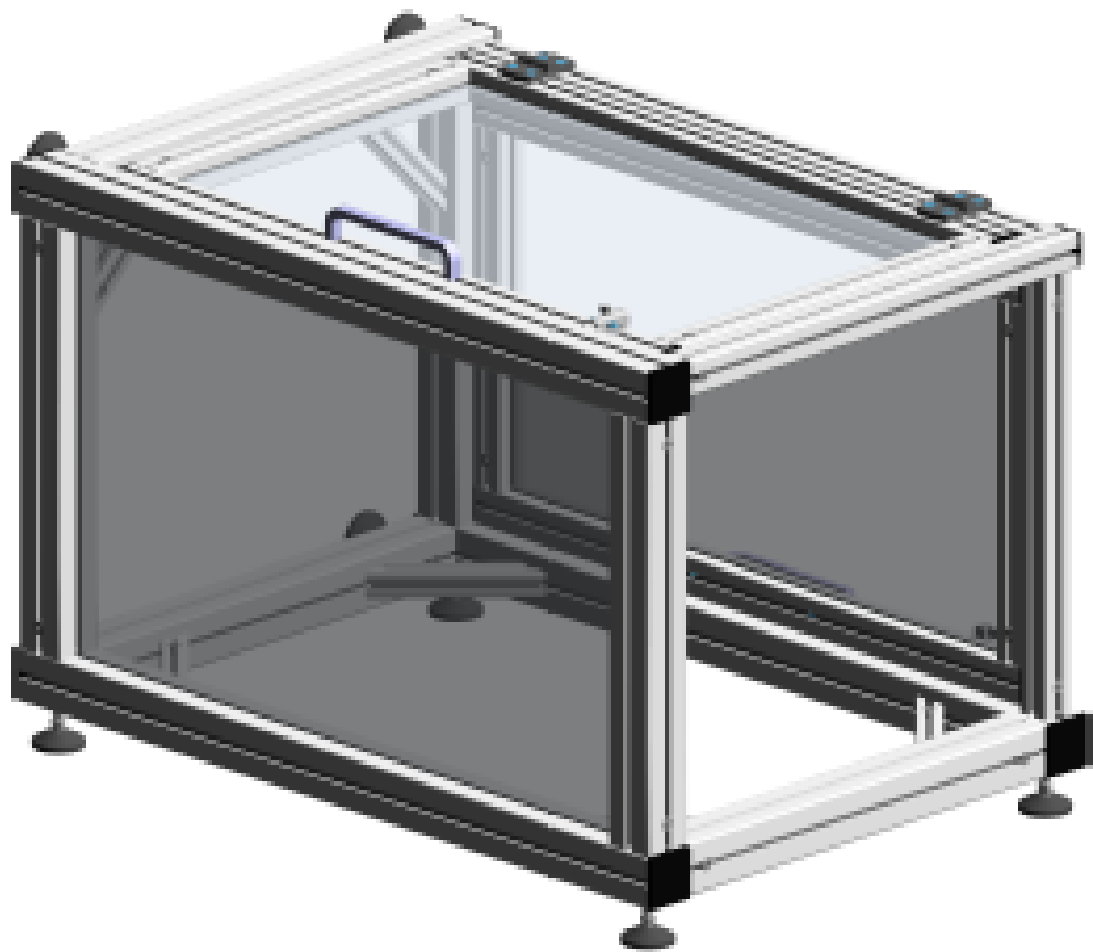
Design Title : Unknown  
Customer Name :  
Date : 2019-07-14

Construction documentation



## Isometric view

Some accessories may not be shown





light				
<p>core hole Ø12.0 for thread M14</p>				
Description		Profile 60×60, 2E, LP	Profile 60×60, 4E, LP	
bar, 6 m		1.11.060060.23LP.60	1.11.060060.43LP.60	
packing unit (number)		1.11.060060.23LP.61 (6)	1.11.060060.43LP.61 (6)	
moment of inertia	cm <sup>4</sup>	$I_x = 35.1$ $I_y = 37.7$	$I_x = 35.5$ $I_y = 35.5$	
moment of resistance	cm <sup>3</sup>	$W_x = 11.7$ $W_y = 12.5$	$W_x = 11.7$ $W_y = 11.7$	
weight	kg/m	G = 2.9	G = 2.7	

