



## **Projeto e fabrico de ferramentas para ensaio de adesivos e juntas adesivas**

**JOSÉ GUILHERME FALCÃO PEREIRA BARBOSA**

julho de 2024

**Projeto e fabrico de ferramentas para ensaio de  
adesivos e juntas adesivas**

**José Guilherme Falcão Pereira Barbosa**

**Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Mecânica, Área de Especialização em  
Construções Mecânicas**

**Orientador: Arnaldo Manuel Guedes Pinto**

**Júri:**

Presidente:

Professor Doutor António Gonçalves Magalhães, Professor Coordenador, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Vogais:

Professor Doutor Eduardo André de Sousa Marques, Professor Associado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Professor Doutor Arnaldo Manuel Guedes Pinto, Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Porto, junho 2024



## **Agradecimentos**

Ao Professor Arnaldo Manuel Guedes Pinto, orientador desta dissertação, que proporcionou uma elevada e importante ajuda e tempo no decorrer deste relatório.

Ao Professor Paulo Jorge Roque de Oliveira Nóvoa, coorientador desta dissertação, que contribuiu com uma disponibilidade e ajuda indispensável, nomeadamente, no fabrico dos provetes e realização dos ensaios experimentais bem como na análise dos resultados obtidos.

Ao Professor Rui Manuel Fazenda da Silva, coorientador desta dissertação, que contribuiu com uma ajuda e tempo indispensável no desenvolvimento, desenho e fabrico de todas as ferramentas necessárias para os ensaios de juntas topo a topo e de rolete flutuante. De salientar que todas as ferramentas que permitiram a realização da parte experimental do trabalho foram fornecidas a custo zero pela empresa em que o Professor Rui Fazenda é o Diretor Geral (Gislotica – Projecto e Fabrico de Soluções Mecânicas, Lda). O seu contributo, conhecimento e disponibilidade foram essenciais para a realização deste trabalho.

À minha família e amigos que sempre me apoiaram e incentivaram ao longo do meu percurso académico.



## Resumo

Este trabalho insere-se no âmbito das ligações adesivas que, apesar de ser um processo de ligação utilizado há milhares de anos, tem sofrido nos últimos tempos um grande incremento na sua aplicação nas mais diversas indústrias. Tal deve-se ao desenvolvimento de novos adesivos e às vantagens associadas a este processo de ligação como, por exemplo, melhor distribuição de tensões, resistência à fadiga, capacidade de ligar materiais similares e dissimilares, resistência à corrosão, não danifica nem provoca alterações estruturais dos substratos e permite uma redução do peso das estruturas. Esta dissertação desenvolveu-se no Instituto Superior de Engenharia do Porto e teve como principal objetivo dotar o Laboratório de Ensaios Tecnológicos das ferramentas necessárias para a realização de ensaios de arrancamento por rolete flutuante e ensaios de tração de juntas topo a topo. Numa primeira fase do trabalho foi realizado um breve estudo sobre as ligações adesivas e depois centrou-se no desenvolvimento das referidas ferramentas. A ferramenta para o ensaio de rolete flutuante está de acordo com a norma **ASTM D3167**. Para o fabrico das juntas topo a topo optou-se por desenvolver uma ferramenta original e, portanto, diferente da ferramenta frequentemente utilizada e que é proposta na norma **ASTM D2095**. Esta ferramenta é necessária para garantir o alinhamento dos substratos e regular a espessura do adesivo. Além disso, foi também necessário desenvolver um dispositivo para fixar e tracionar a junta topo a topo na máquina de tração. Para validar o funcionamento das ferramentas foram realizados os respetivos ensaios de arrancamento e de tração, utilizando três adesivos com diferentes valores de rigidez, ductilidade e resistência mecânica. Dois dos adesivos são de epóxido (Araldite® AV138 e Araldite® 420A/B) e o outro é de poliuretano (SikaForce® 710). A execução dos ensaios e as propriedades avaliadas permitiram constatar o correto funcionamento das ferramentas desenvolvidas e fabricadas no âmbito deste trabalho.

**PALAVRAS-CHAVE:** Ligação adesiva, Ensaio de rolete flutuante, Ensaio de tração de juntas topo a topo, Propriedades mecânicas dos adesivos, Modos de rotura



## Abstract

This work inserts into the scope of adhesive bonds that, despite being a bonding process used for thousands of years, has suffered in recent times a large increase in its applications in the most diverse industries. This is due to the development of new adhesives and associated advantages with this bonding process such as, for example, better stress distribution, fatigue resistance, capacity to bond similar and dissimilar materials, corrosion resistance, does not damage or cause structural changes of the substrates and allows weight reduction of structures. This dissertation was developed at the Instituto Superior de Engenharia do Porto and its main objective was to provide the Technological Testing Laboratory with the necessary tools to realize floating roller peel tests and tensile tests of butt-joints.

In the first phase of the work, a brief study was done about adhesive connections and then focused on the development of these tools. The floating roller tool complies with the **ASTM D3167** standard. The manufacture of butt-joints, it was decided to develop an original tool and, therefore, different from the frequently used tool proposed in the **ASTM D2095** standard. This tool is necessary to ensure substrate alignment and regulate adhesive thickness. Furthermore, it was also necessary to develop a device to fix and pull the butt-joint on the tensile machine. To validate the performance of the tools, the respective peel and tensile tests were realized, using three adhesives with different values of stiffness, ductility and mechanical resistance. Two of the adhesives are epoxy (Araldite® AV138 and Araldite® 420A/B) and the other is polyurethane (SikaForce® 710). The execution of the tests and the evaluated properties made it possible to verify the correct functioning of the tools developed and manufactured within the scope of this work.

**KEYWORDS:** Adhesive bonding, Floating roller test, Tensile butt joints test, Mechanical properties of adhesives, Failure modes



# Índice

Lista de Figuras.....	xiii
Lista de Tabelas.....	xvii
Acrónimos e Símbolos.....	xix
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Metodologia.....	3
1.4. Estrutura.....	3
2. Revisão Bibliográfica.....	5
2.1. Adesivos e ligações adesivas.....	5
2.1.1. Conceito de junta adesiva.....	5
2.1.2. Vantagens e desvantagens.....	7
2.1.3. Classificação dos adesivos.....	7
2.1.4. Tipos de adesivos estruturais, propriedades e aplicações.....	9
2.1.5. Modos de carregamento.....	11
2.1.6. Modos de rotura.....	12
2.1.7. Preparação superficial.....	13
2.1.8. Tipos de juntas.....	13
2.2. Introdução aos ensaios de adesivos.....	15
2.3. Ensaios à tração.....	15
2.3.1. Tração em provetes maciços.....	15
2.3.2. Tração em juntas topo a topo ( <i>Butt-joint</i> ).....	17
2.4. Ensaios ao corte.....	23
2.4.1. Ensaio de corte em junta de sobreposição simples.....	24
2.4.2. Ensaio Iosipescu V-Notched beam shear method.....	25
2.4.3. Ensaio de borboleta ou <i>Notched plate shear method</i> (Arcan).....	25
2.4.4. Ensaio de junta topo a topo em torção ( <i>Napkin-ring test</i> ).....	26
2.4.5. Ensaio TAST.....	27
2.5. Ensaios de arrancamento.....	27
2.5.1. Ensaio de arrancamento em junta de tipo “T”.....	28
2.5.2. Ensaio de arrancamento a 180°.....	29
2.5.3. Ensaio de rolete flutuante.....	29
2.5.4. Ensaio de Climbing drum test.....	32
2.6. Ensaio de impacto.....	33
2.7. Ensaio de fadiga.....	34
2.8. Ensaios de durabilidade.....	35

2.8.1. Determinação da durabilidade em juntas de sobreposição simples .....	35
2.8.2. Determinação da durabilidade através do ensaio de cunha .....	35
2.8.3. Determinação da durabilidade de juntas de sobreposição simples em tensão .	36
2.8.4. Determinação da durabilidade usando o ensaio <i>Maddison</i> (Junta perfurada) ..	37
2.8.5. Determinação da durabilidade por arrancamento (junta em T) .....	37
2.8.6. Avaliação das condições ambientais no comportamento à fadiga .....	37
2.9. Ensaio de fratura.....	37
2.9.1. Modo I.....	37
2.9.2. Modo II.....	38
2.9.3. Modo misto.....	39
3. Desenho e fabrico das ferramentas.....	41
3.1. Ferramenta para ensaio de rolete flutuante.....	41
3.2. Ferramenta para fabrico de juntas topo a topo.....	43
3.3. Ferramenta para fixação da junta topo a topo à máquina de tração .....	54
4. Ensaio .....	57
4.1. Ensaio de arrancamento de rolete flutuante .....	57
4.1.1. Materiais utilizados.....	57
4.1.2. Dimensões e Geometria das juntas .....	62
4.1.3. Fabrico das juntas .....	63
4.1.4. Ensaio Dureza Shore .....	69
4.1.5. Condições de ensaio .....	72
4.1.6. Resultados.....	73
4.1.7. Discussão de resultados.....	83
4.2. Ensaio de tração com juntas topo a topo.....	83
4.2.1. Materiais utilizados (adesivos e substratos).....	83
4.2.2. Dimensões e Geometria das juntas .....	84
4.2.3. Fabrico das juntas .....	84
4.2.4. Condições de ensaio .....	87
4.2.5. Resultados.....	87
4.2.6. Discussão de resultados.....	91
5. Conclusões e propostas para trabalhos futuros .....	93
5.1. Conclusões.....	93
5.2. Propostas para trabalhos futuros.....	95
Referências.....	97
Anexo A- Ferramenta para ensaio de Rolete flutuante .....	103
Anexo B- Ferramenta para fabrico de juntas topo a topo .....	105
Anexo C- Ferramenta para o ensaio de tração das juntas topo a topo .....	107

Anexo D- Fichas técnicas dos adesivos .....	109
Anexo E- Tabela de custos das ferramentas .....	111



## Lista de Figuras

Figura 1- Junta adesiva [2] .....	5
Figura 2- Junta de sobreposição simples com filete .....	6
Figura 3- Filetes com diferentes geometrias [3] .....	6
Figura 4- Modos de carregamento e respetiva distribuição de tensões [5] .....	11
Figura 5- Modos de rotura em juntas adesivas [5] .....	12
Figura 6- Fabrico de provetes de adesivo maciço utilizando o molde existente no LET .....	15
Figura 7- (a) Proвете de adesivo maciço e (b) respetivas dimensões em mm, adaptado de [10], segundo a norma <b>EN ISO 527</b> [11] .....	15
Figura 8- (a) Proвете fixo nas maxilas da máquina de tração e com extensómetro acoplado e (b) visualização da estufa, adaptado de [10].....	16
Figura 9- Curva Tensão-Deformação do adesivo Araldite® AV138-M, adaptado de [12].....	16
Figura 10- (a) Molde para o fabrico de juntas topo a topo e (b) Geometria do provete (dimensões em mm), adaptado de [15] .....	17
Figura 11- Etapas de fabrico de juntas topo a topo .....	17
Figura 12- Geometria da provete topo a topo, dimensões em mm, adaptado de [12] .....	18
Figura 13- Imagem do molde (a) e representação esquemática do sistema de montagem (b), adaptado de [12].....	18
Figura 14- Ilustração da distribuição de tensões à tração na área colada, adaptado de [12] ...	18
Figura 15- Curvas tensão-deformação típicas do ensaio de tração para diferentes espessuras do adesivo, adaptado de [12] .....	19
Figura 16- Molde com parafuso micrométrico, adaptado de [16] .....	20
Figura 17- Proвете com comprimento variável, adaptado de [16].....	20
Figura 18- Gráfico tensão-deformação do adesivo epóxico Dow DER331 com 13% em peso de catalisador DEH24, adaptado de [16] .....	20
Figura 19- Força máxima (a) e percentagem de rotura coesiva (b) em função da espessura do adesivo e da preparação superficial, adaptado de [16].....	21
Figura 20- Juntas topo a topo sem (a) e com extensómetro (b) e (c), adaptado de [17] .....	21
Figura 21- (a) Dimensões em mm do aderente, (b) molde e (c) ferramenta para carregamento da junta, adaptado de [18] .....	22
Figura 22- Molde utilizado por Mendoza-Navarro et al. para fabrico de juntas topo a topo [19] .....	22
Figura 23- Molde utilizado por Jun Zhang et al. para fabrico de juntas topo a topo, adaptado de [20].....	23
Figura 24- Dimensões (a) e fixação da junta topo a topo (b), adaptado de [20] .....	23
Figura 25- Geometria de um provete segundo a norma <b>ASTM D1002</b> , adaptado de [24].....	24
Figura 26- Deformação diferencial dos aderentes e tensões que atuam na camada de adesivo quando sujeitos a carregamento, adaptado de [25] .....	24
Figura 27- Geometria do provete para o ensaio <i>losipescu</i> segundo a norma <b>ASTM D5379</b> , [26] .....	25
Figura 28- Dimensões do provete para o ensaio Arcan, adaptado de [9] .....	26
Figura 29- Ferramenta para carregamento do provete Arcan, adaptado de [9].....	26

Figura 30- Provete para o ensaio topo a topo em torção, adaptado de [9] .....	26
Figura 31- Provete TAST. (a) extensómetro; (b) dimensões (em mm), adaptado de [9].....	27
Figura 32- Amostra para o teste de arrancamento em junta do tipo "T" segundo a norma <b>ASTM D1876-08</b> , adaptado de [29] .....	28
Figura 33- Ensaio de arrancamento a 180° segundo a norma <b>ISO 8510-2</b> , adaptado de [28] ..	29
Figura 34- Ensaio de rolete flutuante segundo o método da norma <b>ASTM D3167</b> , adaptado de [32].....	30
Figura 35- Dimensões do provete segundo o método da norma <b>ASTM D3167</b> .....	30
Figura 36- (a) Amostras usadas em ensaio de rolete flutuante, (b) execução do teste de arrancamento, (c) Força/deslocamento do ensaio realizado, adaptado de [33] .....	31
Figura 37- Resultados do teste de arrancamento em compósitos com fibras contínuas, adaptado de [33].....	31
Figura 38- (a) Cuvas força-deslocamento. (b) Resistência ao arrancamento em função do tipo de preparação dos substratos e tempo de exposição à névoa salina, adaptado de [34].....	32
Figura 39- Ensaio de <i>climbing</i> de uma estrutura sandwich segundo a norma <b>ASTM D1781</b> [11], adaptado de [39].....	33
Figura 40- Sistema de fixação para ensaios de impacto em juntas adesivas segundo a norma <b>ASTM D950</b> , adaptado de [40].....	33
Figura 41- Amostra para ensaio de fadiga, adaptado de [41].....	34
Figura 42- Ensaio cunha, adaptado de <b>ASTM D3762</b> [43] .....	36
Figura 43- Aparelho teste de durabilidade, adaptado de <b>ASTM 2919</b> [42] .....	36
Figura 44- Amostra aderente plana, adaptado de <b>ASTM D3433-99</b> [46] .....	38
Figura 45- Provete para ensaio TDCB, adaptado de [47] .....	38
Figura 46- Ensaio ENF usando amostra em modo II, adaptado de [48].....	39
Figura 47- Representação de um exemplo de ensaio MMF em modo misto, adaptado de [48] .....	39
Figura 48- Representação de ensaios em modo misto [apontamentos de PROLI (Processos de ligação) Módulo 9- Ensaios de adesivos] .....	40
Figura 49- Desenho de conjunto da ferramenta para o ensaio de rolete flutuante.....	41
Figura 50- Ferramenta Rolete Flutuante parcialmente montada.....	42
Figura 51- Ferramenta Rolete Flutuante montada .....	42
Figura 52- Ferramenta na máquina de tração .....	42
Figura 53- Desenho da ferramenta projetada para o fabrico de juntas topo a topo .....	43
Figura 54- Conjunto base e placa vertical .....	44
Figura 55- Conjunto suporte inferior e superior .....	45
Figura 56- Vista explodida do suporte inferior .....	45
Figura 57- Vista explodida do suporte superior .....	45
Figura 58- Vista de trás do conjunto completo.....	46
Figura 59- Imagens da ferramenta para fabrico de juntas topo a topo.....	47
Figura 60- Etapas de fabrico de juntas topo a topo utilizando a ferramenta desenvolvida.....	49
Figura 61- Parafusos como batentes.....	50
Figura 62- Barra de aço como batente.....	50
Figura 63- Alinhamento dos substratos e folga entre eles .....	50

Figura 64- Reservatório em silicone colocado no substrato inferior .....	51
Figura 65- Substratos para juntas topo a topo .....	52
Figura 66- Representação da ferramenta para fixação da junta topo a topo à máquina de tração .....	54
Figura 67- Peças da ferramenta para fixação das juntas topo a topo .....	55
Figura 68- Ferramenta para a realização dos ensaios de juntas topo a topo fixa na máquina de tração .....	55
Figura 69- Orientação dos eixos dos furos existentes nos substratos da junta topo a topo .....	55
Figura 70- Resistência ao corte de diferentes juntas metálicas, adaptado de [54] .....	58
Figura 71- Resistência ao corte de diferentes juntas metálicas, adaptado de [57] .....	59
Figura 72- Geometria do conjunto provete rígido e flexível (dimensões em mm) .....	62
Figura 73- Corte dos substratos flexíveis numa guilhotina (LTM) .....	63
Figura 74- Limas usadas (LABF) .....	63
Figura 75- Esmeril METABO (LABF) .....	63
Figura 76- Granalhagem dos substratos .....	64
Figura 77- Substratos a) rígidos; b) flexíveis após granalhagem .....	64
Figura 78- Desbaste no esmeril METABO (LABF) .....	64
Figura 79- Lixagem com uma lixa P500 .....	64
Figura 80- Limpeza superficial .....	65
Figura 81- Vista geral da mesa de trabalho utilizada o fabrico das juntas de arrancamento .....	65
Figura 82- Processo de fabrico das juntas de arrancamento .....	66
Figura 83- Fios de cobre usados para calibrar a espessura do adesivo .....	66
Figura 84- Juntas para a 1ª série .....	67
Figura 85- Juntas para a 2ª série .....	67
Figura 86- Durómetro Shore Hildebrand (LET) .....	69
Figura 87- Amostras para o ensaio de dureza Shore .....	69
Figura 88- Máquina de ensaios Shimadzu AG-I 10 kN (LET) .....	72
Figura 89- Ferramenta 1 de rolete flutuante .....	72
Figura 90- Ferramenta 2 de rolete flutuante .....	72
Figura 91- Junta de arrancamento colocada na máquina de ensaios .....	72
Figura 92- Força/deslocamento dos provetes Araldite® 420 A/B (1ª série) .....	74
Figura 93- Resistência ao arrancamento dos provetes Araldite® 420 A/B (1ª série) .....	74
Figura 94- Força/deslocamento dos provetes AV138 (1ª série) .....	75
Figura 95- Resistência ao arrancamento dos provetes AV138 (1ª série) .....	75
Figura 96- Força/deslocamento dos provetes SikaForce® 710 .....	76
Figura 97- Resistência ao arrancamento dos provetes SikaForce® 710 .....	76
Figura 98- Superfície de rotura dos provetes com diferentes adesivos após o ensaio de arrancamento (1ª série) .....	77
Figura 99- Força/ deslocamento dos provetes Araldite® 420 A/B (2ª série) .....	79
Figura 100- Resistência ao arrancamento dos provetes Araldite® 420 A/B (2ª série) .....	79
Figura 101- Força/deslocamento dos provetes Araldite® AV138 (2ª série) .....	80
Figura 102- Resistência ao arrancamento dos provetes Araldite® AV138 (2ª série) .....	80
Figura 103- Força/deslocamento dos provetes SikaForce® 710 (2ª série) .....	81

Figura 104- Resistência ao arrancamento dos provetes SikaForce® 710 (2ª série).....	81
Figura 105- Superfície de fratura dos provetes (2ª série) após o arrancamento .....	81
Figura 106- Resistência ao arrancamento dos diferentes adesivos (1ª série) .....	82
Figura 107- Resistência ao arrancamento dos diferentes adesivos (2ª série) .....	82
Figura 108- Junta topo a topo .....	84
Figura 109- Aspeto final das juntas na ferramenta.....	85
Figura 110- Juntas topo a topo após limpeza do excesso do adesivo .....	85
Figura 111- Microscópio <i>Olympus SZ1145TR</i> (LMET) .....	86
Figura 112- Espessura observada no provete 1 SKF 710 .....	86
Figura 113- Variação da espessura do adesivo Araldite® AV138.....	86
Figura 114- Variação da espessura do adesivo Araldite® 420 A/B .....	86
Figura 115- Variação da espessura do adesivo SikaForce® 710.....	86
Figura 116- Máquina Shimadzu AGI 10 kN (LET).....	87
Figura 117- Força/deslocamento dos provetes Araldite® AV138 .....	89
Figura 118- Força/deslocamento dos provetes Araldite® 420 A/B.....	89
Figura 119- Força/deslocamento dos provetes SKF 710.....	89
Figura 120- Comparação dos valores de tensão de rotura .....	90
Figura 121- Provetes topo a topo após o ensaio de tração .....	90

## Lista de Tabelas

Tabela 1- Comparação qualitativa dos diferentes adesivos [2] .....	8
Tabela 2- Adesivos estruturais e as suas propriedades (adaptado de [4]) .....	9
Tabela 3- Alguns tipos de juntas adesivas.....	14
Tabela 4- Propriedades à tração para diferentes espessuras de adesivo, adaptado de [12] ....	19
Tabela 5- Composição química do aço CK45 [49] .....	52
Tabela 6- Composição química do aço inoxidável AISI 304 [51] .....	53
Tabela 7- Composição química da liga AW 6082-T6 [53].....	53
Tabela 8- Lista de peças da ferramenta para fixação das juntas topo a topo à máquina de tração .....	54
Tabela 9- Características do adesivo Araldite® AV138-M1/HV998-1 [54] .....	58
Tabela 10- Características do adesivo Araldite® 420 A/B [57].....	59
Tabela 11- Características do adesivo SikaForce® 710 L100 [58] .....	60
Tabela 12- Propriedades das ligas de alumínio AW 1050 e AW 6082 [60] [61].....	61
Tabela 13- Composição química da liga EN AW 1050 [60] .....	61
Tabela 14- Dimensões nominais dos substratos usados nos ensaios de arrancamento .....	62
Tabela 15- Especificações da guilhotina para o corte de substratos .....	63
Tabela 16- Dimensões dos provetes da 1ª série (granalhagem) .....	67
Tabela 17- Dimensões dos provetes da 2ª série (lixagem) .....	68
Tabela 18- Dureza Shore D do Araldite® AV138 (1ª série).....	70
Tabela 19- Dureza Shore D do Araldite® 420A/B (1ª série) .....	70
Tabela 20- Dureza Shore D do SikaForce® 710 L100 (1ª série).....	70
Tabela 21- Dureza Shore D do Araldite® AV138 (2ª série).....	71
Tabela 22- Dureza Shore D do Araldite® 420 A/B (2ª série) .....	71
Tabela 23- Dureza Shore D do SikaForce® 710 L100 (2ª série).....	71
Tabela 24- Resultados das forças e tipo de rotura (Araldite® 420 A/B- 1ª série).....	73
Tabela 25- Resistência ao arrancamento (Araldite® 420 A/B- 1ª série) .....	73
Tabela 26- Resultados das forças e tipo de rotura (Araldite® AV138- 1ª série) .....	74
Tabela 27- Resistência ao arrancamento (Araldite® AV138- 1ª série).....	75
Tabela 28- Resultados das forças e tipo de rotura (SKF 710- 1ª série) .....	76
Tabela 29- Resistência ao arrancamento (SKF 710- 1ª série) .....	76
Tabela 30- Resultado das forças e tipo de rotura (Araldite® 420 A/B- 2ª série) .....	78
Tabela 31- Resistência ao arrancamento (Araldite® 420 A/B- 2ª série) .....	78
Tabela 32- Resultado das forças e tipo de rotura (AV138- 2ª série).....	79
Tabela 33- Resistência ao arrancamento (AV138- 2ª série) .....	79
Tabela 34- Resultado das forças e tipo de rotura (SKF 710- 2ª série).....	80
Tabela 35- Resistência ao arrancamento (SKF 710- 2ª série) .....	80
Tabela 36- Resultados obtidos com o ensaio de tração .....	88



## Acrónimos e Símbolos

### Lista de Acrónimos

CAD	<i>Computer Aided Design</i>
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
LABF	Laboratório de Fundação
LET	Laboratório de Ensaios Tecnológicos
LMET	Laboratório de Metalografia
LTM	Laboratório de Tecnologia Mecânica
P.Porto	Instituto Politécnico do Porto
NIS	<i>Nikon Imaging Software</i>
SKF	<i>SikaForce</i>

### Lista de Símbolos

$m$	Massa	$kg$
$T$	Temperatura	$^{\circ}C$
$T_{amb}$	Temperatura ambiente	$^{\circ}C$
$\tau$	Tensão de corte média	$Pa$
$P$ ou $F$	Força	$N$
$A$	Área	$mm^2$
$b$	Largura	$mm$
$a$	Deslocamento	$mm$
$\nu$	Coefficiente de Poisson	-
$G$	Módulo de corte	$Pa$
$E$	Módulo de elasticidade	$Pa$



## 1. Introdução

Este relatório, com o título “Projeto e fabrico de ferramentas para ensaio de adesivos e juntas adesivas”, foi desenvolvido no âmbito da unidade curricular Dissertação/Projeto/Estágio (DPEST), do 2º ano do Mestrado em Engenharia Mecânica (MEM), do ramo de Construções Mecânicas, do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP). Pretende-se realizar um estudo sobre adesivos e ligações adesivas, incidindo principalmente nos vários ensaios disponíveis para determinar as suas propriedades mecânicas. Dentro dos ensaios mecânicos será dado maior realce ao ensaio de tração em juntas topo a topo (*butt-joints*) e ao ensaio de arrancamento de rolete flutuante (*floating roller test*). De facto, durante a dissertação de mestrado deseja-se projetar e fabricar as ferramentas necessárias para a realização deste tipo de ensaios no Laboratório de Ensaios Tecnológicos (LET) do ISEP. Desta forma, será possível realizar este tipo de ensaios no LET por alunos de licenciatura ou de mestrado e também para o desenvolvimento de trabalhos de investigação.

Durante este relatório serão utilizados vários conhecimentos adquiridos ao longo de todo o percurso académico, especialmente das unidades curriculares de Processos de Ligação, Processos de Fabrico 1 e 2, Mecânica dos Materiais, Materiais Metálicos, Materiais não Metálicos, tentando descrever os principais tópicos da referência bibliográfica de forma explícita e estruturada.

Neste capítulo serão abordados:

- O enquadramento
- Os objetivos
- Metodologia
- Estrutura

### 1.1. Enquadramento

As ligações adesivas têm sido muito utilizadas em diversas áreas como, por exemplo, a indústria aeroespacial e aeronáutica, defesa militar, automóvel, de componentes de eletrónica, de construção civil, do calçado e das madeiras. A utilização de juntas coladas em aplicações industriais tem vindo a aumentar nos últimos anos, em detrimento dos métodos tradicionais de ligação tais como a soldadura, a brasagem e ligações aparafusadas e rebitadas.

As ligações adesivas podem estar sujeitas a quatro modos elementares de carregamento que são: tração/compressão, corte, arrancamento e clivagem. Na prática, as ligações adesivas estão

## Introdução

frequentemente sujeitas a uma combinação destes modos de carregamento. Os modos de carregamento mais desfavoráveis são a clivagem e o arrancamento.

A obtenção das propriedades mecânicas dos adesivos é um aspeto importante para conhecer o comportamento das ligações adesivas quando sujeitas a solicitações. As propriedades à tração dos adesivos podem ser determinadas utilizando provetes *bulk* (provetes de adesivo maciço), mas este método tem diversas desvantagens como o uso de elevada quantidade de adesivo e a dificuldade em obter provetes sem defeitos. Outro método possível é o ensaio de tração em juntas topo a topo, mas para a realização deste ensaio são necessários substratos com uma determinada geometria e dispositivos que permitam a sua adequada ligação e solicitação na máquina de ensaios. De salientar que, destes dois métodos, o LET possui apenas a capacidade de realizar os ensaios segundo o primeiro método.

Para determinar as propriedades de uma junta adesiva ao arrancamento se ambos os substratos forem flexíveis normalmente recorre-se ao ensaio de arrancamento em junta do tipo “T”, no entanto este processo só é válido em substratos flexíveis. No caso de se pretender analisar a resistência ao arrancamento com um substrato rígido e outro flexível recorre-se a ensaios de arrancamento a 180°, com rolete flutuante e *Climbing Drum Test* (teste de tambor de escalada). O ensaio com rolete flutuante é amplamente utilizado na indústria e em trabalhos de investigação para avaliar a qualidade da adesão de juntas adesivas, pois submete a ligação a condições de carregamento muito desfavoráveis. Durante a dissertação de mestrado, pretende-se dotar o LET com a capacidade de realizar este tipo de ensaio.

Ou seja, a motivação para a realização deste trabalho passa por dotar o LET da capacidade de realizar estes dois tipos de ensaios (ensaio de tração em juntas topo a topo e ensaio de arrancamento por rolete flutuante). Contudo, é necessário realizar um estudo prévio sobre as ligações adesivas e em particular destes dois métodos de ensaio. Neste relatório é apresentado este estudo que foi efetuado com base em pesquisa bibliográfica de documentos científicos e livros relacionados com o tema e depois de analisado todos pormenores mais relevantes proceder ao fabrico e montagem destas ferramentas.

### 1.2. Objetivos

O principal objetivo deste trabalho consistiu no fabrico de ferramentas para a realização de ensaios de arrancamento com rolete flutuante e de tração de juntas topo a topo. Com base neste objetivo principal, é possível identificar alguns objetivos subjacentes:

- Estudo das ligações adesivas;
- Análise das normas utilizadas para a realização dos ensaios de rolete flutuante e de juntas topo a topo;
- Desenho da ferramenta de rolete flutuante;
- Desenho da ferramenta para o fabrico das juntas topo a topo que permita garantir o alinhamento dos substratos e regular a espessura do adesivo;
- Desenho da ferramenta para fixar e tracionar as juntas topo a topo na máquina de tração;

- Definição dos materiais e componentes necessários para o fabrico das várias ferramentas;
- Montagem das ferramentas;
- Validação das ferramentas através de ensaios utilizando diferentes tipos de adesivos.

### **1.3. Metodologia**

A elaboração deste relatório envolveu o estudo das ligações adesivas, ensaios de tração, ensaios ao corte, arrancamento, impacto, fadiga, durabilidade e fratura, mas em especial de rolete flutuante e de juntas topo a topo, materiais e fabrico destas ferramentas através da consulta de livros e artigos científicos recorrendo *websites* como, por exemplo, o *ResearchGate*, *ScienceDirect*, *Google Student* e *Web of Science*. Para a gestão das referências bibliográficas foi utilizado o *Mendeley*.

No projeto, modelação e fabrico recorreu-se ao programa *SOLIDWORKS* e ao livro do Professor Simões Morais [1] para modelar todas as peças necessárias com as tolerâncias e cotas essenciais.

Os ensaios foram realizados segundo normas adequadas para cada ensaio e os resultados foram tratados utilizando o *EXCEL*.

### **1.4. Estrutura**

Este relatório está dividido nos seguintes capítulos:

1. Introdução: neste primeiro capítulo é apresentada uma breve contextualização do tema do trabalho, bem como os seus objetivos e a metodologia utilizada para os atingir.
2. Revisão bibliográfica: aborda vários assuntos relacionados com adesivos e juntas adesivas como, por exemplo, as vantagens e desvantagens deste processo de ligação, tipos de adesivos estruturais, modos de rotura, preparação superficial, tipos de juntas e diferentes tipos de ensaios para avaliar o seu comportamento mecânico.
3. Desenho e fabrico das ferramentas: nesta fase são apresentados os desenhos e imagens das ferramentas indicando as várias peças e componentes que as constituem. Engloba também a indicação dos materiais utilizados para o fabrico das peças e uma descrição do seu funcionamento.
4. Ensaios: neste capítulo são indicados os materiais dos substratos e os adesivos utilizados nos ensaios de arrancamento e de tração, bem como o procedimento para o fabrico das juntas e as respetivas condições de ensaio. São apresentados e discutidos os resultados obtidos, sendo também analisado o funcionamento das ferramentas desenvolvidas.
5. Conclusões e propostas para trabalhos futuros: este capítulo apresenta uma síntese sobre o funcionamento das ferramentas fabricadas e dos resultados obtidos com os ensaios de arrancamento e de tração. São também indicadas algumas sugestões para dar continuidade a este trabalho.

## Introdução

## 2. Revisão Bibliográfica

Neste capítulo são referidos alguns assuntos relacionados com as ligações adesivas como, por exemplo, o conceito de ligação adesiva, as suas vantagens e desvantagens, classificação dos adesivos, modos de rotura, métodos de preparação superficial, tipos de juntas e tipos de adesivos estruturais. Numa fase posterior do relatório são apresentados os vários ensaios que permitem determinar as diversas propriedades mecânicas dos adesivos e das juntas, tendo maior foco no ensaio de tração em juntas topo a topo e no ensaio de arrancamento de rolete flutuante. De facto, existe uma grande variedade de ensaios que permitem avaliar as mais diversas propriedades dos adesivos e juntas adesivas. Neste relatório serão abordados apenas alguns dos ensaios que permitem avaliar as propriedades mecânicas dos adesivos em forma maciça ou em forma de junta. Estes ensaios podem ser divididos da seguinte forma [2]:

- Ensaio à tração
- Ensaio à compressão
- Ensaio de corte
- Ensaio de arrancamento
- Ensaio de impacto
- Ensaio de fadiga
- Ensaio de durabilidade
- Ensaio de caracterização à fratura

### 2.1. Adesivos e ligações adesivas

Nos subcapítulos seguintes são apresentados vários tópicos relacionados com as ligações adesivas, começando com o que se entende por junta adesiva e as suas vantagens e desvantagens.

#### 2.1.1. Conceito de junta adesiva

Uma junta adesiva é o conjunto constituído pelos aderentes, o adesivo, os primários (se utilizados) e todas as interfases e interfaces associadas, como mostrado na Figura 1 [2].

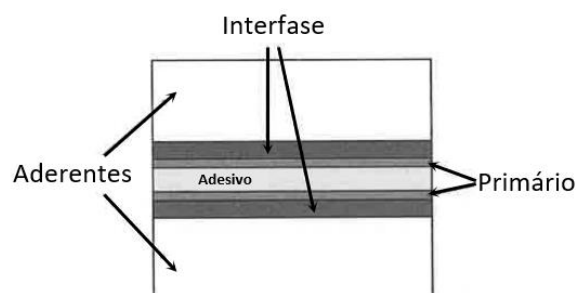


Figura 1- Junta adesiva [2]

O significado dos vários constituintes que podem surgir numa junta adesiva está indicado nos pontos seguintes:

- Aderente: corresponde ao material, corpo ou componente ligado pelo adesivo. Antes da ligação é designado por substrato. Contudo, os dois termos são frequentemente usados sem distinção.
- Adesivo: pode ser definido como um material capaz de promover a união entre dois substratos e com capacidade de resistir à sua separação, pela ação combinada de diferentes forças: forças adesivas (adesão), forças coesivas (coesão) e forças mecânicas (resultantes da ancoragem do adesivo na superfície dos aderentes). Os adesivos são geralmente materiais poliméricos.
- Interface: também designada por camada limite, corresponde ao plano de contacto entre duas superfícies de dois materiais como, por exemplo, entre o adesivo e o aderente. Está contida na interfase.
- Interfase: região entre o adesivo e o aderente. É uma região com características diferentes da parte maciça do adesivo ou do aderente. De facto, o contacto entre o adesivo e a superfície do aderente pode provocar o aparecimento de uma região, quer no adesivo quer no aderente, que sofrem alterações das suas propriedades. Ou seja, é a região entre o adesivo e o aderente que se estende desde um ponto no aderente onde as propriedades locais (físicas, químicas, mecânicas e morfológicas) começam a alterar-se desde as propriedades *bulk* do aderente até um ponto no adesivo onde as propriedades locais igualam as propriedades *bulk* do adesivo. É uma região crítica de uma ligação adesiva.
- Primário: por vezes pode ser necessário aplicar uma substância (primário) sobre o substrato, para melhorar a adesão ou proteger as superfícies até à aplicação do adesivo.

Numa junta adesiva pode também existir o filete que consiste na porção de adesivo que preenche o canto ou o ângulo formado pelos dois aderentes (Figura 2). Forma-se devido ao excesso de adesivo que é expulso para fora da junta. Este excesso de adesivo é frequentemente removido ou então pode adquirir diversas formas como se pode observar na Figura 3.

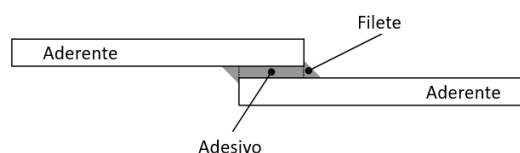


Figura 2- Junta de sobreposição simples com filete

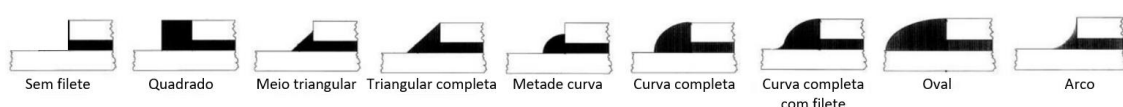


Figura 3- Filetes com diferentes geometrias [3]

### 2.1.2. Vantagens e desvantagens

Relativamente às ligações adesivas é importante ter em consideração determinadas vantagens e desvantagens que estas oferecem em comparação a outros tipos de ligações, tais como as ligações por soldadura e as ligações mecânicas. Nos pontos seguintes estão indicadas algumas vantagens e desvantagens associadas a este processo de ligação [2], [4].

Vantagens:

- Distribuição de tensões mais uniforme sobre a área de colagem total;
- Permite ligar qualquer tipo de combinações de materiais (similares ou dissimilares);
- Boa resistência à corrosão e à fadiga;
- Boa capacidade de amortecimento de vibrações;
- Permite ligar e vedar simultaneamente;
- Capacidade de ligar materiais com qualquer espessura e geometria permitindo que o processo seja mais flexível;
- Não provoca alterações estruturais podendo ser efetuadas a temperaturas relativamente baixas e, ao contrário das ligações aparafusadas e rebitadas, não danificam o substrato;
- Apresenta boa aparência e a junta é praticamente invisível.

Desvantagens:

- As superfícies a ligar necessitam de tratamento superficial;
- Fraca resistência a altas temperaturas;
- Fraca resistência a esforços de arrancamento e clivagem;
- Desmontagem difícil ou impossível. As ligações adesivas estruturais são consideradas ligações permanentes;
- Alguns adesivos podem apresentar algumas das seguintes características: elevado custo, tempo de endurecimento elevado, tempo de vida limitado, toxicidade e inflamabilidade;
- Limitação na aplicação de ensaios não destrutivos para a inspeção da ligação.

### 2.1.3. Classificação dos adesivos

Os adesivos podem ser classificados quanto à origem, composição química, função ou desempenho, forma física, método de aplicação, modo de endurecimento, tipo de substrato e custo. Neste relatório serão abordadas apenas as três primeiras formas de classificar os adesivos.

Os adesivos quanto à sua origem podem ser classificados como adesivos naturais, sintéticos e semi-sintéticos [2], [4].

1. **Adesivos naturais:** são adesivos fabricados através de produtos de origem natural tais como produtos de origem animal ou vegetal (agrícola). Estes adesivos têm geralmente propriedades inferiores às dos sintéticos, mas por serem biodegradáveis possuem vantagens interessantes em termos ambientais e de saúde, sendo muito utilizados na colagem de madeira e papel.

2. **Adesivos sintéticos:** são adesivos fabricados pelo homem como é o caso dos polímeros sintéticos. Estes adesivos têm melhores propriedades mecânicas e térmicas que os naturais pelo que são utilizados em aplicações estruturais exigentes. De facto, todos os adesivos estruturais são sintéticos.
3. **Adesivos semi-sintéticos:** são adesivos fabricados através da junção de propriedades de adesivos naturais e sintéticos.

Quanto à sua composição química os adesivos dividem-se em quatro grupos: termoendurecíveis, termoplásticos, elastoméricos e híbridos (que resultam da combinação de dois ou mais tipos de resinas) [2], [4]. A Tabela 1 apresenta uma breve comparação destas famílias de adesivos e pode-se constatar que os adesivos à base de resinas termoendurecíveis apresentam, de uma forma geral, melhores propriedades. Contudo, mesmo estas têm algumas limitações pelo que frequentemente são utilizados adesivos híbridos.

Tabela 1- Comparação qualitativa dos diferentes adesivos [2]

Adesivos	Propriedades			
	Flexibilidade Resiliência	Resistência mecânica	Resistência térmica	Resistência a agentes químicos
Termoendurecíveis	má	boa	boa	boa
Termoplásticos	média	medíocre	medíocre	boa
Elastoméricos	boa	má	variável	medíocre

Quanto à sua função ou desempenho podem ser classificados como adesivos estruturais ou não estruturais [2], [4].

1. **Adesivos estruturais:** são adesivos de elevada resistência e desempenho com capacidade para resistir a esforços consideráveis. Permitem que a resistência ao corte da ligação exceda os 6,9 MPa (1000 psi), têm boa resistência a condições ambientais comuns, conseguem resistir a cargas elevadas sem que ocorram grandes deformações e não sofrem fluência quando sujeitos a cargas significativas [2]. De salientar que os adesivos estruturais são frequentemente à base de resinas termoendurecíveis.
2. **Adesivos não estruturais:** estes adesivos não são adaptados ao suporte de cargas substanciais, têm baixa resistência à temperatura e agentes químicos, degradam-se após longas exposições ao meio ambiente e sofrem fluência quando sujeitos a cargas mesmo que moderadas. São nomeadamente usados para ligações temporárias e por vezes podem ser usados com outro tipo de ligação mecânica permitindo assim reduzir o número de ligações mecânicas, amortecer vibrações, vedação e isolamento [2].

### 2.1.4. Tipos de adesivos estruturais, propriedades e aplicações

Os adesivos estruturais são aplicados nas mais diversas indústrias e em juntas permanentes que necessitam de elevada resistência e durabilidade. São geralmente termoendurecíveis que endurecem por reação de cura. Os principais adesivos estruturais são apresentados de forma muito sucinta na Tabela 2 [2], [4].

Tabela 2- Adesivos estruturais e as suas propriedades (adaptado de [4])

Adesivos Estruturais	Descrição	Condições de cura	Características especiais	Aplicações e gama de preço
Epóxicos	Uma ou duas partes, líquido, pasta ou sólido	Temperatura ambiente (Tamb) ou alta temperatura	Aderem bem a vários substratos; facilmente modificáveis; são os mais versáteis; elevada resistência à tração, ao corte e à fluência; baixa contração na cura; excelente resistência à humidade e diversos solventes	Metais, plásticos, vidros, borrachas, madeiras e cerâmicos Custo: médio
Epóxido modificado com borracha de nitrilo	Uma parte, líquido ou pasta	Temperatura e pressão	Boa resistência ao arrancamento sem sacrificar as propriedades a altas temperaturas; boa resistência ao impacto; durabilidade satisfatória mesmo sob ação de humidade; não devem estar continuamente mergulhados em água	Metais, termoendurecíveis, termoplásticos e superfícies oleosas Custo: médio
Epóxido-fenólicos	Pasta de duas partes, filme suportado	Temperatura e pressão	Liberta voláteis durante a cura; retém 50% da resistência para temperaturas de 260 °C; <i>shelf life</i> limitada; baixa resistência ao arrancamento e resistência ao impacto	Metais, núcleo de ninho de abelha, laminados de plástico, cerâmicos Custo: médio
Epóxido-nylon	Soluções de solvente, filmes suportados e não suportados	Temperatura e pressão	Excelente resistência ao corte mesmo a temperaturas criogénicas; adequados para temperaturas entre -250 e 82 °C; <i>shelf life</i> limitada; boa resistência ao arrancamento, fadiga e impacto; fraca resistência à fluência e à humidade	Metais, núcleo de ninho de abelha, plásticos Custo: médio
Epóxido-polisulfitos	Duas partes, líquido ou pasta	Tamb ou superior	Adequado para o intervalo de temperaturas entre -55 e 93 °C; maior resistência ao impacto, maior alongamento e menos fragilidade que os epóxicos; elevada capacidade de deformação e resistência química	Metais, plásticos, madeira, betão Custo: médio
Nitrilo-fenólicos	Soluções de solvente, filmes suportados ou não suportados	Calor e pressão	Excelente resistência ao corte; boa resistência ao arrancamento; superior à dos vinilo-fenólicos e neopreno-fenólicos; boa adesão; a resistência ao corte pode atingir valores de 35 MPa	Metais, plásticos, vidros e borrachas Custo: médio
Vinilo-fenólicos	Soluções de solvente, emulsões, fita, líquido e pó	Calor e pressão	Boa resistência ao corte e ao arrancamento; boa resistência ao calor; boa resistência à intempérie, humidade, óleo, água e solventes	Metais, papel e núcleo de ninho de abelha Custo: baixo/médio
Neopreno-fenólicos	Soluções de solvente, filmes suportados ou não suportados	Calor e pressão	Boa ligação para uma variedade de substratos; temperatura de serviço adequada entre -55 e 95 °C; excelente resistência à fluência e às condições ambientais; excelente resistência ao impacto e à fadiga	Metais, vidro e plástico Custo: médio

Tabela 2 (continuação)- Adesivos estruturais e as suas propriedades (adaptado de [4])

<b>Adesivos Estruturais</b>	<b>Descrição</b>	<b>Condições de cura</b>	<b>Características especiais</b>	<b>Aplicações e gama de preço</b>
Resorcinol e Fenol-Resorcinol-Formaldeído	Geral/ soluções de álcool-água às quais deve ser adicionado formaldeído	Tamb ou mais elevada com pressão moderada	Adequados para aplicações exteriores; não é afetado por água fervente, mofo, fungos, óleo e a maioria dos solventes; a resistência da união é igual ou superior à resistência da madeira; não adere diretamente ao metal	Madeira, plásticos, papel, couro e têxteis Custo: médio
Melamina-formaldeído	Pó para ser misturado com o agente endurecedor	Temperatura e pressão	Equivalente em durabilidade e resistência à água (mesmo a ferver) que os fenólicos e resorcinois; geralmente combinados com ureia para baixar o custo; maior temperatura de serviço que as ureias	Madeira; muito utilizado na indústria do mobiliário Custo: médio
Ureia-Formaldeído	Geralmente resinas de duas partes e agente endurecedor	Pressão	Não tão durável quanto outros, mas adequado para uma ampla gama de condições de serviço. Fácil aplicação e cura; <i>Pot life</i> entre 1 e 24 h; indicados para aplicações interiores	Madeira Custo: baixo
Poliimidaz (PI)	Soluções de solvente ou filmes suportados	Alta temperatura	Excelente resistência térmica e à oxidação; adequados para trabalhar em contínuo até temperaturas de 285 °C e por curtos períodos a temperaturas de 480 °C	Metais, folhas de metal e núcleo de ninho de abelha Custo: muito elevado
Bismaleimidaz (BMI)	Uma parte, filmes ou pasta	Alta temperatura	Adequados para trabalhar em contínuo até temperaturas de 200 °C e por curtos períodos a temperaturas de 230 °C; baixa resistência ao arrancamento	Metais, compósitos e placas de circuitos Custo: elevado
Polibenzimidazol (PBI)	Filmes suportados	Alta temperatura e pressão	Boa resistência a altas temperaturas; adequados para trabalhar em contínuo até temperaturas de 230 °C e por curtos períodos a temperaturas de 535 °C; deterioram a altas temperaturas quando expostos ao ar e originam voláteis durante a cura	Metais, folhas de metal e núcleo de ninho de abelhas Custo: muito elevado
Poliuretanos	Soluções de solvente ou pasta	Tamb	Excelente flexibilidade; boa resistência ao corte, ao arrancamento e à abrasão; bom desempenho a baixas temperaturas, boa tenacidade e molhabilidade	Indústria automóvel, indústria de calçado e construção naval
Anaeróbicos	Uma parte, líquido ou pasta	Tamb ou alta temperatura na ausência de ar	Excelente capacidade de molhagem; adequados para temperaturas ente 54 e 150 °C, resiste a ciclos térmicos rápidos; cura a 120 °C confere maior resistência ao corte; cura em minutos à temperatura de 138 °C; boa resistência à humidade e solventes	Metais, plásticos, vidro e madeira Custo: muito elevado
Cianoacrilatos	Líquido de uma parte	Cura rápida à Tamb	Ligação rápida e com boa resistência; baixa viscosidade, baixa resistência ao calor e ao choque	Metais, plásticos e vidros Custo: muito elevado
Acrílicos modificados	Duas partes, líquido ou pasta	Tamb	Excelente ligação de diversos plásticos, cura rápida e boa resistência às condições ambientais; capacidade em ligar superfícies mal preparadas	Metais, muitos plásticos e madeiras Custo: médio
Poliésteres	Duas partes, líquido ou pasta	Tamb ou superior	Custo mais reduzido que os epóxidos, mas propriedades inferiores. Resistentes a químicos, humidade, calor e intempérie. Boas propriedades elétricas; ampla gama de resistências; sistema curado com isocianato adere bem a muitos filmes plásticos	Metais, laminados plásticos, plásticos e vidros Custo: baixo/médio

### 2.1.5. Modos de carregamento

A juntas adesivas podem estar sujeitas a quatro modos fundamentais de carregamento: tração/compressão, corte, clivagem e arrancamento. Na prática, uma junta pode estar sujeita a qualquer combinação dos carregamentos referidos [2].

A Figura 4 apresenta os vários modos de carregamento e a respetiva distribuição de tensões ao longo do comprimento de sobreposição.

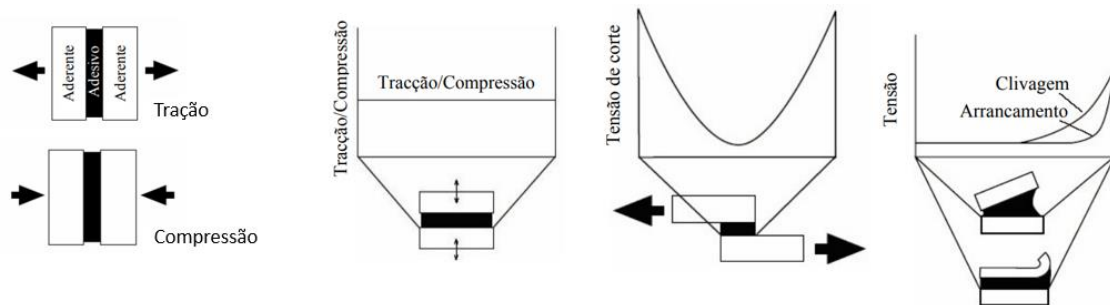


Figura 4- Modos de carregamento e respetiva distribuição de tensões [5]

Uma junta adesiva está sujeita a um **carregamento de tração** quando as forças atuam perpendicularmente ao plano do adesivo e tendem a provocar o afastamento das superfícies dos aderentes. A distribuição das tensões normais através do comprimento da colagem é teoricamente uniforme. Contudo, em muitos casos a distribuição destas tensões não é uniforme, pois podem surgir picos de tensões de clivagem ou de arrancamento nas extremidades da zona de sobreposição que podem ser causados pela dificuldade em controlar a espessura do adesivo ou porque as forças aplicadas nem sempre são rigorosamente uniaxiais. O efeito de *Poisson* também contribui para que existam picos de tensão nas extremidades da ligação.

As **tensões de compressão** desenvolvem-se quando as forças atuam perpendicularmente ao plano da junta e tendem a comprimir um aderente contra o outro. A distribuição da tensão pelo adesivo é constante. Na realidade uma junta em compressão pura praticamente não precisa de adesivo.

No caso do **carregamento ao corte** as forças atuam paralelamente ao plano da junta (ao plano do adesivo) e tendem a provoca o escorregamento entre os dois aderentes. Numa junta de sobreposição simples, tal como se pode observar na Figura 4 (para o caso do carregamento ao corte), a distribuição da tensão de corte ao longo do comprimento de sobreposição não é uniforme. De facto, as extremidades da junta estão sujeitas a um maior nível de tensões que a parte central da ligação. Este comportamento deve-se ao efeito de deformação diferencial de cada um dos aderentes ao longo do comprimento de sobreposição. Contudo, é de salientar que este é o modo de carregamento preferencial para as ligações adesivas pois, nesta situação, toda a área de colagem contribui para a resistência da ligação.

Os **esforços de clivagem** são provocados por forças de tração, mas aplicadas na extremidade de uma junta rígida. Neste caso existe uma forte concentração de tensões na extremidade da junta que está sob as forças de clivagem e a extremidade oposta pouco contribui para a

resistência da junta. O **arrancamento** é um caso muito semelhante à clivagem, mas, neste caso, pelo menos um dos aderentes pode deformar por ação das forças aplicadas, levando a uma concentração das forças aplicadas numa zona muito mais localizada. Os esforços mais prejudiciais para as ligações adesivas são a clivagem e o arrancamento [5].

### 2.1.6. Modos de rotura

O modo de rotura de uma junta adesiva é determinado por vários fatores como, por exemplo, pela preparação superficial, qualidade da junta, pela sua geometria e pelo tipo de carregamento. Os principais modos de rotura que podem ocorrer nas ligações adesivas estão apresentados na Figura 5 e são os seguintes [2], [5]:

- Rotura coesiva: ocorre quando a ligação entre o adesivo e o substrato é mais forte do que a resistência interna do adesivo, após a rotura ambas as superfícies se encontram cobertas de adesivo. Quando ocorre este tipo de rotura significa que ocorreu uma boa preparação das superfícies.
- Rotura adesiva: ocorre na interface entre o adesivo e o aderente, após a rotura a superfície de um dos aderentes não apresenta vestígios de adesivo, enquanto a outra superfície encontra-se coberta de adesivo. Quando ocorre esta rotura significa que houve má preparação das superfícies devido à falha na adesão entre o adesivo e a superfície do aderente.
- Rotura mista: trata-se de uma combinação entre rotura coesiva e adesiva, este modo de rotura pode surgir devido a uma má limpeza na região de ligação das superfícies.
- Rotura do aderente: trata-se de uma rotura coesiva do substrato. Ocorre quando o aderente é o elo mais fraco da junta adesiva. Contudo, este tipo de rotura é difícil de ocorrer em aderentes de elevada resistência e nos casos em que a área de colagem é diminuta.

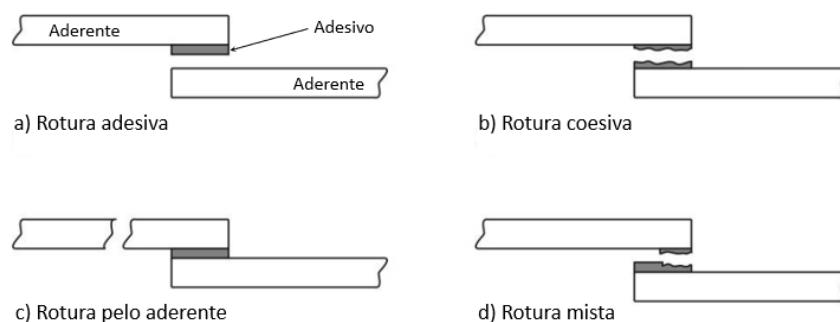


Figura 5- Modos de rotura em juntas adesivas [5]

Evidentemente que quando se projeta uma ligação adesiva é que ela suporte as condições de serviço sem sofrer rotura. Contudo, a ocorrer rotura, é preferível que seja uma rotura coesiva no adesivo ou no aderente, uma vez que se está a utilizar a totalidade da resistência dos materiais constituintes da junta. A rotura de um dos aderentes é demonstrativa de uma junta bem concebida, nomeadamente se a carga de rotura corresponder à resistência nominal do substrato [5].

### 2.1.7. Preparação superficial

O principal objetivo da preparação superficial é garantir que na ligação o ponto mais fraco seja o adesivo ou o substrato. Ou seja, é garantir que as forças de ligação entre o adesivo e a superfície não sejam o elo mais fraco da ligação. Esta etapa no fabrico de uma ligação adesiva é de elevada importância, pois afeta significativamente a resistência e durabilidade da ligação. Trata-se de uma operação que por vezes pode ser muito simples e rápida de executar, mas noutros casos pode ser complexa, demorada e dispendiosa [2], [6], [7].

Os tratamentos de superfície, também frequentemente designados por pré-tratamentos, visam um ou a combinação dos seguintes efeitos:

- **Remoção de material da superfície** como, por exemplo, óleos e gorduras, óxidos pouco resistentes nos metais, agentes de desmoldagem, pó e outras partículas de contaminação.
- **Modificação química da superfície** que no caso dos polímeros visa aumentar a energia de superfície, nomeadamente a componente polar. No caso dos metais visa melhorar a resistência à corrosão, substituir o óxido presente por outro mais firmemente ligado ao metal base, mais resistente e com maior afinidade para com o adesivo.
- **Alteração da topografia da superfície** para conferir uma rugosidade superficial que permita a ancoragem do adesivo.





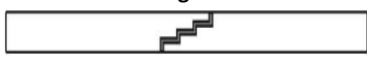


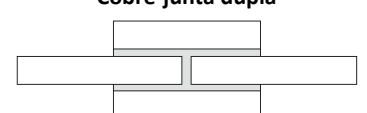

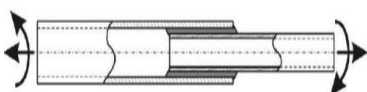
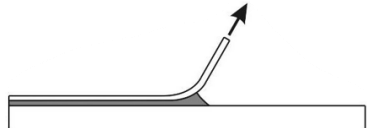
Os tratamentos de superfície podem ser divididos nos dois grupos seguintes [2]:

1. **Processos passivos:** são processos que não alteram a natureza química da superfície. Podem ser químicos (solventes e detergentes) ou mecânicos (lixagem, escovagem e granalhagem). Visam essencialmente limpar, desengordurar, remover determinadas camadas fracas e, no caso dos processos mecânicos, conferir rugosidade superficial aos substratos. Em determinadas ligações adesivas estes processos passivos podem ser suficientes, ou então podem ser apenas o primeiro passo de um tratamento que, posteriormente, envolve processos ativos.
2. **Processos ativos:** alteram a natureza química da superfície. Estes processos também permitem limpar as superfícies, remover camadas fracas e conferir uma microrugosidade superficial aos substratos. Podem ser químicos (ácido crómico, cloreto de ferro, ácido sulfúrico, hidróxido de sódio e também processos de anodização) ou físicos (descarga corona, por chama e por plasma). Os tratamentos ativos são usados quando se pretende a máxima resistência e permanência e são sempre precedidos e seguidos dum processo de limpeza passivo.

### 2.1.8. Tipos de juntas

Existem várias configurações de juntas de sobreposição, juntas cilíndricas, juntas em T e juntas em canto. A Tabela 3 apresenta algumas das configurações mais comuns de juntas adesivas indicando as suas principais vantagens e limitações [2], [4].

Tabela 3- Alguns tipos de juntas adesivas

Tipos de juntas	Vantagens	Desvantagens
<p><b>Sobreposição simples</b></p> 	<p>Fácil de fabricar. É a mais usada na indústria. Adesivo essencialmente ao corte. Pode ser usada com aderentes finos.</p>	<p>Carregamento não centrado provoca efeitos de flexão que, por sua vez, originam tensões de arrancamento (menor resistência da junta).</p>
<p><b>Sobreposição dupla</b></p> 	<p>Diminui os efeitos de flexão. Os aderentes não precisam de ser maquinados.</p>	<p>Maior tempo de produção do que as juntas de sobreposição simples</p>
<p><b>Chanfro exterior</b></p> 	<p>Diminui os efeitos dos esforços de arrancamento nas extremidades.</p>	<p>Necessidade de produzir o chanfro. Maior tempo de fabrico e maior custo.</p>
<p><b>Chanfro interior</b></p> 	<p>Diminui os gradientes de esforços ao longo do adesivo.</p>	<p>Necessidade de produzir o chanfro. Maior tempo de fabrico e maior custo.</p>
<p><b>Degrau</b></p> 	<p>Diminui os esforços de arrancamento.</p>	<p>Tempo de fabrico mais elevado. No caso de materiais compósitos a maquinagem pode danificar as fibras, mas os degraus podem ser executados durante o empilhamento.</p>
<p><b>Junta de ressalto</b></p> 	<p>Garante o alinhamento das forças.</p>	<p>Necessidade de fabricar o ressalto. Substratos frágeis ou de elevada resistência dificultam a produção.</p>
<p><b>Cobre-junta</b></p> 	<p>Garante maior resistência do que as juntas de sobreposição simples.</p>	<p>Sofre influência de esforços de arrancamento.</p>
<p><b>Cobre-junta dupla</b></p> 	<p>Diminui o aparecimento de esforços de flexão.</p>	<p>Tempo de fabrico mais elevado.</p>
<p><b>Topo a topo</b></p> 	<p>Fácil de fabricar.</p>	<p>Baixa eficácia (concentração de esforços de corte e arrancamento nas extremidades. Não permite esforços de flexão.</p>
<p><b>Tubular</b></p> 	<p>Usado em ligações com tubos.</p>	<p>Dificuldade em obter em obter uma boa leitura da distribuição de tensões.</p>
<p><b>Arrancamento</b></p> 	<p>Avalia a resistência ao arrancamento entre substratos do mesmo ou de diferentes tipos.</p>	<p>Incerteza nos resultados obtidos pelo ensaio de arrancamento.</p>

## 2.2. Introdução aos ensaios de adesivos

O comportamento de uma junta adesiva depende de vários fatores como, por exemplo, o tipo de junta, condições ambientais, tipo e intensidade dos esforços, preparação superficial, características geométricas da junta e, evidentemente, as propriedades dos substratos e do(s) adesivo(s) utilizado(s) na ligação. Os adesivos, como para qualquer outro material, são caracterizados pelas suas propriedades físicas, térmicas e mecânicas. Nos capítulos seguintes são apresentados alguns ensaios destrutivos que permitem determinar as propriedades à tração, corte e arrancamento. Os ensaios de tração e arrancamento têm particular interesse para este trabalho porque numa fase posterior (dissertação de mestrado) pretende-se projetar, fabricar e testar os dispositivos necessários para a realização de ensaios à tração em juntas topo a topo e ensaios de arrancamento com rolete flutuante. Os ensaios ao corte também são considerados porque é o modo de carregamento mais usual nas ligações adesivas.

## 2.3. Ensaios à tração

A obtenção das propriedades à tração de um adesivo pode ser efetuada através do ensaio de provetes em adesivo maciço. Contudo, o método mais utilizado para determinar estas propriedades em junta, é a utilização de juntas topo a topo com substratos cilíndricos. Estes ensaios podem também ser usados para controlo de qualidade de juntas coladas [8].

### 2.3.1. Tração em provetes maciços

Os provetes de adesivo maciço são geralmente fabricados utilizando um molde cujas cavidades possuem a geometria e dimensões adequadas para o provete que se pretende fabricar (Figura 6). Este ensaio consiste em aplicar uma força uniaxial no provete até à sua rotura [6],[9]. A Figura 7 mostra um provete e respetivas dimensões usado para o ensaio de tração segundo a referência [10].

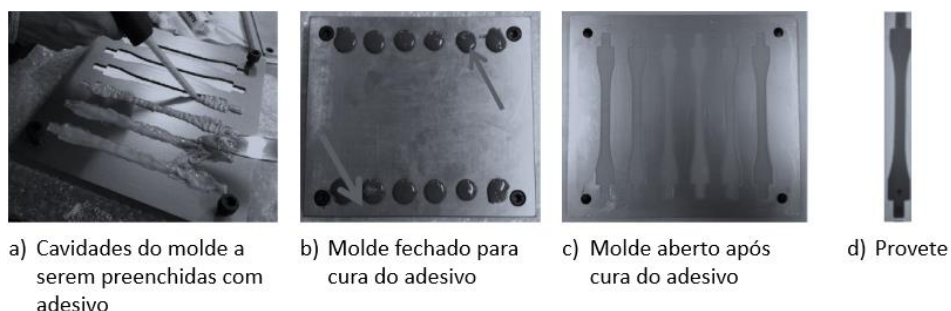


Figura 6- Fabrico de provetes de adesivo maciço utilizando o molde existente no LET

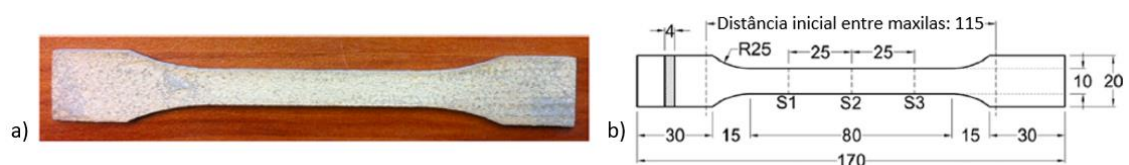


Figura 7- (a) Provete de adesivo maciço e (b) respetivas dimensões em mm, adaptado de [10], segundo a norma **EN ISO 527** [11]

A Figura 8 apresenta um provete de adesivo fixo nas maxilas da máquina de tração. Neste caso foi utilizado um extensómetro para avaliar o alongamento do provete e uma estufa para a realização de ensaios a diferentes temperaturas.

A Figura 9 apresenta uma curva tensão/deformação típica de um ensaio de tração de um adesivo de baixa ductilidade. Neste caso o adesivo utilizado foi o Araldite® AV138-M. O módulo de elasticidade foi obtido pelo declive da tangente na origem à curva tensão/deformação usando uma aproximação polinomial da curva [12]. A partir deste gráfico pode-se observar que a tensão de rotura é aproximadamente 43 MPa e a extensão na rotura de aproximadamente 1,1%. O módulo de elasticidade (E) determinado foi de aproximadamente 4,6 GPa [12].

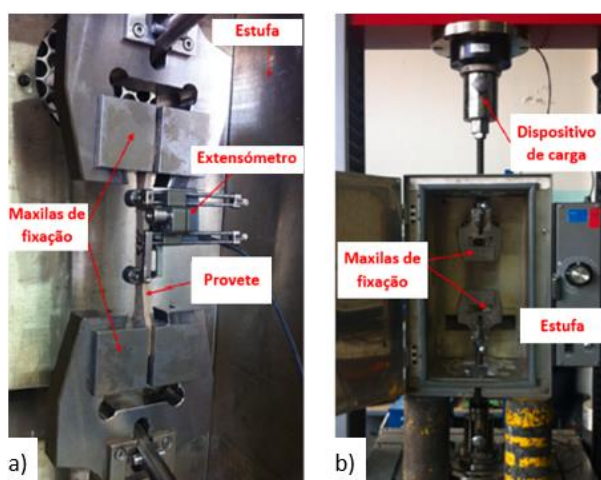


Figura 8- (a) Provete fixo nas maxilas da máquina de tração e com extensómetro acoplado e (b) visualização da estufa, adaptado de [10]

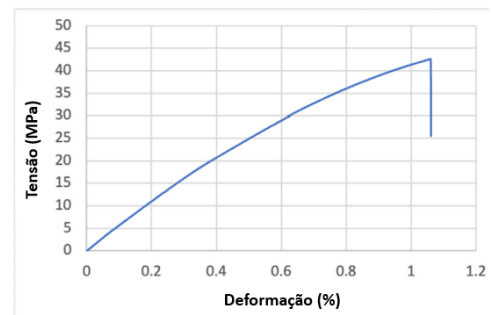


Figura 9- Curva Tensão-Deformação do adesivo Araldite® AV138-M, adaptado de [12]

Com este ensaio é possível determinar as várias propriedades à tração como, por exemplo, a tensão de rotura, tensão de cedência, módulo de elasticidade, coeficiente de *Poisson*, e ductilidade.

Este ensaio tem como vantagens:

- Pode ser realizado em qualquer máquina de ensaio à tração universal
- É um ensaio simples de realizar

No entanto, também tem desvantagens como:

- Dificuldade em obter provetes livres de defeitos devido ao aparecimento de vazios ou porosidades
- Elevado consumo de adesivo
- Falha de perceção na transição elástica-plástica
- Dificuldade em medir as deformações do adesivo devido à baixa amplitude de deformações

### 2.3.2. Tração em juntas topo a topo (*Butt-joint*)

Este ensaio consiste na aplicação de uma força longitudinal numa junta topo a topo até à rotura do adesivo. As tensões são calculadas dividindo as forças aplicadas pela área colada. Quando carregada axialmente gera um estado uniaxial de tensão, aparentemente uniforme. No entanto, autores como *Adams* e *Coppendale* (1977; 1979) demonstram que a distribuição de tensões não é uniforme, devido ao efeito de *Poisson* pela constrição provocada na camada de adesivo pelos substratos quando há uma diferença de rigidez entre estes ou até possível desalinhamento [9]. Para a realização do ensaio de tração de juntas topo a topo podem ser aplicadas duas normas *ASTM*, a **ASTM D897** [13] que utiliza substratos circulares curtos fabricados em metal ou madeira e a **ASTM D2095** [14]. Esta última norma é a mais geral e inclui geometrias tanto redondas como quadradas. O molde apresentado na Figura 10 (a) é usado para o alinhamento dos substratos e controlar a espessura da camada de adesivo. A Figura 10 (b) apresenta as dimensões, em milímetros, de um provete topo a topo [15].

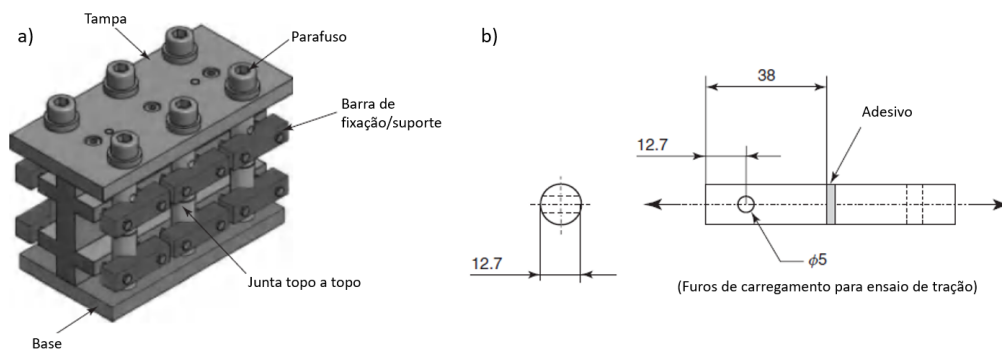


Figura 10- (a) Molde para o fabrico de juntas topo a topo e (b) Geometria do provete (dimensões em mm), adaptado de [15]

A figura seguinte apresenta as etapas para o fabrico de juntas topo a topo com recurso a uma ferramenta que permite garantir um correto alinhamento dos substratos e uma espessura de adesivo uniforme por toda a área de colagem.

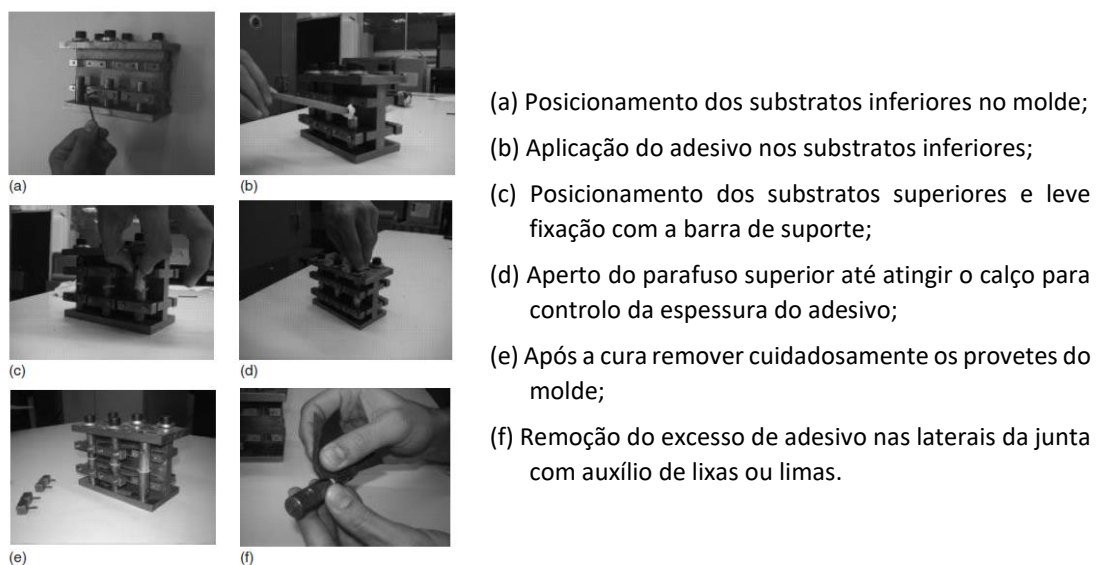


Figura 11- Etapas de fabrico de juntas topo a topo

No trabalho realizado por Carbas et al. [12] foi realizado um estudo numérico e experimental utilizando juntas topo a topo solicitadas à tração e à torção. A dimensão das juntas está apresentada na Figura 12 (de acordo com a norma **ASTM D2095** [14]) e o fabrico das juntas foi realizado com o auxílio da ferramenta apresentada na Figura 13. No trabalho referido foram utilizados substratos de aço e um adesivo estrutural de epóxico (Araldite® AV 138 M) que corresponde a um adesivo de elevada rigidez e baixa ductilidade. A cura ocorreu à temperatura ambiente durante 7 dias. Os ensaios à tração foram realizados numa máquina de tração universal com uma célula de carga de 30 kN e com uma velocidade de 0,2 mm/min. A extensão foi medida com um extensómetro com um comprimento inicial de 25 mm. Foram utilizadas três espessuras de adesivo (0,2, 0,5 e 1 mm).

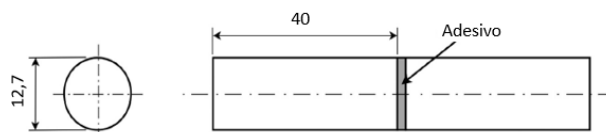
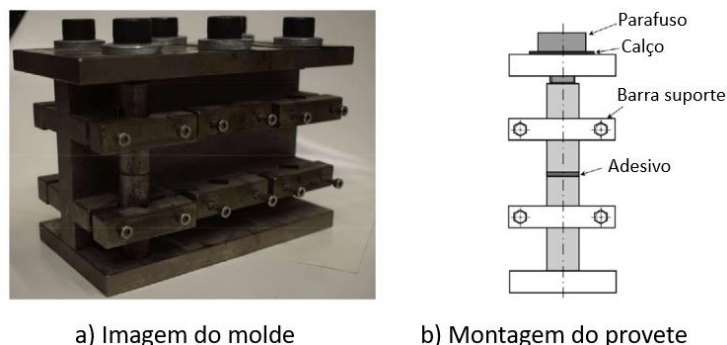


Figura 12- Geometria da provete topo a topo, dimensões em mm, adaptado de [12]



a) Imagem do molde

b) Montagem do provete

Figura 13- Imagem do molde (a) e representação esquemática do sistema de montagem (b), adaptado de [12]

A distribuição das tensões von Mises, obtida através da simulação numérica e para uma espessura de adesivo de 0,5 mm, está apresentada na Figura 14. Pode-se observar uma concentração de tensões nas extremidades da ligação e junto das interfaces. Estes serão os pontos críticos da ligação.

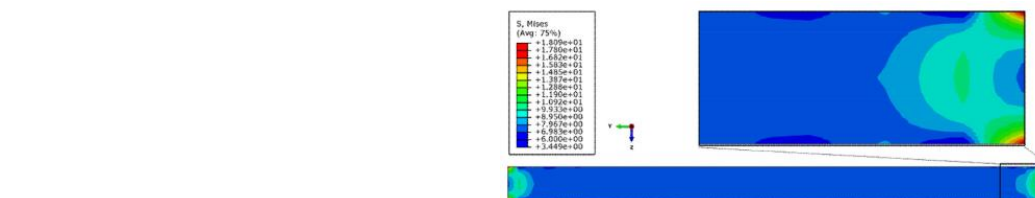


Figura 14- Ilustração da distribuição de tensões à tração na área colada, adaptado de [12]

As curvas tensão-deformação em função da espessura do adesivo estão apresentadas na Figura 15. A Tabela 4 apresenta os valores de rigidez, resistência e ductilidade em função da espessura do adesivo. A partir destes resultados pode-se constatar que, para o adesivo utilizado, a

variação da rigidez em função da espessura do adesivo é estatisticamente negligenciável. Contudo, verifica-se um aumento da resistência com a diminuição da espessura do adesivo.

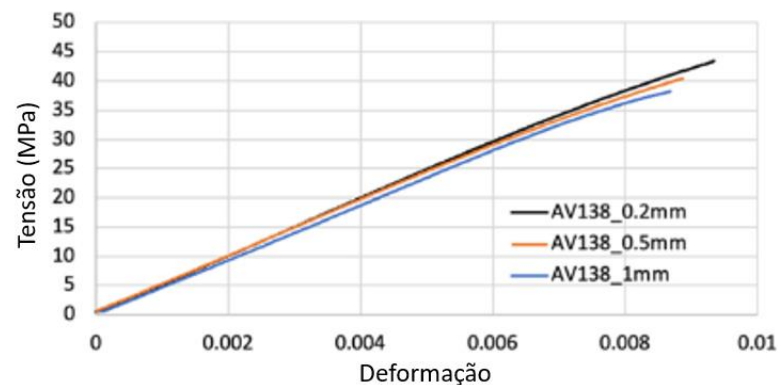


Figura 15- Curvas tensão-deformação típicas do ensaio de tração para diferentes espessuras do adesivo, adaptado de [12]

Tabela 4- Propriedades à tração para diferentes espessuras de adesivo, adaptado de [12]

Espessura do adesivo	Módulo de elasticidade [GPa]	Tensão de rotura [MPa]	Extensão na rotura [%]
0,2 mm	$4,78 \pm 0,05$	$42,7 \pm 0,9$	$0,85 \pm 0,09$
0,5 mm	$4,71 \pm 0,06$	$40,8 \pm 0,8$	$0,88 \pm 0,08$
1 mm	$4,67 \pm 0,08$	$39,4 \pm 1,2$	$0,91 \pm 0,1$
Provete maciço	$4,6 \pm 0,1$	$43,0 \pm 2,0$	$1,1 \pm 0,2$

Costa Mattos et al. [16] também estudaram o comportamento à tração de juntas topo a topo utilizando substratos de alumínio (AA 2024) ligados com o adesivo de epóxico da Dow (adesivo DER 331 com 13% de catalisador DEH 24). As superfícies de colagem foram submetidas a três tipos de preparação:

- lixagem + anodização com ácido fosfórico + ataque químico com ácido fosfórico (lixagem+PAA+PAD);
- lixagem + ataque químico com solução de ácido sulfúrico e ácido férrico + anodização com ácido fosfórico + ataque químico com ácido fosfórico (lixagem+P2+PAA+PAD);
- polimento + ataque químico com solução de ácido sulfúrico e ácido férrico + anodização com ácido fosfórico + ataque químico com ácido fosfórico (polimento+P2+PAA+PAD).

Para o fabrico das juntas foi utilizado o molde apresentado na Figura 16 que permitiu controlar o alinhamento dos substratos e a espessura do adesivo. A configuração das juntas está apresentada na Figura 17. O diâmetro dos substratos foi de 12,7 mm e, independentemente da espessura do adesivo, o comprimento do aderente foi mantido constante e igual a 12,7 mm. A ligação adesiva foi realizada imediatamente após a preparação superficial dos substratos e a cura decorreu à temperatura ambiente (25 °C) durante 2 h. Antes do ensaio as juntas foram armazenadas numa estufa com atmosfera controlada durante 72 h. Os ensaios foram realizados a uma velocidade de 0,5 mm/min a uma temperatura de 25 °C. A Figura 18 mostra uma curva tensão-deformação típica obtida com o ensaio de tração.

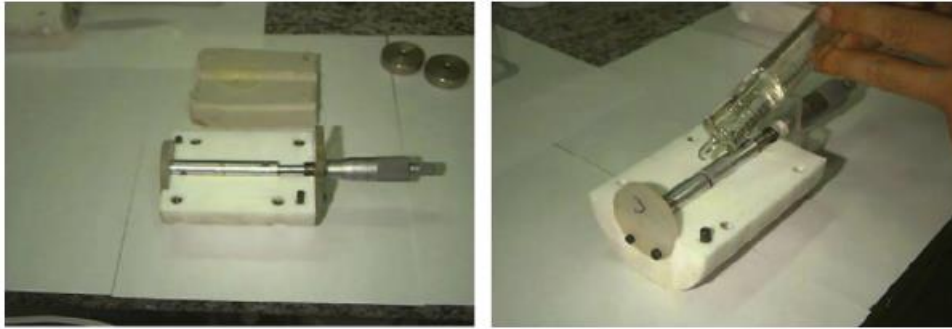


Figura 16- Molde com parafuso micrométrico, adaptado de [16]

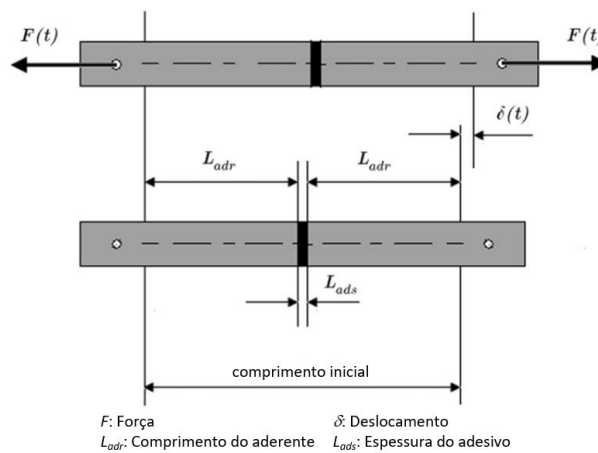


Figura 17- Provete com comprimento variável, adaptado de [16]

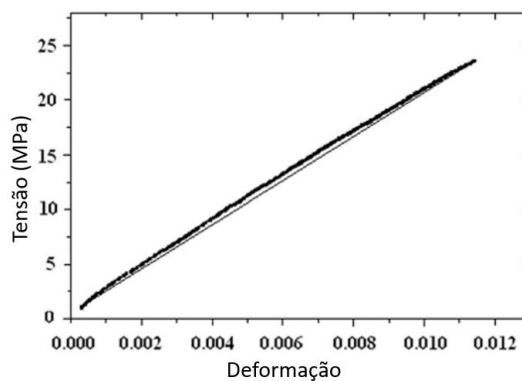


Figura 18- Gráfico tensão-deformação do adesivo epóxico Dow DER331 com 13% em peso de catalisador DEH24, adaptado de [16]

Os gráficos da Figura 19 apresentam o efeito da espessura do adesivo e do tipo de preparação superficial dos substratos na força máxima suportada pela junta e na percentagem de rotura coesiva. Apesar da grande dispersão dos resultados indicados no gráfico (a) pode-se verificar uma tendência para a diminuição da resistência da ligação com o aumento da espessura do adesivo. Além disso, verifica-se que o tipo de preparação influenciou os resultados obtidos. Do

gráfico (b) pode-se constatar que a espessura do adesivo e o tipo de preparação superficial também influenciaram o tipo de rotura. Verifica-se que, para o adesivo utilizado, a utilização de espessuras inferiores a 0,5 mm provocam roturas predominantemente adesivas, mas para espessuras ligeiramente superiores a 1 mm a rotura já é essencialmente coesiva.

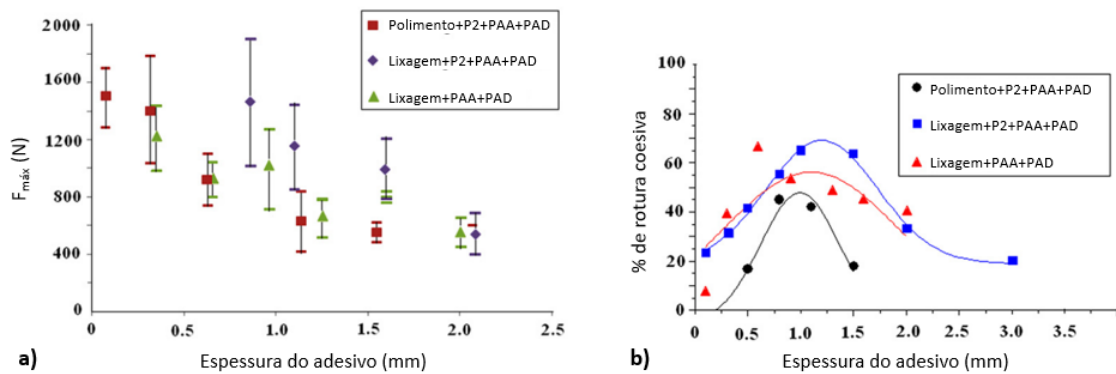


Figura 19- Força máxima (a) e percentagem de rotura coesiva (b) em função da espessura do adesivo e da preparação superficial, adaptado de [16]

Os ensaios de tração de juntas topo a topo pode ser realizado com ou sem extensómetros tal como mostrado na Figura 20. Sem a utilização de extensómetro apenas é possível obter as propriedades de resistência. Para determinar as propriedades elásticas é necessário utilizar extensómetros para avaliar com rigor a deformação do adesivo. Contudo, se o extensómetro estiver acoplado aos substratos será necessário ter em conta que a deformação avaliada não é somente do adesivo. Será necessário considerar influência da deformação dos substratos. O artigo realizado por A. Öchsner e J. Grácio [17] apresenta um estudo sobre o efeito da deformação do aderente nos resultados de ensaios à tração de juntas topo a topo, para diferentes combinações de aderentes e adesivos, em que as deformações foram avaliadas com recurso a extensómetros.

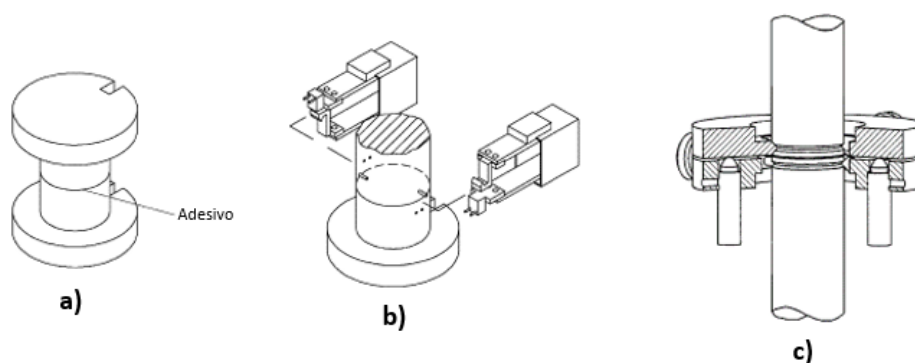


Figura 20- Juntas topo a topo sem (a) e com extensómetro (b) e (c), adaptado de [17]

No trabalho realizado por Ardila-Rodríguez et al. [18] foi estudado o efeito de diferentes tipos de preparação superficial na resistência de juntas topo a topo (*ASTM D2094*) com substratos

em titânio. Os tratamentos utilizados foram a lixagem, granalhagem, tratamento por UV/Ozono e por aplicação de Sol-gel e primário. Os ensaios foram realizados à temperatura ambiente e a uma velocidade de  $0,5 \text{ mm/min}$ . A Figura 21 apresenta as dimensões dos aderentes, o molde para o alinhamento dos aderentes e a ferramenta para tracionar a junta.

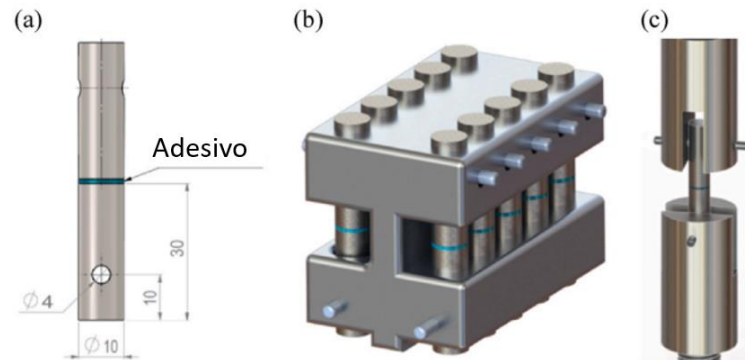


Figura 21- (a) Dimensões em mm do aderente, (b) molde e (c) ferramenta para carregamento da junta, adaptado de [18]

A Figura 22 apresenta um molde de construção mais simples para o fabrico de juntas topo a topo e que permite controlar o alinhamento dos substratos e a espessura do adesivo [19]. Utiliza um anel de acoplamento colocado na extremidade do substrato inferior. O adesivo é colocado neste anel e depois o substrato superior é também introduzido neste anel deixando a espessura desejada para o adesivo. Este anel garante o alinhamento dos substratos e permite conter o derramamento de adesivo.

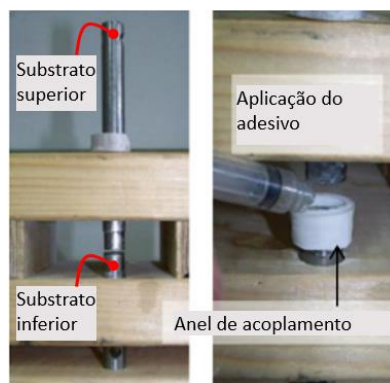


Figura 22- Molde utilizado por Mendoza-Navarro et al. para fabrico de juntas topo a topo [19]

Outro molde para o fabrico de juntas topo a topo pode ser observado na Figura 23 e foi utilizado por Jun Zhang et al. [20] para fabricar as juntas apresentadas na Figura 24 (a). Na Figura 24 (b) apresenta-se a junta fixa nas maxilas da máquina de tração. Os substratos são cilindros ocos e para evitar a entrada de adesivo para o furo dos substratos são utilizados tampões de polipropileno. O tubo exterior em forma de cone, também em polipropileno, garante o preenchimento com adesivo da folga entre os substratos e evita o derramamento durante o processo de cura. O molde sendo em material metálico permite a realização da cura do adesivo sob ação de temperatura. No trabalho referido a cura decorreu a  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  durante 6 h.

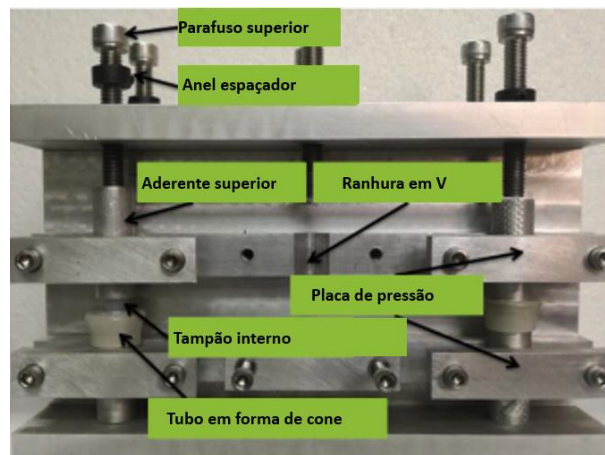


Figura 23- Molde utilizado por Jun Zhang et al. para fabricação de juntas topo a topo, adaptado de [20]

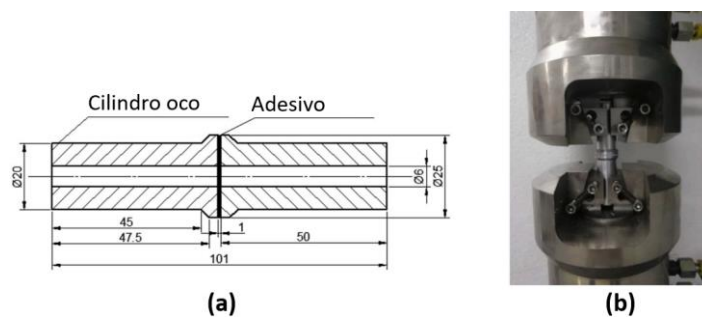


Figura 24- Dimensões (a) e fixação da junta topo a topo (b), adaptado de [20]

O ensaio de tração em juntas topo a topo tem como principais vantagens [2], [21], [22]:

- Pode ser realizado em qualquer tipo de máquina de ensaio à tração universal
- É fácil de executar
- É económico
- Permite reutilizar os substratos

Contudo também apresenta algumas desvantagens, tais como, [2], [21], [22]:

- Elevada precisão de fabricação de provetes
- Alinhamento preciso dos provetes durante o ensaio
- Uso de gabaritos (moldes para controlar o alinhamento dos substratos e a espessura do adesivo)
- As propriedades mecânicas são afetadas se houver adesivo excedentário

## 2.4. Ensaios ao corte

Os ensaios para avaliar as propriedades de corte podem ser divididos nos seguintes métodos:

- Ensaio de junta de sobreposição simples
- Ensaio losipescu *V-Notched beam shear method*
- Ensaio de borboleta ou *Notched plate shear method* (Arcan)
- Ensaio de junta topo a topo em torção ou *Napkin-ring test*
- Ensaio de corte com aderentes espessos (*Thick Adherend Shear Test*, TAST)

### 2.4.1. Ensaio de corte em junta de sobreposição simples

Este ensaio é um dos métodos mais comuns para caracterizar uma junta adesiva, pode ser realizado em máquinas universais ou convencionais. Este ensaio é regulamentado pelas normas **ASTM D1002** [23] e **ISO 4587**. Também pode ser usado como método comparativo para o estudo de adesivos desde que haja uniformização de parâmetros que podem afetar o resultado dos ensaios. Os resultados são expressos pela tensão de corte ( $\tau$ ) dada pela seguinte equação:

$$\tau = \frac{F}{A} \tag{1}$$

$$A = lb \tag{2}$$

$F$ : Carga aplicada,  $l$ : comprimento de sobreposição,  $b$ : largura de sobreposição

A figura seguinte apresenta um exemplo típico de uma junta de sobreposição simples segundo a norma **ASTM D1002**.