Design Title : Unknown  
 Customer Name :  
 Date : 2019-07-14

Construction documentation  
 by **MayTec**

## Assembly hints

ACCESSORY	1.32.4EM6	T-Nut for subsequent insertion, w. spring E, M6
<p>Fixing with leaf spring</p>		<p>Diese Nutensteine lassen sich leicht in zusammengebaute Rahmen einsetzen</p>
<p>Insert front-sided and rotate</p>		
<p><b>Application</b>                  Fastening element for screw-type connections</p>		
<p><b>Technical data</b>                  Design steel:                  • material: steel                  • surface: galvanised                  Design stainless:                  • material: stainless steel 1.4305                  • surface: pickled and passivated                  max. moment of torque: <math>M_{a, max}</math></p>		

## GUIA LINAR

**Célula**



**Model 1040/1041**

Tedea-Huntleigh

**Low Capacity Single-Point Aluminum Load Cells**



Low Capacity Single-Point Aluminum Load Cells

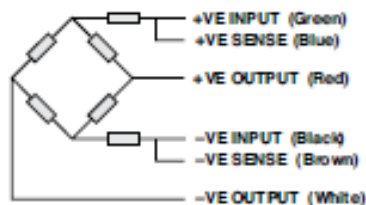
SPECIFICATIONS				
PARAMETER	VALUE			UNIT
NTEP/OIML accuracy class	NTEP	Non-Approved	C3*	
Maximum no. of intervals (n)	5000 single	1000	3000	
Rated capacity—R.C. ( $E_{max}$ )	5, 7, 10, 15, 20, 30, 50, 75, 100			kg
Rated output—R.O.	2.0			mV/V
Rated output tolerance	0.2			±mV/V
Zero balance	0.2			±mV/V
Zero return, 30 min.	0.0330	0.0300	0.0170	±% of applied load
Total error	0.0200	0.0500	0.0200	±% of rated output
Temperature effect on zero	0.0023	0.0100	0.0023	±% of rated output/°C
$Y = E_{max}/V_{min}$	6000	1400	6000	Maximum available 10000
Temperature effect on output	0.0010	0.0030	0.0010	±% of applied load/°C
Eccentric loading error	0.0049	0.0074	0.0049	±% of rated load/cm
Temp. range, compensated	-10 to +40			°C
Temp. range, safe	-20 to +70			°C
Maximum safe central overload	150			% of R.C.
Ultimate central overload	300			% of R.C.
Excitation, recommended	10			VDC or VAC RMS
Excitation, maximum	15			VDC or VAC RMS
Input Impedance	415±15			Ω
Output Impedance	350±3			Ω
Insulation resistance	>2000			MΩ
Cable length	1040: 1.0	1041: 0.5		m
Cable type	6 wire, PVC, single floating screen			Standard
Construction	Plated (anodized) aluminum 1040 aluminum—1041			
Environmental protection	IP65**			
Platform size (max)	400 x 400			mm
Recommended torque	Up to 30 kg: 7.0 50 kg and up: 10.0			N*m

\* 50% utilization. Other utilization factors available upon request.

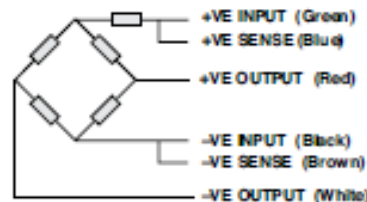
\*\* Available also in IP67

All specifications are subject to change without notice.