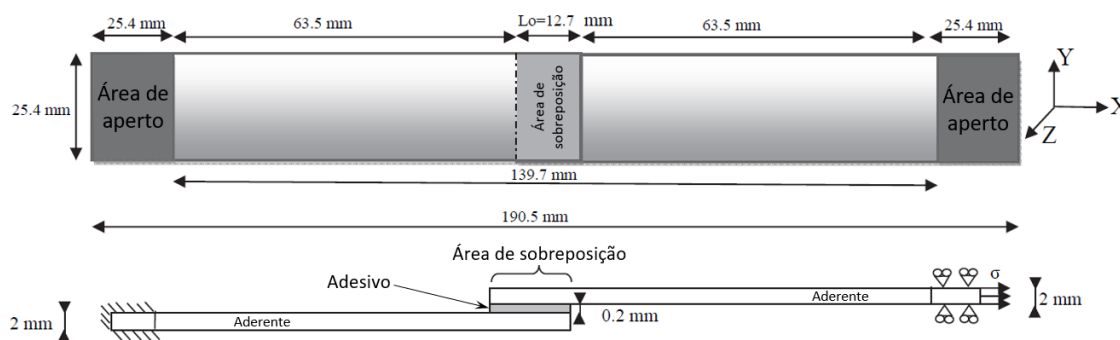
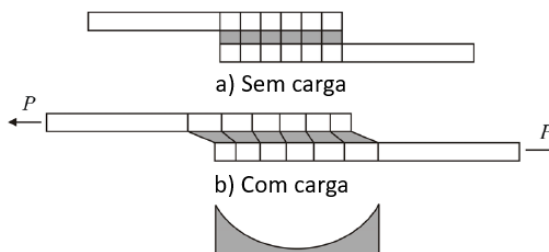


Figura 25- Geometria de um provete segundo a norma **ASTM D1002**, adaptado de [24]

A distribuição das tensões, como pode ser observado na Figura 26, não é uniforme devido à deformação diferencial dos substratos. A tensão de corte é máxima nas extremidades de sobreposição e é mínima no centro. Além disso, o desalinhamento dos aderentes provoca a flexão da junta introduzindo esforços de arrancamento nas extremidades. Ou seja, este método de ensaio é simples e fácil de executar, mas o adesivo não está sujeito a corte puro.



c) Tensão de corte no adesivo ao longo do comprimento de sobreposição

Figura 26- Deformação diferencial dos aderentes e tensões que atuam na camada de adesivo quando sujeitos a carregamento, adaptado de [25]

### 2.4.2. Ensaio losipescu V-Notched beam shear method

Este ensaio pode ser realizado em provetes maciços de adesivo ou em junta e é regulamentado pela norma **ASTM D5379**. O ensaio é realizado num provete retangular com dois entalhes simétricos no centro do provete sendo solicitado em quatro pontos. Com a solicitação imposta a secção central do provete fica sujeita a um esforço de corte. Os momentos fletores dos dois lados anulam-se um ao outro pelo que a secção central do provete está sujeita a um esforço de corte, nesta zona devem ser colocados extensómetros a  $45^\circ$  e  $-45^\circ$  com o eixo do provete de forma a medir as respetivas deformações.

A figura em baixo retirada da referência [26] demonstra as dimensões de um provete segundo a norma **ASTM D5379**:

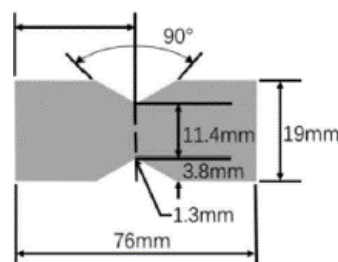


Figura 27- Geometria do provete para o ensaio *losipescu* segundo a norma **ASTM D5379**, [26]

Este método tem como principais vantagens:

- Permite obter a tensão de corte ( $\tau$ ) e o módulo de corte (G)
- O provete usado é compacto e de fácil execução
- Permite determinar facilmente as propriedades ao corte

Contudo este método também apresenta certas desvantagens:

- Dificuldade na obtenção de medidas precisas das deformações
- Obriga ao uso de adesivos de baixa tenacidade para impedir a flexão do provete
- Necessita de um acessório especial de ligação do provete
- A obtenção de um esforço de corte puro depende da aplicação correta da carga

### 2.4.3. Ensaio de borboleta ou *Notched plate shear method* (Arcan)

Este ensaio consiste na utilização de um provete com forma semelhante a uma borboleta tal como mostrado na Figura 28. Este ensaio pode ser realizado tanto em provetes de adesivo maciço como em provetes de junta. O provete tem de estar fixo em quatro pontos (Figura 29) e a concentração de tensões depende do raio de concordância dos entalhes [2], [9]. A secção entre os dois entalhes está sujeita a um esforço de corte. Tal como acontece no ensaio losipescu, devem ser colados extensómetros de forma a medir as deformações de corte do provete ou utilizar sistemas óticos.

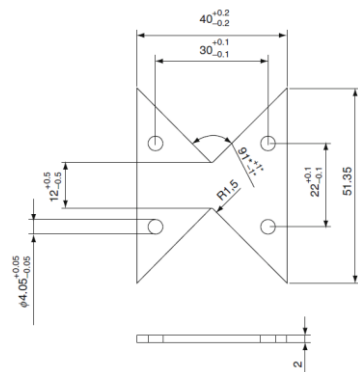


Figura 28- Dimensões do provete para o ensaio Arcan, adaptado de [9]

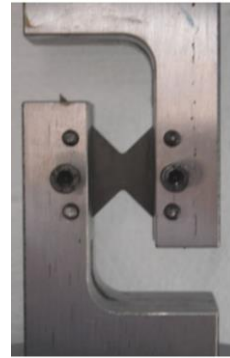


Figura 29- Ferramenta para carregamento do provete Arcan, adaptado de [9]

Este método tem como principais vantagens:

- Pode aplicado a todos os tipos de adesivos
- Pode ser usado em diversas condições ambientais
- Permite determinar a tensão de corte( $\tau$ ) e o módulo de corte( $G$ )
- É muito utilizado em provetes de dimensões muito reduzidas

No entanto também apresenta algumas desvantagens como:

- Precisa de acessórios especiais de ligação
- A tensão de corte que se obtém não é uniforme, pois não é um ensaio de corte puro
- Apresenta certas dificuldades na medição da amplitude de deformações

#### 2.4.4. Ensaio de junta topo a topo em torção (*Napkin-ring test*)

Este ensaio é utilizado quando as deformações são baixas, não tem uma norma específica e é usado em juntas de topo a topo entre dois cilindros de paredes finas (Figura 30). Este ensaio permite obter um estado de tensão em corte puro ao longo do adesivo e permite determinar propriedades de corte aplicando um momento torsor ao adesivo ou junta adesiva.

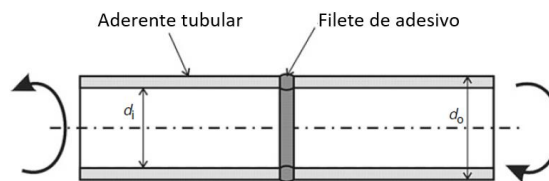


Figura 30- Provede para o ensaio topo a topo em torção, adaptado de [9]

Este método tem como principais vantagens:

- Se os provetes estiverem alinhados corretamente permite obter um estado de tensão relativamente uniforme (corte puro)
- Permite obter a tensão de corte ( $\tau$ ) e o módulo de corte ( $G$ )

No entanto também possui certas desvantagens como:

- Elevado custo na obtenção dos provetes e são difíceis de fabricar
- Dificuldade em controlar a espessura do cordão
- Equipamento usado é muito complexo

### 2.4.5. Ensaio TAST

Este ensaio é muito usado devido à sua facilidade na obtenção de provetes e utilização do equipamento recomendado. Neste ensaio os substratos mais usados são geralmente metálicos, pois devem ser de elevada rigidez. A figura seguinte demonstra os provetes TAST com as suas dimensões. Este ensaio é normalizado pelas normas **ISO 11003-2.2** [27] e **ASTM D3983** [2], [9].

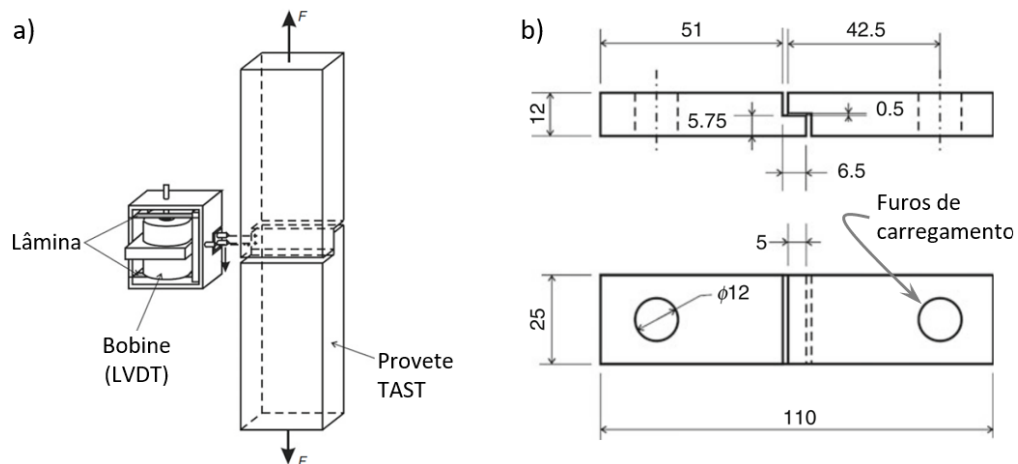


Figura 31- Provette TAST. (a) extensómetro; (b) dimensões (em mm), adaptado de [9]

Este método tem como principais vantagens:

- Custo razoável para o fabrico dos respetivos provetes
- O estado de tensão é relativamente uniforme na zona adesiva
- Permite obter a tensão de corte ( $\tau$ ) e o módulo de corte ( $G$ )

No entanto também apresenta algumas desvantagens como:

- Os substratos usados devem ser espessos e está limitado a apenas substratos metálicos
- É necessário recorrer a ferramentas especiais para o alinhamento dos substratos e solicitação dos provetes

## 2.5. Ensaios de arrancamento

Estes ensaios são particularmente adequados para distinguir os adesivos frágeis dos dúcteis e podem ser divididos nos seguintes dois grupos [2], [28]:

1. Ensaio de arrancamento em junta de tipo "T"
2. Ensaio de arrancamento entre um substrato rígido e um substrato flexível que por sua vez este divide-se em três ensaios:
  - Ensaio de arrancamento a 180°
  - Ensaio de rolete flutuante ou *floating roller test*
  - Ensaio de *Climbing Drum Test*

### 2.5.1. Ensaio de arrancamento em junta de tipo "T"

Este ensaio é descrito pela norma **ASTM D1876** [23], é aplicado quando se pretende caracterizar a resistência ao arrancamento de ligações adesivas com substratos flexíveis. Este ensaio é realizado numa máquina universal de tração com velocidade de aplicação de carga constante e, segundo a norma, devem ser ensaiados pelo menos dez provetes em condições idênticas. Este método também é muito usado para caracterizar diferentes combinações de adesivos e preparação das superfícies, embora em muitos casos se note uma grande dispersão [2], [28].

A Figura 32 mostra um exemplo de uma junta em "T" utilizada para o ensaio de arrancamento de dois substratos flexíveis segundo a norma **ASTM D1876** [23]. Neste exemplo foram utilizados substratos de alumínio (AW 1050) com 0,5 mm de espessura e um adesivo (Araldite® LY5052 com endurecedor Aradur 5052) com fibras de carbono.

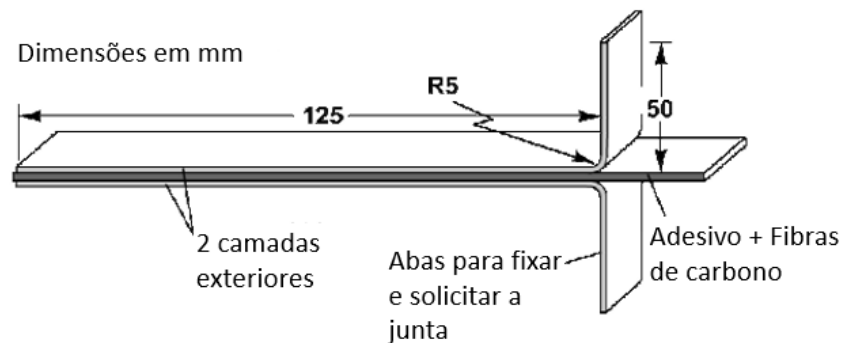


Figura 32- Amostra para o teste de arrancamento em junta do tipo "T" segundo a norma **ASTM D1876-08**, adaptado de [29]

Este método tem como principais vantagens:

- É um ensaio simples e económico
- Os provetes usados são de fácil fabrico
- O ensaio pode ser feito em qualquer máquina à tração universal

No entanto este também apresenta determinadas desvantagens:

- A espessura do adesivo influencia o resultado
- As propriedades mecânicas são afetadas pela geometria do adesivo excedentário na extremidade da junta.
- As medições apresentam elevado grau de incerteza

### 2.5.2. Ensaio de arrancamento a 180°

Este ensaio é descrito pela norma *ASTM D903-39* [30] e *ISO 8510-2* e um dos substratos é bastante flexível podendo ser dobrado com um ângulo de 180°. Este ensaio é mais usado em adesivos não estruturais (vedantes, por exemplo). Os resultados são mais consistentes que os obtidos com a juntas em “T”, pois o ângulo de arrancamento é mantido constante, embora dependa das propriedades dos aderentes, tais como a espessura e módulo de elasticidade [2] [28]. A Figura 33 mostra um esquema do ensaio de arrancamento a 180°.

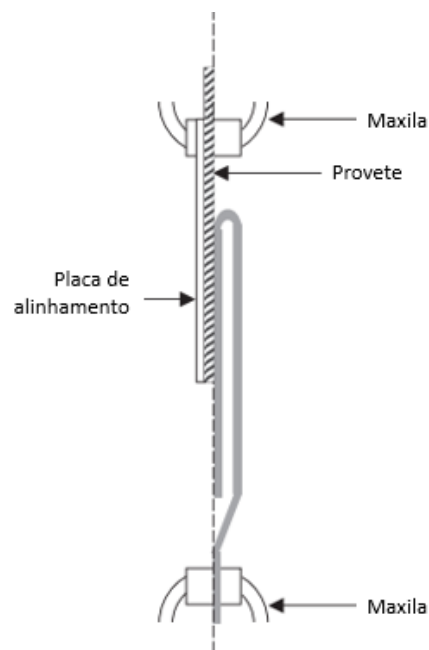


Figura 33- Ensaio de arrancamento a 180° segundo a norma *ISO 8510-2*, adaptado de [28]

### 2.5.3. Ensaio de rolete flutuante

Este ensaio é normalizado pela norma *ASTM D3167* [31]. O ensaio de rolete flutuante, ilustrado na Figura 34, permite caracterizar a resistência ao arrancamento de ligações adesivas entre um substrato flexível e outro substrato rígido. O ângulo de arrancamento é constante durante o ensaio e pode ser efetuado numa máquina de ensaio à tração universal usando ferramentas próprias (rolete flutuante). Segundo a norma referida uma variação da espessura dos aderentes influencia os valores de teste, por isso a espessura das chapas usadas para fabricar os provetes devem ser especificadas. Quando a espessura não é especificada o aderente flexível deve ter uma espessura de 0,63 mm e o aderente rígido uma espessura de 1,63 mm. As dimensões do provete estão indicadas na Figura 35. O ensaio deve ser realizado a uma velocidade constante de 152 mm/min e os primeiros 25 mm devem ser desprezados. Para o cálculo devem ser utilizados valores de até pelo menos 76,2 mm de deslocamento e consequente propagação da rotura da ligação. Ou seja, o ensaio consiste basicamente em obter a carga média durante um período em que a solitação de arrancamento permanece estável. Este método de teste

também pode ser usado como alternativa ao teste usado pela norma **ASTM D1781** [11] para a aceitação e controlo do processo testado, no entanto é mais severo devido ao ângulo de arrancamento ser maior [2], [28].

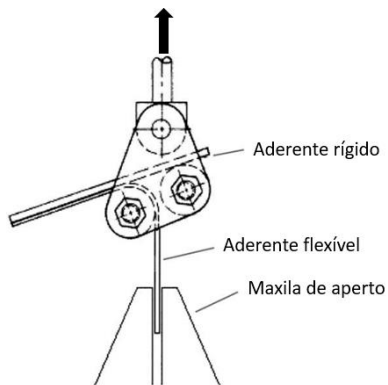


Figura 34- Ensaio de rolete flutuante segundo o método da norma **ASTM D3167**, adaptado de [32]

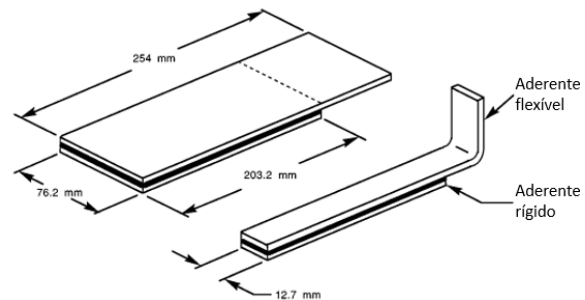


Figura 35- Dimensões do provete segundo o método da norma **ASTM D3167**

A norma **ISO 4578** também define o método a seguir para realizar o ensaio de rolete flutuante e a principal diferença é que, neste caso, a largura dos aderentes é de 25 mm.

Os resultados obtidos podem ser geralmente apresentados sob a forma de um gráfico que indica a evolução da força de arrancamento em função do deslocamento. O modo de rotura é importante na interpretação dos resultados [2], [28].

Este método também pode ser usado na análise de propriedades em compósitos híbridos com fibra contínua fabricados por impressão 3D [33]. Os provetes usados neste ensaio foram preparados de acordo com a norma **ASTM D3167** [31], e são mostrados na Figura 36 (a). No trabalho indicado foi usada uma fita para configurar uma zona artificial de pré-fissura entre as camadas adjacentes durante o processo de impressão. O ensaio foi realizado numa máquina MTS com o objetivo de estudar as propriedades de adesão dos compósitos impressos utilizando uma célula de carga 1 kN. A Figura 36 (b) mostra a configuração dos testes de arrancamento. A velocidade foi de  $100 \text{ mm/min}$  e os ensaios foram realizados à temperatura ambiente. Durante o teste foram registados a força de arrancamento e variação do deslocamento calculando, assim, as cargas médias como demonstra na Figura 36 (c). Foram testadas três amostras no total em cada condição de teste e os valores médios reportados com seu respetivo desvio padrão. A Figura 37 mostra as curvas forças de arrancamento/deslocamento para vários compósitos.

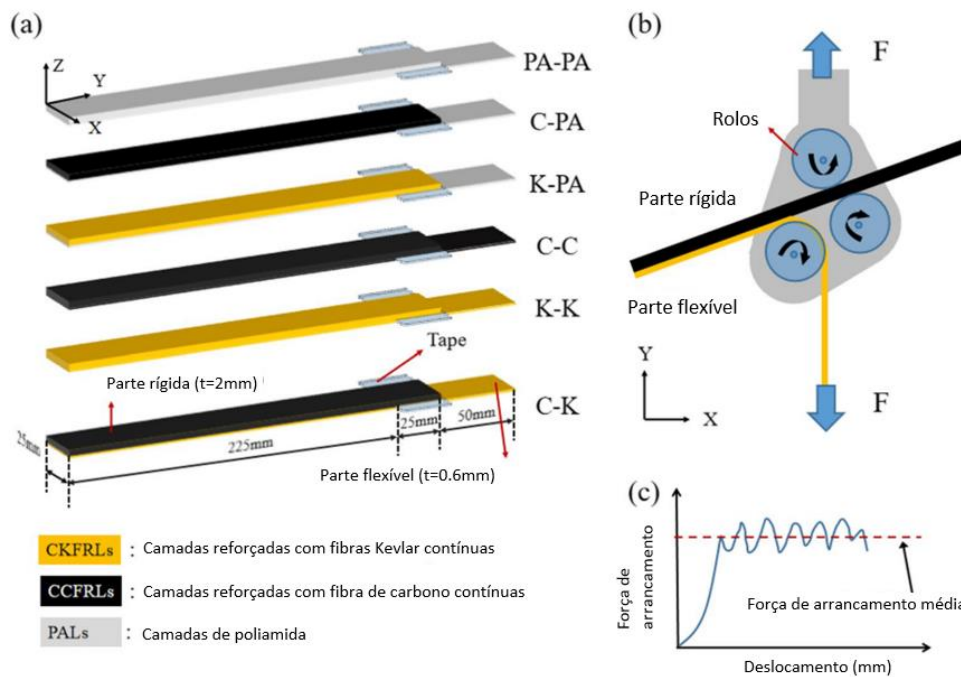


Figura 36- (a) Amostras usadas em ensaio de rolete flutuante, (b) execução do teste de arrancamento, (c) Força/deslocamento do ensaio realizado, adaptado de [33]

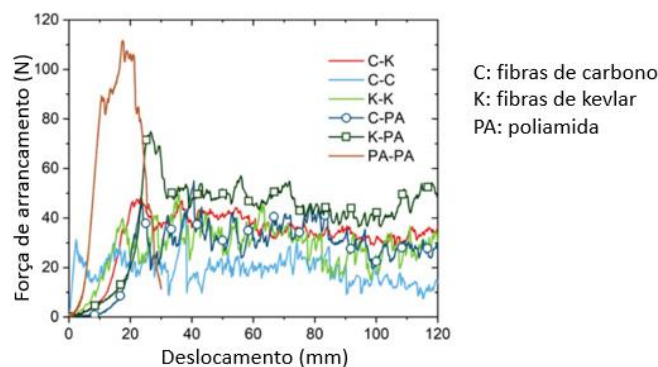


Figura 37- Resultados do teste de arrancamento em compósitos com fibras contínuas, adaptado de [33]

Sang Yoon Park et al. [34] utilizaram ensaios de rolete flutuante segundo a norma **ASTM D3167** [31] para analisar o efeitos do tipo de preparação superficial dos substratos de alumínio (AA 2024-T3) na resistência à corrosão da junta adesiva. Foram utilizados dois adesivos de epóxico (Cytec FM73 com 0,30 mm de espessura e 3M AF163-2 K com uma espessura de 0,25 mm). As juntas tinham 25 mm de largura e 300 mm de comprimento com 2,35 mm de espessura total. A resistência ao arrancamento aparente foi definida pela seguinte equação:

$$\tau_{peel} = \frac{P_{peel}}{w} \quad (3)$$

$\tau_{peel}$ : Tensão de arrancamento (N/mm);  $P_{peel}$ : Força de arrancamento (N);  $w$ : Largura (mm)

O gráfico (a) da Figura 38 apresenta um exemplo de curvas força-deslocamento obtidas com o ensaio de rolete flutuante para uma determinada preparação superficial. O gráfico (b) apresenta a resistência ao arrancamento para o adesivo AF163-2 K em função do tempo de envelhecimento e tipo de preparação superficial. Para conhecimento destes fatores torna-se necessário consultar o respetivo artigo [34].

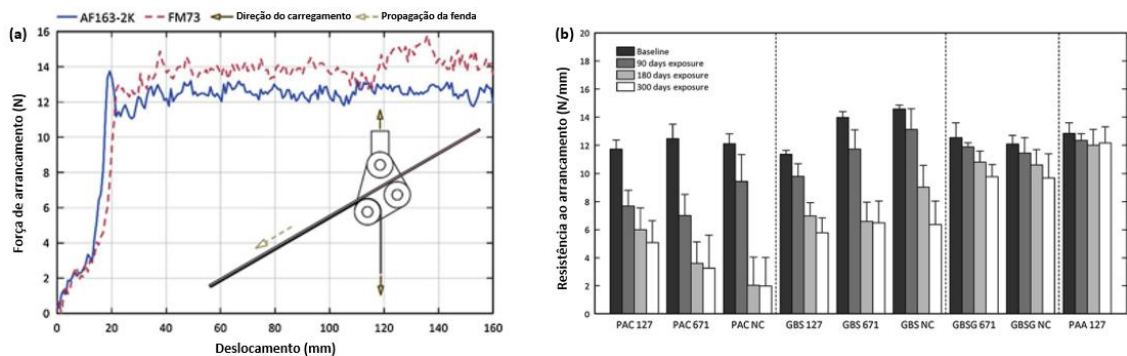


Figura 38- (a) Curvas força-deslocamento. (b) Resistência ao arrancamento em função do tipo de preparação dos substratos e tempo de exposição à névoa salina, adaptado de [34]

Outros trabalhos interessantes que utilizaram o ensaio de rolete flutuante são o [35], [36], [37] e [38].

Este ensaio tem como principais vantagens:

- Compatível com materiais metálicos e PMC (*Polymer Matrix Composites*)
- Simples de executar
- Económico
- Custo moderado no fabrico de provetes

No entanto este ensaio também possui certas desvantagens, tais como:

- Necessita de ferramentas próprias, como é o caso do rolete
- Apenas fornece dados comparativos

#### 2.5.4. Ensaio de Climbing drum test

O método para a realização deste ensaio é descrito pela norma **ASTM D1781** [11]. Trata-se de um ensaio de arrancamento usado para caracterizar a resistência ao arrancamento de ligações adesivas entre um substrato rígido e outro flexível sendo mais utilizado em estruturas *sandwich* em que se pretende conhecer a resistência de separação entre a pele e o núcleo. Este ensaio utiliza ferramentas próprias como a apresentada na Figura 39. Trata-se de um método meramente comparativo que tende a controlar a qualidade da ligação adesiva [2].

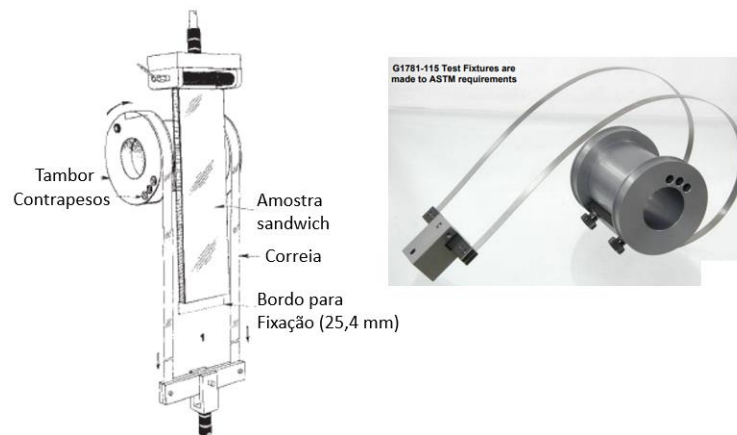


Figura 39- Ensaio de *climbing* de uma estrutura sandwich segundo a norma **ASTM D1781** [11], adaptado de [39]

Este ensaio tem como principais vantagens:

- É um ensaio simples e económico
- Pode ser usado em diversos tipos de estruturas sandwich

No entanto apresenta certas desvantagens:

- É um ensaio válido apenas para estruturas sandwich e peles de baixa rigidez
- Necessita de ferramentas próprias para a sua execução

## 2.6. Ensaio de impacto

A norma **ASTM D950** descreve um procedimento para a realização de ensaios de impacto em juntas adesivas. Esta metodologia é baseada no ensaio Charpy para metais. O resultado do ensaio é apresentado como energia absorvida por unidade de área colada ( $J/m^2$ ) [21]. Os resultados não são muito reprodutíveis e a energia absorvida depende da espessura da camada de adesivo.

Existem outras metodologias que permitem avaliar a resistência de juntas adesivas quando sujeitas a solicitações em que a velocidade de deformação é elevada. Juntas de sobreposição simples podem ser solicitadas nestas condições adaptando dispositivo do tipo *drop test*.

O exemplo da Figura 40 retirado da referência [40] tem por base a norma **ASTM D950-82**.

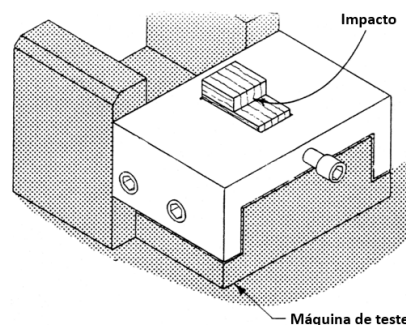


Figura 40- Sistema de fixação para ensaios de impacto em juntas adesivas segundo a norma **ASTM D950**, adaptado de [40]

O ensaio de impacto tem como principais vantagens:

- Permite medir a resistência de adesivos perante solicitações com diferentes velocidades de deformação
- Permite comparar de diferentes adesivos quando se utilizam idênticas condições de ensaio
- Com a adaptação dos dispositivos *drop test*, é possível determinar a duração do ensaio até este atingir a força máxima, a força máxima e o alongamento até à rotura.

No entanto este método também apresenta desvantagens:

- É um ensaio meramente comparativo
- Não permite obter propriedades intrínsecas da junta
- A energia medida está apenas relacionada com a camada de adesivo e não com o tipo da junta
- Necessita de ferramentas especiais para fixação e solicitação das juntas.

## 2.7. Ensaio de fadiga

Este ensaio baseia-se na norma **ASTM D3166-99** [41], que refere o procedimento a ser considerado para avaliar o comportamento à fadiga em juntas de sobreposição simples, o objetivo deste ensaio é avaliar o comportamento de um adesivo quando sujeito a solicitações cíclicas obtendo assim um diagrama Tensão/N(ciclos) também designado de curva de *Wöhler*. Neste ensaio são considerados pelo menos cinco níveis de tensão escolhidos criteriosamente de forma que a rotura ocorra regularmente com intervalos mínimos de 2000 ciclos e no máximo  $10 \times 10^6$  ciclos, para cada nível de tensão escolhido devem ser analisados pelo menos cinco provetes. A norma evidencia a necessidade de indicar a frequência nas especificações de material em caso de não estar implícita esta especificação o recomendado é uma leitura de 1800 ciclos/minuto (30 HZ), a frequência máxima a ser usada depende da condutibilidade térmica da combinação adesivo/substrato, do modo de carregamento e das dimensões do provete, nomeadamente a sua largura. A temperatura na superfície do provete deve ser mantida o mais baixa possível o que pode ser necessário o uso de termopares para controlar a variação de temperatura no provete durante o ensaio de fadiga. Os ensaios de fadiga são realizados em máquinas servo hidráulicas capazes de impor cargas e deslocamentos constantes e condições diversas para o ciclo de carregamento, a fixação dos provetes deve garantir o bom alinhamento de forma a evitar desvios superiores a 2% na força aplicada[2].

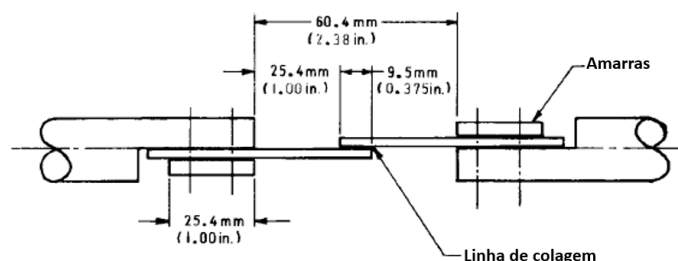


Figura 41- Amostra para ensaio de fadiga, adaptado de [41]

## 2.8. Ensaios de durabilidade

Estes ensaios são importantes, pois as condições ambientais em que as juntas adesivas são atuadas diminui a sua resistência, por exemplo a humidade relativa e a temperatura ambiental diminuem a manutenção em serviço sob condições normais para um período estimado com o período do projeto. Estes ensaios avaliar o desempenho da junta mediante diversas condições adversas e o efeito provocado por várias preparações superficiais ou mesmo pela influência dos substratos. Os ensaios de durabilidade podem ser distinguidos em dois tipos[21]:

1. Ensaio para caracterização do efeito das condições ambientais isoladamente, este ensaio divide-se em dois ensaios diferentes:
  - Determinação da durabilidade em juntas de sobreposição simples
  - Determinação da durabilidade através do ensaio de cunha (*wedge test*)
2. Ensaio para caracterização do efeito combinado das condições de carregamento e das condições ambientais, este ensaio divide-se em quatro ensaios diferentes:
  - Determinação da durabilidade em juntas de sobreposição simples em tensão
  - Determinação da durabilidade através do ensaio Maddison (junta perfurada)
  - Determinação da durabilidade por arrancamento (junta em T)
  - Avaliação das condições ambientais no comportamento à fadiga

### 2.8.1. Determinação da durabilidade em juntas de sobreposição simples

Este procedimento consiste na realização de ensaio de tração em juntas de sobreposição simples seguindo o procedimento descrito na norma **ASTM 1002** [23]. Os provetes são submetidos durante pelo menos 40 horas nas condições ambientais descritas na norma **ASTM D2919**[42].

### 2.8.2. Determinação da durabilidade através do ensaio de cunha

Este ensaio, especificado pela norma **ASTM D3762** [43], é muito sensível às variações que ocorrem na preparação da superfície dos substratos e à durabilidade do adesivo devido às condições ambientais a que estes são sujeitos (não se trata de um ensaio quantitativo). Os substratos usados neste processo são planos e rígidos e funciona através de uma cunha que é forçada através da camada de adesivo criando um esforço de arrancamento no adesivo. O principal objetivo deste ensaio é caracterizar o tipo de fratura. A força necessária para a propagação da fratura relaciona-se com a rigidez dos substratos à medida que estes vão sendo separados assumindo que os substratos não se deformam plasticamente. No entanto, quando se utilizam adesivos de elevada ductilidade e de baixo módulo os substratos não devem ser muito espessos para que as deformações na extremidade da fissura não sejam muito elevadas.

A figura em baixo demonstra a extensão da fissura num provete segundo a norma **ASTM D3762** [43].

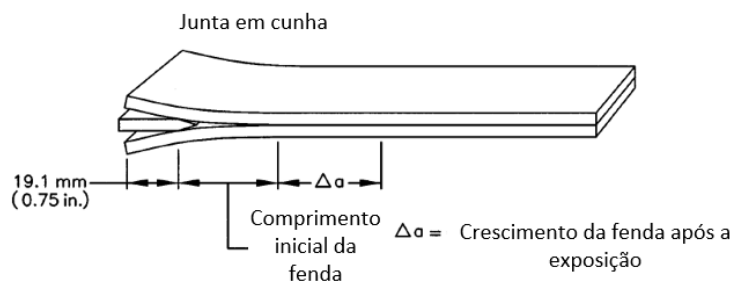


Figura 42- Ensaio cunha, adaptado de *ASTM D3762* [43]

### 2.8.3. Determinação da durabilidade de juntas de sobreposição simples em tensão

Este ensaio descrito pela norma *ASTM D2919* [42] utiliza um dispositivo como o demonstrado na figura abaixo. Os dispositivos introduzem esforço de tração através de uma mola e a força aplicada deve ter uma precisão de  $\pm 1\%$ . No mínimo seis provetes devem ser colocados nos dispositivos e carregados previamente até 1% da carga pretendida e depois de reapertar os parafusos até à carga total desejada. Os parafusos de bloqueamento são apertados e a carga aplicada pela máquina de ensaio é retirada ficando os provetes carregados pelas molas do dispositivo. Os dispositivos são colocados nas condições ambientais pretendidas e feitas observações periódicas dos provetes. No registo é considerado o tempo total para efeitos de rotura.

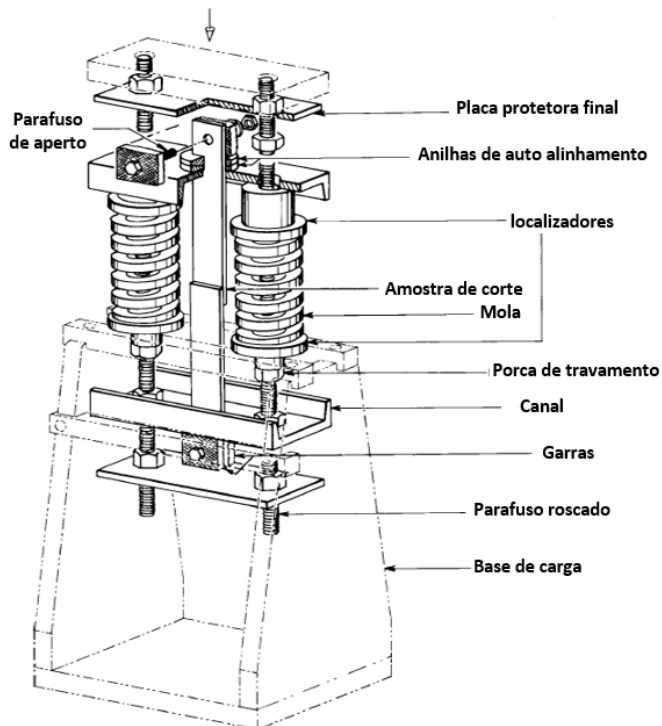


Figura 43- Aparelho teste de durabilidade, adaptado de *ASTM 2919* [42]

#### 2.8.4. Determinação da durabilidade usando o ensaio *Maddison* (Junta perfurada)

Este ensaio, definido pela norma *ISO 14615*, é realizado numa junta de sobreposição simples em que a zona de sobreposição é perfurada permitindo uma penetração mais rápida da humidade. Usa-se um conjunto de seis provetes tensionado por uma mola e colocados em contacto com a atmosfera pretendida. A durabilidade é avaliada pelo tempo necessário até à rotura nas condições de ensaio [2].

#### 2.8.5. Determinação da durabilidade por arrancamento (junta em T)

Este ensaio, no que compete ao arrancamento em substratos flexíveis, é o mais usado devido à sua simplicidade e é realizado em juntas com forma de T. Este método é definido pela norma *ASTM D2918* [44] e refere o método em que pode ser medida a durabilidade nas condições requeridas. O dispositivo de ensaio pode ser preparado para exposição ambiental exterior segundo a norma *ASTM D1828* [45], ou exposição em câmara com atmosfera controlada ou imersão do provete com temperatura controlada.

#### 2.8.6. Avaliação das condições ambientais no comportamento à fadiga

O efeito ambiental no comportamento das juntas adesivas com carregamento cíclico é avaliado e realizado por comparação entre a resistência à fadiga de juntas envelhecidas e juntas não envelhecidas. Os provetes são submetidos a um período de acondicionamento mínimo em condições ambientais específicas e ensaiados de acordo com o processo descrito pela norma *ASTM D3166-99* [41]. Assim é estabelecida a comparação entre as diferentes curvas de tensão máxima e o número de ciclos para a rotura [2].

### 2.9. Ensaios de fratura

Estes ensaios têm como função avaliar a resistência mecânica de juntas coladas através da taxa de libertação de energia  $G_c$  e são caracterizados pelos seguintes modos de fratura [2]:

- Modo I
- Modo II
- Modo III (misto I+II)

#### 2.9.1. Modo I

Neste modo de carregamento, dois possíveis ensaios, são o ensaio DCB (*Double Cantilever Beam*) e o ensaio TDCB (*Tapered Double Cantilever Beam*).

A Figura 44 mostra a geometria e dimensões de um provete para a realização do ensaio DCB segundo a norma *ASTM D3433-99* [46]. É o ensaio mais utilizado para determinar a resistência

à fratura em modo I, pois é um ensaio relativamente simples de executar e que utiliza substratos com uma geometria simples e, portanto, de fácil fabrico e menor custo.

Considera-se uma região inicial isenta de adesivo (pré-fenda) situada na extremidade do provete em que vai ser realizado o carregamento do provete. A velocidade de ensaio deve ser aplicada de forma a induzir o início da propagação da pré-fenda um minuto após o início do ensaio. A velocidade de ensaio está geralmente compreendida entre 0,5 e 3 mm/min, dependendo das características dos materiais dos substratos e do adesivo. Durante o ensaio, regista-se a carga (P) e o deslocamento ( $\delta$ ) para os respetivos valores de comprimento de fenda.

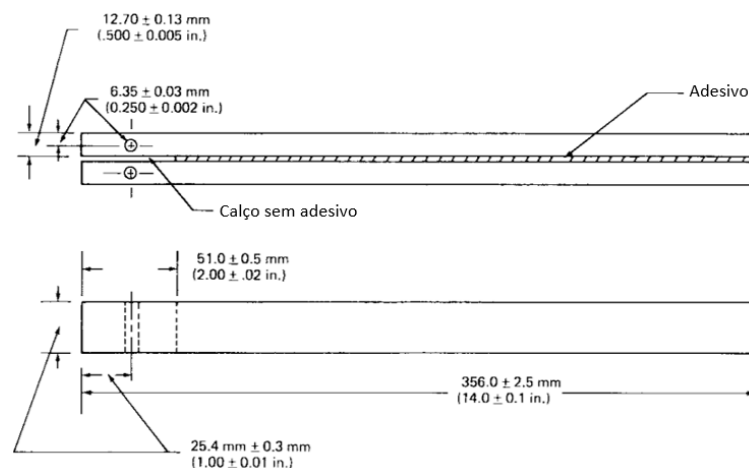


Figura 44- Amostra aderente plana, adaptado de *ASTM D3433-99* [46]

A Figura 45 mostra a geometria dos substratos usados no ensaio TDCB que também é sugerida pela norma *ASTM D3433-99* [46]. A maior desvantagem deste ensaio, comparativamente ao DCB, é o fabrico dos substratos que é mais difícil e dispendioso.

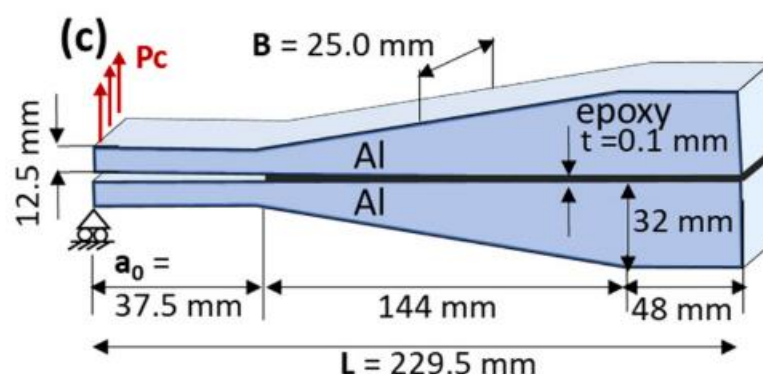


Figura 45- Provete para ensaio TDCB, adaptado de [47]

## 2.9.2. Modo II

A caracterização da fratura em modo I, apresentada muito resumidamente no subcapítulo anterior, encontra-se bem definida e os ensaios normalizados. Contudo, o mesmo já não

acontece quando se trata do modo II. Os principais ensaios em modo II são: o ENF (*End Notched Flexure*), o ELS (*End Loaded Split*) e o 4ENF (*Four-point End Notched Flexure*).

O ensaio ENF é o mais utilizado para caracterizar a fratura de materiais em modo II devido à sua simplicidade, já o ensaio ELS apresenta grandes dificuldades na obtenção correta do  $G_{IIC}$  devido à presença de grandes deslocamentos e à sensibilidade no aperto, por outro lado o ensaio 4ENF necessita de um dispositivo mais sofisticado e apresenta problemas como o caso de atrito na zona da pré-fenda. A Figura 46 demonstra um exemplo de ensaio realizado usando o ensaio ENF para amostras modo II puras.

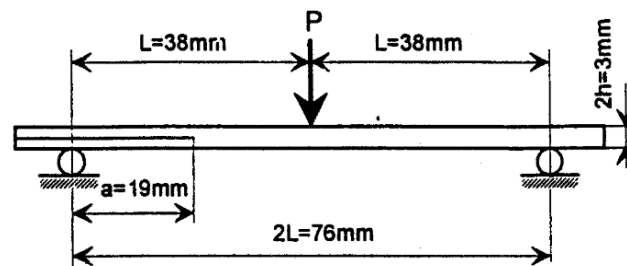


Figura 46- Ensaio ENF usando amostra em modo II, adaptado de [48]

### 2.9.3. Modo misto

Como as juntas adesivas são geralmente sujeitas à ação de tensões normais e de corte devem ser realizados testes de resistência na ação combinado dos dois modos. Um ensaio possível para este caso é o MMF (*Mixed Mode Flexure*) que é similar ao ensaio ENF, mas neste ensaio uma das extremidades do provete está apoiada no braço superior e é definido pela norma **ASTM D6671** para caracterizar a fratura interlaminar de compósitos em modo misto. A Figura 47 mostra um esquema do ensaio MMF.

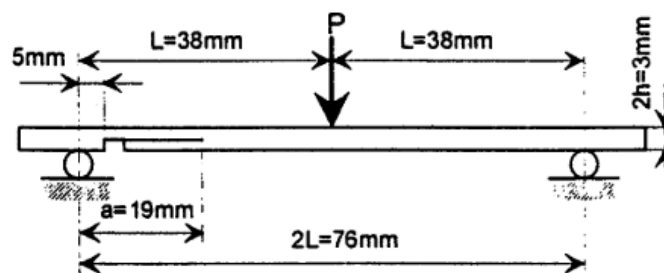


Figura 47- Representação de um exemplo de ensaio MMF em modo misto, adaptado de [48]

Para o caso das ligações adesivas existem vários ensaios em modo misto, embora nenhum deles, neste momento, esteja normalizado. Contudo, no carregamento em modo I+II (misto) os ensaios mais relevantes são os seguintes: *Asymmetric Double Cantilever Beam* (ADCB), *Asymmetric Tapered Double Cantilever Beam* (ATDCB), *Mixed-Mode Bending* (MMB) e *Mixed Mode Flexure* (MMF) e o *Cracked Lap Shear* (CLS). A Figura 48 apresenta esquemas que ilustram este tipo de ensaios.

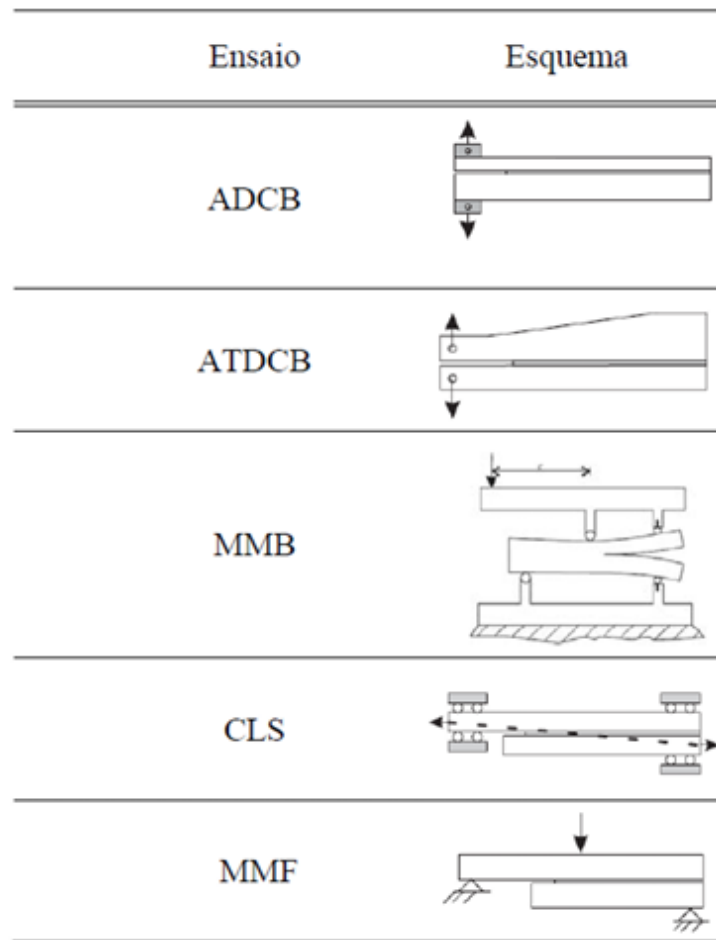


Figura 48- Representação de ensaios em modo misto [apontamentos de PROLI (Processos de ligação) Módulo 9- Ensaios de adesivos]

### 3. Desenho e fabrico das ferramentas

Neste capítulo serão apresentados os desenhos das peças principais para o fabrico das ferramentas requeridas. Para a modelação e desenhos das peças foi usado o programa SOLIDWORKS.

#### 3.1. Ferramenta para ensaio de rolete flutuante

A ferramenta para o ensaio de rolete flutuante foi desenvolvida de acordo com os requisitos da norma **ASTM D3167** [31].

Na figura seguinte é apresentado o desenho de conjunto da ferramenta com recurso ao SolidWorks®. Nesta figura não estão presentes os parafusos que fixam as placas laterais aos veios. Os desenhos técnicos das várias peças encontram-se no Anexo A.

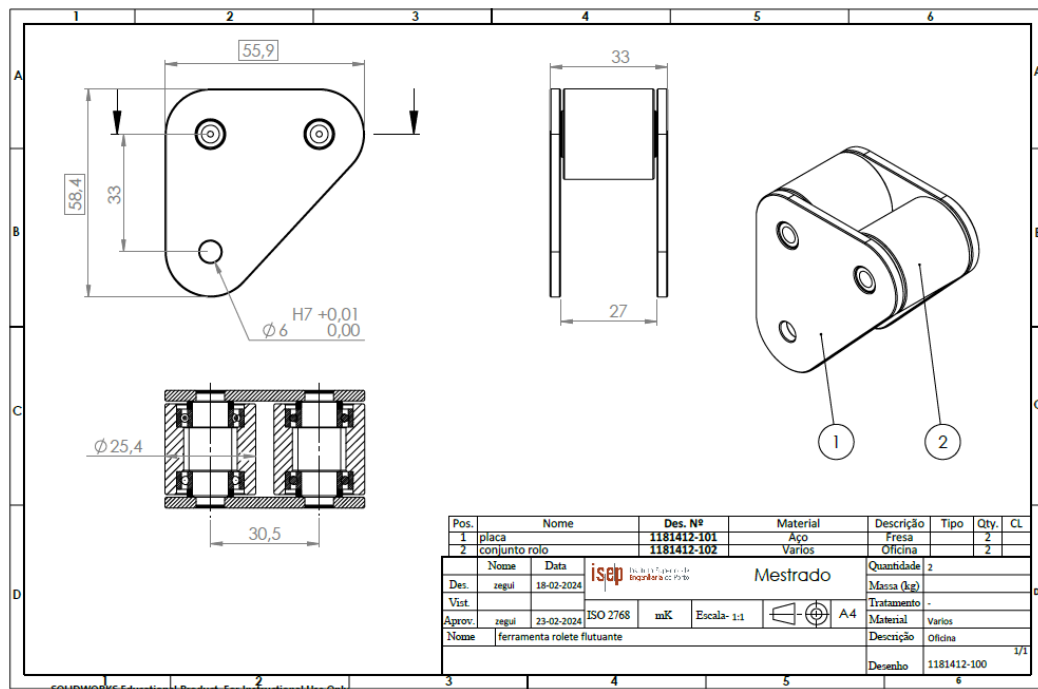


Figura 49- Desenho de conjunto da ferramenta para o ensaio de rolete flutuante

Na Figura 50 pode observar-se a ferramenta parcialmente montada. De facto, um dos rolos já tem o respetivo veio e rolamentos montados. A ferramenta é constituída por duas placas

## Desenho e fabrico das ferramentas

laterais (1) com espessura de 3 mm e três furos. Um dos furos tem 6 mm de diâmetro e serve para a colocação de um pino para acoplar a ferramenta à máquina de ensaios. Os outros dois furos têm 8 mm de diâmetro e servem para fixar os rolos (2) que apresentam 25,4 mm de diâmetro e 25,4 mm de comprimento. Os rolos são ocos para permitir a passagem dos respetivos veios (3). O diâmetro interno dos rolos na zona central é 15 mm (comprimento de 12,5 mm) e nas extremidades mais próximas da zona central é de 19 mm e com tolerâncias adequadas para o devido ajustamento ao diâmetro externo dos rolamentos SKF bearing 61800 (4). Os topos dos veios apresentam um diâmetro de 8 mm, para ajustar ao diâmetro dos respetivos furos das placas laterais, e possuem furos roscados que permitem fixar as placas laterais por intermédio de parafusos de cabeça hexagonal M6x12 (5). As zonas seguintes dos veios possuem um diâmetro de 10 mm e tolerâncias adequadas para o ajustamento ao furo dos rolamentos. O diâmetro da zona central dos veios é de 12 mm e com um comprimento de 12,5 mm. Para evitar o contacto e conseqüente atrito entre as placas laterais e o topo dos rolos são colocados anéis espaçadores (6) com diâmetro externo de 13 mm, diâmetro interno de 10 mm e 2 mm de largura. A colocação destes anéis garante uma folga de 0,8 mm entre a placa lateral e o topo do rolo. Nas ligações aparafusadas foram utilizadas anilhas *nord-lock* para evitar o afrouxamento da ligação. Estas anilhas estão colocadas nos parafusos apresentados na Figura 50. Na Figura 51 apresenta-se a ferramenta totalmente montada e na Figura 52 pode observar-se a ferramenta colocada na máquina de tração.



Figura 50- Ferramenta Rolete Flutuante parcialmente montada



Figura 51- Ferramenta Rolete Flutuante montada



Figura 52- Ferramenta na máquina de tração

Todas as peças (placas laterais, rolos, veios e anéis espaçadores) foram fabricados por maquinagem. Para os veios utilizou-se o aço FR 3 (DIN: 34 CrNiMo 6) por se tratar de um aço tratado com melhores propriedades que um aço de construção ao carbono. Para as outras peças foi utilizado o aço CK45. As peças foram submetidas a um tratamento de superfície por oxidação a negro (exceto os anéis espaçadores).

De salientar que todas as peças referidas anteriormente, bem como os restantes componentes (rolamentos, parafusos e anilhas), foram fornecidas pela Gislótica – Projecto e Fabrico de Soluções Mecânicas, Lda. Apesar da ferramenta ter sido oferecida, é conveniente conhecer o seu custo. Assim, o custo desta ferramenta rondou os 400 euros. No Anexo E encontra-se o custo de cada componente.

### 3.2. Ferramenta para fabrico de juntas topo a topo

Para o fabrico de juntas topo a topo é boa prática utilizar ferramentas (*gabarits*) para garantir o alinhamento dos substratos e regular a espessura do adesivo. A ferramenta que se pretende fabricar no âmbito deste trabalho deve respeitar as seguintes especificações:

- Garantir o alinhamento dos substratos;
- Fácil regulação da espessura do adesivo;
- Possibilidade de aceder a todo o perímetro da zona de colagem para limpeza do excesso de adesivo antes do endurecimento total do adesivo;
- Permitir a cura do adesivo à temperatura ambiente, mas também a temperaturas mais elevadas (até cerca de 120 °C);
- Fabrico de pelo menos 5 juntas topo a topo;
- Utilização de substratos cilíndricos de 12,7 mm de diâmetro e comprimento de 40 mm, mas com a possibilidade de utilizar provetes com outras dimensões;
- Fácil manuseamento (movimentação da ferramenta).

No subcapítulo 2.3.2 foram apresentadas algumas ferramentas utilizadas para o fabrico de juntas topo a topo com provetes cilíndricos. Contudo, nenhuma das ferramentas analisadas cumpre com todas as especificações referidas anteriormente e, por este motivo, decidiu-se a desenvolver uma nova ferramenta que é apresentada e descrita neste subcapítulo, mas que já pode ser observada na Figura 53. Os desenhos técnicos das várias peças que compõem a ferramenta encontram-se no Anexo B.

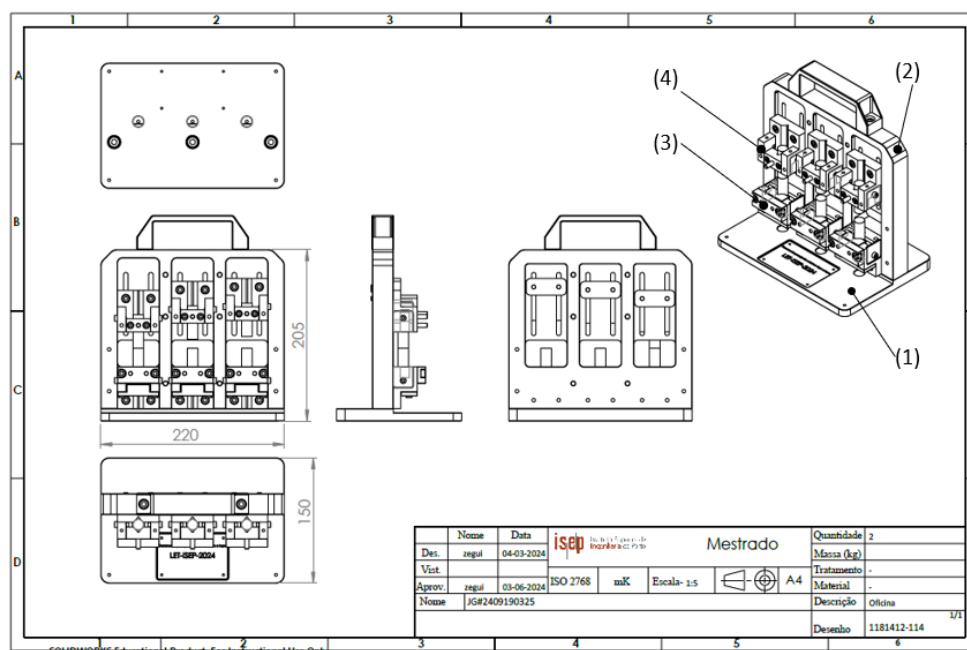


Figura 53- Desenho da ferramenta projetada para o fabrico de juntas topo a topo

A ferramenta pode ser dividida em 4 partes: base (1), placa vertical (2), suporte inferior (3) e suporte superior (4). Na ferramenta apresentada na Figura 53 também se pode observar a pega fixa no topo da placa vertical e os substratos cilíndricos fixos nos suportes inferiores e

superiores. De salientar que foram contempladas duas ferramentas iguais permitindo, assim, o fabrico de 6 juntas topo a topo. Optou-se por fazer duas ferramentas iguais, em que cada uma permite o fabrico de 3 juntas, em vez de fazer uma ferramenta única que permitisse fabricar as 6 juntas pois, neste segundo caso, a ferramenta seria mais pesada e mais difícil de manusear (transportar).

A **base** (Figura 54), fabricada numa liga de alumínio (AW 6082), permite a colocação da ferramenta numa mesa de trabalho e a fixação da placa vertical com recurso a 3 parafusos CHC M8x20. As dimensões máximas da base são 220x150x15 [mm].

A **placa vertical** (Figura 54), fabricada em aço CK45, possui 3 canais verticais nas suas faces onde são alojados os suportes dos substratos. Estes canais garantem o alinhamento dos suportes e consequentemente dos substratos. Na zona inferior dos rasgos (zona (a) da Figura 54) são fixos os suportes inferiores através de dois parafusos. Cada canal possui 2 rasgos verticais por onde passam parafusos que servem para fixar o suporte superior (zona (b) da Figura 54). A parte inferior dos canais é totalmente aberta para facilitar o acesso à zona da junta topo a topo que se encontra mais próxima da placa vertical (zona (c) da Figura 54). No caso de uma cura do adesivo à temperatura ambiente, esta abertura permitirá remover o excesso de adesivo da junta em todo o seu perímetro. Na face de topo da placa vertical existem 2 furos roscados para fixação de uma pega com parafusos CHC M6x16. Na face inferior apresenta 3 furos roscados para permitir a fixação à base. As dimensões máximas da placa vertical são 220x190x25 [mm].

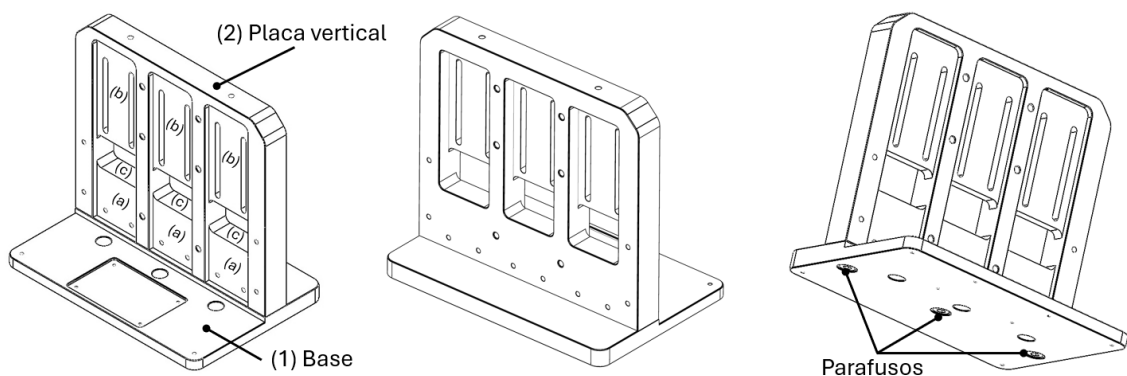


Figura 54- Conjunto base e placa vertical

O **suporte inferior** (Figura 55 e Figura 56) é constituído por várias peças e serve para fixar o substrato inferior da junta topo a topo. Os suportes inferiores são colocados nos canais maquinados na face da placa vertical e fixos a esta placa com 2 parafusos CHC M5x30. O substrato é aprisionado entre duas superfícies em V (mordentes) por ação de parafusos CHC M5x25. A vista explodida da Figura 56 permite observar as várias peças que constituem o suporte inferior incluindo o substrato e o pino que, neste caso, ficará na horizontal e paralelo à face da placa vertical da ferramenta. A colocação deste pino não é absolutamente necessária, mas a sua colocação permite definir a orientação do eixo do furo do substrato (paralelo à face da placa vertical).

Todas as peças dos suportes (inferiores e superiores) foram fabricadas por maquinagem em alumínio (AW 6082) com exceção das chapas laterais que são de aço inoxidável (AISI 304) e cortadas a laser.

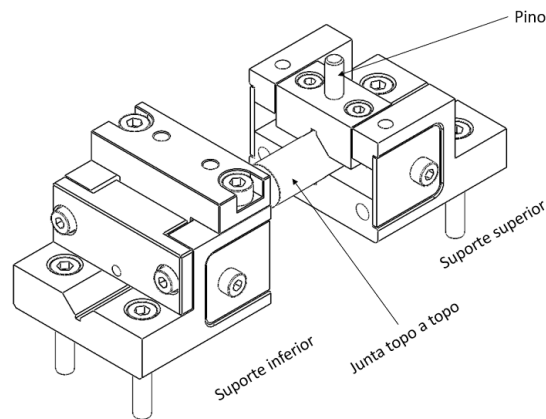


Figura 55- Conjunto suporte inferior e superior

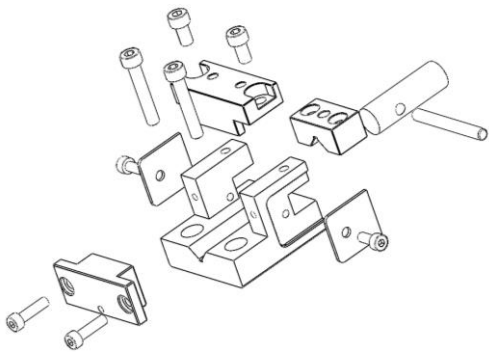


Figura 56- Vista explodida do suporte inferior

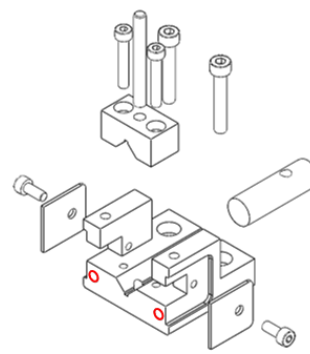


Figura 57- Vista explodida do suporte superior

O **suporte superior** (Figura 55 e Figura 57) também é constituído por várias peças e serve para fixar o substrato superior da junta topo a topo. Os suportes superiores são colocados nos canais maquinados na face da placa vertical garantindo o alinhamento com os suportes inferiores. A forma de fixar o substrato é idêntico ao indicado para o suporte inferior, ou seja, o substrato é aprisionado entre duas superfícies em V (mordentes) por ação de parafusos CHC M4x25. A vista explodida da Figura 57 permite observar as várias peças que constituem o suporte superior incluindo o substrato e o pino que, neste caso, ficará numa posição perpendicular à face da placa vertical da ferramenta. A colocação deste pino não é absolutamente necessária, mas a sua colocação permite definir a orientação do eixo do furo do substrato superior (perpendicular à face da placa vertical). De facto, a colocação dos substratos nos suportes pode ser realizada sem a colocação dos pinos. Contudo, se os substratos forem colocados nos suportes com os pinos, então os eixos dos furos dos substratos ficam perpendiculares entre si. No ensaio da junta topo a topo a aplicação do esforço de tração será realizado através dos pinos que são colocados nos furos dos substratos.

Os suportes superiores, ao contrário dos inferiores, podem ser deslocados individualmente ao longo dos canais e, uma vez definida a posição do suporte superior, que depende da folga que se pretende entre os substratos, faz-se o seu bloqueamento através de parafusos CHC M5x30 que passam pelo suporte e pela placa vertical (através dos rasgos existentes nos canais) e

apertam numas placas que se encontram alojadas nas caixas maquinadas na parte detrás da placa vertical (placas assinaladas na Figura 58). A folga entre os substratos será o valor que se pretende para a espessura do adesivo.

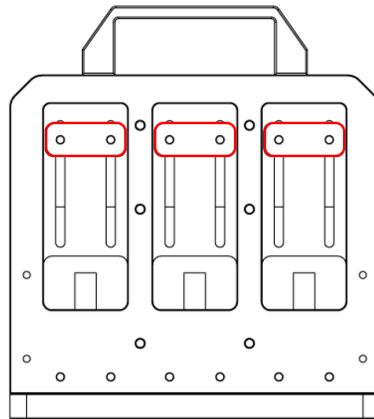


Figura 58- Vista de trás do conjunto completo

Os suportes dos substratos apresentam nos seus topos 2 furos roscados (assinalados a vermelho na Figura 57 para o caso do suporte superior) para colocação de parafusos M6 que funcionam como batentes e que permitem garantir a folga entre os substratos e, consequentemente, a espessura do adesivo. Dependendo do comprimento dos parafusos, podem ser colocados parafusos em apenas num dos suportes ou nos dois (superior e inferior). A ferramenta também permite utilizar como batente dos suportes superiores uma barra aparafusada na parte frontal da placa vertical. Este aspeto será referido mais à frente e permitirá uma melhor compreensão da função dos batentes sob a forma de parafusos ou de uma barra.

Na Figura 59 são apresentadas várias imagens da ferramenta desenvolvida e fabricada no âmbito deste trabalho. Como já foi referido, foram fabricadas duas ferramentas iguais que permitem fabricar um total de seis juntas. As duas imagens superiores apresentam a parte frontal e as duas imagens inferiores a parte de trás das ferramentas. Na ferramenta da esquerda os batentes utilizados são parafusos M6. Nas imagens da direita pode-se observar a ferramenta com a barra de aço a servir de batente para os suportes superiores.

As peças foram fabricadas por maquinagem e em alguns casos foi utilizado o corte por laser. A grande maioria das peças foi fabricada com a liga de alumínio AW 6082 e anodizadas. Já as peças fabricadas em aço CK45 foram oxidadas a negro. Nos suportes dos substratos existem umas pequenas chapas com espessura de 1,5 mm que foram cortadas a laser e fabricadas em aço inoxidável AISI 304. As pegas (elesa M.443-140-CH) são de poliamida reforçada com fibra de vidro.

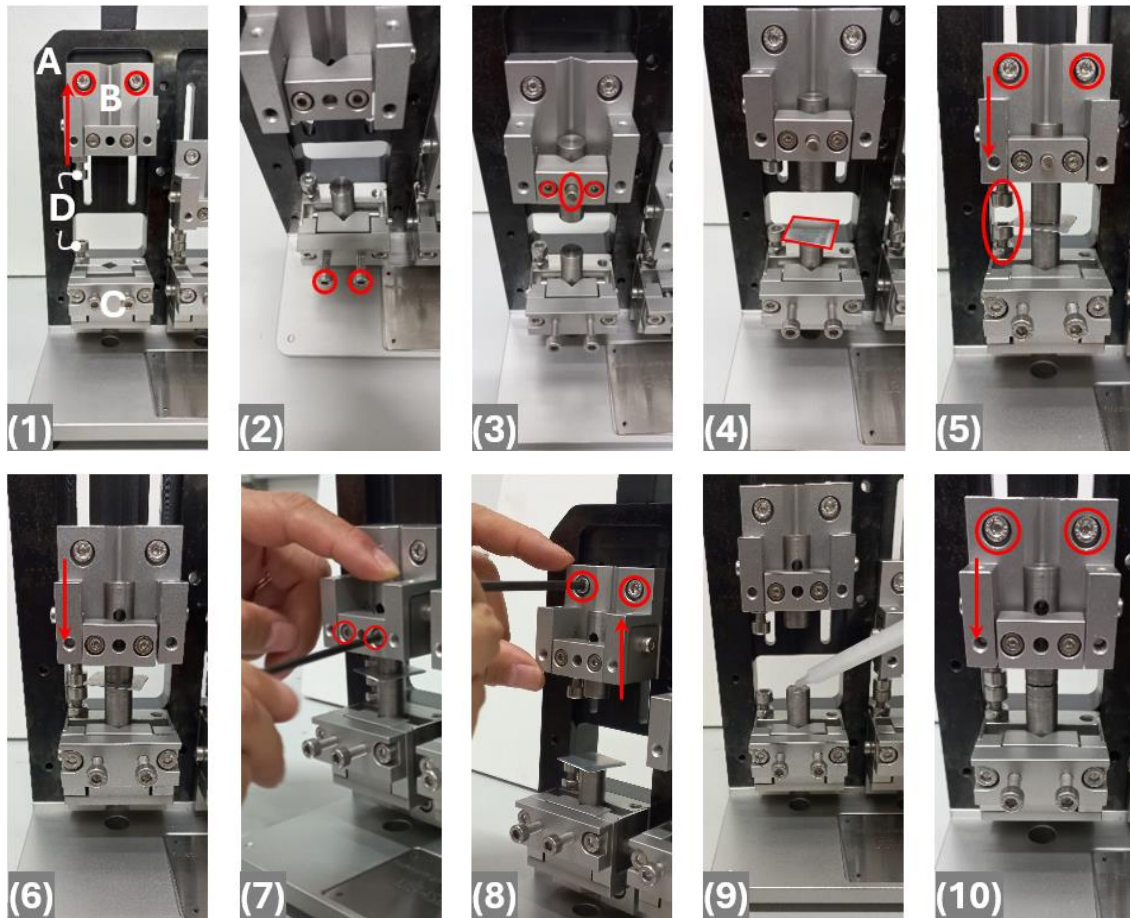
De salientar que, tal como aconteceu com a ferramenta de rolete flutuante, todas as peças necessárias para esta nova ferramenta, bem como os substratos, foram fornecidas e oferecidas pela empresa Gislótica – Projecto e Fabrico de Soluções Mecânicas, Lda. Apesar da oferta, é conveniente conhecer o custo da ferramenta e dos substratos. Assim, o custo da ferramenta rondou os 2100 euros e o dos substratos foi de 1080 euros. No Anexo E encontra-se o custo de cada componente.



Figura 59- Imagens da ferramenta para fabrico de juntas topo a topo

Para o fabrico de juntas topo a topo utilizando a ferramenta apresentada, propõem-se a execução dos seguintes passos que estão ilustrados na Figura 60:

- 1) **Afastar o suporte superior do suporte inferior.**  
Colocar o suporte superior numa posição mais elevada e fixá-lo nessa posição através dos dois parafusos CHC M5x30 (o suporte inferior está sempre fixo na ferramenta).
- 2) **Colocar e fixar o substrato inferior no suporte inferior.**  
Não tocar na superfície a colar.  
Pode ser colocado um pino no furo do substrato para que o seu eixo fique praticamente paralelo à placa vertical da ferramenta.  
Fixar o substrato inferior através dos dois parafusos CHC M5x25.
- 3) **Colocar o substrato superior no suporte superior.**  
Não tocar na superfície a colar.  
Tal como assinalado na imagem (3) da Figura 60 pode ser colocado um pino a passar pelo furo do mordente e pelo furo do substrato. Desta forma o eixo do furo fica perpendicular à placa vertical da ferramenta e, conseqüentemente, perpendicular ao eixo do furo do substrato inferior.  
Apertar ligeiramente o substrato nos mordentes através dos dois parafusos CHC M4x25 (apenas o necessário para que, no caso de não se ter colocado o pino, o substrato não se desloque por ação da gravidade).
- 4) **Colocar uma chapa de espessura calibrada sobre a superfície do substrato inferior.**  
A chapa deve estar convenientemente limpa e deve possuir a espessura que se pretende para o adesivo.
- 5) **Descer o suporte superior de forma que o substrato superior pressione a chapa espaçadora.**  
Previamente é necessário aliviar os dois parafusos CHC M5x30.  
No caso de se ter colocado o pino no substrato superior, os batentes devem ficar ligeiramente afastados e, em qualquer caso, devem encontrar-se fixos e sem folgas. Contudo, se não foi colocado o pino referido no passo (3), o suporte deve ser deslocado tal como indica o passo seguinte.
- 6) **Descer o suporte superior até que o seu movimento seja impedido pelos batentes.**  
Se no passo (3) foi colocado o pino, então, antes deste movimento do suporte superior, é necessário retirar este pino.  
O substrato superior não deve estar demasiado apertado nos mordentes pois, durante este movimento descendente, os mordentes têm de deslizar ao longo do substrato.
- 7) **Fixar o substrato superior nos mordentes** através dos dois parafusos CHC M4x25.  
Durante o acionamento dos parafusos, deve pressionar-se ligeiramente o substrato superior contra a chapa espaçadora e o suporte superior contra a placa vertical.
- 8) **Afastar o suporte superior do suporte inferior.**  
Colocar o suporte superior numa posição mais elevada e fixá-lo nessa posição através dos dois parafusos CHC M5x30.
- 9) **Aplicar o adesivo na superfície do substrato inferior.**  
Previamente é necessário retirar a chapa espaçadora.
- 10) **Descer o suporte superior até que o seu movimento seja impedido pelos batentes e fixar a sua posição** através dos parafusos CHC M5x30.  
A espessura do adesivo será igual à folga entre os topos dos substratos e que foi previamente definida pela chapa espaçadora. Na imagem (10) da Figura 60 o adesivo não está presente.



A: Placa vertical; B: Suporte superior; C: Suporte inferior; D: Batentes

Figura 60- Etapas de fabrico de juntas topo a topo utilizando a ferramenta desenvolvida

Após a cura do adesivo é necessário retirar as juntas da ferramenta abrindo os mordentes e subindo os suportes superiores.

Antes do ensaio das juntas é necessário remover o excesso de adesivo com recurso a lixas e, se necessário, a limas. Durante a remoção do excesso de adesivo é necessário especial cuidado para não provocar a rotura da ligação (evitar esforços de flexão) e para não danificar os substratos devido ao processo de abrasão.

No caso de a cura decorrer à temperatura ambiente é possível remover a maioria do excesso do adesivo antes da cura total do adesivo. Nesta situação a remoção do adesivo será muito mais fácil, pois o adesivo ainda não endureceu completamente. Isto é possível porque a ferramenta desenvolvida, quando utiliza os parafusos como batentes, permite o acesso a todo o perímetro da zona da ligação.

A ferramenta desenvolvida permite várias hipóteses para o fabrico de juntas topo a topo. Como foi indicado no procedimento anterior, pode-se colocar pinos nos substratos inferiores e superiores de forma que os seus eixos fiquem aproximadamente perpendiculares entre si. Contudo, a colocação dos pinos não é absolutamente necessária, pois a ferramenta

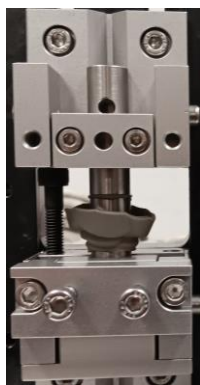
desenvolvida para a colocação da junta na máquina de ensaios permite que os eixos dos furos tenham qualquer orientação. Esta ferramenta é apresentada no subcapítulo seguinte.

Na Figura 61 pode-se observar os parafusos que funcionam como batentes. No primeiro caso foi colocado um parafuso em cada um dos suportes. Contudo, dependendo do comprimento destes parafusos, pode-se utilizar apenas um parafuso como mostra a imagem b) da Figura 61. Nesta imagem, por esquecimento, falta a porca que fixa a posição do parafuso e elimina possíveis folgas. A posição destes parafusos pode ser regulada em altura e é fixa através da utilização de porcas. Nestes exemplos os batentes estão do lado esquerdo dos suportes, mas também é possível colocar do lado direito.

Tal como mostra Figura 62, em vez de parafusos é possível utilizar uma barra de aço a servir de batente. A folga entre esta barra e a junta topo a topo é muito pequena (0,70 mm) o que dificulta a remoção do adesivo na zona mais próxima da barra. Além disso, o adesivo pode contactar com a barra e, por este motivo, deve-se aplicar desmoldante na superfície da barra ou colocar uma película de plástico como, por exemplo, de PTFE. Esta barra quando não é utilizada deve estar alojada na parte de trás da placa vertical da ferramenta.



a)



b)

Figura 61- Parafusos como batentes

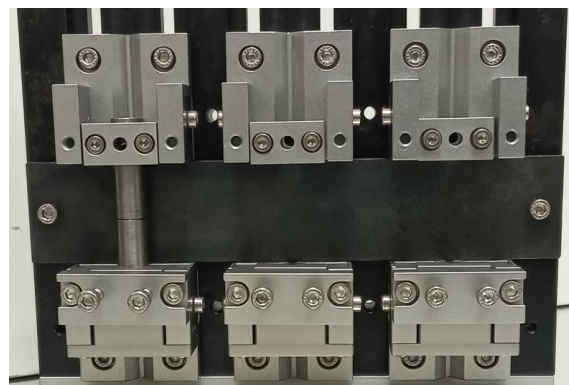


Figura 62- Barra de aço como batente

Na Figura 63 pode-se observar que a ferramenta desenvolvida para o fabrico das juntas topo a topo garante que os substratos estão devidamente alinhados (coaxiais) e que a folga entre os substratos é uniforme garantindo, assim, uma espessura do adesivo uniforme. De facto, estes são os principais propósitos da ferramenta.



Figura 63- Alinhamento dos substratos e folga entre eles

No caso de se utilizar adesivos com possibilidade de escorrerem é necessário colocar no substrato inferior um pequeno reservatório cónico em silicone, tal como mostra a Figura 64. Este reservatório vai impedir que o adesivo escorra para as peças do suporte do substrato. Outra hipótese será a aplicação de desmoldante nas peças que podem entrar em contacto com o adesivo.



Figura 64- Reservatório em silicone colocado no substrato inferior

A ferramenta foi desenvolvida essencialmente para provetes cilíndricos com diâmetro de 12,7 mm e um comprimento de 40 mm (provetes segundo a norma **ASTM D2094**). Contudo, é possível utilizar provetes com outras dimensões. O diâmetro pode variar entre 8,5 e 14,5 mm. Quanto ao comprimento dos substratos superiores, teoricamente, não há nada que limite o seu valor. A ferramenta também não limita o comprimento dos substratos inferiores. Neste caso, para substratos com diâmetro inferior a 12,7 mm não é preciso remover a base da ferramenta, pois existem uns furos na base que permitem a passagem dos substratos. Contudo, será necessário remover a base do suporte inferior que serve de apoio ao substrato inferior e elevar a base da ferramenta relativamente ao plano da mesa de trabalho. Além disso, também existe a possibilidade de retirar a base da ferramenta e trabalhar com a ferramenta na horizontal, ou seja, a placa vertical passa a ficar numa posição horizontal e, neste caso, deixa de haver qualquer restrição ao comprimento do substrato inferior.

Face ao exposto, é de salientar que a ferramenta desenvolvida satisfaz todos os requisitos definidos no início deste subcapítulo. Ou seja, a ferramenta:

- garante o alinhamento dos substratos, pois os suportes dos substratos (inferior e superior) encontram-se dentro do mesmo canal maquinado na placa vertical da ferramenta;
- permite regular a espessura do adesivo, pois o suporte superior pode ser deslocado permitindo definir a folga desejada entre os topos dos substratos;
- possibilita o acesso a todo o perímetro da zona de colagem para limpeza do excesso de adesivo (neste caso é mais adequado utilizar os parafusos como batentes);
- permite a cura do adesivo à temperatura ambiente, mas também a temperaturas mais elevadas, pois a ferramenta é fabricada em materiais metálicos (liga de alumínio e aço). No entanto, para temperaturas elevadas será necessário retirar a pega e os apoios de borracha da ferramenta;

## Desenho e fabrico das ferramentas

- possibilita o fabrico de até 6 juntas topo a topo com substratos cilíndricos com dimensões segundo a norma **ASTM D2094**, mas também pode utilizar-se substratos com outras dimensões;
- é de fácil manuseamento (movimentação da ferramenta), pois, em vez de uma ferramenta única que permitisse fabricar 6 juntas, optou-se por fabricar duas ferramentas iguais em que cada uma permite fabricar 3 juntas. Assim, o peso de cada uma das ferramentas (7,75 kg, sem substratos colocados na ferramenta) é cerca de metade do peso de uma ferramenta única. Além disso, algumas peças foram fabricadas em alumínio o que permite diminuir o peso da ferramenta. A pega também facilita o manuseamento e transporte da ferramenta.

Contudo, também podem ser identificadas algumas desvantagens da ferramenta desenvolvida, quando comparada com a ferramenta mais utilizada para o fabrico deste tipo de juntas e que pode ser observada na Figura 10 da página 17. De facto, a ferramenta desenvolvida é mais complexa, pois possui mais componentes, e é mais dispendiosa. Além disso, tem componentes fabricados com diferentes materiais e, portanto, com diferentes coeficientes de expansão térmica que, no caso de cura sob ação de temperatura, podem introduzir tensões entre os componentes da ferramenta e na própria junta.

Para finalizar este subcapítulo referente à ferramenta desenvolvida para o fabrico de juntas topo a topo é de salientar que também foram fabricados substratos de aço ao carbono (CK45), aço inoxidável (AISI 304) e de alumínio (AW 6086-T6). Para cada material foram maquinados 30 substratos com diâmetro de 12,7 mm e comprimento de 40 mm. O desenho destes substratos está no Anexo B. Estes substratos podem ser observados na Figura 65.



Figura 65- Substratos para juntas topo a topo

O **aço CK45** é um aço ao carbono e tem como principais características: é um aço de construção muito utilizado no fabrico das mais diversas peças. Apresenta um teor médio em carbono e grande estabilidade dimensional em serviço ou em operações de maquinagem [49], [50]. A composição química pode ser analisada na tabela seguinte.

Tabela 5- Composição química do aço CK45 [49]

Composição química (% Peso)									
Elementos	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	W	Cr+Mo+Ni
Mínimo	0,42	-	0,50	-	-	-	-	-	-
Máximo	0,50	0,40	0,80	0,40	0,10	0,40	0,07	0,05	0,63

O aço inoxidável **AISI 304** é o mais utilizado e mais versátil dentro do grupo dos aços inoxidáveis austeníticos. Apresenta excelente resistência à corrosão, conformação e soldabilidade [51], [52]. A composição química pode ser vista na tabela seguinte.

Tabela 6- Composição química do aço inoxidável AISI 304 [51]

<b>Composição química (% Peso)</b>									
<b>Elementos</b>	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	N
<b>Mínimo</b>	-	-	-	-	-	18	-	8	-
<b>Máximo</b>	0,08	2	0,75	0,045	0,030	20	-	10,5	0,10

A liga de alumínio **EN AW 6082-T6** é uma liga de Al-Mg-Si endurecível por precipitação e tem como principais características: elevada resistência à corrosão, boa maquinabilidade, boa soldabilidade, boa condutividade elétrica e térmica, aptidão muito elevada para polimento e boa aptidão para a anodização. Apresenta resistência mecânica média/alta [53]. Na Tabela 12 da página 61 estão indicadas algumas propriedades desta liga de alumínio. A composição química pode ser observada na tabela seguinte.

Tabela 7- Composição química da liga AW 6082-T6 [53]

<b>Composição química (% Peso)</b>									
<b>Elementos</b>	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
<b>Mínimo</b>	0,7	-	-	0,4	0,6	-	-	-	Resto
<b>Máximo</b>	1,3	0,5	0,1	1	1,2	0,25	0,2	0,1	

### 3.3. Ferramenta para fixação da junta topo a topo à máquina de tração

Para a realização do ensaio à tração das juntas topo a topo foi necessário desenvolver um dispositivo para fixação e carregamento das juntas topo a topo. Este dispositivo pode ser observado na Figura 66 (com exceção dos pinos), cujos desenhos podem ser consultados no Anexo C. A Tabela 8 apresenta a lista de peças deste conjunto.

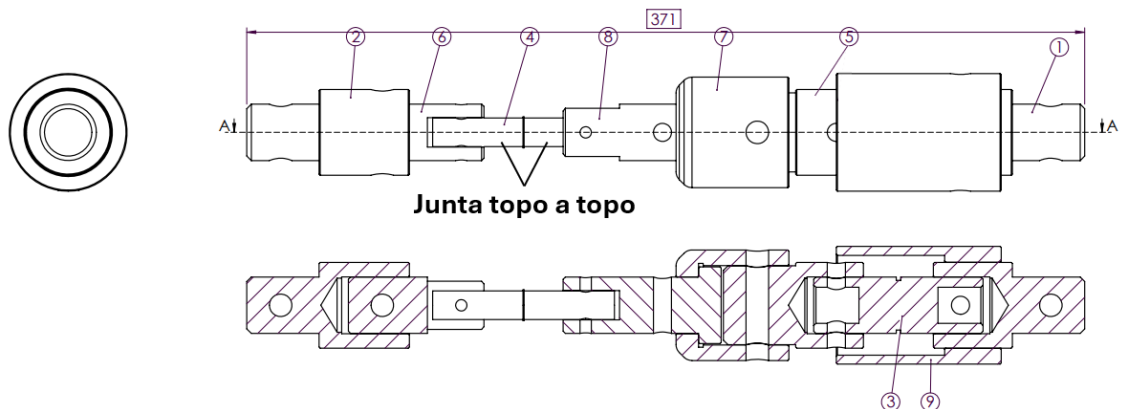


Figura 66- Representação da ferramenta para fixação da junta topo a topo à máquina de tração

Tabela 8- Lista de peças da ferramenta para fixação das juntas topo a topo à máquina de tração

(1)	Suporte inferior para fixação da ferramenta na mesa da máquina de tração
(2)	Suporte superior para fixação da ferramenta na célula de carga que está fixa no travessão móvel da máquina de tração
(3)	Junta de <i>cardan</i>
(4)	Junta topo a topo
(5)	Peça cilíndrica que faz a ligação entre a junta de <i>cardan</i> e as peças que permitem a fixação do substrato inferior da junta topo a topo
(6)	Suporte superior que permite a fixação do substrato superior da junta topo a topo através de um pino com 5 mm de diâmetro
(7)	Cilindro oco que aloja a parte superior da peça (5) e a parte inferior do suporte (8)
(8)	Suporte inferior que permite a fixação do substrato inferior da junta topo a topo através de um pino com 5 mm de diâmetro. Esta peça pode rodar em torno do seu eixo longitudinal de forma que o furo do suporte coincida com o furo do substrato
(9)	Cilindro oco que aloja a junta de <i>cardan</i> e impede que a peça (5) tombe após a rotura da junta ou no caso de não estar qualquer junta fixa nos suportes (6) e (8)

Na Figura 67 é possível observar as peças fabricadas e na Figura 68 a ferramenta montada e fixa na máquina de tração. A montagem das várias peças e a fixação da ferramenta à máquina de tração é realizada através de pinos. De salientar que os suportes (6) e (8) da junta topo a topo estão ambos conectados a juntas de *cardan*. Para o suporte inferior foi incluída uma junta de *cardan* na própria ferramenta (3). Para o suporte superior a máquina de tração já contém uma junta de *cardan* que se encontra conectada à célula de carga (Figura 68). Durante o fabrico das

juntas topo a topo é necessário regular a orientação dos eixos dos furos existentes nos substratos que geralmente é de 90° ou 0°, tal como mostra a Figura 69. É através destes furos que passam os pinos que permitem a ligação da junta à ferramenta e a aplicação do esforço de tração. A ferramenta desenvolvida para o fabrico destas juntas, apresentada no subcapítulo anterior, permite regular esta orientação. Contudo, é possível ensaiar juntas topo a topo com os eixos dos furos com qualquer orientação, pois o suporte inferior (8) pode rodar em torno do seu eixo longitudinal.



Figura 67- Peças da ferramenta para fixação das juntas topo a topo

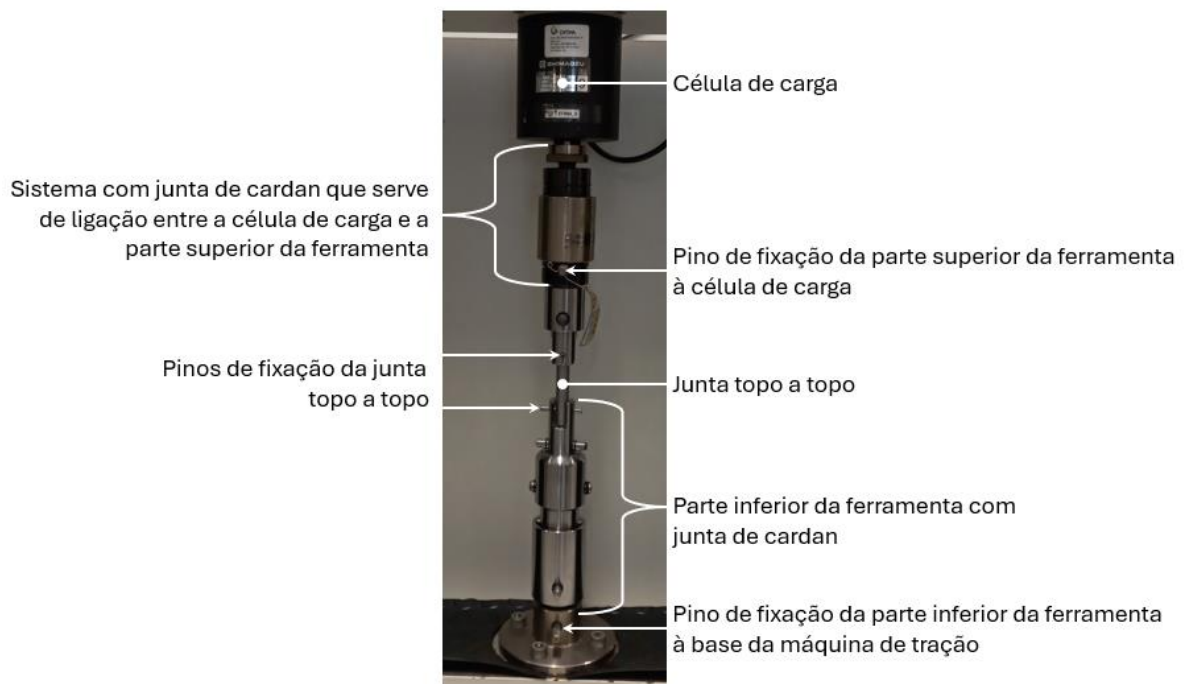


Figura 68- Ferramenta para a realização dos ensaios de juntas topo a topo fixa na máquina de tração

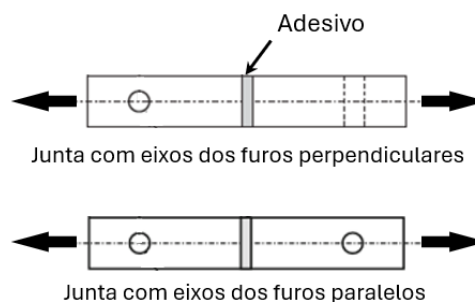


Figura 69- Orientação dos eixos dos furos existentes nos substratos da junta topo a topo

Todas as peças que compõem esta ferramenta foram fabricadas por maquinagem utilizando o aço FR 3 (DIN: 34 CrNiMo 6) O custo desta ferramenta foi de 650 euros. No Anexo E encontra-se o custo de cada peça fabricada para esta ferramenta. Contudo, tal como aconteceu com as ferramentas anteriores, todas as peças necessárias para esta nova ferramenta foram fornecidas e oferecidas pela empresa Gislotica – Projecto e Fabrico de Soluções Mecânicas, Lda.