Wiring Schematic Diagram  
(1040 Balanced bridge configuration)



Wiring Schematic Diagram  
(1041 Unbalanced bridge configuration)



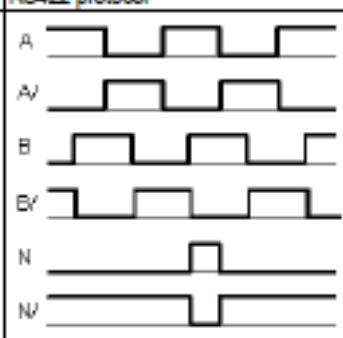
Motor de passo



# stepper motor MOT-AN-S . . .



part number (not configurable, only for illustration)													
MOT	AN - S - 060 - 020 - 056 - M - A - AAAA												
	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">specifics</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>AAAA</td> <td>standard</td> </tr> <tr> <td>AAAC</td> <td>incremental encoder</td> </tr> <tr> <td>AAAD</td> <td>incremental encoder and brake</td> </tr> </tbody> </table>	specifics		AAAA	standard	AAAC	incremental encoder	AAAD	incremental encoder and brake				
specifics													
AAAA	standard												
AAAC	incremental encoder												
AAAD	incremental encoder and brake												
	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">options</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A</td> <td>without</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>encoder</td> </tr> <tr> <td>D</td> <td>encoder and brake</td> </tr> </tbody> </table>	options		A	without	C	encoder	D	encoder and brake				
options													
A	without												
C	encoder												
D	encoder and brake												
	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">motor connection</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>M</td> <td>metric plug</td> </tr> <tr> <td>L</td> <td>stranded wire</td> </tr> </tbody> </table>	motor connection		M	metric plug	L	stranded wire						
motor connection													
M	metric plug												
L	stranded wire												
	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">flange dimension</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>028</td> <td>28mm (NEMA11)</td> </tr> <tr> <td>042</td> <td>42mm (NEMA17)</td> </tr> <tr> <td>056</td> <td>56mm (NEMA23)</td> </tr> <tr> <td>060</td> <td>60mm (NEMA23XL)</td> </tr> <tr> <td>086</td> <td>86mm (NEMA34)</td> </tr> </tbody> </table>	flange dimension		028	28mm (NEMA11)	042	42mm (NEMA17)	056	56mm (NEMA23)	060	60mm (NEMA23XL)	086	86mm (NEMA34)
flange dimension													
028	28mm (NEMA11)												
042	42mm (NEMA17)												
056	56mm (NEMA23)												
060	60mm (NEMA23XL)												
086	86mm (NEMA34)												
	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">holding torque</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>001</td> <td>0,1Nm</td> </tr> <tr> <td>005</td> <td>0,5Nm</td> </tr> <tr> <td>020</td> <td>2,0Nm</td> </tr> <tr> <td>035</td> <td>3,5Nm</td> </tr> <tr> <td>059</td> <td>5,9Nm</td> </tr> </tbody> </table>	holding torque		001	0,1Nm	005	0,5Nm	020	2,0Nm	035	3,5Nm	059	5,9Nm
holding torque													
001	0,1Nm												
005	0,5Nm												
020	2,0Nm												
035	3,5Nm												
059	5,9Nm												
	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">max voltage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>060</td> <td>60VDC</td> </tr> </tbody> </table>	max voltage		060	60VDC								
max voltage													
060	60VDC												
	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">motor type</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>S</td> <td>stepper motor</td> </tr> </tbody> </table>	motor type		S	stepper motor								
motor type													
S	stepper motor												
	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">type</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>AN</td> <td>version</td> </tr> </tbody> </table>	type		AN	version								
type													
AN	version												
	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">product group</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>MOT</td> <td>motor</td> </tr> </tbody> </table>	product group		MOT	motor								
product group													
MOT	motor												