Para montar a ferramenta na máquina de tração e fixar a junta topo a topo na ferramenta, tal como mostra a Figura 68, para depois iniciar-se o ensaio de tração, propõem-se o seguinte procedimento:

- 1) Fixar a parte inferior na base da máquina através do pino com 10 mm de diâmetro;
- 2) Fixar a parte superior da ferramenta no sistema que se encontra apertado na célula de carga e que possui uma junta de *cardan*. Esta fixação é realizada através de um pino com 8 mm de diâmetro. É necessário garantir que o travessão móvel da máquina de ensaios está numa posição que permite a colocação das duas partes da ferramenta sem ocorrer colisão entre elas;
- 3) Fixar a junta no suporte superior através de um pino com 5 mm de diâmetro. Este pino passa através do furo existente no suporte superior da ferramenta e o furo do substrato superior da junta;
- 4) Fixar a junta no suporte inferior através de um pino com 5 mm de diâmetro. Para a colocação do segundo pino será necessário alinhar o furo do suporte com o furo do substrato. Isto deverá ser realizado deslocando o travessão móvel para que os eixos dos furos fiquem à mesma cota e rodar o suporte inferior em torno do seu eixo longitudinal até que os eixos fiquem coincidentes.
- 5) Após a colocação dos pinos que ligam a junta à ferramenta pode iniciar-se o ensaio. Contudo, recomenda-se a aplicação de uma pré-carga da ordem de 10 N para eliminar as folgas existentes nas ligações das várias peças que constituem a ferramenta.

O capítulo seguinte apresenta os resultados obtidos em ensaios de rolete flutuante e de tração que utilizaram as ferramentas fabricadas no âmbito deste trabalho. Estes ensaios visam essencialmente analisar o funcionamento das ferramentas.

## 4. Ensaio

Neste capítulo são apresentados resultados dos ensaios de arrancamento utilizando a metodologia de rolete flutuante e de tração de juntas topo a topo, utilizando as ferramentas fabricadas no âmbito deste trabalho e apresentadas no capítulo anterior. Com estes ensaios, pretende-se validar o funcionamento destas ferramentas.

### 4.1. Ensaio de arrancamento de rolete flutuante

Para o ensaio de rolete flutuante foram realizadas duas séries de ensaios. Na 1ª série os substratos foram preparados por granalhagem e na 2ª série foram tratados por lixagem – isto porque se constatou que a granalhagem deformava os substratos flexíveis. Utilizaram-se três adesivos e cinco provetes para cada condição de preparação de superfície. Na 1ª série, quatro provetes foram ensaiados com uma ferramenta de rolete flutuante de outro laboratório e o quinto provete foi ensaiado com a ferramenta desenvolvida no âmbito deste trabalho para comparar o funcionamento das ferramentas. Na 2ª série todos os provetes foram ensaiados com a ferramenta de rolete flutuante fabricada no âmbito da presente dissertação.

Nos seguintes subcapítulos serão apresentados os materiais utilizados, geometria e fabrico das juntas, resultados obtidos com ambas as ferramentas e sua discussão. São também incluídos resultados do ensaio de dureza Shore D para os adesivos, utilizado como ensaio de controlo de qualidade dos adesivos.

#### 4.1.1. Materiais utilizados

Foram utilizados dois adesivos de epóxido (Araldite® AV138 e Araldite® 420A/B) e um adesivo de poliuretano (SikaForce® 710). As fichas técnicas dos adesivos encontram-se no Anexo D. Os substratos foram fabricados em alumínio.

##### 1) ADESIVOS:

O adesivo **Araldite® AV 138M-1 e endurecedor HV 998-1** é um sistema bi-componente tixotrópico e após a mistura apresenta uma cor cinza. O tempo de cura à temperatura ambiente é de 24 h, mas se for realizada a 100 °C é de apenas 10 minutos. Apresenta alta rigidez e resistência mecânica, mas baixa ductilidade. Possui excelente resistência química e é resistente a temperaturas de até 140 °C. Trata-se de um adesivo com altas resistências mecânicas sob

ação de calor. Este adesivo é adequado para aplicações industriais que requerem resistência a ambientes agressivos e/ou sob ação de temperatura. Permite a ligação de vários materiais como metais, cerâmicos, vidro, borrachas e plásticos rígidos. A espessura da camada de adesivo recomendada é entre 0,05 e 0,1 mm. A seguinte tabela apresenta algumas características deste adesivo [54] [55] [56].

Tabela 9- Características do adesivo Araldite® AV138-M1/HV998-1 [54]

<b>Resistência à tração (ISO 527)</b>	29 MPa
<b>Módulo de elasticidade (ISO 527)</b>	4,2 GPa
<b>Alongamento até à rotura (ISO 527)</b>	0,8%
<b>Viscosidade</b>	tixotrópica
<b>Cor após a mistura</b>	cinzenta
<b>Dureza Shore</b>	D 86
<b>Pot fife (100 g a 25°C)</b>	30 minutos

A Figura 70 apresenta a resistência de diferentes juntas metálicas, ao corte, para um tempo de cura de 16 horas a 40 °C e testada a 23 °C usando, substratos com preparação de superfície de jato de areia [54].

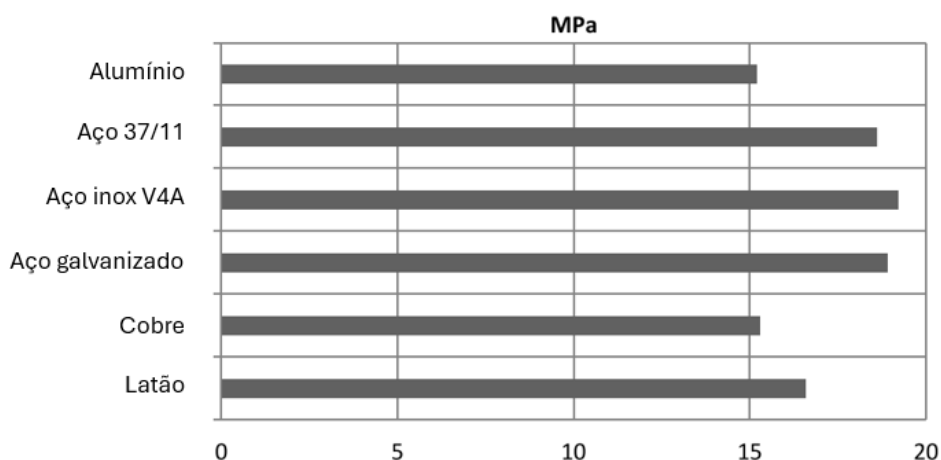


Figura 70- Resistência ao corte de diferentes juntas metálicas, adaptado de [54]

O **Araldite® 420 A/B** é um adesivo de epóxido, bi- componente, com uma cor verde-escuro após a mistura dos componentes. Cura à temperatura ambiente, possuindo elevadas resistência ao corte, arrancamento e tenacidade. Possui também boa resistência à humidade. Adequado para aplicações envolvendo a ligação de metais, compósitos e ninhos-de-abelha. Permite a ligação de uma ampla variedade de materiais, incluindo metal, madeira, borracha, compósitos reforçados com fibra de vidro e muitos plásticos. A espessura de filme de adesivo mais adequada situa-se entre 0,05 mm e 0,1 mm. À temperatura ambiente, este adesivo atinge a cura total ao fim de uma a duas semanas. A cura pode ser acelerada através do aquecimento,

por exemplo: 4 horas a 50 °C, ou 1 hora a 120 °C, conforme indicado pelo fabricante [57]. A tabela seguinte apresenta algumas características deste adesivo.

Tabela 10- Características do adesivo Araldite® 420 A/B [57]

Propriedades	420 A	420 B
Cor	Amarelo	Azul
	Verde-escuro	
Viscosidade a 25 °C	100-300 Pa. s	0,6-1,4 Pa. s
	35-45 Pa. s	
Pot life (100 g a 25°C)	60 minutos	
Resistência ao corte a 23 °C	> 30 MPa	
Dureza Shore	D75	
Resistência à tração a 23°C	29 MPa	
Módulo de elasticidade (E)	1,495 GPa	
Alongamento até à rotura	4,6 %	
	-20°C → 1 GPa	
	0°C → 0,88 GPa	
	23°C → 0,73 GPa	
	60°C → 0,074 GPa	
	90°C → 5,5 MPa	

A Figura 71 demonstra a resistência de diferentes juntas metálicas ao corte para um tempo de cura de 16 horas a 40 °C e testadas a 23 °C com pré-tratamento de jato de areia das superfícies dos substratos [57].

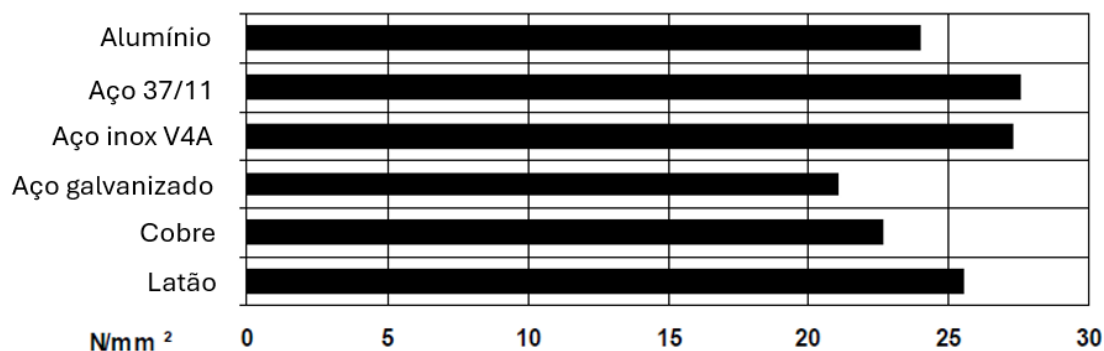


Figura 71- Resistência ao corte de diferentes juntas metálicas, adaptado de [57]

O **SikaForce® 710 L100** é um adesivo de poliuretano bi-componente - componente A SikaForce-710 L100 (mistura de poliois) e componente B SikaForce- 010 (mistura de derivados de isocianatos) - com cura à temperatura ambiente e com cor bege após a mistura. É usado principalmente para colagem de metal, fibrocimento, madeira e fibra de vidro em espumas de poliestireno, espumas de poliuretano e lã mineral, na fabricação de elementos para painéis sanduiche e outras construções [58]. Este adesivo, quando comparado com os adesivos anteriores de epóxido, é mais flexível e mais dúctil. Algumas propriedades podem ser consultadas na tabela seguinte.

Tabela 11- Características do adesivo SikaForce® 710 L100 [58]

Propriedades	Componente A	Componente B
	bege	Castanho
Cor	bege	
Resistência ao corte (ISO 4587)	9 MPa	
Mecanismo de cura	Poliadição	
Temperatura de aplicação	15 – 30°C	
Módulo de elasticidade (E) (ASTM D638)	0,330 GPa [59]	
Resistência à tração (ISO 527)	14 MPa	
Alongamento de rotura (ISO 527)	25%	
Densidade	1,56 g/cm <sup>3</sup>	
Viscosidade	22000 mPa.s	300 mPa.s
(não tixotrópico)	10000 mPa.s	
Dureza Shore	D72	
<i>Pot-life</i>	100 minutos	
<i>Open-time</i>	135 minutos	
Tempo de armazenagem	12 meses	

## 2) SUBSTRATOS:

As juntas para o ensaio de rolete flutuante utilizam um substrato flexível em um substrato rígido. Para os substratos flexíveis, com espessura de 0,5 mm, foi utilizado o alumínio AW 1050. Para os substratos rígidos, com espessura de 3 mm, foi utilizada a liga de alumínio AW 6082-T6. Algumas características gerais desta liga de alumínio já foram apresentadas na página 53. Contudo, a Tabela 12 apresenta algumas propriedades das duas ligas de alumínio.

Tabela 12- Propriedades das ligas de alumínio AW 1050 e AW 6082 [60] [61]

Propriedades da liga EN AW 1050	
Massa volúmica ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	2,71
Módulo de elasticidade ( $E$ (GPa))	69
Tensão limite de elasticidade ( $R_{p0,2}$ (MPa))	75
Tensão máxima de resistência à tração ( $R_m$ (MPa))	105-145
Coefficiente de expansão térmica (20 – 100°C) ( $\text{K}^{-1}$ )	$23,6 \times 10^{-6}$
Condutividade térmica (W/mK)	229
Dureza Brinell (HB)	33
Propriedades da liga EN AW 6082-T6	
Massa volúmica ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	2,70
Módulo de elasticidade ( $E$ (GPa))	70
Tensão limite de elasticidade ( $R_{p0,2}$ (MPa))	200-260
Tensão máxima de resistência à tração ( $R_m$ (MPa))	270-310
Condutividade térmica (W/mk)	170
Alongamento (%)	6-8
Dureza Brinell (HB)	95

A liga de alumínio **EN AW 1050** tem como principais características: baixa resistência mecânica, elevada resistência à corrosão, elevadas condutividade térmica e elétrica, boa conformabilidade e soldabilidade, elevada refletividade, baixo polimento e baixa maquinabilidade. Pode ser aplicada em áreas farmacêuticas, sinalização, indústria química, etc. [60]. A composição química desta liga está apresentada na seguinte tabela.

Tabela 13- Composição química da liga EN AW 1050 [60]

Composição química (% Peso)									
Elementos	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
Mínimo	-	-	-	-	-	-	-	-	99,5
Máximo	0,25	0,4	0,05	0,05	0,05	-	0,07	0,05	-

#### 4.1.2. Dimensões e Geometria das juntas

De acordo com a norma **ASTM D3167** [31] e como referido no subcapítulo 2.5.3 os substratos rígido e flexível devem ter largura de 12,7 mm e comprimentos de 203,2 mm e 254 mm, respetivamente. Quanto às espessuras, se não forem especificadas, deverão ser 1,63 mm e 0,63 mm para os substratos rígido e flexível, respetivamente. Contudo, neste trabalho foram usados substratos com dimensões nominais apresentadas na seguinte tabela.

Tabela 14- Dimensões nominais dos substratos usados nos ensaios de arrancamento

Substrato	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)
Rígido	200	20	3
Flexível	250	20	0,5

Quando se procede à colagem dos substratos, a camada de adesivo deve ser aplicada na zona tratada do substrato rígido com cerca de 150 mm, limitada por duas regiões de aproximadamente 40 mm e 10 mm, sem aplicação de adesivo, utilizadas para calibrar a espessura do filme de adesivo. Em cada uma das zonas interiores daquelas regiões, *i.e.*, adjacentes à camada de adesivo, foram colocados dois arames de cobre com espessura de 0,20 mm para controlo da espessura do filme de adesivo. O comprimento de  $\approx 40$  mm sem adesivo visa permitir o apoio do substrato rígido em ambos os roletes e assim facilitar o início do processo de arrancamento durante o ensaio. De acordo com a norma de ensaio este comprimento deverá estar compreendido entre 38,1 mm e 74,2 mm (*i.e.*, 1,5 in a 3,0 in). O desenho da junta pode ser visto na Figura 72.

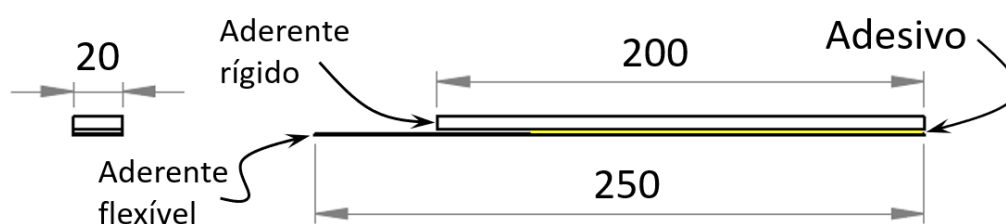


Figura 72- Geometria do conjunto provete rígido e flexível (dimensões em mm).

### 4.1.3. Fabrico das juntas

Os substratos flexíveis foram cortados numa guilhotina a partir de uma chapa de alumínio (AW 1050) com uma espessura nominal de 0,5 mm. Os substratos rígidos já foram fornecidos com as dimensões de 200x20x3 [mm].

A subsequente preparação dos substratos foi realizada executando as seguintes etapas.

#### 1ª Etapa: Corte e remoção de rebarbas com auxílio de limas, lixas ou esmeril

O processo corte dos substratos flexíveis encontra-se ilustrado na Figura 73, tendo sido utilizada uma guilhotina hidráulica com as seguintes especificações.

Tabela 15- Especificações da guilhotina para o corte de substratos

<b>Espessura máxima de corte (mm)</b>	4
<b>Chapa com carga máxima de rutura (Kg/mm<sup>2</sup>)</b>	Até 50

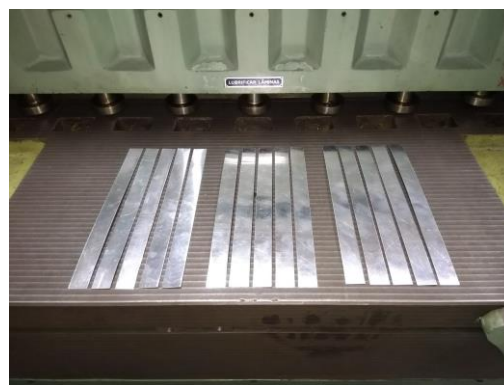


Figura 73- Corte dos substratos flexíveis numa guilhotina (LTM)

Após o corte removeram-se vestígios de rebarbas presentes nos substratos usando limas e/ou o esmeril (Figura 74 e Figura 75).



Figura 74- Limas usadas (LABF)



Figura 75- Esmeril METABO (LABF)

### 2ª Etapa: Limpeza com acetona

Após a remoção de rebarbas os provetes foram limpos com acetona comercial (pureza > 99%).

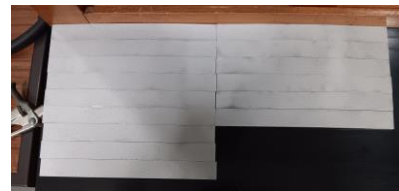
### 3ª Etapa: Granalhagem / lixagem

#### Granalhagem:

Foi realizada com abrasivo de óxido de alumínio fundido castanho com granulometria de 425 – 600 µm (Cerablast BFA-NK F036). Foi feita a granalhagem de 15 substratos rígidos e 15 flexíveis, à pressão de 4 bar, na granalhadora mostrada na Figura 76, tendo-se obtido os resultados ilustrados na Figura 77.



Figura 76- Granalhagem dos substratos (LABF)



a)



b)

Figura 77- Substratos a) rígidos; b) flexíveis após granalhagem

#### Lixagem:

Este procedimento foi usado na segunda série de ensaios, como alternativa ao processo de granalhagem. Após corte e remoção de rebarbas no esmeril (Figura 78), foram sujeitos a limpeza, e preparação da superfície por abrasão com lixa P500 (Figura 79). O processo de lixagem excluiu 10 mm de uma extremidade dos substratos rígidos e flexíveis, sendo limitado a cerca de 150 mm adjacentes a essa região.



Figura 78- Desbaste no esmeril METABO (LABF)



Figura 79- Lixagem com uma lixa P500

#### 4ª Etapa: Limpeza com ar comprimido filtrado

Concluída a granalhagem ou lixagem, foi realizada uma limpeza dos substratos usando um jato de ar comprimido. Para a segunda série de provetes, os substratos flexíveis não foram submetidos a limpeza com jato de ar comprimido para evitar a sua deformação, como sucedeu durante a primeira série.

#### 5ª Etapa: Limpeza/ desengorduramento com acetona.

Em seguida foi feita a limpeza e desengorduramento das superfícies dos provetes usando acetona como demonstra a figura seguinte.



Figura 80- Limpeza superficial

#### 6ª Etapa: Colagem

O processo de colagem dos substratos foi precedido pela mistura dos componentes dos adesivos nas quantidades indicadas pelos fabricantes (100/40 nos adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 420 A/B, e uma proporção de 100/19 para o adesivo SikaForce® 710 L100). No fabrico dos provetes foi tido em consideração o valor de *pot life* de cada adesivo (30 min, 1 h, e 1h40, para AV138, 420 A/B e SikaForce® 710, respetivamente). Após a mistura aplicou-se o adesivo com recurso a uma espátula. A Figura 81 demonstra a mesa de trabalho utilizada para o fabrico das juntas. Nesta figura pode observa-se os *gabarits* utilizados para garantir o alinhamento dos substratos.

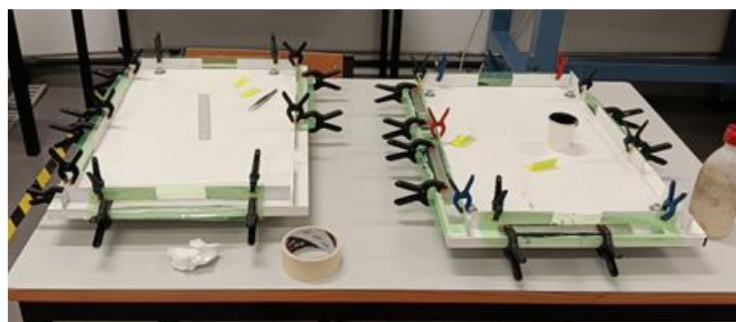


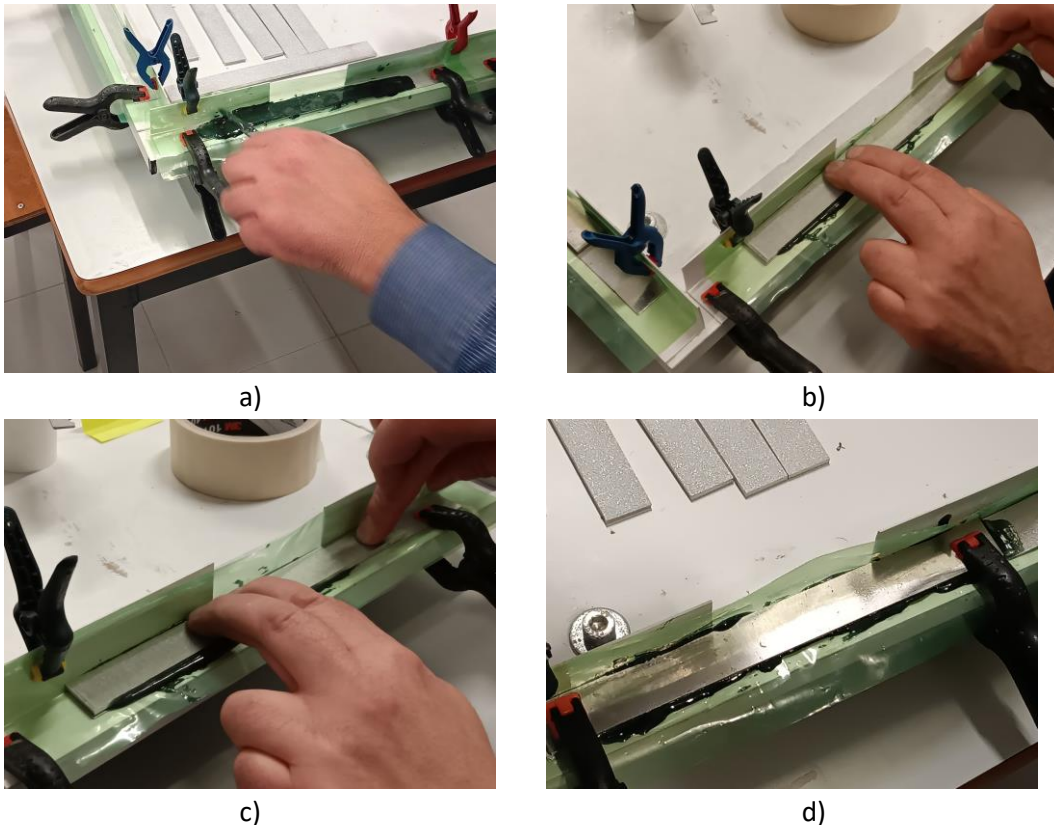
Figura 81- Vista geral da mesa de trabalho utilizada o fabrico das juntas de arrancamento

## Ensaio

Para a colagem dos substratos foram realizados os seguintes passos:

- 1) Posicionamento do substrato flexível no *gabarit*;
- 2) Aplicação do adesivo na superfície do substrato flexível;
- 3) Posicionamento do substrato rígido;
- 4) Pressionar a junta e colocar molas de pressão.

As imagens da Figura 82 mostram alguns passos realizados na colagem das juntas.



- a) colocação do adesivo no substrato flexível, b) posicionamento do substrato rígido,  
c) pressionar a junta d) colocação de molas de pressão

Figura 82- Processo de fabrico das juntas de arrancamento

A espessura do adesivo foi controlada através de fios de cobre com um diâmetro de 0,2 mm, tal como se pode observar na Figura 83. A zona não colada das juntas foi garantida usando um filme de desmoldante.

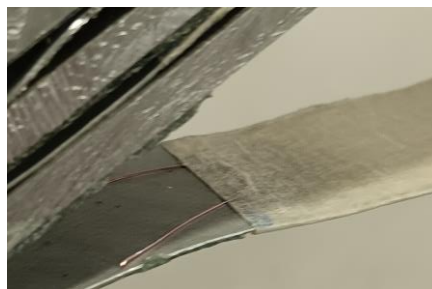


Figura 83- Fios de cobre usados para calibrar a espessura do adesivo

As figuras seguintes apresentam as juntas de arrancamento fabricadas para a 1ª série (preparadas por granalhagem) e para a 2ª série (preparadas por lixagem).



Figura 84- Juntas para a 1ª série

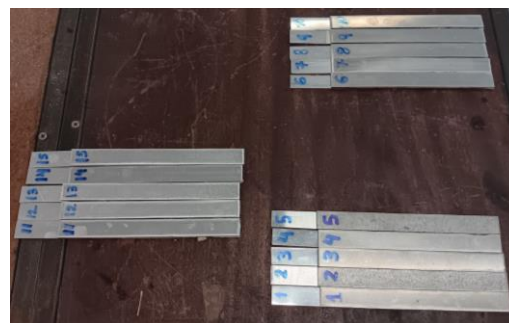


Figura 85- Juntas para a 2ª série

Após a cura do adesivo foi necessário retirar os vestígios de adesivos usando lixa e lima. Após esta limpeza procedeu-se à medição com um paquímetro digital da espessura dos substratos (flexível e rígido) e da espessura total da junta. Foram realizadas três medições para cada caso. Com estes valores é possível calcular a espessura do adesivo. Os valores médios obtidos para cada provete (junta) estão indicados nas tabelas seguintes.

Tabela 16- Dimensões dos provetes da 1ª série (granalhagem)

Provete	Espessura flexível ( $e_{flexível}$ ) [mm]	Espessura rígida ( $e_{rígida}$ ) [mm]	Espessura total ( $e_{total}$ ) [mm]	Espessura do adesivo ( $e_{adesivo}$ ) [mm]	Largura (L) [mm]
<b>Araldite® 420A/B</b>					
1	0,42	3,01	4,03	0,60	20,35
2	0,40	3,01	3,82	0,41	20,45
3	0,39	3,01	4,34	0,94	20,52
4	0,43	3,01	3,78	0,34	20,34
5	0,41	3,01	4,16	0,74	20,55
<b>Araldite® AV138</b>					
6	0,41	3,01	4,22	0,8	20,39
7	0,42	3,01	4,11	0,68	20,50
8	0,41	3,01	4,51	1,09	20,36
9	0,39	3,01	4,34	0,94	20,27
10	0,42	3,01	4,31	0,88	20,42
<b>SikaForce® 710 L100</b>					
11	0,42	3,01	4,20	0,77	20,21
12	0,42	3,01	4,06	0,63	20,32
13	0,42	3,01	4,18	0,75	20,30
14	0,42	3,01	3,96	0,53	20,24
15	0,42	3,01	4,10	0,67	20,34

Tabela 17- Dimensões dos provetes da 2ª série (lixagem)

Provete	Espessura flexível ( $e_{flexível}$ ) [mm]	Espessura rígida ( $e_{rígida}$ ) [mm]	Espessura total ( $e_{total}$ ) [mm]	Espessura do adesivo ( $e_{adesivo}$ ) [mm]	Largura (L) [mm]
<b>Araldite® 420A/B</b>					
1	0,36	3,01	3,72	0,35	20,23
2	0,36	3,01	3,87	0,50	20,12
3	0,36	3,01	3,66	0,29	20,19
4	0,36	3,01	3,82	0,45	20,21
5	0,36	3,01	3,91	0,54	20,24
<b>Araldite® AV138</b>					
6	0,36	3,01	3,77	0,40	20,24
7	0,36	3,01	3,89	0,52	20,29
8	0,36	3,01	3,91	0,54	20,47
9	0,36	3,01	3,88	0,51	20,49
10	0,36	3,01	3,88	0,51	20,32
<b>SikaForce® 710 L100</b>					
11	0,36	3,01	3,65	0,28	20,27
12	0,36	3,01	3,76	0,39	20,34
13	0,36	3,01	3,67	0,30	20,31
14	0,36	3,01	3,67	0,30	20,26
15	0,36	3,01	3,75	0,38	20,34

A espessura do adesivo indicada nas tabelas anteriores foi calculada pela seguinte equação:

$$e_{adesivo} = e_{total} - (e_{rígido} + e_{flexível}) \quad (4)$$

#### 4.1.4. Ensaio Dureza Shore

Foi realizado um ensaio de dureza Shore para avaliar a qualidade da cura do adesivo. Várias normas indicam a metodologia para a realização deste ensaio, como é o caso das normas **ISO 868**, **ISO 7619**, **ASTM D2240**, **ASTM 1415** ou **DIN 53505**. O equipamento utilizado pode ser observado na Figura 86.



Figura 86- Durómetro Shore Hildebrand (LET)

Foi utilizada a escala D pelo que o indentador é pressionado contra a superfície da amostra sob a ação de uma carga de 5 kg. O valor da dureza depende da profundidade da indentação. Contudo, em muitos polímeros, a leitura da indentação e, conseqüentemente, o valor da dureza pode variar com o tempo. Por este motivo, os valores de dureza foram registados para 1s, 3s e 15s de aplicação de carga.

As amostras dos diferentes adesivos usadas neste ensaio entram-se mostradas na Figura 87.



a) Araldite® 420 A/B



b) Araldite® AV138



c) SikaForce® 710

Figura 87- Amostras para o ensaio de dureza Shore

Os resultados obtidos encontram-se nas seguintes tabelas para os seguintes tempos de medição 1s, 3s e 15s. Estes ensaios foram realizados para os adesivos preparados para o fabrico das juntas das duas séries, pois as duas séries não foram fabricadas no mesmo dia.

Tabela 18- Dureza Shore D do Araldite® AV138 (1ª série)

<b>Medições de Dureza Shore D</b>			
<b>AV138M/HV998- Base epóxi</b>			
<b>Ensaio</b>	<b>Tempo de ensaio (s)</b>		
	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>15</b>
<b>1º</b>	88	84	83
<b>2º</b>	91	85	83
<b>3º</b>	88	83	82
<b>4º</b>	88	84	83
<b>5º</b>	87	83	82
<b>Média</b>	88	84	83
<b>Valor de referência</b>	86 [54]	-	-

De acordo com os resultados obtidos os valores da dureza estão dentro do esperado.

Tabela 19- Dureza Shore D do Araldite® 420A/B (1ª série)

<b>Medições de Dureza Shore D</b>			
<b>420A/B- Base epóxi</b>			
<b>Ensaio</b>	<b>Tempo de ensaio (s)</b>		
	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>15</b>
<b>1º</b>	73	69	68
<b>2º</b>	73	70	67
<b>3º</b>	83	72	70
<b>4º</b>	82	72	70
<b>5º</b>	77	72	70
<b>Média</b>	78	71	69
<b>Valor de referência</b>	75 [57]	-	-

De acordo com os resultados obtidos os valores da dureza estão dentro do esperado.

Tabela 20- Dureza Shore D do SikaForce® 710 L100 (1ª série)

<b>Medições de Dureza Shore D</b>			
<b>SikaForce® 710 L100- Base Poliuretano</b>			
<b>Ensaio</b>	<b>Tempo de ensaio (s)</b>		
	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>15</b>
<b>1º</b>	80	55	52
<b>2º</b>	80	60	54
<b>3º</b>	75	58	53
<b>4º</b>	78	58	53
<b>5º</b>	75	60	53
<b>Média</b>	78	58	53
<b>Valor de referência</b>	72 [58]	-	-

Tabela 21- Dureza Shore D do Araldite® AV138 (2ª série)

<b>Medições de Dureza Shore D</b>			
<b>AV138M/HV998- Base epóxi</b>			
<b>Ensaio</b>	<b>Tempo de ensaio (s)</b>		
	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>15</b>
<b>1º</b>	85	81	81
<b>2º</b>	86	82	81
<b>3º</b>	85	81	80
<b>4º</b>	86	82	81
<b>5º</b>	85	81	80
<b>Média</b>	85	81	81
<b>Valor de referência</b>	86 [54]	-	-

Tabela 22- Dureza Shore D do Araldite® 420 A/B (2ª série)

<b>Medições de Dureza Shore D</b>			
<b>420 A/B- Base epóxi</b>			
<b>Ensaio</b>	<b>Tempo de ensaio (s)</b>		
	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>15</b>
<b>1º</b>	79	71	70
<b>2º</b>	75	70	68
<b>3º</b>	79	73	72
<b>4º</b>	76	72	70
<b>5º</b>	75	71	69
<b>Média</b>	77	71	70
<b>Valor de referência</b>	75 [57]	-	-

Tabela 23- Dureza Shore D do SikaForce® 710 L100 (2ª série)

<b>Medições de Dureza Shore D</b>			
<b>SikaForce® 710 L100- Base Poliuretano</b>			
<b>Ensaio</b>	<b>Tempo de ensaio (s)</b>		
	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>15</b>
<b>1º</b>	75	57	53
<b>2º</b>	74	58	53
<b>3º</b>	73	56	52
<b>4º</b>	69	53	50
<b>5º</b>	74	57	53
<b>Média</b>	73	56	52
<b>Valor de referência</b>	72 [58]	-	-

A partir dos resultados apresentados nas tabelas anteriores pode-se constatar que os valores de dureza obtidos experimentalmente foram bastante próximos dos valores indicados pelos

fabricantes, indicando uma adequada cura dos adesivos. A dureza dos adesivos de epóxico após 3 s e 15 s é apenas ligeiramente inferior ao valor da dureza máxima. Contudo, para o adesivo à base de poliuretano (SikaForce®) verifica-se uma maior diminuição da dureza com o aumento do tempo de ensaio, pois este adesivo apresenta maior ductilidade.

#### 4.1.5. Condições de ensaio

Os ensaios de rolete flutuante foram realizados à temperatura ambiente, com uma velocidade de 152 *mm/min* e com uma pré-carga inicial de 5 N utilizando a máquina de tração Shimadzu AG-I 10 kN, como mostra a Figura 88. Foi utilizada uma célula de carga de 5 kN com região de trabalho limitada a 500 N para aumentar a sensibilidade do registo da evolução da força. Durante o ensaio o sistema regista a evolução da força e do deslocamento do travessão superior da máquina de ensaios. Os ensaios foram realizados duas semanas após o fabrico das juntas.

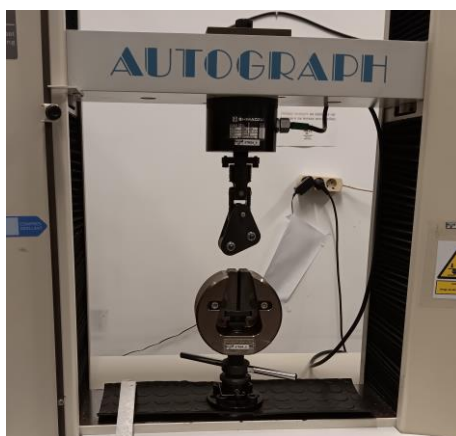


Figura 88- Máquina de ensaios Shimadzu AG-I 10 kN (LET)

Na Figura 89 e na Figura 90 apresentam-se as duas ferramentas de rolete flutuante utilizadas neste trabalho. A ferramenta 1 foi utilizada para validar o funcionamento da ferramenta desenvolvida no âmbito deste trabalho (ferramenta 2). A ferramenta 1 já foi utilizada em muitos ensaios de arrancamento e foi cedida por outro laboratório. Na Figura 91 pode observar-se a junta colocada na ferramenta de rolete flutuante com a extremidade do substrato flexível fixo na maxila inferior da máquina de ensaios e o substrato rígido sobre os rolos.



Figura 89- Ferramenta 1 de rolete flutuante



Figura 90- Ferramenta 2 de rolete flutuante

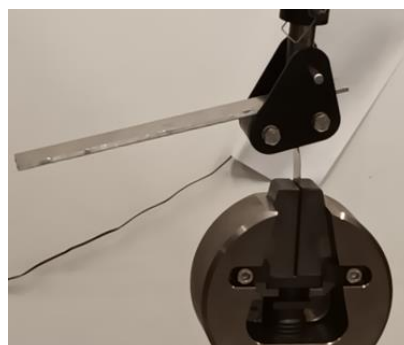


Figura 91- Junta de arrancamento colocada na máquina de ensaios

#### 4.1.6. Resultados

Os valores mais importantes a considerar, segundo as normas aplicadas ao ensaio, são a força média ( $P_{média}$ ), máxima ( $P_{máx.}$ ) e mínima ( $P_{mín.}$ ). Estes valores devem ser encontrados num deslocamento de pelo menos 75 mm, desprezando os primeiros 25 mm de deslocamento. Com estes valores são determinados os seguintes parâmetros:  $P_{média}/b$ ,  $P_{máx.}/b$ ,  $P_{mín.}/b$ . Sendo “b” a largura da junta. Outro resultado muito importante é o tipo de rotura da junta. Os resultados obtidos são apresentados nas tabelas e figuras seguintes. Em primeiro lugar são apresentados os resultados da 1ª série de juntas (preparação por granalhagem; 4 juntas para cada adesivo ensaiadas com uma ferramenta disponibilizada por outro laboratório e uma junta para cada adesivo ensaiada com a ferramenta fabricada neste trabalho). Depois são apresentados os resultados obtidos com a 2ª série de juntas (preparação por lixagem; todas as juntas ensaiadas com a ferramenta fabricada no âmbito deste trabalho).

##### 1) Resultados obtidos na 1ª série de ensaios

###### Araldite® 420 A/B

Tabela 24- Resultados das forças e tipo de rotura (Araldite® 420 A/B- 1ª série)

Provete	$P_{média}$ (N)	$P_{máx.}$ (N)	$P_{mín.}$ (N)	Tipo de rotura
1	103,96	116,94	91,55	Rotura essencialmente adesiva
2	123,96	134,56	108,22	Rotura essencialmente adesiva
3	105,03	126,61	94,16	Rotura essencialmente adesiva
4	111,25	121,77	106,41	Rotura essencialmente adesiva
5*	91,24	116,27	76,78	Rotura essencialmente adesiva
<b>Média</b>	107,09	123,23	95,42	-
<b>Desvio padrão</b>	10,65	6,78	11,39	-

(\*): Ensaio realizado com a ferramenta fabricada no âmbito deste trabalho.

**Nota:** No provete 5 o deslocamento máximo não chegou aos 100 mm.

Tabela 25- Resistência ao arrancamento (Araldite® 420 A/B- 1ª série)

Provete	$\frac{P_{média}}{b}$ (N/mm)	$\frac{P_{máx.}}{b}$ (N/mm)	$\frac{P_{mín.}}{b}$ (N/mm)
1	5,11	5,75	4,50
2	6,06	6,58	5,29
3	5,12	6,17	4,59
4	5,47	5,99	5,23
5*	4,34	5,66	3,74
<b>Média</b>	5,24	6,03	4,67
<b>Desvio padrão</b>	0,53	0,33	0,57

(\*): Ensaio realizado com a ferramenta fabricada no âmbito deste trabalho.

## Ensaio

O gráfico da Figura 92 mostra as curvas de evolução da força ao longo do deslocamento dos diferentes provetes excluindo os primeiros 25 mm e com uma extensão de pelo menos 75 mm.

O gráfico da Figura 93 mostra a evolução de P/b de cada provete em função do deslocamento.

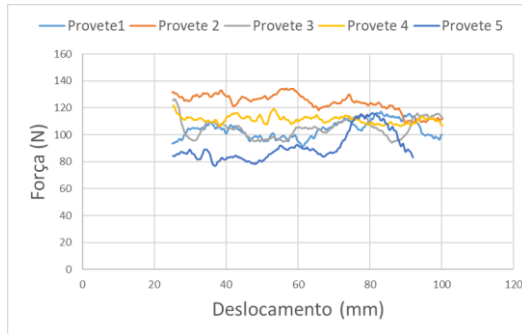


Figura 92- Força/deslocamento dos provetes Araldite® 420 A/B (1ª série)

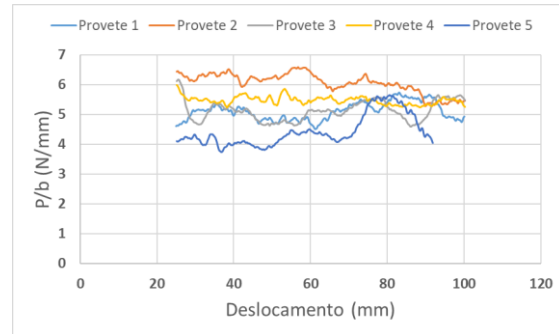


Figura 93- Resistência ao arrancamento dos provetes Araldite® 420 A/B (1ª série)

O provete 5 apresenta força mais baixa, porque este já se encontrava danificado antes da realização do ensaio (o substrato flexível apresentava algumas ondulações).

### Araldite® AV138 M-1/HV998-1

Tabela 26- Resultados das forças e tipo de rotura (Araldite® AV138- 1ª série)

Provete	P <sub>média</sub> (N)	P <sub>máx.</sub> (N)	P <sub>min.</sub> (N)	Tipo de rotura
6	23,33	28,22	18,20	Rotura coesiva próxima da interface
7	40,50	53,72	28,84	Rotura coesiva
8	27,98	38,70	18,77	Rotura coesiva próxima da interface
9	21,74	31,20	17,75	Rotura coesiva próxima da interface
10*	24,52	37,86	19,13	Rotura coesiva próxima da interface
<b>Média</b>	27,61	37,94	20,54	-
<b>Desvio padrão</b>	6,76	8,83	4,18	-

(\*): Ensaio realizado com a ferramenta fabricada no âmbito deste trabalho.

Tabela 27- Resistência ao arrancamento (Araldite® AV138- 1ª série)

Provete	$\frac{P_{m\acute{e}dia}}{b}$ (N/mm)	$\frac{P_{m\acute{a}x.}}{b}$ (N/mm)	$\frac{P_{m\acute{i}n.}}{b}$ (N/mm)
6	1,14	1,38	0,89
7	1,98	2,62	1,41
8	1,37	1,90	0,92
9	1,07	1,54	0,88
10*	1,20	1,85	0,94
<b>Média</b>	1,35	1,86	1,01
<b>Desvio padrão</b>	0,33	0,43	0,20

(\*): Ensaio realizado com a ferramenta fabricada no âmbito deste trabalho.

O gráfico da Figura 94 mostra as curvas de evolução da Força ao longo do deslocamento dos diferentes provetes excluindo os primeiros 25mm e com uma extensão de pelo menos 75 mm.

O gráfico da Figura 95 mostra a evolução de P/b de cada provete em função do deslocamento.

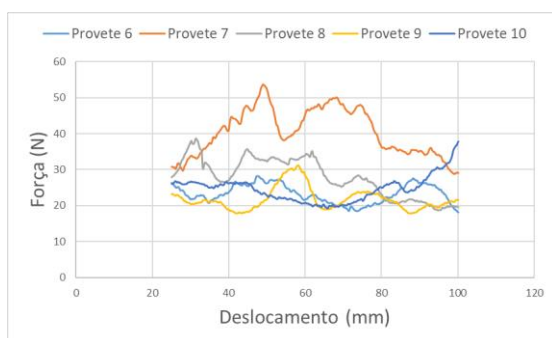


Figura 94- Força/deslocamento dos provetes AV138 (1ª série)

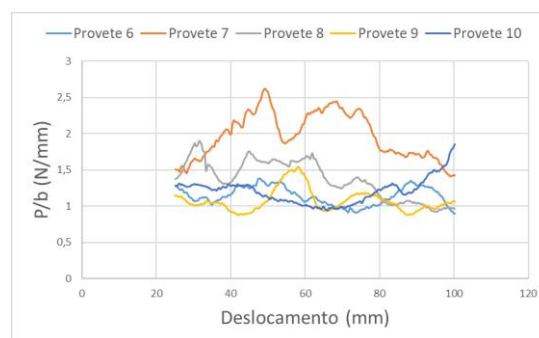


Figura 95- Resistência ao arrancamento dos provetes AV138 (1ª série)

**SikaForce® 710 L100**

Tabela 28- Resultados das forças e tipo de rotura (SKF 710- 1ª série)

Provete	$P_{m\acute{e}dia}$ (N)	$P_{m\acute{a}x.}$ (N)	$P_{m\acute{i}n.}$ (N)	Tipo de rotura
11	113,02	130,25	100,55	Rotura adesiva
12	112,03	132,73	92,52	Rotura adesiva
13	112,83	123,56	101,27	Rotura adesiva
14	98,77	110,27	89,03	Rotura adesiva
15*	112,19	127,98	98,06	Rotura adesiva
<b>Média</b>	109,77	124,96	96,28	-
<b>Desvio padrão</b>	5,51	7,94	4,75	-

(\*): Ensaio realizado com a ferramenta fabricada no âmbito deste trabalho.

Tabela 29- Resistência ao arrancamento (SKF 710- 1ª série)

Provete	$\frac{P_{m\acute{e}dia}}{b}$ (N/mm)	$\frac{P_{m\acute{a}x.}}{b}$ (N/mm)	$\frac{P_{m\acute{i}n.}}{b}$ (N/mm)
11	5,59	6,44	4,98
12	5,51	6,53	4,55
13	5,56	6,09	4,99
14	4,88	5,45	4,40
15*	5,52	6,29	4,82
<b>Média</b>	5,41	6,16	4,75
<b>Desvio padrão</b>	0,27	0,39	0,23

(\*): Ensaio realizado com a ferramenta fabricada no âmbito deste trabalho.

O gráfico da Figura 96 mostra as curvas de evolução da Força ao longo do deslocamento dos diferentes provetes excluindo os primeiros 25mm e com uma extensão de pelo menos 75 mm.

O gráfico da Figura 97 mostra a evolução de  $P/b$  de cada provete em função do deslocamento.

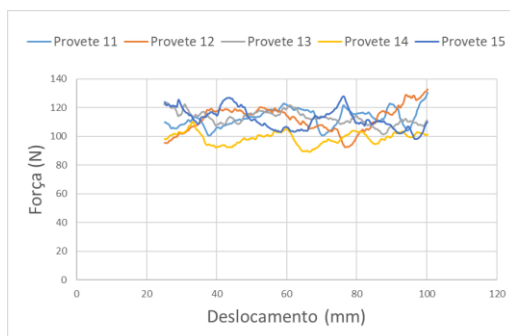


Figura 96- Força/deslocamento dos provetes SikaForce® 710

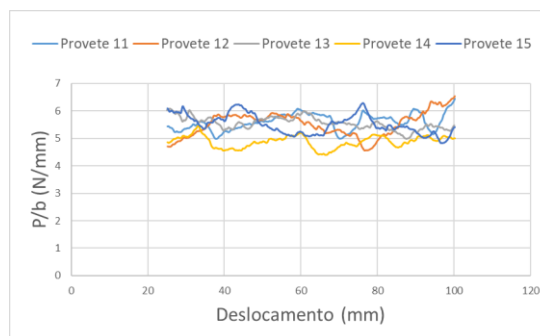


Figura 97- Resistência ao arrancamento dos provetes SikaForce® 710

As superfícies de rotura podem ser observadas na figura seguinte.

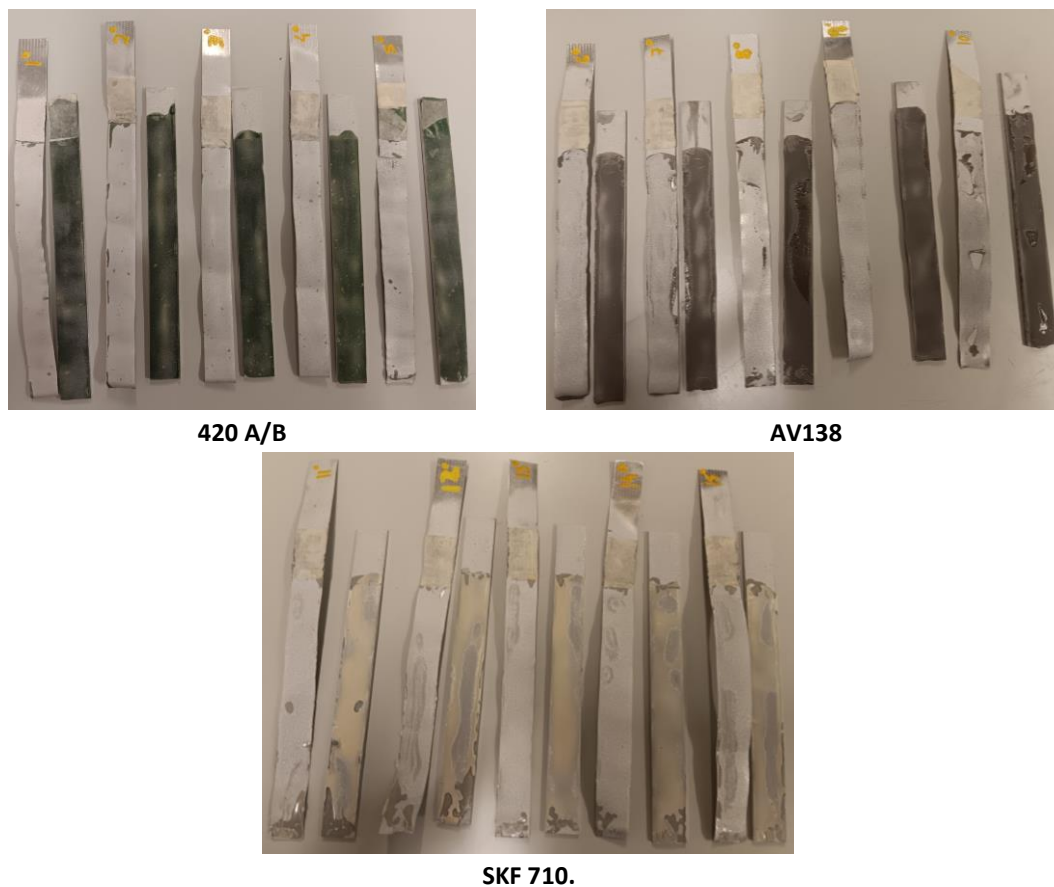


Figura 98- Superfície de rotura dos provetes com diferentes adesivos após o ensaio de arrancamento (1ª série)

De realçar que, durante a realização dos ensaios com a ferramenta de rolete fabricada neste trabalho, verificou-se que os rolos rolavam de forma intermitente. Por este motivo, por vezes ocorria um escorregamento entre as superfícies dos substratos e a superfície dos rolos. Apesar deste problema os resultados obtidos com esta ferramenta foram idênticos aos obtidos com a ferramenta disponibilizada por outro laboratório. Contudo, este problema foi analisado e resolvido. De facto, constatou-se que os rolamentos da ferramenta não rodavam livremente devido a uma montagem dos rolamentos com muito aperto nos furos dos rolos. O problema foi totalmente corrigido alargando ligeiramente o diâmetro dos furos onde são montados os rolamentos.

## 2) Resultados obtidos na 2ª série de ensaios

Nesta 2ª série de ensaios os substratos foram preparados por lixagem, pois nos ensaios da 1ª série verificou-se que a granalhagem provocou a deformação dos substratos flexíveis. Foram utilizados os mesmos adesivos e realizou-se cinco ensaios para cada condição. Todos os ensaios

## Ensaio

foram realizados com a ferramenta de rolete flutuante fabricada neste trabalho. Os resultados obtidos encontram-se nas tabelas e figuras seguintes.

De salientar que nestes ensaios o problema identificado nos ensaios da 1ª série não ocorreu. Ou seja, os rolos da ferramenta rodavam à medida que os substratos avançavam, não ocorrendo qualquer escorregamento entre eles.

### Araldite® 420 A/B

Tabela 30- Resultado das forças e tipo de rotura (Araldite® 420 A/B- 2ª série)

Provete	P <sub>média</sub> (N)	P <sub>máx.</sub> (N)	P <sub>min.</sub> (N)	Tipo de rotura
1	49,55	59,42	28,25	Rotura essencialmente adesiva
2	46,71	52,20	39,94	Rotura essencialmente adesiva
3	74,38	83,17	64,28	Rotura essencialmente adesiva
4	45,72	60,22	28,22	Rotura essencialmente adesiva
5	41,13	50,67	31,95	Rotura essencialmente adesiva
<b>Média</b>	51,50	61,14	38,53	-
<b>Desvio padrão</b>	11,75	11,65	13,57	-

Tabela 31- Resistência ao arrancamento (Araldite® 420 A/B- 2ª série)

Provete	$\frac{P_{m\acute{e}d\i a}}{b}$ (N/mm)	$\frac{P_{m\acute{a}x.}}{b}$ (N/mm)	$\frac{P_{m\i n.}}{b}$ (N/mm)
1	2,45	2,94	1,40
2	2,32	2,59	1,98
3	3,68	4,12	3,18
4	2,26	2,98	1,40
5	2,03	2,50	1,58
<b>Média</b>	2,55	3,03	1,91
<b>Desvio padrão</b>	0,58	0,58	0,67

O gráfico da Figura 99 mostra as curvas de evolução da Força ao longo do deslocamento dos diferentes provetes excluindo os primeiros 25mm e com uma extensão de pelo menos 75 mm.

O gráfico da Figura 100 mostra a evolução de P/b de cada provete em função do deslocamento.

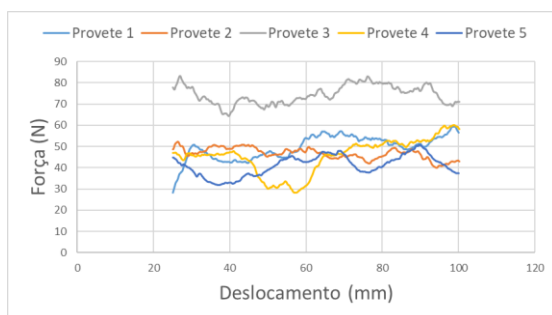


Figura 99- Força/ deslocamento dos provetes Araldite® 420 A/B (2ª série)

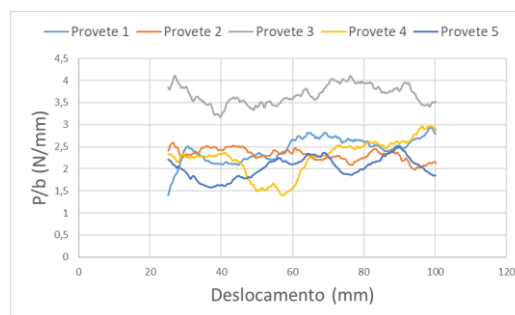


Figura 100- Resistência ao arrancamento dos provetes Araldite® 420 A/B (2ª série)

### Araldite® AV138 M-1/HV998-1

Tabela 32- Resultado das forças e tipo de rotura (AV138- 2ª série)

Provete	$P_{m\acute{e}dia}$ (N)	$P_{m\acute{a}x.}$ (N)	$P_{m\acute{i}n.}$ (N)	Tipo de rotura
6	6,27	9,48	5,22	Rotura aparentemente adesiva
7	4,23	7,84	2,72	Rotura aparentemente adesiva
8	6,48	9,42	5,09	Rotura aparentemente adesiva
9	9,05	11,08	7,34	Rotura aparentemente adesiva
10	6,61	9,59	5,30	Rotura aparentemente adesiva
<b>Média</b>	6,53	9,48	5,13	-
<b>Desvio padrão</b>	1,53	1,02	1,47	-

Tabela 33- Resistência ao arrancamento (AV138- 2ª série)

Provete	$\frac{P_{m\acute{e}dia}}{b}$ (N/mm)	$\frac{P_{m\acute{a}x.}}{b}$ (N/mm)	$\frac{P_{m\acute{i}n.}}{b}$ (N/mm)
6	0,31	0,47	0,26
7	0,21	0,39	0,13
8	0,32	0,46	0,25
9	0,44	0,54	0,36
10	0,33	0,47	0,26
<b>Média</b>	0,32	0,47	0,25
<b>Desvio padrão</b>	0,07	0,05	0,07

## Ensaio

O gráfico da Figura 101 mostra as curvas de evolução da força ao longo do deslocamento dos diferentes provetes excluindo os primeiros 25mm e com um deslocamento de pelo menos 75 mm.

O gráfico seguinte mostra a evolução de P/b de cada provete em função do deslocamento.

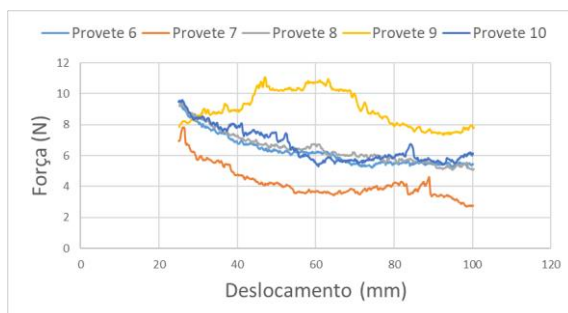


Figura 101- Força/deslocamento dos provetes Araldite® AV138 (2ª série)

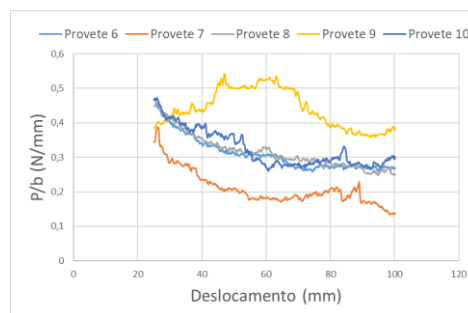


Figura 102- Resistência ao arrancamento dos provetes Araldite® AV138 (2ª série)

## SikaForce® 710 L100

Tabela 34- Resultado das forças e tipo de rotura (SKF 710- 2ª série)

Provete	$P_{média}$ (N)	$P_{máx.}$ (N)	$P_{min.}$ (N)	Tipo de rotura
11	102,07	121	80,77	Rotura adesiva
12	89,59	108,3	72,97	Rotura adesiva
13	85,14	94,92	77,48	Rotura adesiva
14	82,02	90,53	72,55	Rotura mista
15	91,42	106,92	63,02	Rotura mista
<b>Média</b>	90,05	104,33	73,36	-
<b>Desvio padrão</b>	6,86	10,76	5,99	-

Tabela 35- Resistência ao arrancamento (SKF 710- 2ª série)

Provete	$\frac{P_{média}}{b}$ (N/mm)	$\frac{P_{máx.}}{b}$ (N/mm)	$\frac{P_{min.}}{b}$ (N/mm)
11	5,04	5,97	3,98
12	4,40	5,32	3,59
13	4,19	4,67	3,82
14	4,05	4,47	3,58
15	4,49	5,26	3,10
<b>Média</b>	4,43	5,14	3,61
<b>Desvio padrão</b>	0,34	0,53	0,30

O gráfico da Figura 103 mostra as curvas de evolução da força ao longo do deslocamento dos diferentes provetes excluindo os primeiros 25mm e com um deslocamento de pelo menos 75 mm.

O gráfico da Figura 104 mostra a evolução de  $P/b$  de cada provete em função do deslocamento.

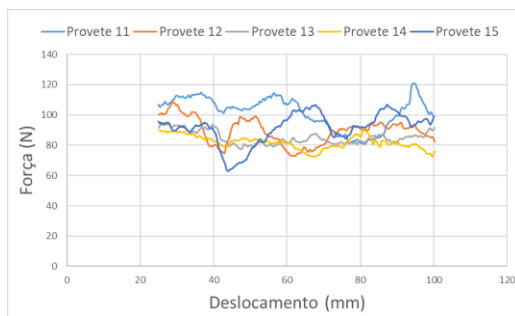


Figura 103- Força/deslocamento dos provetes SikaForce® 710 (2ª série)

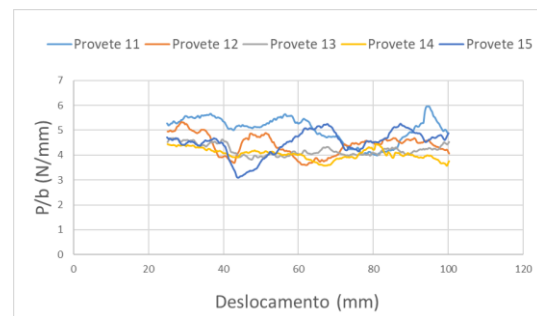


Figura 104- Resistência ao arrancamento dos provetes SikaForce® 710 (2ª série)

As superfícies de rotura podem ser observadas na figura seguinte.

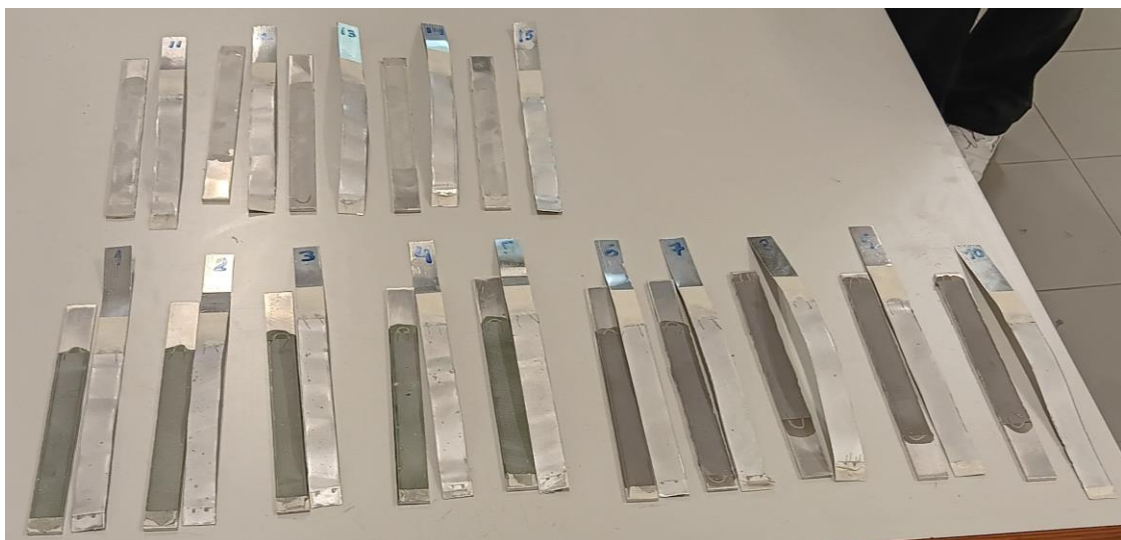


Figura 105- Superfície de fratura dos provetes (2ª série) após o arrancamento

## Ensaio

O gráfico da Figura 106 apresenta a resistência ao arrancamento média obtida na 1ª série de ensaios e respectivos desvios padrão. O gráfico da Figura 107 apresenta os mesmos tipo de resultados, mas para a 2ª série de ensaios. A partir destes gráficos contata-se que o adesivo AV138 apresenta uma resistência ao arrancamento bastante inferior à dos outros adesivos, pois é um adesivo frágil. Além disso, a preparação dos substratos por granalhagem (1ª série) permitiu atingir resistências ao arrancamento superiores às obtidas com substratos tratados por lixagem (2ª série).

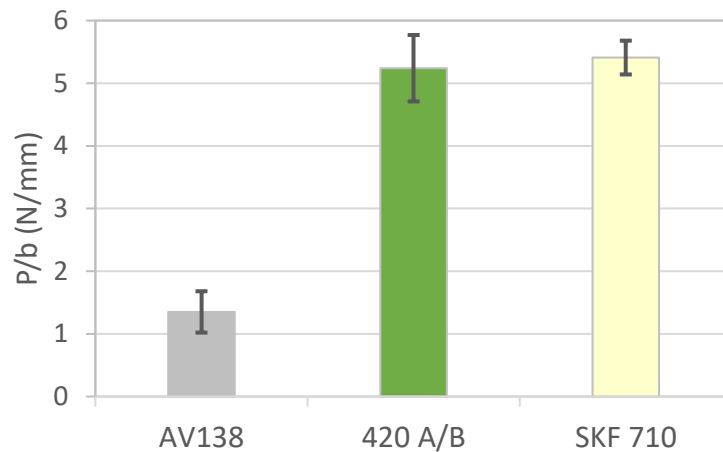


Figura 106- Resistência ao arrancamento dos diferentes adesivos (1ª série)

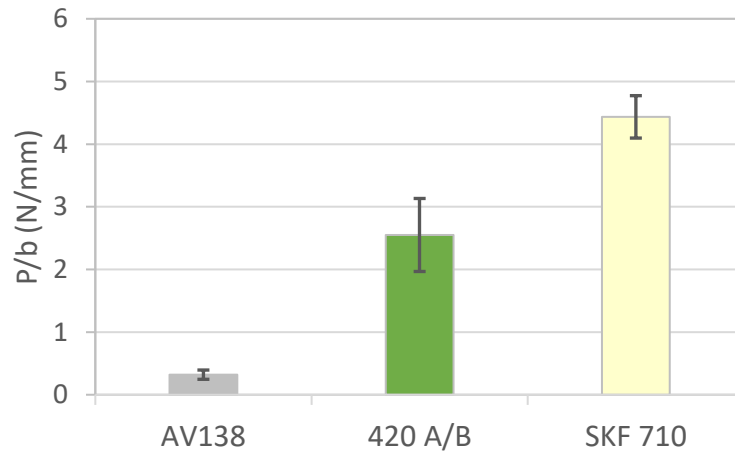


Figura 107- Resistência ao arrancamento dos diferentes adesivos (2ª série)

#### **4.1.7. Discussão de resultados**

A ferramenta de rolete fabricada, após alguns ajustes, apresentou um correto funcionamento permitindo a realização dos ensaios de arrancamento de forma eficiente.

Relativamente aos resultados obtidos nos ensaios é de salientar que tal, como esperado, o adesivo AV138 foi o que apresentou uma resistência ao arrancamento menor, pois é o adesivo mais frágil.

Na 1ª série de ensaios (granalhagem) é possível observar que os adesivos Araldite® 420 A/B e SikaForce® 710, possuem resistências ao arrancamento muito próximas, o que seria de esperar, atendendo às suas características, presentes nas respectivas fichas técnicas. Estas revelam que estes têm resistências ao arrancamento significativamente superiores, quando comparadas com a do adesivo Araldite® AV138.

No caso do SikaForce® 710, que é o mais dúctil dos três, é de esperar que a sua resistência ao arrancamento seja a maior, o que foi verificado, independentemente do tratamento superficial.

Relativamente aos resultados obtidos na 2ª série de ensaios, em que em vez de se proceder a granalhagem, se optou pela lixagem usando uma lixa P500, verificou-se que a resistência ao arrancamento do adesivo Araldite® AV138 continua a ser a menor, tal como esperado, e consideravelmente inferior à obtida nos ensaios da 1ª série. Este resultado pode ser atribuído ao processo de tratamento superficial adotado. Também é de notar que o adesivo Araldite® 420 A/B teve uma descida considerável na sua resistência ao arrancamento em comparação à obtida na 1ª série, que será também consequência do distinto tratamento superficial.

Mediante os resultados obtidos para os dois tipos de tratamento superficial estudados, pode concluir-se que os adesivos de epóxido (AV138 e 420 A/B) são mais sensíveis ao tratamento superficial, relativamente ao adesivo de poliuretano (SikaForce® 710).

Quanto ao modo de rotura verificou-se que foram essencialmente roturas adesivas, embora este tipo de rotura seja mais evidente quando se utilizou a preparação por lixagem.

### **4.2. Ensaaios de tração com juntas topo a topo**

Os ensaios de juntas topo a topo foram realizados essencialmente para validar o funcionamento da ferramenta para o fabrico das juntas e da ferramenta para o seu ensaio na máquina de tração. Estas ferramentas foram apresentadas nos subcapítulos 3.2 e 3.3.

#### **4.2.1. Materiais utilizados (adesivos e substratos)**

Foram utilizados os mesmos adesivos que os usados no ensaio de rolete flutuante (Araldite® AV138, Araldite® 420 A/B e SikaForce® 710). Estes adesivos estão brevemente descritos no subcapítulo 4.1.1

Os substratos foram fabricados em aço inoxidável AISI 304. No final do subcapítulo 3.2 estão indicadas algumas características deste tipo de aços.

#### 4.2.2. Dimensões e Geometria das juntas

Os substratos apresentam a geometria e dimensões indicadas na Figura 108.

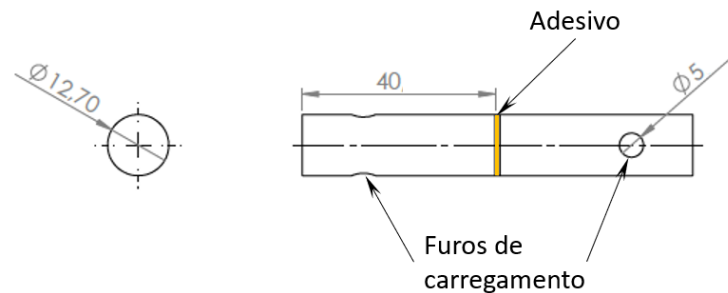


Figura 108- Junta topo a topo

#### 4.2.3. Fabrico das juntas

O fabrico das juntas iniciou-se com a preparação das superfícies de colagem dos substratos. Estes são reutilizáveis após remoção dos resíduos de adesivo presentes após os ensaios. Etapas de preparação das superfícies:

- 1ª Etapa: Limpeza com acetona para remoção de óleos e lubrificantes
- 2ª Etapa: Lixagem da superfície de colagem com lixa P500
- 3ª Etapa: limpeza com ar comprimido e posteriormente limpeza com acetona.

Após a preparação superficial dos substratos foi realizado o fabrico das juntas utilizando a ferramenta desenvolvida para este efeito e apresentada no subcapítulo 3.2. O procedimento para a colagem dos substratos está descrito no procedimento apresentado na página 48 do subcapítulo 3.2.

A espessura pretendida para a camada de adesivo foi de 0,2 mm e para o controlo deste parâmetro foi utilizada uma chapa de aço com 0,2 mm de espessura.

Como batentes para a posição do suporte superior foram utilizados os parafusos em vez da barra de aço.

Foi colocado nos substratos inferiores o reservatório cónico de silicone. Contudo, para os adesivos utilizados não ocorreu qualquer escorrimento de adesivo.

A cura de adesivo decorreu à temperatura ambiente.

Na figura seguinte pode observar-se três juntas fixas na ferramenta que controla o alinhamento dos substratos e a espessura do adesivo.

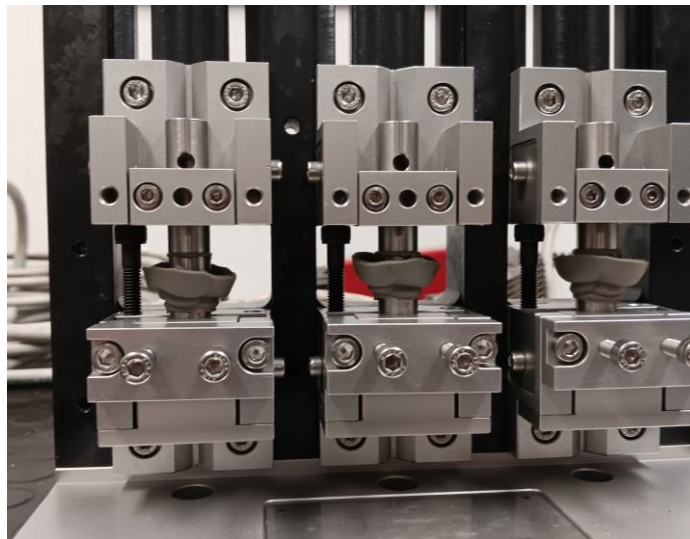


Figura 109- Aspecto final das juntas na ferramenta

As imagens da figura seguinte apresentam as juntas topo a topo fabricadas e prontas para serem submetidas ao ensaio de tração. A remoção do excesso de adesivo foi realizada após o seu endurecimento com recurso a limas e lixas.



**Araldite® AV138**



**Araldite® 420 A/B**



**SikaForce® 710**

Figura 110- Juntas topo a topo após limpeza do excesso do adesivo

**Nota:** Apesar de terem sido fabricados seis provetes com o Araldite® AV138 só cinco foram usados para ensaio de tração.

Verificou-se que os substratos estavam devidamente alinhados e não apresentavam evidentes sinais de excentricidade.

Através da análise realizada com o microscópio (Figura 111), com auxílio do software NIS-ELEMENTS, é possível constatar que a camada de adesivo apresenta-se uniforme e a espessura muito próxima do valor pretendido (0,2 mm), tal como mostram a Figura 112, Figura 113, Figura 114 e Figura 115. A espessura do adesivo foi avaliada em três zonas distintas e desfasadas entre si de aproximadamente 120°.

## Ensaio



Figura 111- Microscópio *Olympus SZ1145TR* (LMET)

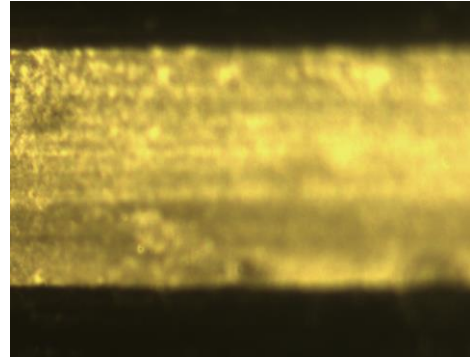


Figura 112- Espessura observada no provete 1 SKF 710

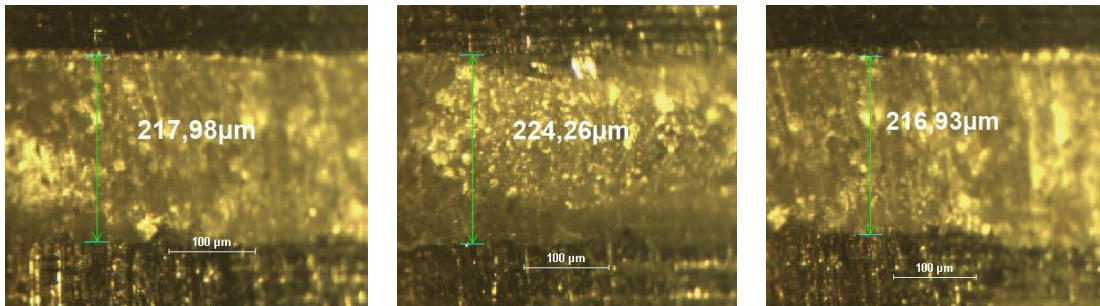


Figura 113- Variação da espessura do adesivo Araldite® AV138

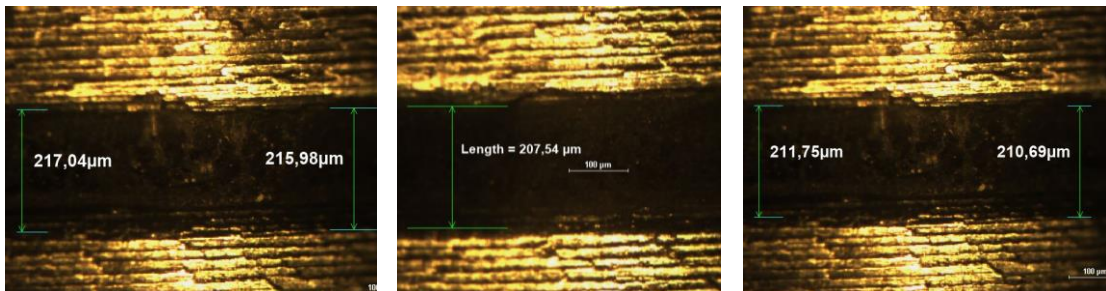


Figura 114- Variação da espessura do adesivo Araldite® 420 A/B

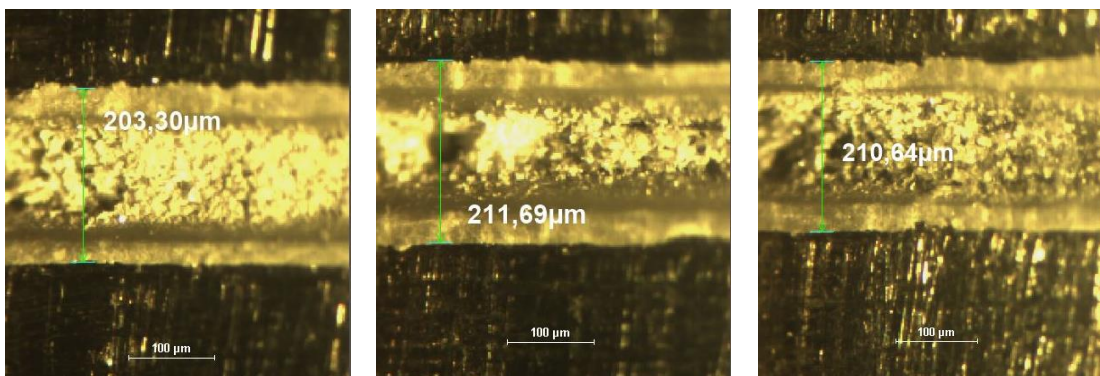


Figura 115- Variação da espessura do adesivo SikaForce® 710

#### 4.2.4. Condições de ensaio

Os ensaios das juntas topo a topo foram realizados à temperatura ambiente com humidade relativa de 62% na máquina Shimadzu AG-I 10kN (Figura 116) equipada com uma célula de carga de 10 kN. A velocidade de ensaio foi de 0,5 mm/min. Para fixar e solicitar as juntas topo a topo na máquina de ensaios foi necessário utilizar a ferramenta apresentada no subcapítulo 3.3 e que pode ser observada na Figura 116. Os provetes foram ensaiados duas semanas após a cura. Foram realizados cinco ensaios para cada adesivo.



Figura 116- Máquina Shimadzu AGI 10 kN (LET)

#### 4.2.5. Resultados

Os resultados obtidos nos ensaios de tração das juntas topo a topo são apresentados nas tabelas e figuras seguintes. Para cada ensaio são indicados o tipo de rotura e os valores dos seguintes parâmetros: força máxima ( $F_{máx.}$ ), tensão máxima ( $\sigma_{máx.}$ ) e deslocamento máximo ( $\delta_{máx.}$ ).

A tensão máxima é obtida pela seguinte expressão:

$$\sigma_{máx.} = \frac{F_{máx.}}{A} \quad (5)$$

em que  $A$  é a área de colagem.

Tabela 36- Resultados obtidos com o ensaio de tração

<b>Propriedades obtidas com os resultados do ensaio de tração</b>				
<b>Provete</b>	<b>Tipo de rotura</b>	<b>F<sub>máx.</sub> (N)</b>	<b>σ<sub>máx.</sub> (MPa)</b>	<b>δ<sub>máx.</sub> (mm)</b>
<b>Araldite® AV 138</b>				
1	Coesiva	3621,25	28,59	0,724
2	Coesiva	3790,94	29,93	0,734
3	Coesiva	3637,81	28,72	0,75
4	Coesiva	3508,13	27,69	0,674
5	Coesiva	3834,69	30,27	0,737
Média	-	3678,56	29,04	-
Desvio padrão	-	119,16	0,94	-
<b>Araldite® 420 A/B</b>				
1	Adesiva	2446,88	19,32	0,488
2	Coesiva	2798,13	22,09	0,559
3	Coesiva	2461,88	19,43	0,483
4	Adesiva	2426,25	19,15	0,489
5	Coesiva	2997,5	23,66	0,596
Média	-	2626,13	20,73	-
Desvio padrão	-	230,89	1,82	-
<b>SKF 710 L100</b>				
1	Coesiva	968,44	7,64	0,300
2	Coesiva	1144,06	9,03	0,320
3	Coesiva	1082,19	8,54	0,357
4	Coesiva	1019,06	8,04	0,291
5	Coesiva	1195,63	9,44	0,303
Média	-	1081,88	8,54	-
Desvio padrão	-	82	0,65	-

Os gráficos seguintes demonstram a variação da força ao longo do deslocamento até à rotura dos respetivos adesivos.

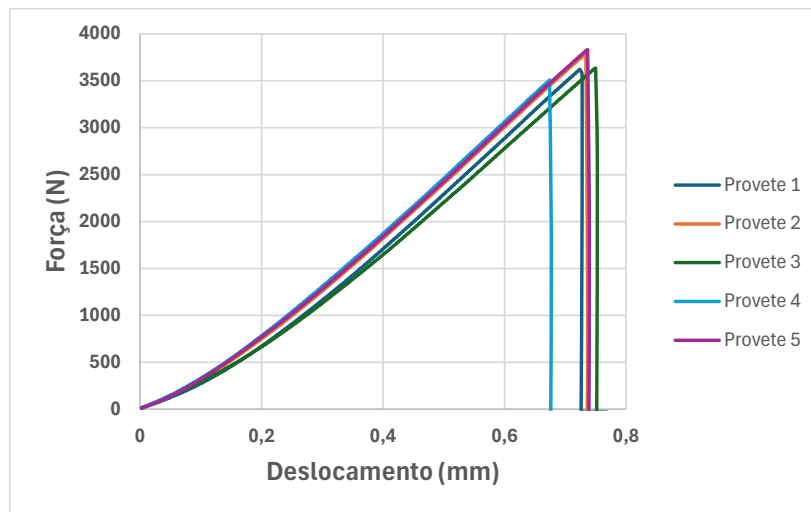


Figura 117- Força/deslocamento dos provetes Araldite® AV138

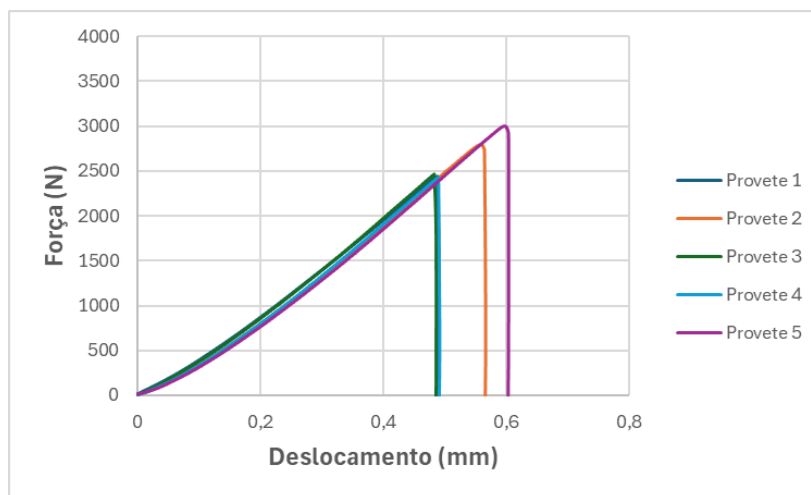


Figura 118- Força/deslocamento dos provetes Araldite® 420 A/B

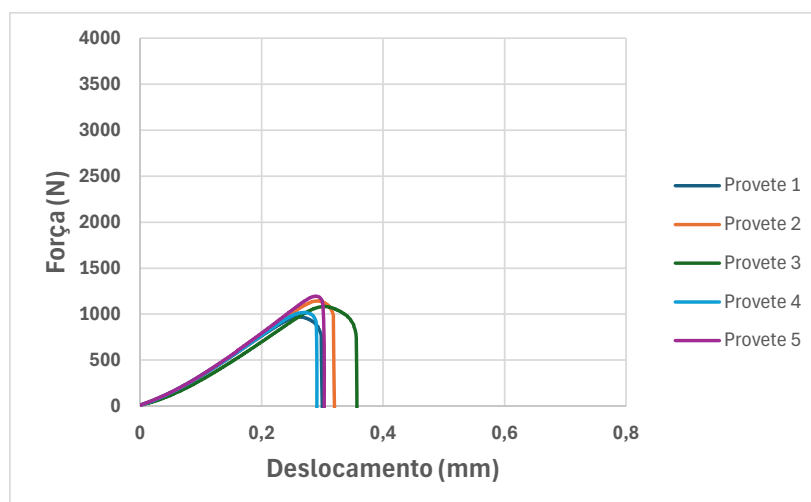


Figura 119- Força/deslocamento dos provetes SKF 710

## Ensaio

No seguinte gráfico de barras é possível observar a diferença no valor médio da tensão máxima e respetivo desvio padrão dos diferentes adesivos.

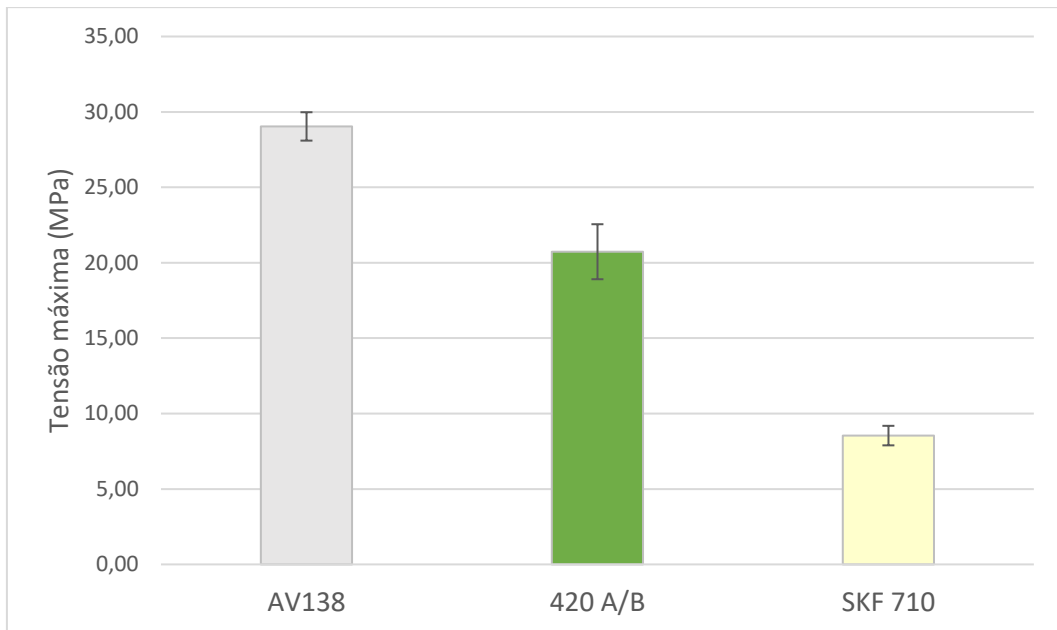


Figura 120- Comparação dos valores de tensão de rotura

As superfícies após rotura, para os três adesivos estudados podem ser observados na seguinte figura:

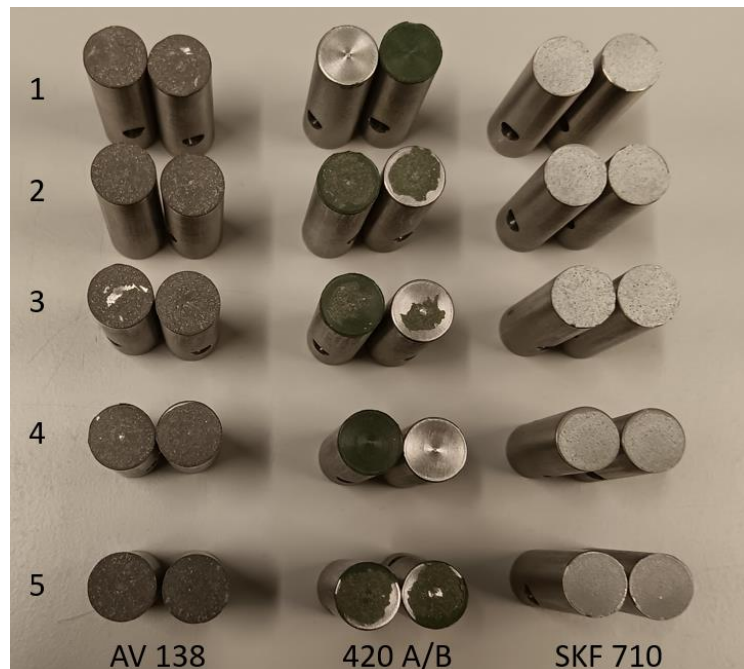


Figura 121- Provetes topo a topo após o ensaio de tração

#### 4.2.6. Discussão de resultados

Os resultados das observações com microscópio indicam a capacidade da ferramenta, para o fabrico de juntas topo a topo com controlo da espessura de filme de adesivo. Adicionalmente garante o alinhamento dos substratos. Isto foi verificado através da rotação dos provetes numa mesa plana sem observação de excentricidade.

A ferramenta de fixação e solitação das juntas, devido aos dois elementos de ligação, permitiu o alinhamento do provete sem introdução de esforços, que poderiam resultar em roturas prematuras, comprometendo a qualidade dos resultados. Contudo, verificou-se a existência de algumas folgas nos elementos de fixação das várias peças que constituem esta ferramenta. Este facto afeta o deslocamento registado durante os ensaios.

Não obstante, os resultados dos ensaios não constituírem o propósito da dissertação serão discutidos nos próximos parágrafos.

Na medida em que as propriedades à tração obtidas em ensaios de juntas topo a topo não são geralmente fornecidas pelos fabricantes, os resultados são comparados com a resistência à tração obtida de ensaios com provetes maciços de adesivo.

O valor de resistência da junta obtido para o adesivo AV138 (29,04 MPa) é idêntico ao apresentado pelo fabricante para resistência à tração do adesivo (29 MPa).

Para o adesivo 420 A/B a resistência da junta para (20,74 MPa) é aproximadamente 29% inferior à resistência à tração referida pelo fabricante. Contudo, com este adesivo algumas roturas foram adesivas.

O adesivo SikaForce® 710 foi, tal como esperado, o que apresentou menor resistência. Para este adesivo a resistência obtida foi de 8,54 MPa, sendo 39% inferior à indicada na ficha técnica.

Para os adesivos AV138 e SKF 710 as roturas foram sempre coesivas. Já para o adesivo 420 A/B em duas juntas a rotura foi adesiva, indicando que, provavelmente, as superfícies não foram devidamente preparadas ou que será necessário alterar o método de preparação.



## 5. Conclusões e propostas para trabalhos futuros

Com a realização do estudo bibliográfico sobre as ligações adesivas, respetivos ensaios, fabrico das ferramentas, testes e resultados obtidos serão agora apresentadas as principais conclusões e algumas sugestões para trabalhos futuros.

### 5.1. Conclusões


As ligações adesivas têm sido cada vez mais utilizadas nas mais diversas indústrias devido às inúmeras vantagens que estas possuem em comparação às ligações tradicionais. Para além disso várias ligações só são possíveis com recurso a adesivos.


Existem diversos ensaios que permitem determinar as propriedades mecânicas dos adesivos e juntas adesivas. Contudo, o ensaio de tração em juntas topo a topo (*butt-joints*) e o ensaio de arrancamento de rolete flutuante (*floating roller test*) são os ensaios com maior relevância para esta dissertação. De facto, os principais objetivos deste trabalho consistiram no projeto e fabrico das ferramentas necessárias para a realização destes ensaios. O funcionamento das ferramentas foi validado com o fabrico de juntas e realização dos respetivos ensaios, utilizando três adesivos com diferentes características.

Nos quadros seguintes estão indicados os principais objetivos do trabalho e como foram alcançados.