technical data						
flange dimension		28(NEMA11)	42(NEMA17)	56(NEMA23)	60(NEMA23XL)	66(NEMA34)
motor						
max voltage	[VDC]	60	60	60	60	60
nominal voltage	[VDC]	24-48	24-48	24-48	24-48	24-48
nominal current	[A]	1,0	1,8	4,2	4,2	6,4
holding torque	[Nm]	0,12	0,5	2,0	3,5	5,9
detent torque	[Nm]	0,004	0,022	0,068	0,075	0,210
step angle	[°]	1,8 ±5%	1,8 ±5%	1,8 ±5%	1,8 ±5%	1,8 ±5%
resistance / phase	[Ω]	2,30 ±10%	1,75 ±10%	0,50 ±10%	0,65 ±10%	0,33 ±10%
inductance / phase	[mH]	1,80 ±20%	3,30 ±20%	2,20 ±20%	3,20 ±20%	3,00 ±20%
moment of inertia / rotor	[kgcm <sup>2</sup> ]	0,018	0,082	0,48	0,84	2,70
max. shaft load axial	[N]	7	7	15	15	65
max. shaft load radial	[N]	20	20	52	63	200
encoder						
operating voltage	[VDC]	5				
impulse / turn		500				
zero impulse / Index		yes				
line-driver		RS422 protocol				
signal sequence (motor rotation clockwise)	CW					
brake						
operating voltage	[VDC]	-	24 ±10%	24 ±10%	24 ±10%	24 ±10%
wattage	[W]	-	8	10	10	11
holding torque	[Nm]	-	0,4	1,0	1,0	2,0
moment of inertia	[kgcm <sup>2</sup> ]	-	0,01	0,02	0,02	0,07
operating condition		The brake may closed not till then the motor idleness.				
weight						
stranded wires	[kg]	0,20	0,38	1,04	1,45	-
plug	[kg]	0,25	0,43	1,12	1,56	3,20
encoder	[kg]	0,27	0,45	1,14	1,58	3,30
encoder and brake	[kg]	-	0,58	1,36	1,82	3,60
operating data						
ambient temperature	[°C]	-10 ... +50				
max temperature rise	[°C]	80				
insulation class		B				
humidity (not condensing)	[%]	85				
protection class engine case		IP65 (shaft seal IP52), motor with stranded wires IP40				
CE		EMV guideline				

stepper motor MOT-AN-S . . .



**pin assignment wire motor**  
flange dimension 28,42,56,60(NEMA11,17,23,23XL)

**pin assignment M12 motor**  
flange dimension 42,56,60(NEMA17,23,23XL)



motor bipolar			motor cable
JST XHP-4			wires / cable
pin	signal	phase	color
1	A	1	white
2	A'		brown
3	B	2	blue
4	B'		black

\* wire length 300mm

motor bipolar			motor cable
M12 5-pole			M12 5-pole
pin	signal	phase	color
1	A'	1	brown
2	A		white
3	B	2	blue
4	B'		black
5	PE		green/yellow
housing	shielding		-