<b>Objetivo:</b>	<b>Fabrico de uma ferramenta para a realização de ensaios de arrancamento por rolete flutuante</b>
Descrição:	Foi desenvolvida e fabricada uma ferramenta que permite a realização deste tipo de ensaio segundo a norma <b>ASTM D3167</b> .
Observações:	Nos primeiros ensaios realizados com a ferramenta verificou-se que a rotação dos rolos era algo intermitente, provocando a ocorrência de escorregamento dos aderentes na superfície dos rolos. Constatou-se que os rolamentos foram montados com um forte aperto. Após a resolução deste problema a ferramenta passou a apresentar um funcionamento perfeitamente normal.
Imagem da ferramenta:	
	Custo da ferramenta: 400 €.

## Conclusão

<b>Objetivo:</b>	<b>Fabrico de uma ferramenta para o fabrico de juntas topo a topo.</b>
<b>Descrição:</b>	Foi desenvolvida e fabricada uma ferramenta que permite o fabrico de juntas topo a topo segundo a norma <b>ASTM D2094</b> .
<b>Observações:</b>	<p>A ferramenta permite o fabrico de até 6 juntas topo a topo com substratos cilíndricos com dimensões segundo a norma <b>ASTM D2094</b>, mas também pode utilizar-se substratos com outras dimensões; garante o alinhamento dos substratos; permite regular a espessura do adesivo; possibilita o acesso a todo o perímetro da zona de colagem; permite a cura do adesivo à temperatura ambiente, mas também a temperaturas mais elevadas (para temperaturas elevadas será necessário retirar a pega e os apoios de borracha); é de fácil manuseamento.</p> <p>Foram também fabricados 30 substratos de aço CK45 + 30 de aço AISI 304 + 30 de liga de alumínio AW6082-T6.</p> <p>Foi elaborado um procedimento para a utilização da ferramenta.</p> <p>As juntas fabricadas com a ferramenta permitiram constatar que os substratos estavam adequadamente alinhados (coaxiais) e a espessura da camada de adesivo apresentava-se uniforme e com a espessura pretendida.</p>
<b>Imagem da ferramenta:</b>	 <p>Custo da ferramenta: 2100 €. Custo dos substratos: 1080 €.</p>

<b>Objetivo:</b>	<b>Fabrico de uma ferramenta para a realização dos ensaios de tração das juntas topo a topo.</b>
<b>Descrição:</b>	Foi desenvolvida e fabricada uma ferramenta que permite a fixação e solitação das juntas. Uma parte de ferramenta é fixa à célula de carga e a outra parte é fixa na mesa da máquina de ensaios.
<b>Observações:</b>	<p>A ferramenta permite a fácil colocação da junta através de pinos com 5 mm de diâmetro. O suporte inferior pode rodar permitindo alinhar os furos do suporte com o furo do substrato. Possui juntas de <i>cardan</i> que garantem que o eixo do provete coincida com a direção da carga aplicada.</p> <p>Foi elaborado um procedimento para facilitar a utilização desta ferramenta.</p>
<b>Imagem da ferramenta:</b>	 <p>Custo: 650 €.</p>

De realçar que o funcionamento das ferramentas fabricadas foi validado com ensaios utilizando os seguintes adesivos: Araldite® AV138, Araldite® 420A/B e o SikaForce® 710.

Foram realizados 30 ensaios de rolete flutuante (18 com a ferramenta fabricada e 12 com uma ferramenta disponibilizada por outro laboratório). Os substratos foram de alumínio.

Para os ensaios de tração foram realizados 15 ensaios (5 ensaios para cada adesivo). Os substratos foram de aço inoxidável AISI 304.

Os resultados dos ensaios de rolete flutuante permitem concluir o seguinte:

- O adesivo com maior resistência ao arrancamento é o SikaForce® 710 (granalhagem: 5,41 N/mm; lixagem: 4,43 N/mm);
- O adesivo com menos resistência ao arrancamento é o AV138 (granalhagem: 1,35 N/mm; lixagem: 0,32 N/mm);
- O adesivo 420A/B também apresenta boa resistência ao arrancamento (granalhagem: 5,24 N/mm; lixagem: 2,55 N/mm).

Os resultados dos ensaios de tração permitem concluir o seguinte:

- O adesivo com maior resistência à tração é o AV138 (29,04 MPa);
- O adesivo com menos resistência à tração é o SikaForce® 710 (8,54 MPa);
- O adesivo 420A/B apresenta uma resistência à tração menor que a do AV138, mas superior à do SikaForce® 710 (20,73 MPa).

## 5.2. Propostas para trabalhos futuros

Quanto a trabalhos futuros propõe-se o seguinte:

- Fabricar juntas topo a topo com cura a diferentes temperaturas (40, 80, 100 e 120 °C) e analisar o efeito da temperatura na ferramenta desenvolvida para o fabrico das juntas.
- Fabricar juntas com substratos de diferentes geometrias, pois a ferramenta só foi testada para substratos com diâmetro de 12,7 mm e 40 mm de comprimento.
- Eliminar as folgas existentes na ferramenta fabricada para fixar e solicitar as juntas topo a topo.
- Fabricar juntas topo a topo com adesivos que tendem a escorrer para, assim, verificar se os reservatórios cónicos de silicone impedem que o adesivo atinja peças da ferramenta (os adesivos utilizados neste trabalho não tinham este comportamento).
- Realizar ensaios de rolete flutuante com outros adesivos e substratos.

## Conclusão

## Referências

- [1] J. M. D. S. Morais, *Desenho de construções mecânicas*, 26.<sup>a</sup> ed. Lisboa: Porto Editora, Lda., 2017.
- [2] L. F. M. Silva, A. G. Magalhães, e M. F. S. F. Moura, *Juntas Adesivas Estruturais*, vol. 1. Porto: Publindústria, Edições Técnicas, 2007.
- [3] P. K. M. T.P. Lang, «Effect of spew geometry on stresses in single lap adhesive joints», *Int. J. Adhes. Adhes.*, pp. 167–177, 1997.
- [4] E. M. Petrie e E. M., *Handbook of Adhesives and Sealants*. Nova Iorque: McGraw-Hill, 2000.
- [5] P. M. S. T. de Castro, P. P. Camanho, L. F. M. da Silva, e P. M. G. P. Moreira, «IDMEC – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto», *Int. J. Struct. Integr.*, vol. 1, n. 2, pp. 161–172, 2010, doi: 10.1108/17579861011053899.
- [6] G. D. Davis, *Surface treatments of selected materials*, vol. 1–2. 2018. doi: 10.1007/978-3-642-01169-6.
- [7] B. Concepts e H. T. Bonding, *Basic Concepts and High Tech Bonding S ERIES E DITOR*, vol. 1. 2005.
- [8] M. R. L. G. William R Broughton, «Preparation and Testing of Adhesive Joints», n. 47. pp. 10–77, 2001. doi: 10.47120.
- [9] L. F. M. Silva, «Handbook of Adhesion Technology», *Handb. Adhes. Technol.*, 2011, doi: 10.1007/978-3-642-01169-6.
- [10] O. Al-Mansouri, N. Pinoteau, R. Mège, e V. Marchetti, «Influence of cure time, temperature, and moisture on mechanical properties of a fast cure adhesive for post-installed rebar application», *Constr. Build. Mater.*, vol. 407, n. May, p. 133615, Dez. 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133615.
- [11] ASTM D1781-98, «Standard Test Method for Climbing Drum Peel for Adhesives». doi: 10.1520/D1781-98R21.
- [12] R. J. C. Carbas, M. A. Dantas, E. A. S. Marques, e L. F. M. da Silva, «Effect of the adhesive thickness on butt adhesive joints under torsional loads», *J. Adv. Join. Process.*, vol. 3, n. April, p. 100061, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.jajp.2021.100061.
- [13] D. 897-01, «Standard Test Method for Tensile Properties of Adhesive Bonds 1», *Test*, vol. 02, pp. 4–6, 1995.
- [14] ASTM D2095-96(2023), «Standard Test Method for Tensile Strength of Adhesives by Means of Bar and Rod Specimens», *ASTM Int.*, vol. 15, p. 3, 2023.
- [15] L. F. M. da Silva, D. A. Dillard, B. Blackman, e R. D. Adams, *Testing Adhesive Joints*. Wiley, 2012. doi: 10.1002/9783527647026.
- [16] H. S. Da Costa Mattos, E. M. Sampaio, e A. H. Monteiro, «Static failure analysis of axially loaded aluminium epoxy butt joints», *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 30, n. 8, pp. 774–780, 2010, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2010.08.004.
- [17] A. Öchsner e J. Grácio, «An evaluation of the elastic properties of an adhesive layer using the tensile-butt joint test: Procedures and error estimates», *Int. J. Adhes. Adhes.*,

## Referências

- vol. 27, n. 2, pp. 129–135, 2007, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2006.01.003.
- [18] L. A. Ardila-Rodríguez, B. Boshuizen, C. Rans, e J. A. Poulis, «The influence of grit blasting and UV/Ozone treatments on Ti-Ti adhesive bonds and their durability after sol-gel and primer application», *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 104, n. July 2020, p. 102750, 2021, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2020.102750.
- [19] L. Ernesto Mendoza-Navarro, A. Diaz-Diaz, R. Castañeda-Balderas, S. Hunkeler, e R. Noret, «Interfacial failure in adhesive joints: Experiments and predictions», *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 44, pp. 36–47, 2013, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2013.02.004.
- [20] J. Zhang, H. Jia, H. Li, e H. Y. Li, «Investigation on the uniaxial ratchetting and fatigue failure behaviors of silicone seal adhesive bonded butt-joints under tensile and torsional cyclic loading», *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 99, p. 102588, 2020, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2020.102588.
- [21] A. Technology, *Handbook of Adhesion Technology*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011. doi: 10.1007/978-3-642-01169-6.
- [22] M. Chaudhury e A. V. Pocius, «Surfaces, Chemistry and Applications», *Adhes. Sci. Eng.*, n. 2, p. 1210, 2002.
- [23] S. T. Method, «ASTM D1002-01.pdf», vol. 01, n. Reapproved 2019, pp. 1–5, 2020.
- [24] M. Bezzerrouki, «Innovative geometric design improves the resistance of simple metal / metal lap joint», *Frat. ed Integrità Strutt.*, vol. 13, n. 48, pp. 491–502, Mar. 2019, doi: 10.3221/IGF-ESIS.48.47.
- [25] J. Monteiro *et al.*, «Effect of adhesive type and overlap length on the mechanical resistance of a simple overlap adhesive joint», *U.Porto J. Eng.*, vol. 7, n. 3, pp. 1–12, 2021, doi: 10.24840/2183-6493\_007.003\_0001.
- [26] Z. Chen *et al.*, «A Comparative Study of Two ASTM Shear Test Standards for Chopped Carbon Fiber SMC», *SAE Int. J. Mater. Manuf.*, vol. 11, n. 4, pp. 2018-01–0098, Abr. 2018, doi: 10.4271/2018-01-0098.
- [27] T. S. Preview, «INTERNATIONAL STANDARD behaviour of structural adhesives — Tensile test method using thick adherends iTeh STANDARD iTeh STANDARD PREVIEW», vol. 2019. 2019.
- [28] W. Broughton, «Testing the mechanical, thermal and chemical properties of adhesives for marine environments», *Adhes. Mar. Eng.*, pp. 99–154, 2012, doi: 10.1533/9780857096159.2.99.
- [29] F. Khan *et al.*, «Effect of various surface preparation techniques on the delamination properties of vacuum infused Carbon fiber reinforced aluminum laminates (CARALL): Experimentation and numerical simulation», *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 31, n. 11, pp. 5265–5272, Nov. 2017, doi: 10.1007/s12206-017-1019-y.
- [30] ASTM D903-98, «Standard Test Method for Peel of Stripping Strength of Adhesive Bonds», vol. 98, n. Reapproved, p., 2004.
- [31] ASTM D3167-10, «Standard Test Method for Floating Roller Peel Resistance of Adhesives», *ASTM Int. West Conshohocken, PA, 2010*, [www.astm.org](http://www.astm.org), pp. 1–4, 2010, [Em linha]. Disponível em: <http://www.astm.org/Standards/D3167.htm>
- [32] R. Banks, A. P. Mouritz, S. John, F. Coman, e R. Paton, «Development of a new structural prepreg: Characterisation of handling, drape and tack properties», *Compos.*

- Struct.*, vol. 66, n. 1–4, pp. 169–174, 2004, doi: 10.1016/j.compstruct.2004.04.034.
- [33] S. Li, K. Wang, W. Zhu, Y. Peng, S. Ahzi, e F. Chinesta, «Investigation on the mechanical properties of 3D printed hybrid continuous fiber-filled composite considering influence of interfaces», *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 123, n. 9–10, pp. 3147–3158, 2022, doi: 10.1007/s00170-022-10398-7.
- [34] S. Y. Park, W. J. Choi, e B. C. Yoon, «Analysis of effects of process factors on corrosion resistance of adhesive bonded joints for aluminum alloys», *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 276, n. July 2018, p. 116412, 2020, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2019.116412.
- [35] S. T. De Freitas e J. Sinke, «Adhesion properties of bonded composite-to-aluminium joints using peel tests», *Journal of Adhesion*, vol. 90, n. 5–6. pp. 511–525, 2014. doi: 10.1080/00218464.2013.850424.
- [36] S. T. Freitas e J. Sinke, «Test method to assess interface adhesion in composite bonding». Faculty of Aerospace Engineering, Delft University of technology, Kluyverweg 1, 2629HS Delft, Netherlands, 2015. doi: 10.1186/s40563-015-0033-5.
- [37] C. E. Ojeda, E. J. Oakes, J. R. Hill, D. Aldi, e G. A. Forsberg, «Temperature effects on adhesive bond strengths and modulus for commonly used spacecraft structural adhesives», *Int. SAMPE Tech. Conf.*, n. August, 2011.
- [38] J. B. S. Nóbrega, R. D. S. G. Campilho, I. J. Sánchez-Arce, e P. J. R. O. Nóvoa, «Numerical estimation of the peel strength of adhesive joints via the floating roller peel test», *Procedia Struct. Integr.*, vol. 47, n. 2022, pp. 408–416, 2023, doi: 10.1016/j.prostr.2023.07.084.
- [39] ASTM D1781, «G115-D1781 – Climbing Drum Peel Test Fixture per ASTM D 1781», p. 55379, 2007.
- [40] A. A. Bezemer, C. B. Guyt, e A. Vlot, «New impact specimen for adhesives: optimization of high-speed-loaded adhesive joints», *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 18, n. 4, pp. 255–260, Ago. 1998, doi: 10.1016/S0143-7496(97)00032-8.
- [41] ASTM International, «Standard Test Method for Fatigue Properties of Adhesives in Shear by Tension Loading (Metal/Metal)», *Current*, vol. 15, n. Reapproved 2020, pp. 2020–2022, 1999, [Em linha]. Disponível em: <https://www.astm.org/d3166-99r20.html>
- [42] B. Joints, D. Test, e A. Drawings, «Standard Test Method for Determining Durability of Adhesive Joints Stressed in Shear by Tension Loading 1», *Test*, vol. 01, n. Reapproved 2007, pp. 1–4, 2012.
- [43] W. Conshohocken, «Astm D3762 - 03(2010)», *Annu. B. ASTM Stand.*, vol. 15.06, n. Reapproved 1998, pp. 1–4, 1998.
- [44] W. Conshohocken, «Standard Test Method for Durability Assessment of Adhesive Joints Stressed in Peel 1», *Annu. B. ASTM Stand.*, vol. 02, pp. 11–13, 1999.
- [45] S. Practice, «Standard Practice for Atmospheric Exposure of Adhesive-Bonded Joints and», *Annu. B. ASTM Stand.*, vol. 15.06, n. December, pp. 10–12, 2001.
- [46] C. S. Plate, C. Quality, R. Bar, e T. A. Strip, «Astm D-3433-99», *Copyr. © ASTM, 100 Barr Harb. Drive, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States*, vol. 15, 1999.
- [47] N. Terasaki, Y. Fujio, S. Horiuchi, e H. Akiyama, «Mechanoluminescent studies of failure line on double cantilever beam (DCB) and tapered-DCB (TDCB) test with similar and dissimilar material joints», *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 93, n. January, p. 102328, 2019,

## Referências

- doi: 10.1016/j.ijadhadh.2019.01.022.
- [48] R. Rikards, F. G. Buchholz, A. K. Bledzki, G. Wacker, e A. Korjakin, «Mode I, mode II, and mixed-mode I/II interlaminar fracture toughness of GFRP influenced by fiber surface treatment», *Mech. Compos. Mater.*, vol. 32, n. 5, pp. 439–462, 1996, doi: 10.1007/BF02313863.
- [49] B. Name, «SIQUAL 1191 Steel», *SII Met. Ravne com*, p. 4, 2016.
- [50] Ramada Aços, «Aço CK 45», n. 1, pp. 9–10, 2018, [Em linha]. Disponível em: <https://www.ramada.pt/pt/produtos/acos/aa-os-de-construa-ao-ao-carbono/f10.html>
- [51] Atlas Steels Australia, «Mechanical properties of 304 grade stainless steel Grade», *Atlas Steels Aust.*, pp. 1–3, 2019, [Em linha]. Disponível em: <https://www.dm-consultancy.com/TR/dosya/1-59/h/aisi-340-info.pdf>
- [52] T. Redondo, «R 304», 2018.
- [53] «Aw6082-Fichatecnica\_1540.Pdf».
- [54] T. Datasheet, «Araldite® AV 138M-1 / Hardener HV 998-1», *HUNTSMAN*, vol. 100, n. July, pp. 1–5, 2018.
- [55] R. D. S. G. Campilho, M. D. Banea, J. A. B. P. Neto, e L. F. M. Silva, «Modelling adhesive joints with cohesive zone models : effect of the cohesive law shape of the adhesive layer».
- [56] J. P. O. Pereira, R. G. S. G. Campilho, P. J. R. O. Nóvoa, F. J. G. Silva, e D. C. Gonçalves, «Adherend effect on the peel strength of a brittle adhesive», *Procedia Struct. Integr.*, vol. 37, n. C, pp. 722–729, 2021, doi: 10.1016/j.prostr.2022.02.002.
- [57] A. B. Araldite, «Araldite® 420 A/B», *HUNTSMAN*, n. August, pp. 1–6, 2012.
- [58] P. D. Sheet, «SikaForce®-710 L100», *Sika*, vol. 07.01, n. March, pp. 1–2, 2023.
- [59] F. C. P. Sales, R. M. Ariati, V. T. Noronha, R. R. C. da Costa, e J. E. Ribeiro, «PU tensile tests: Conventional and digital image correlation analysis», *Procedia Struct. Integr.*, vol. 37, n. C, pp. 389–396, 2021, doi: 10.1016/j.prostr.2022.01.100.
- [60] P. Mec, «Aw 1050», vol. 1050.
- [61] «EN AW 6082 Al Si1MgMn», vol. 49, n. July, p. 6082, 2013.

## DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

---

### DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter conduzido este trabalho académico com integridade. Não plagiei ou apliquei qualquer forma de uso indevido de informações ou falsificação de resultados ao longo do processo que levou à sua elaboração.

Declaro que o trabalho apresentado neste documento é original e de minha autoria, não tendo sido utilizado anteriormente para nenhum outro fim.

Declaro ainda que tenho pleno conhecimento do Código de Conduta Ética do P.PORTO.

*José Guilherme Falcão Barbosa*

ISEP, Porto, 18 de junho de 2024

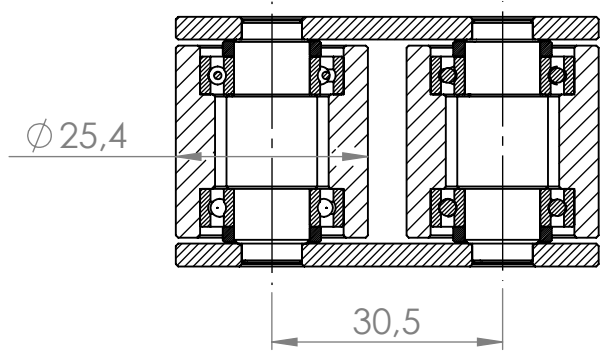
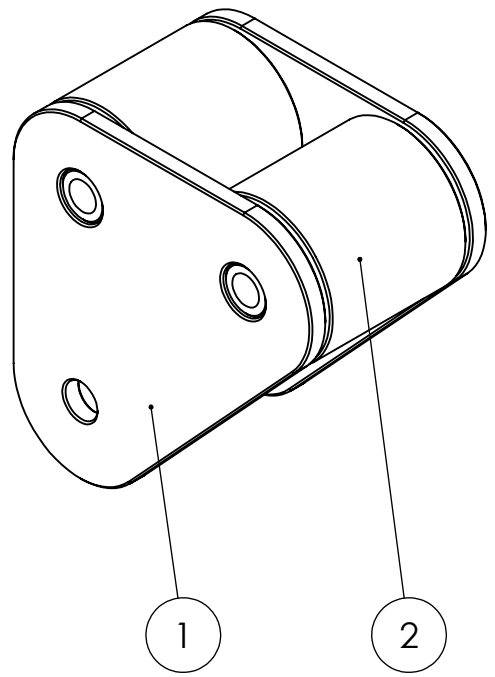
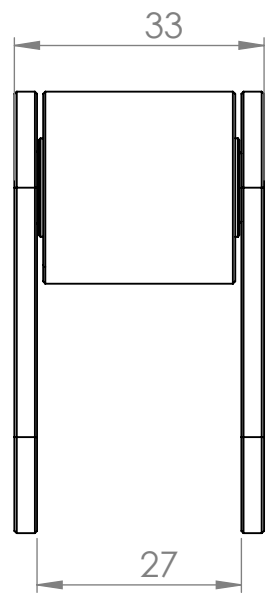
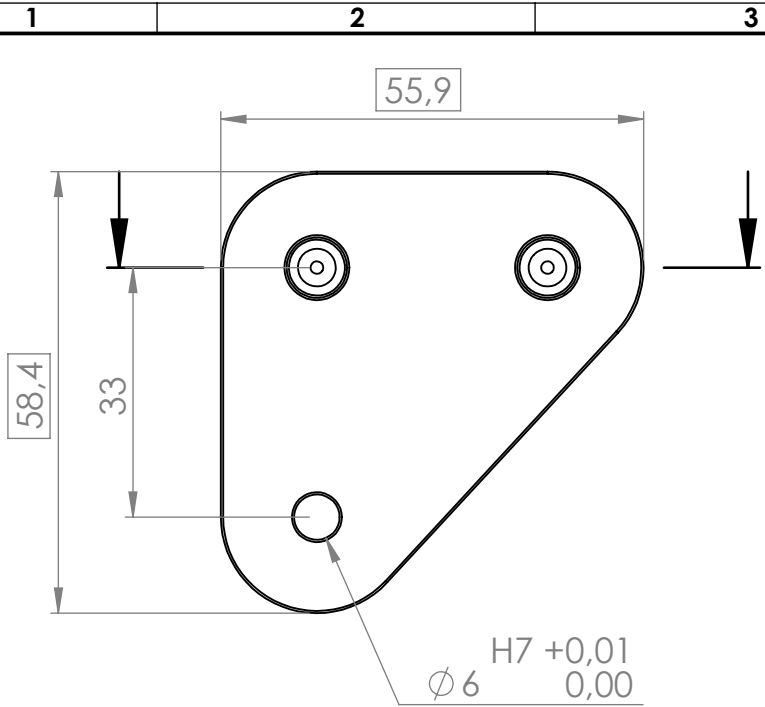
José Guilherme Falcão Pereira Barbosa

# ANEXOS





## **Anexo A- FERRAMENTA PARA ENSAIO DE ROLETE FLUTUANTE**

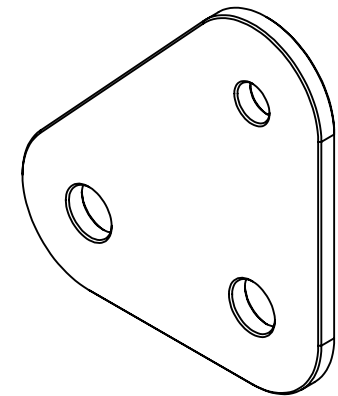
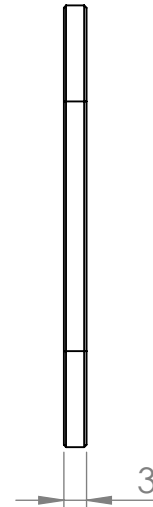
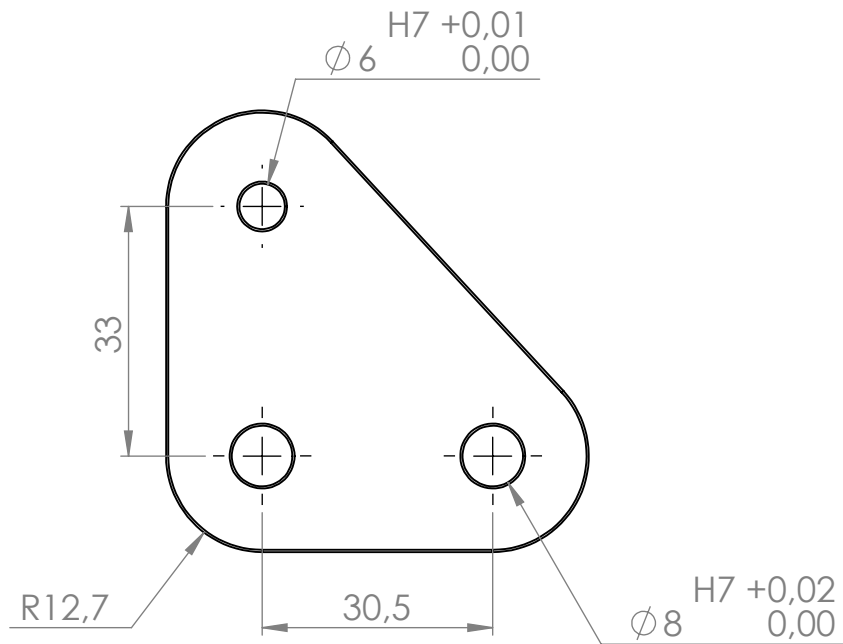





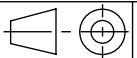
Pos.	Nome	Des. Nº	Material	Descrição	Tipo	Qty.	CL
1	placa	1181412-101	Aço	Fresa		2	
2	conjunto rolo	1181412-102	Varios	Oficina		2	

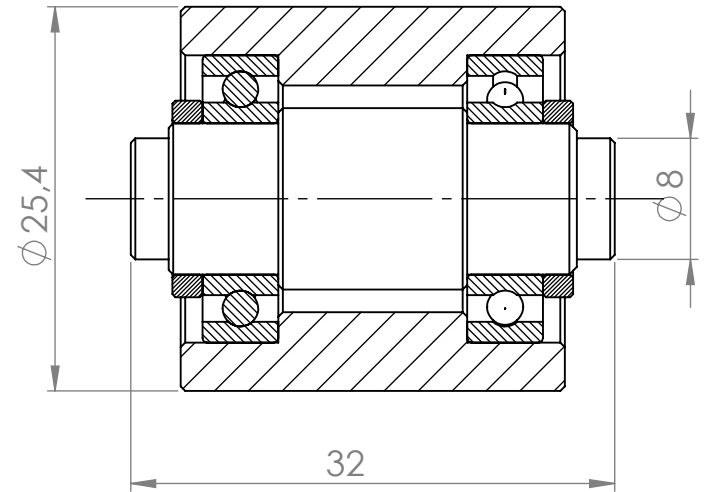
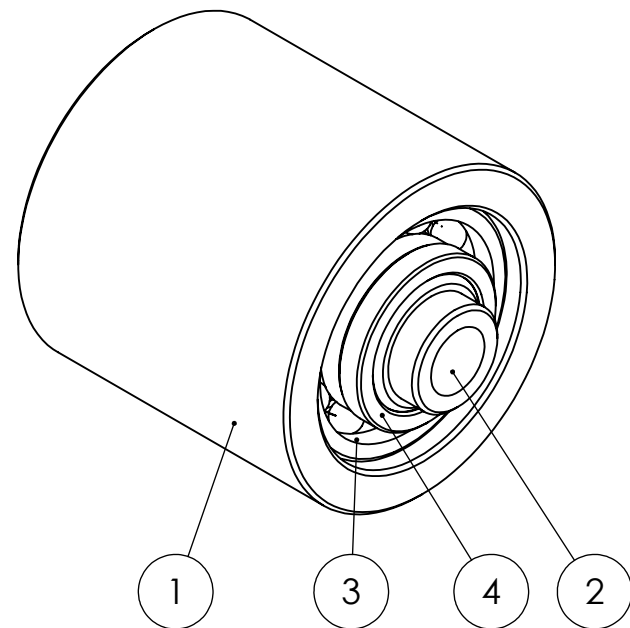
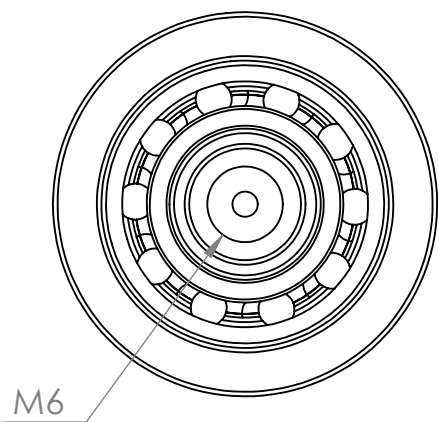
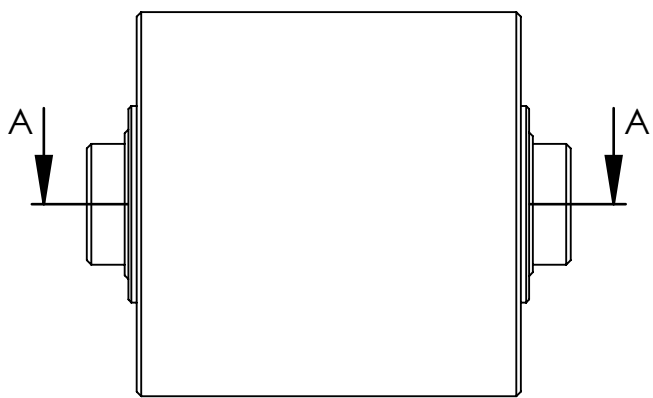
  

Des.	zogui	18-02-2024	 <b>Mestrado</b>				Quantidade	2
Vist.							Massa (kg)	
Aprov.	zogui	23-02-2024	ISO 2768	mK	Escala- 1:1		Tratamento	-
Nome	ferramenta rolete flutuante					Material	Varios	
						Descrição	Oficina	
						Desenho	1181412-100	
							1/1	



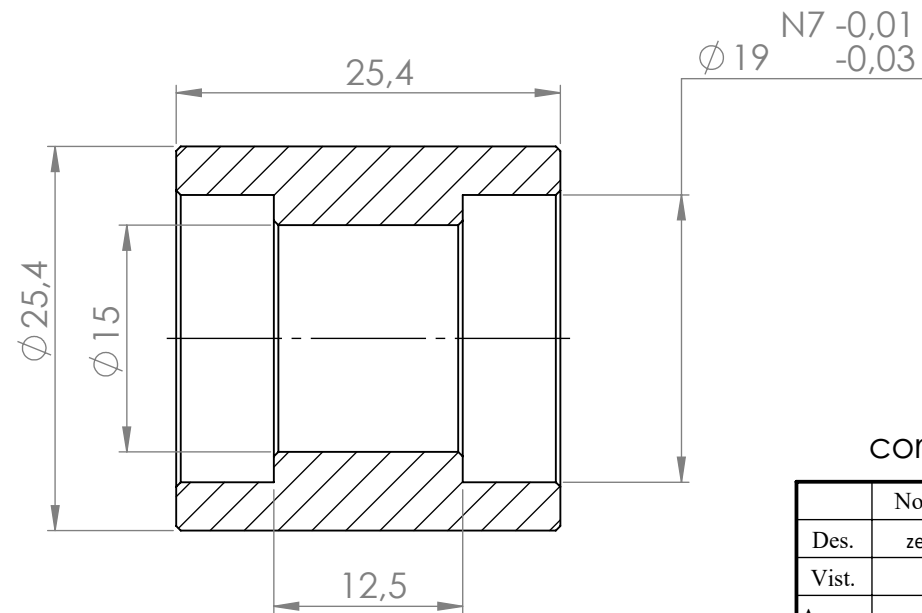
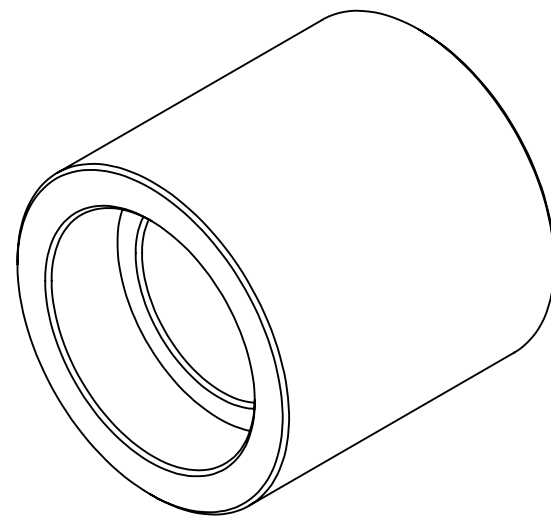
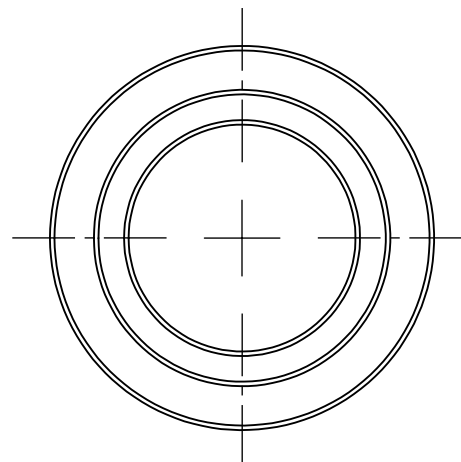
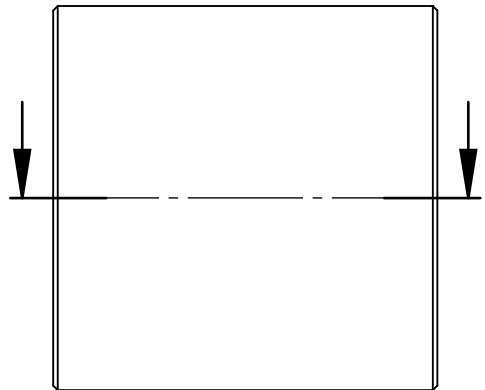
Cortar arestas

	Nome	Data	 <b>Mestrado</b>				Quantidade	4
Des.	zegui	30-10-2023					Massa (kg)	
Vist.							Tratamento	Oxidação a Negro
Aprov.	zegui	19-02-2024	ISO 2768	mK	Escala- 1:1	 A4	Material	Aço
Nome	placa						Descrição	Fresa
							Desenho	1181412-101 1/1


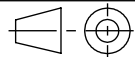


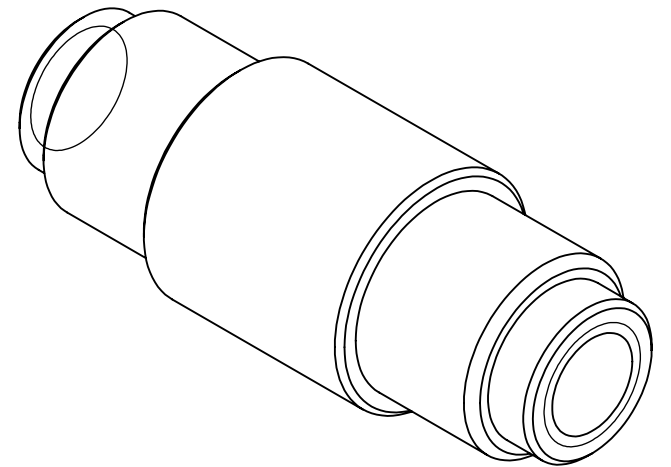
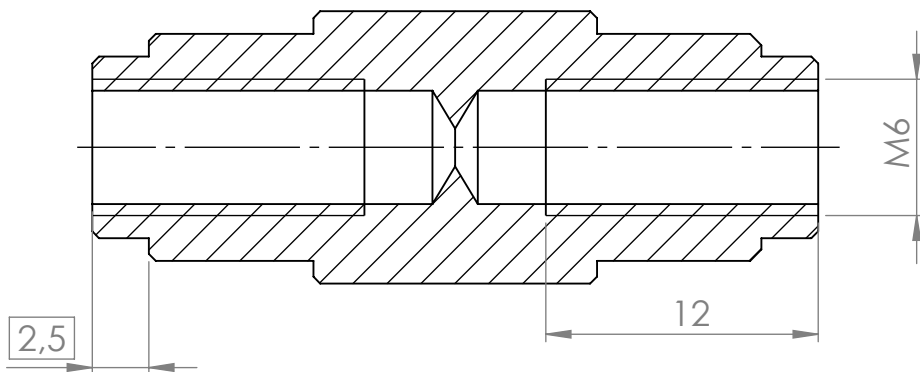
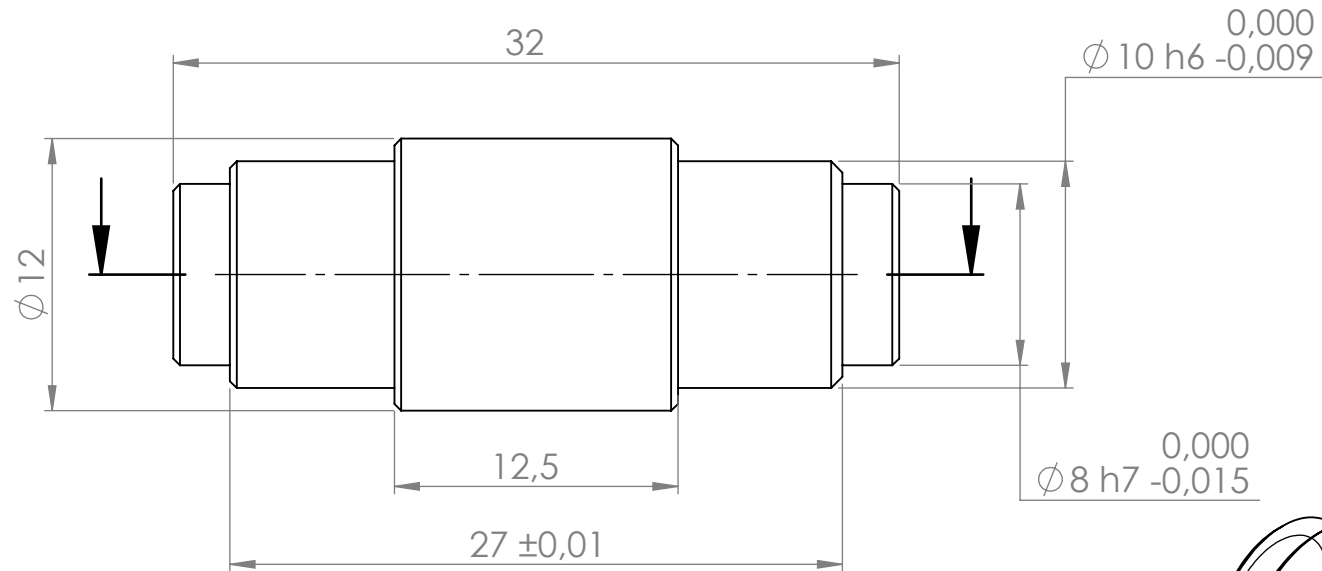
Pos.	Nome	Des. Nº	Material	Descrição	Tipo	Qty.	CL
1	rolo2	<b>1181412-103</b>	Aço CK45	Torno		1	
2	veio-roscado	<b>1181412-104</b>	Aço FR3	Torno		1	
3	skf_bearing_61800	<b>INA</b>	61800-ZZ	Compra		2	
4	separador	<b>1181412-105</b>	Aço	Separador		2	

Nome	zegli	Data	19-02-2024	 Instituto Superior de Engenharia do Porto	<b>Mestrado</b>			Quantidade	4
Des.								Massa (kg)	
Vist.				ISO 2768	mK	Escala- 2:1		Tratamento	-
Aprov.	zegli	19-02-2024					A4	Material	Varios
Nome	conjunto rolo							Descrição	Oficina
								Desenho	1181412-102
									1/1


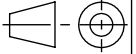


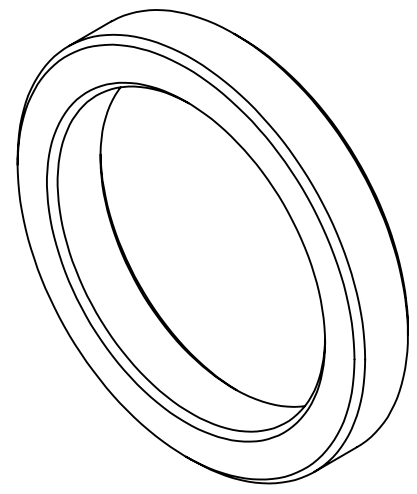
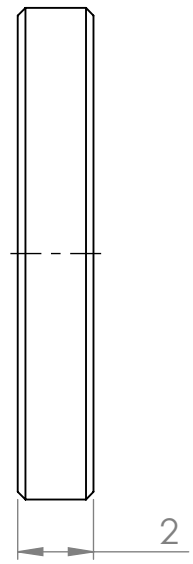
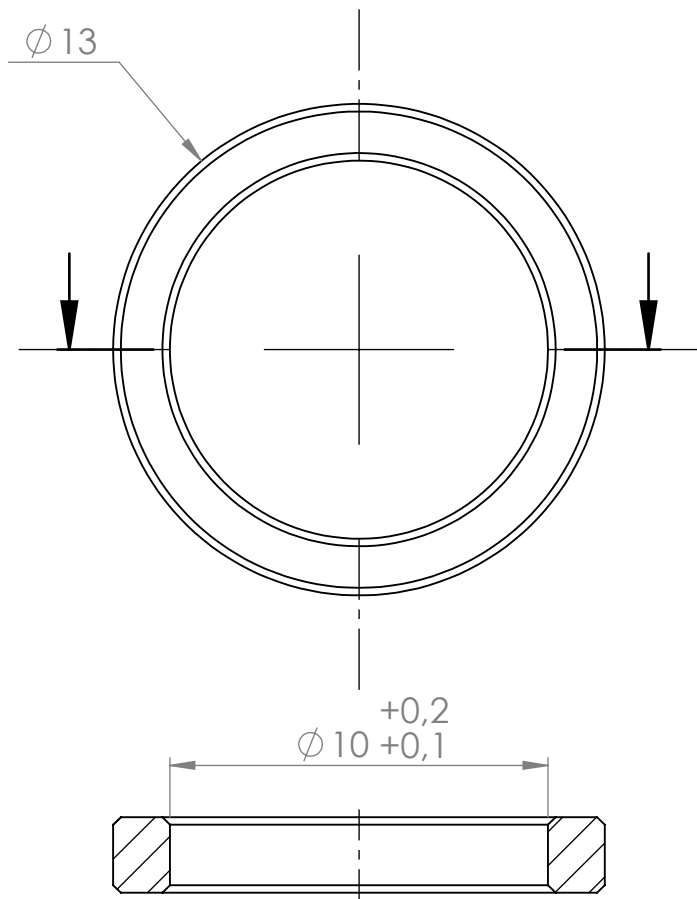
cortar arestas

Nome	zogui	Data	18-02-2024	 <b>Mestrado</b>			Quantidade	4
Des.	zogui						Massa (kg)	
Vist.							Tratamento	Oxidar a Negro
Aprov.	zogui	19-02-2024	ISO 2768	mK	Escala- 2:1	 A4	Material	Aço CK45
Nome	rolo2						Descrição	Torno
							Desenho	1181412-103 1/1


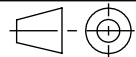


Cortar arestas

	Nome	Data	 <b>Mestrado</b>				Quantidade	4
Des.	zegui	29-10-2023					Massa (kg)	
Vist.							Tratamento	Oxidar a Negro
Aprov.	zegui	19-02-2024	ISO 2768	mK	Escala- 3:1	 A4	Material	Aço FR3
Nome	veio-roscado						Descrição	Torno
							Desenho	1181412-104
								1/1