**pin assignment M17 motor**  
flange dimension 86(NEMA34)



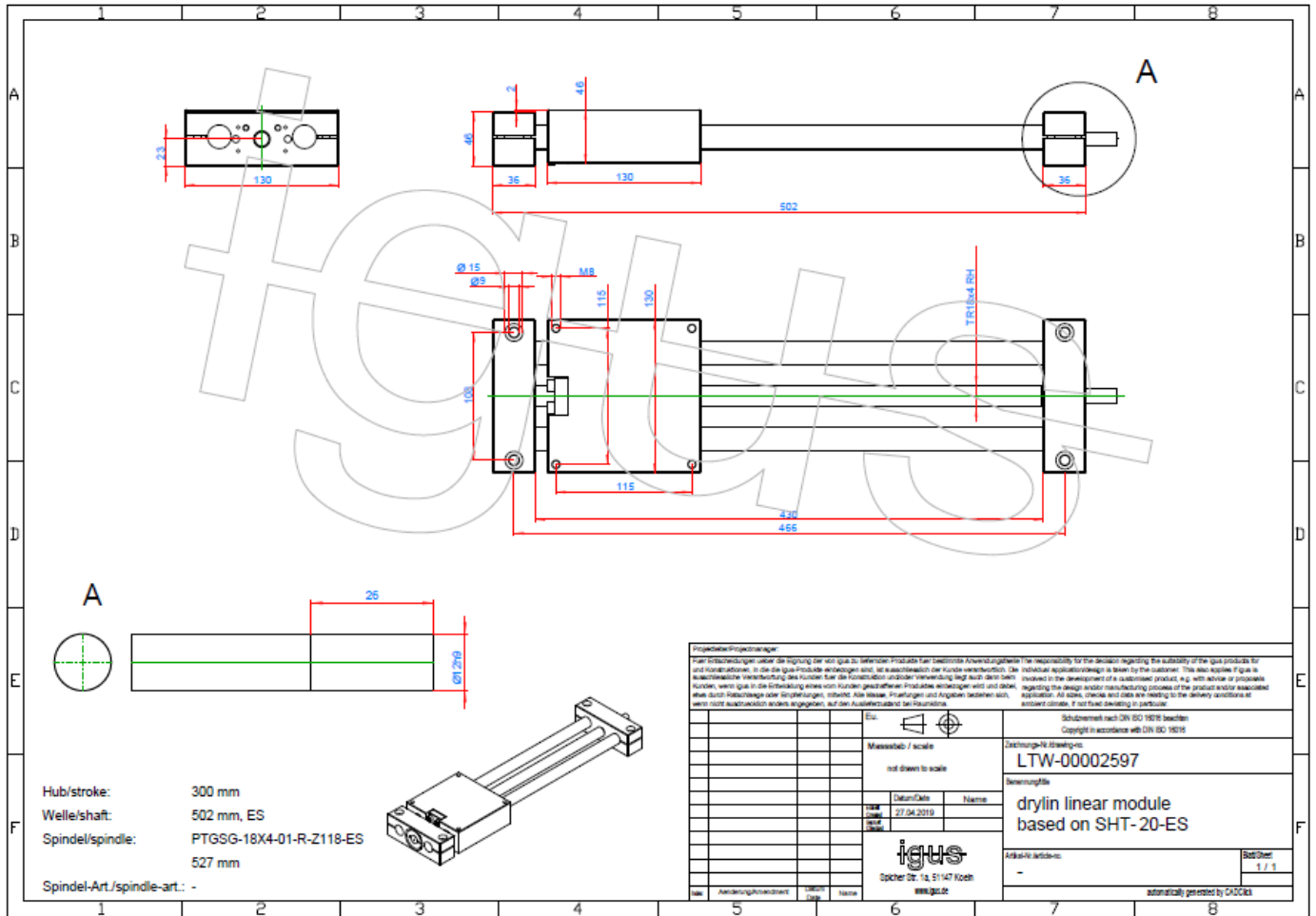
motor bipolar			motor cable
M17 7-pole			M17 7-pole
pin	signal	phase	number
1	A'	1	1
2	A		2
3	B	2	3
4	B'		4
5	brake 24V		5
6	brake 0V		6
7	PE		green/yellow
housing	shielding		shielding

**pin assignmen brake**  
flange dimension 42,56,60(NEMA17,23,23XL)



brake		brake cable
M8 3-pole		M8 3-pole
pin	signal	color
1	brake (24V)	brown
3	0V	blue
4	-	black





Hub/stroke: 300 mm  
 Welle/shaft: 502 mm, ES  
 Spindel/spindle: PTGSG-18X4-01-R-Z118-ES  
 527 mm  
 Spindel-Art/spindle-art.: -

**Projektziele/Project manager:**  
 Für Anforderungen außer der Haftung der igus ist zu betonen Produkte für bestimmte Anwendungswesen. The responsibility for the decision regarding the suitability of the igus products for and non-applicable, it is the customer's responsibility. The individual application design is based on the customer. This also applies to the customer's responsibility for the construction and/or application of the product, e.g. with advice or proposals. igus is not liable for the design and/or manufacturing process of the product and/or associated application. All costs, checks and data are valid to the delivery conditions at all times unless otherwise stated in the order form. If not fixed, drawing is preferred.

Schienenmaß nach DIN ISO 16218 beachten  
 Copyright in accordance with DIN ISO 16218

Measures / scale: not drawn to scale  
 Datum/Date: 27.04.2019  
 Name: [blank]  
 igus  
 Gocher Str. 18, 51147 Köln  
 www.igus.de

Zeichnungs-Nr./Drawing: LTW-00002597  
 Bezeichnung/n: drylin linear module based on SHT-20-ES  
 Artikel/Article: -  
 Blatt/Sheet: 1 / 1  
 automatically generated by CAD/CAM