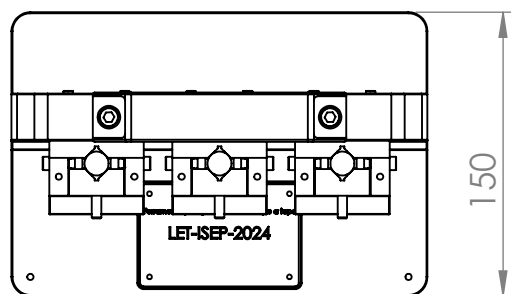
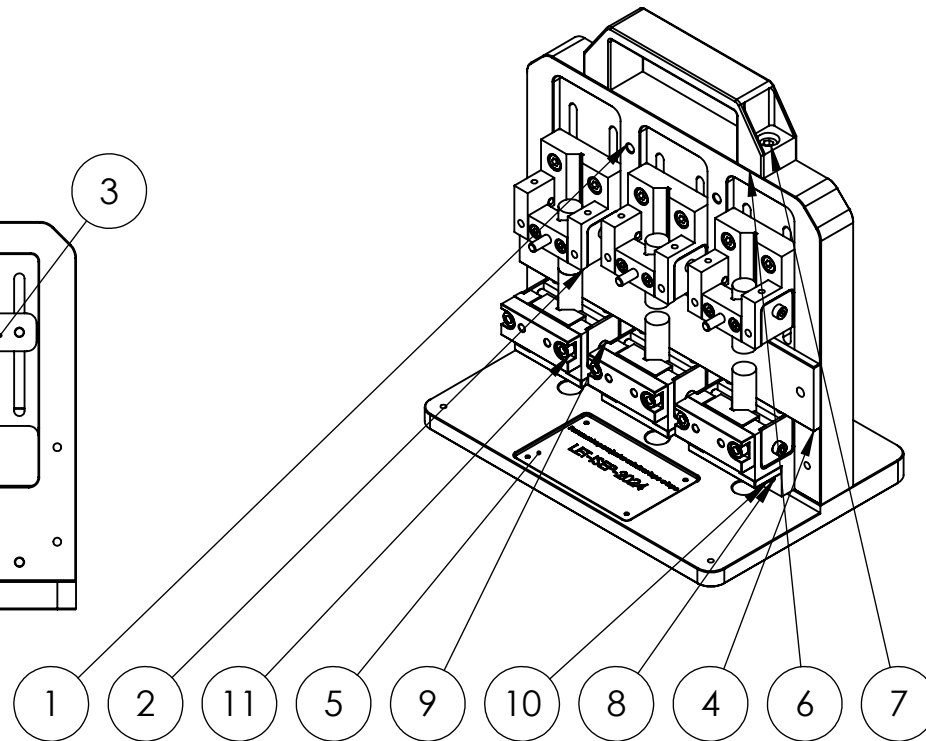
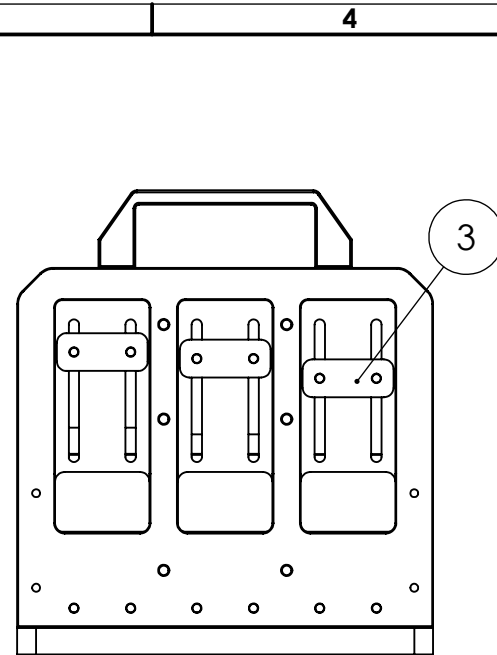
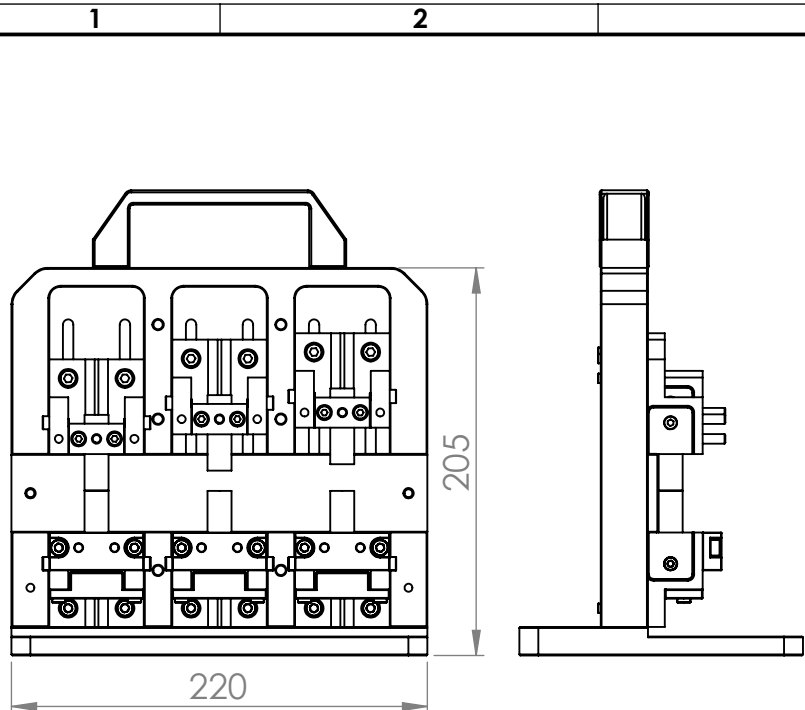


cortar arestas 0.2 mm

	Nome	Data	 <b>Mestrado</b>				Quantidade	8
Des.	zegui	19-02-2024					Massa (kg)	
Vist.							Tratamento	-
Aprov.	zegui	20-02-2024	ISO 2768	mK	Escala- 5:1	 A4	Material	Aço
Nome	separador						Descrição	Separador
							Desenho	1181412-105 1/1

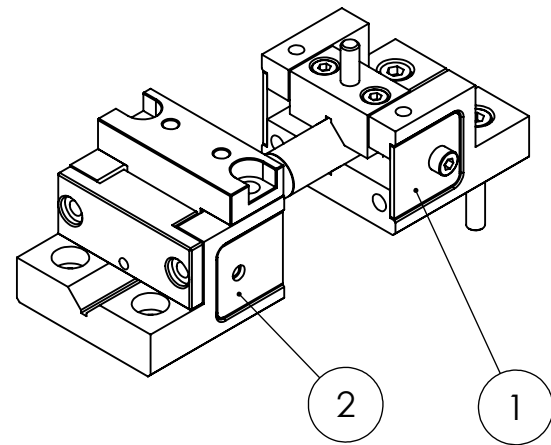
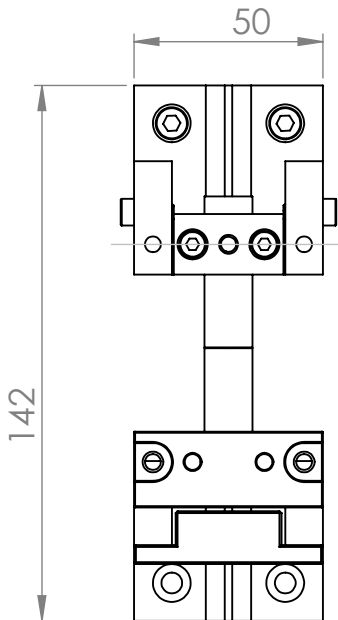
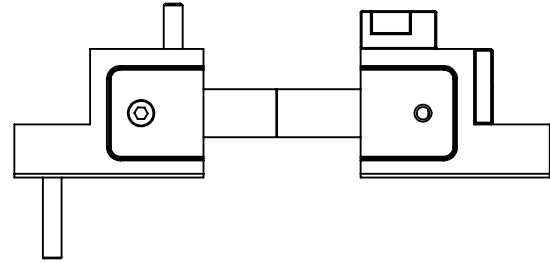
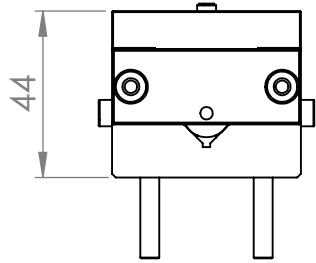
## **ANEXO B- FERRAMENTA PARA FABRICO DE JUNTAS TOPO A TOPO**




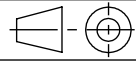


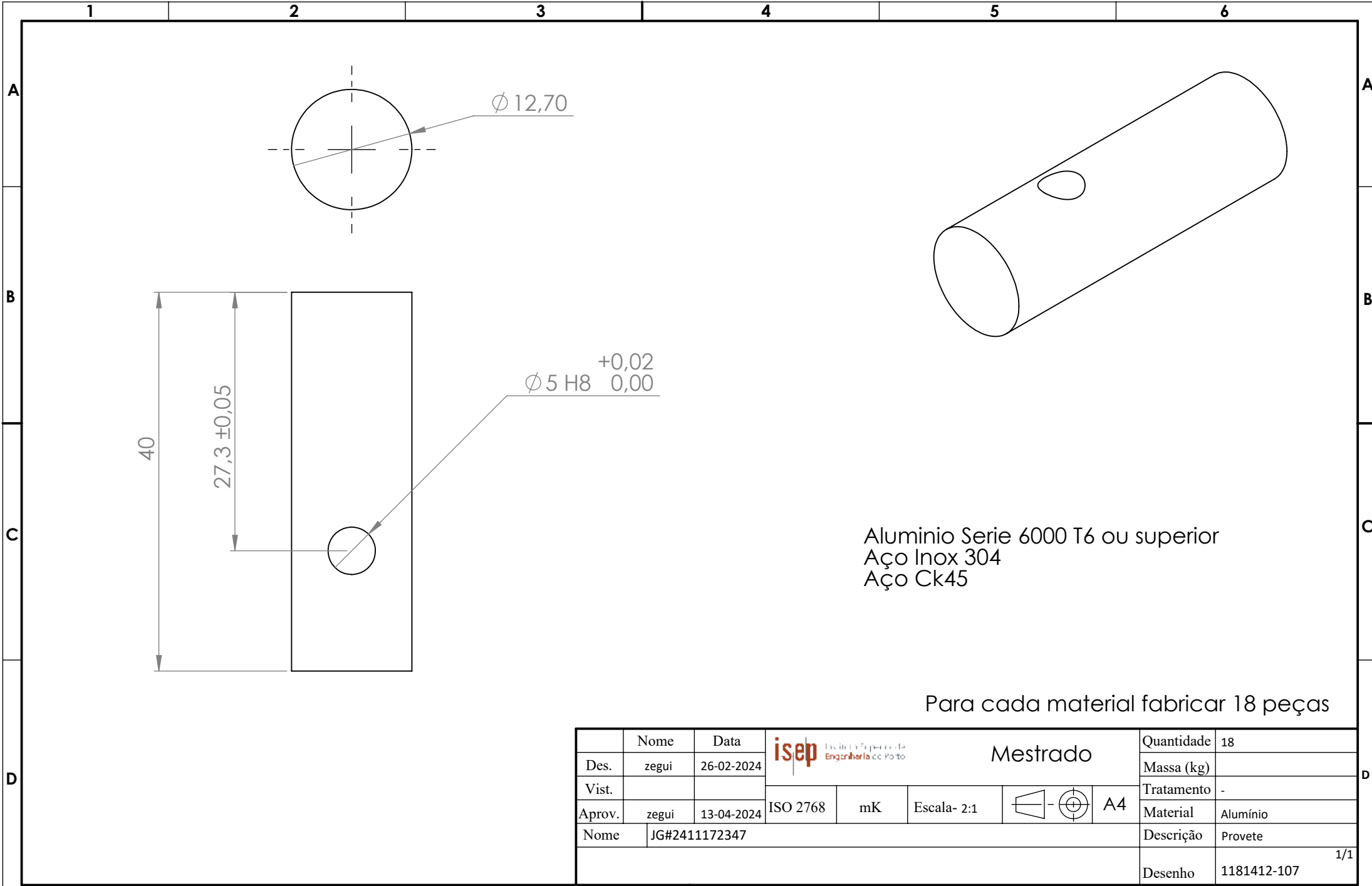
Pos.	Nome	Des. Nº	Material	Descrição	Tipo	Qty.	CL
1	JG#2411172213	<b>1181412-116</b>	-	Oficina		1	
2	JG#2411172219	<b>1181412-106</b>	-	Conjunto lobo		3	
3	JG#2409192355	<b>1181412-122</b>	Aço Inox	Laser		3	
4	JG#2409192359	<b>1181412-123</b>	Aço	Fresa		1	
5	JG#2409190328	<b>20190000-002</b>	Inox316L - Escovado	Laser		1	
6	JG#2409192358	<b>20210058-237</b>	Elesa M443-140-CH	Compra		1	
7	Vis CHC M6x16	<b>PECOL</b>	PARAFUSO	Compra		2	
8	Vis CHC M5x25	<b>PECOL</b>	PARAFUSO	Compra		6	
9	Vis CHC M4x10	<b>PECOL</b>	PARAFUSO	Compra		6	
10	Vis CHC M4x16	<b>PECOL</b>	PARAFUSO	Compra		6	
11	Vis CHC M5x10	<b>PECOL</b>	PARAFUSO	Compra		6	

Nome	zegui	Data	04-03-2024				Mestrado		Quantidade	2
Des.	zegui	04-03-2024	Massa (kg)							
Vist.				ISO 2768	mK	Escala- 1:3		A4	Tratamento	-
Aprov.	zegui	20-06-2024							Material	-
Nome	JG#2409190325								Descrição	Oficina
									Desenho	1181412-114




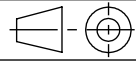
Pos.	Nome	Des. Nº	Material	Descrição	Tipo	Qty.	CL
1	JG#2409190320	1181412-118	-	Oficina		1	
2	JG#2409190324	1181412-120	-	Oficina		1	

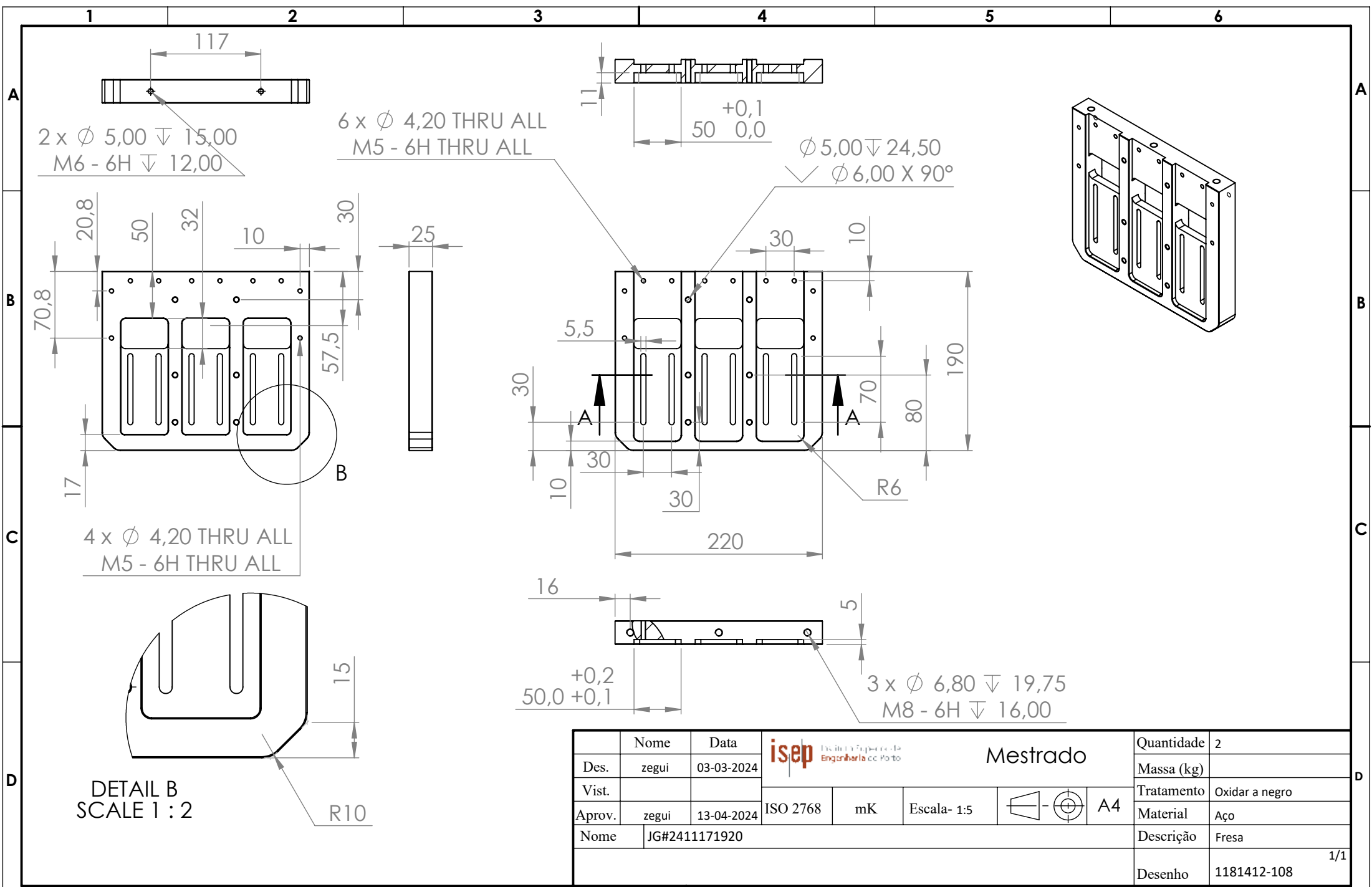
Nome	zegui	Data	04-03-2024	 Instituto Superior de Engenharia do Porto	Mestrado			Quantidade	6
Des.								Massa (kg)	
Vist.							Tratamento	-	
Aprov.	zegui	13-04-2024	ISO 2768	mK	Escala- 1:2	 A4	Material	-	
Nome	JG#2411172219						Descrição	Conjunto lobo	
							Desenho	1181412-106	
								1/1	





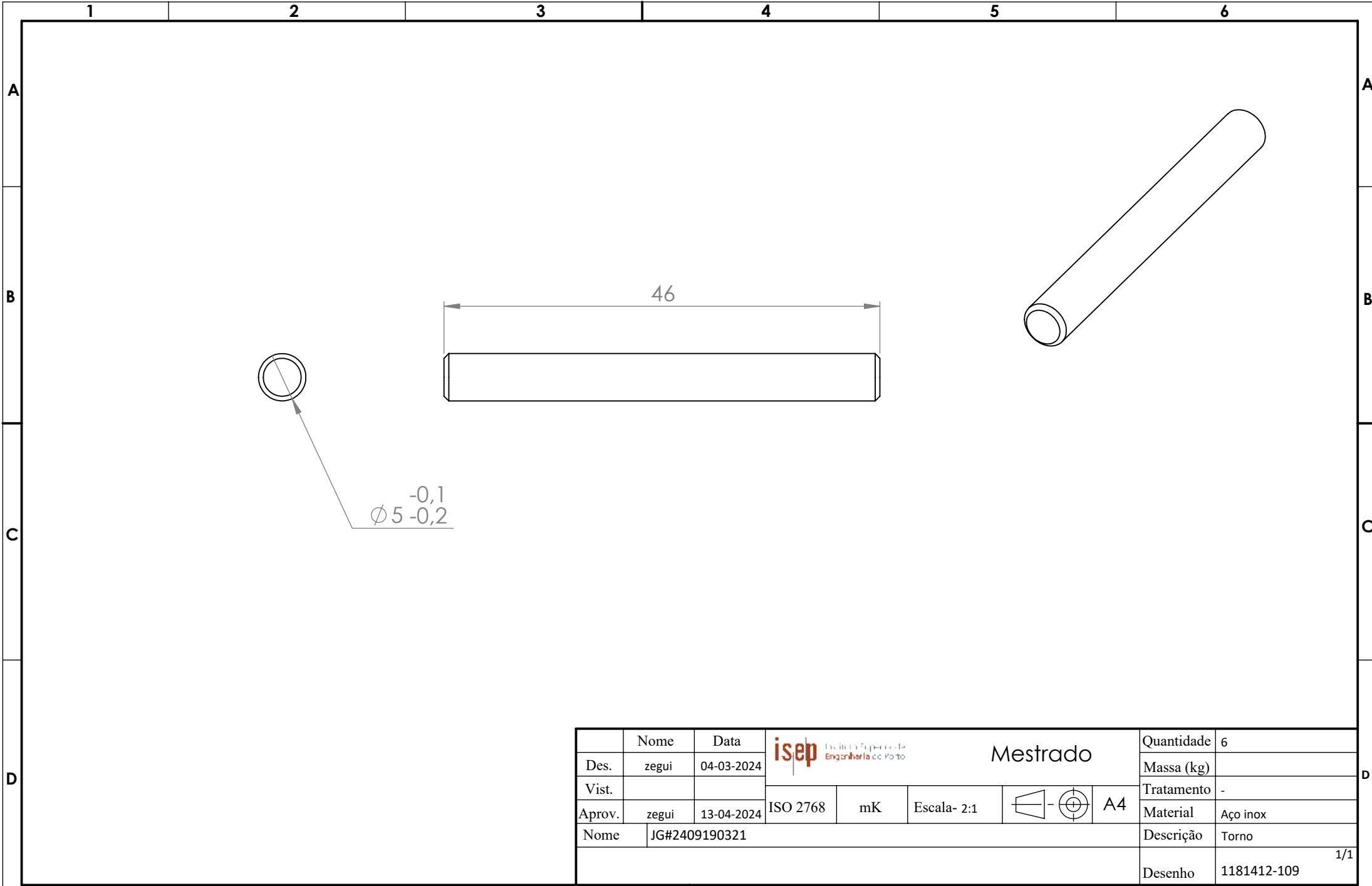
Aluminio Serie 6000 T6 ou superior  
 Aço Inox 304  
 Aço Ck45

Para cada material fabricar 18 peças



	Nome	Data	 <b>Mestrado</b>				Quantidade	18
Des.	zegui	26-02-2024					Massa (kg)	
Vist.							Tratamento	-
Aprov.	zegui	13-04-2024	ISO 2768	mK	Escala- 2:1	 A4	Material	Alumínio
Nome	JG#2411172347						Descrição	Provete
							Desenho	1181412-107 1/1

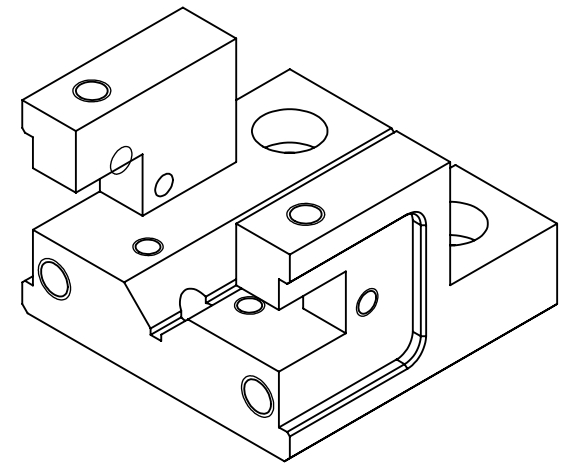
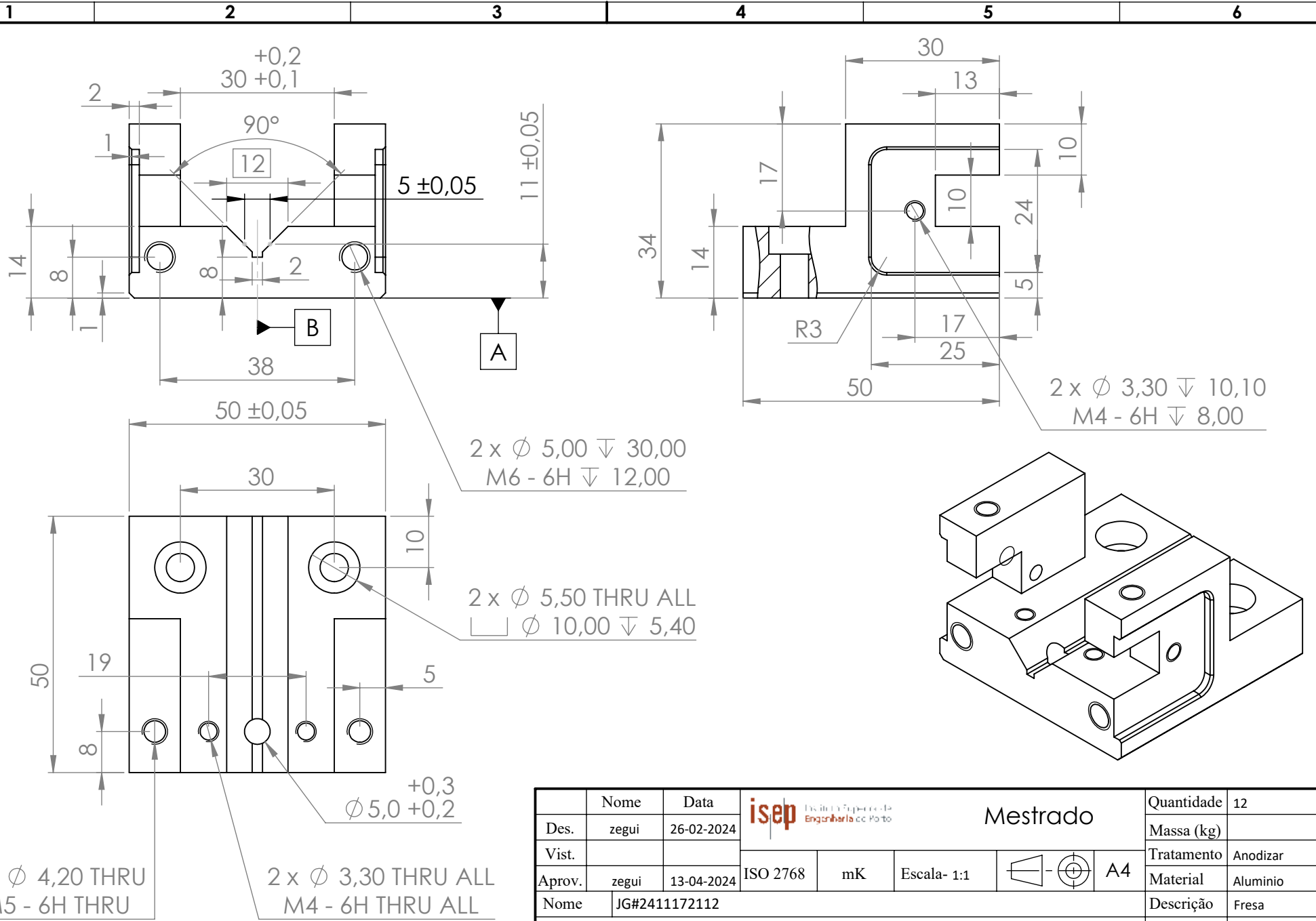



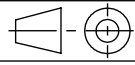
Nome	zegui	Data	03-03-2024	 <b>Mestrado</b>			Quantidade	2
Des.	zegui						Massa (kg)	
Vist.							Tratamento	Oxidar a negro
Aprov.	zegui	13-04-2024	ISO 2768	mK	Escala- 1:5		Material	Aço
Nome	JG#2411171920						Descrição	Fresa
							Desenho	1181412-108
								1/1

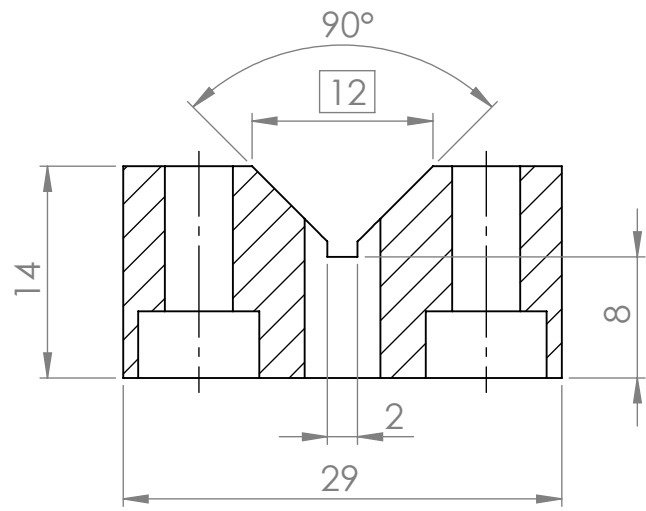


$\begin{matrix} -0,1 \\ \phi 5 -0,2 \end{matrix}$

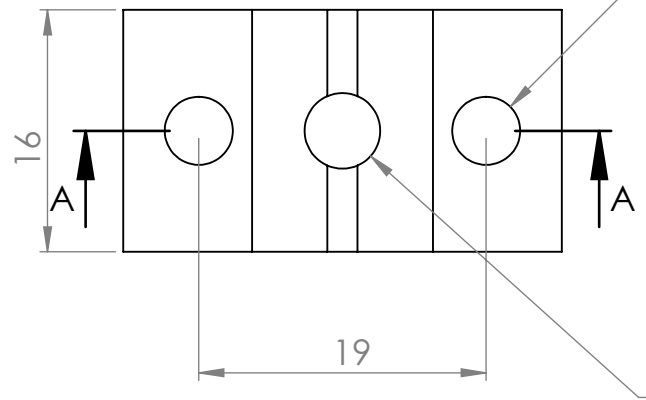
	Nome	Data	 <b>Mestrado</b>				Quantidade	6
Des.	zegui	04-03-2024					Massa (kg)	
Vist.							Tratamento	-
Aprov.	zegui	13-04-2024	ISO 2768	mK	Escala- 2:1	 A4	Material	Aço inox
Nome	JG#2409190321						Descrição	Torno
							Desenho	1181412-109
								1/1



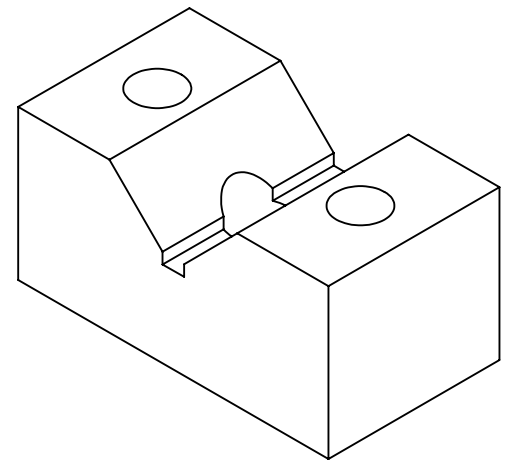
	Nome	Data	 <b>Mestrado</b>				Quantidade	12
Des.	zegui	26-02-2024					Massa (kg)	
Vist.							Tratamento	Anodizar
Aprov.	zegui	13-04-2024	ISO 2768	mK	Escala: 1:1	 A4	Material	Aluminio
Nome	JG#2411172112						Descrição	Fresa
							Desenho	1181412-110




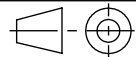
2 x  $\phi$  4,50 THRU ALL  
 $\square$   $\phi$  8,00  $\nabla$  4,40

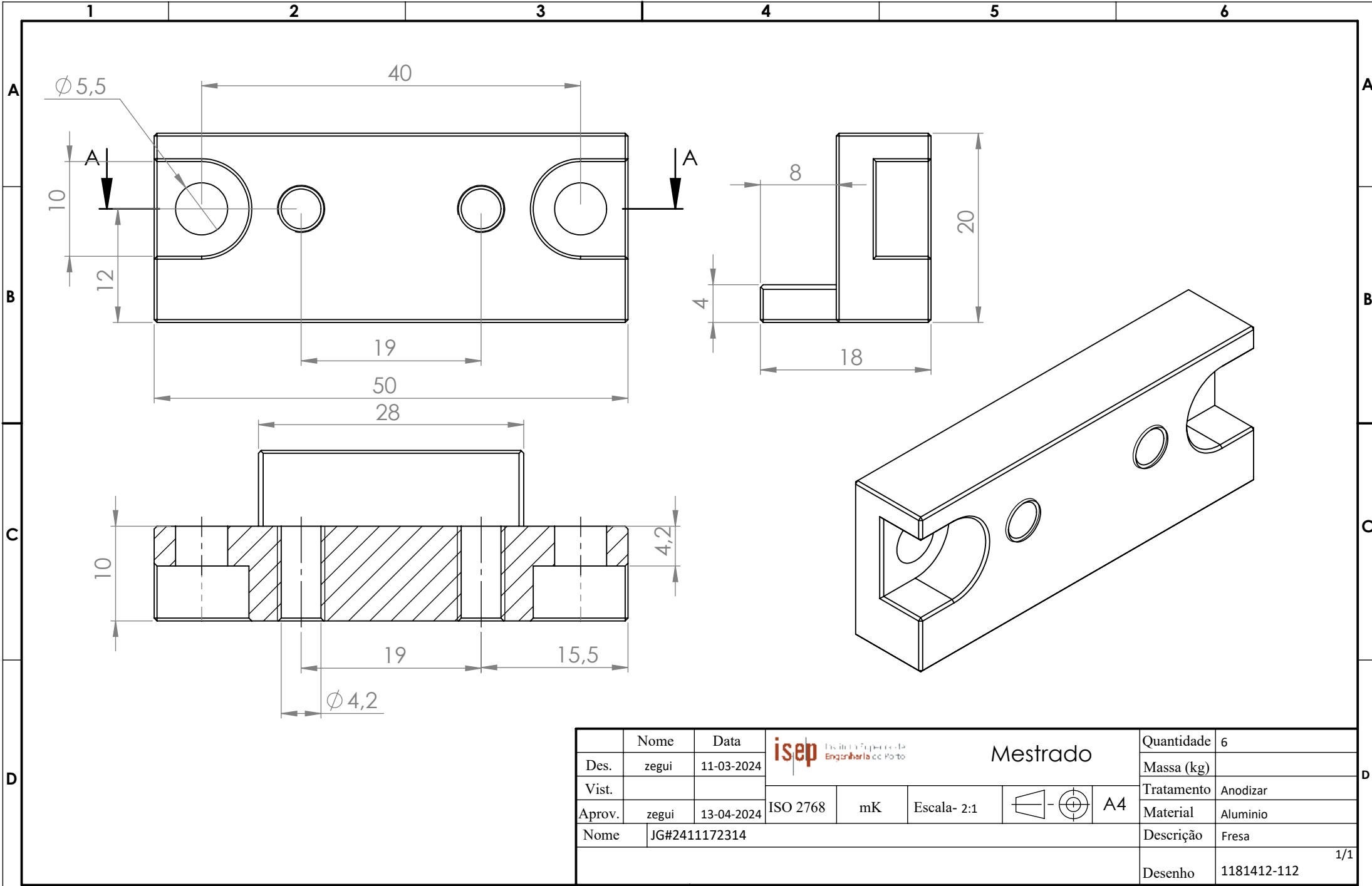


$\phi$  5,0  $+0,3$   
 $+0,2$

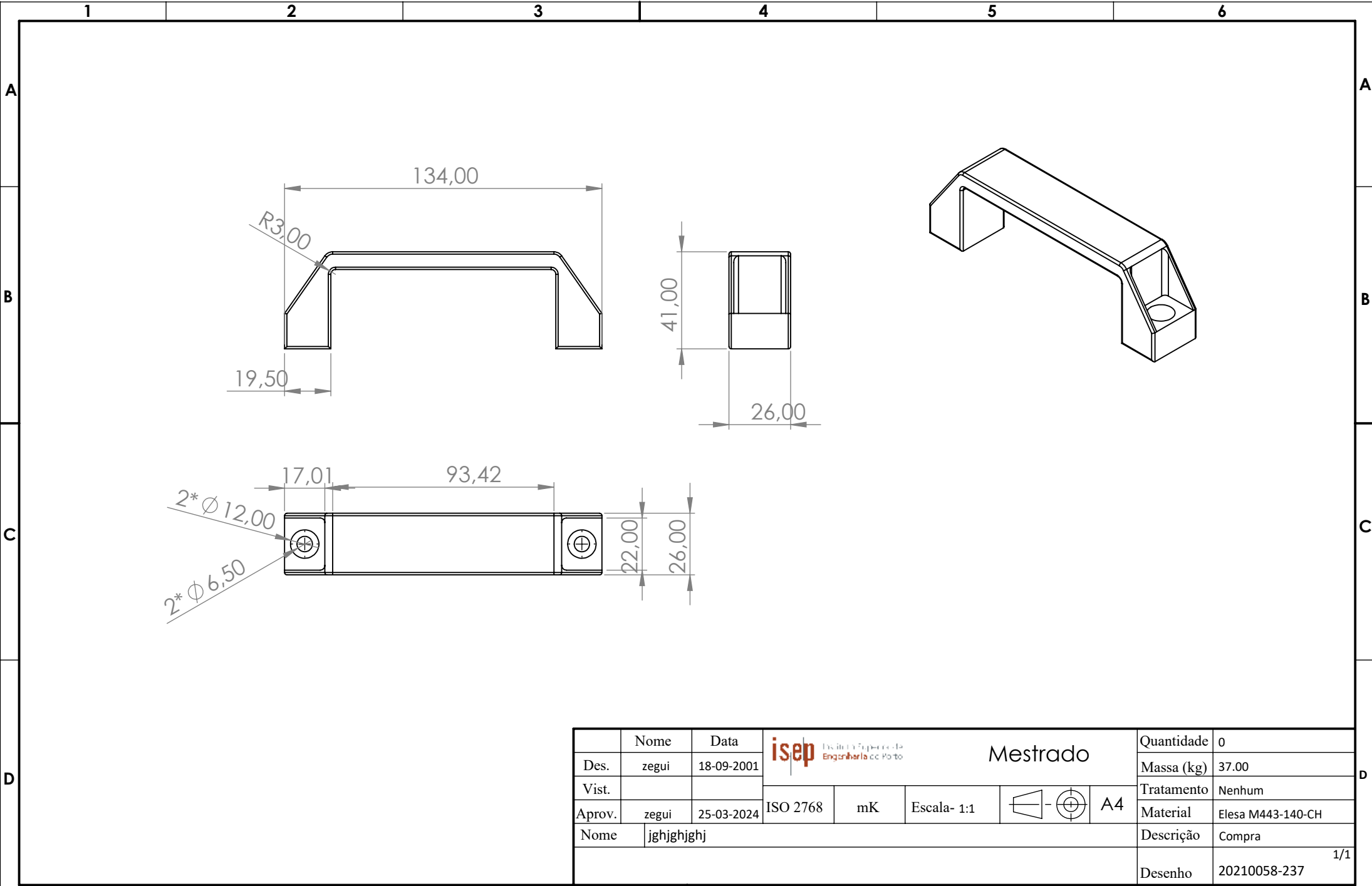


cortar arestas

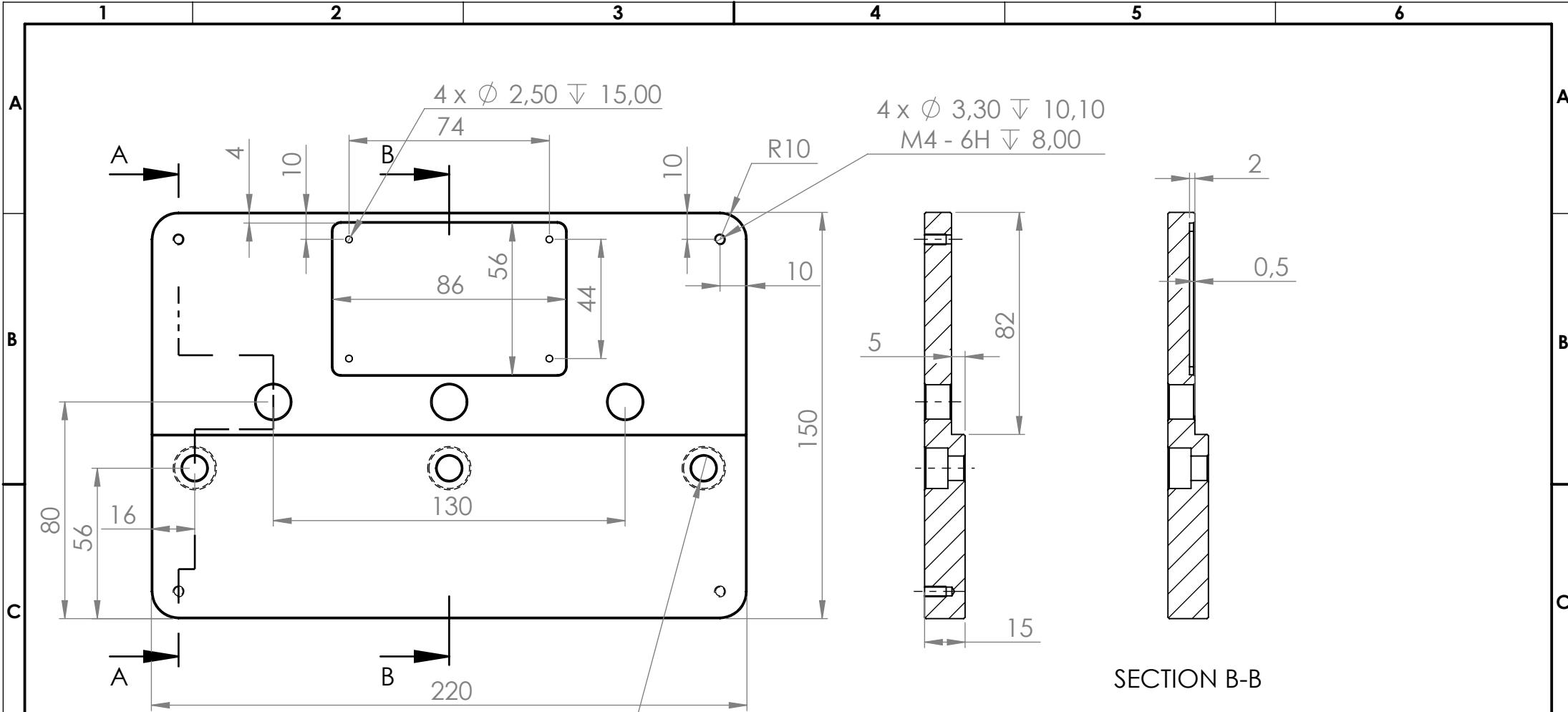
	Nome	Data					Mestrado	Quantidade	12
Des.	zegui	26-02-2024						Massa (kg)	
Vist.								Tratamento	Anodizar
Aprov.	zegui	09-04-2024	ISO 2768	mK	Escala- 2:1			Material	Aluminio
Nome	JG#2409192356							Descrição	Fresa
							Desenho	1181412-111	1/1



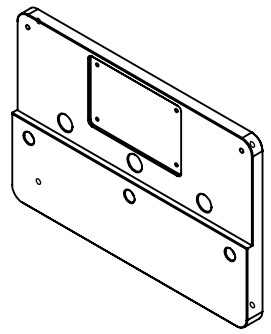
	Nome	Data	 <b>Mestrado</b>				Quantidade	6
Des.	zegui	11-03-2024					Massa (kg)	
Vist.							Tratamento	Anodizar
Aprov.	zegui	13-04-2024	ISO 2768	mK	Escala- 2:1	 A4	Material	Aluminio
Nome	JG#2411172314						Descrição	Fresa
							Desenho	1181412-112
								1/1



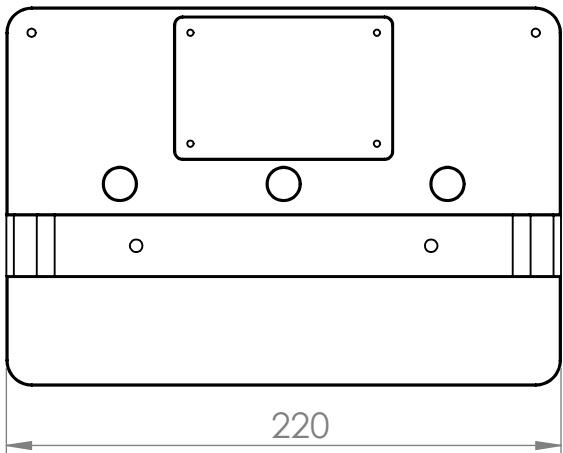
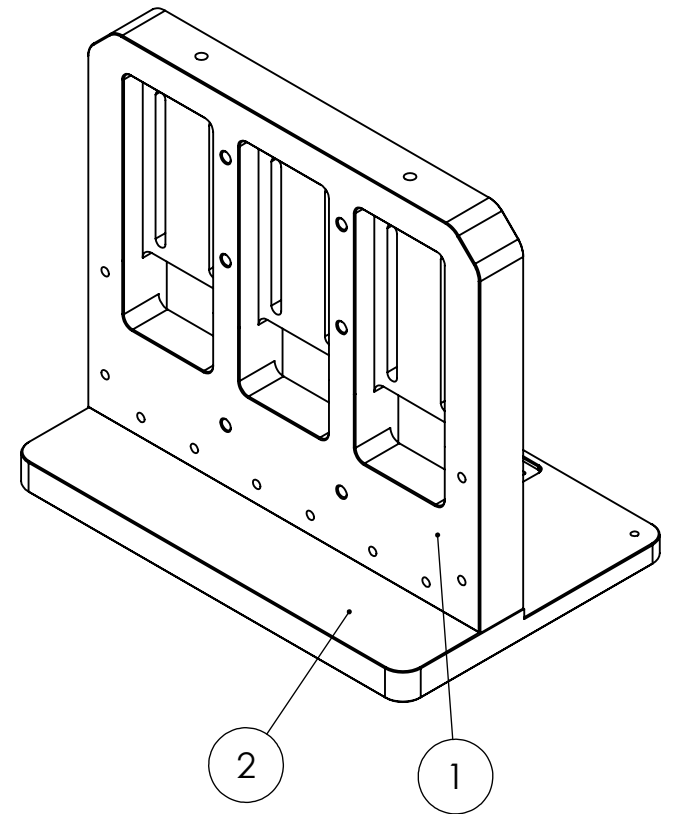
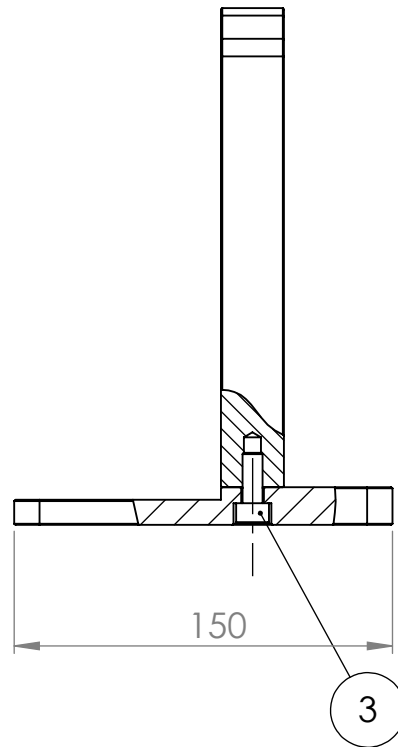
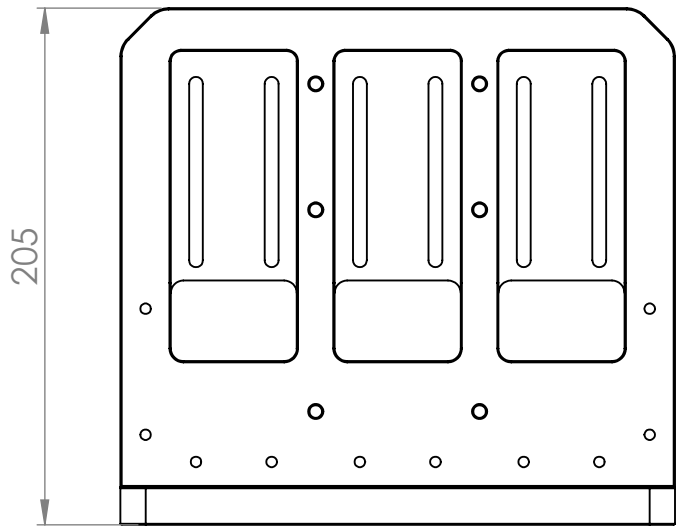
	Nome	Data	 <b>Mestrado</b>				Quantidade	0
Des.	zegui	18-09-2001					Massa (kg)	37.00
Vist.							Tratamento	Nenhum
Aprov.	zegui	25-03-2024	ISO 2768	mK	Escala- 1:1	 A4	Material	Elesa M443-140-CH
Nome	jghjghjghj						Descrição	Compra
							Desenho	20210058-237
								1/1




3 x  $\phi$  9,00 THRU ALL  
 $\square$   $\phi$  15,00  $\nabla$  8,60

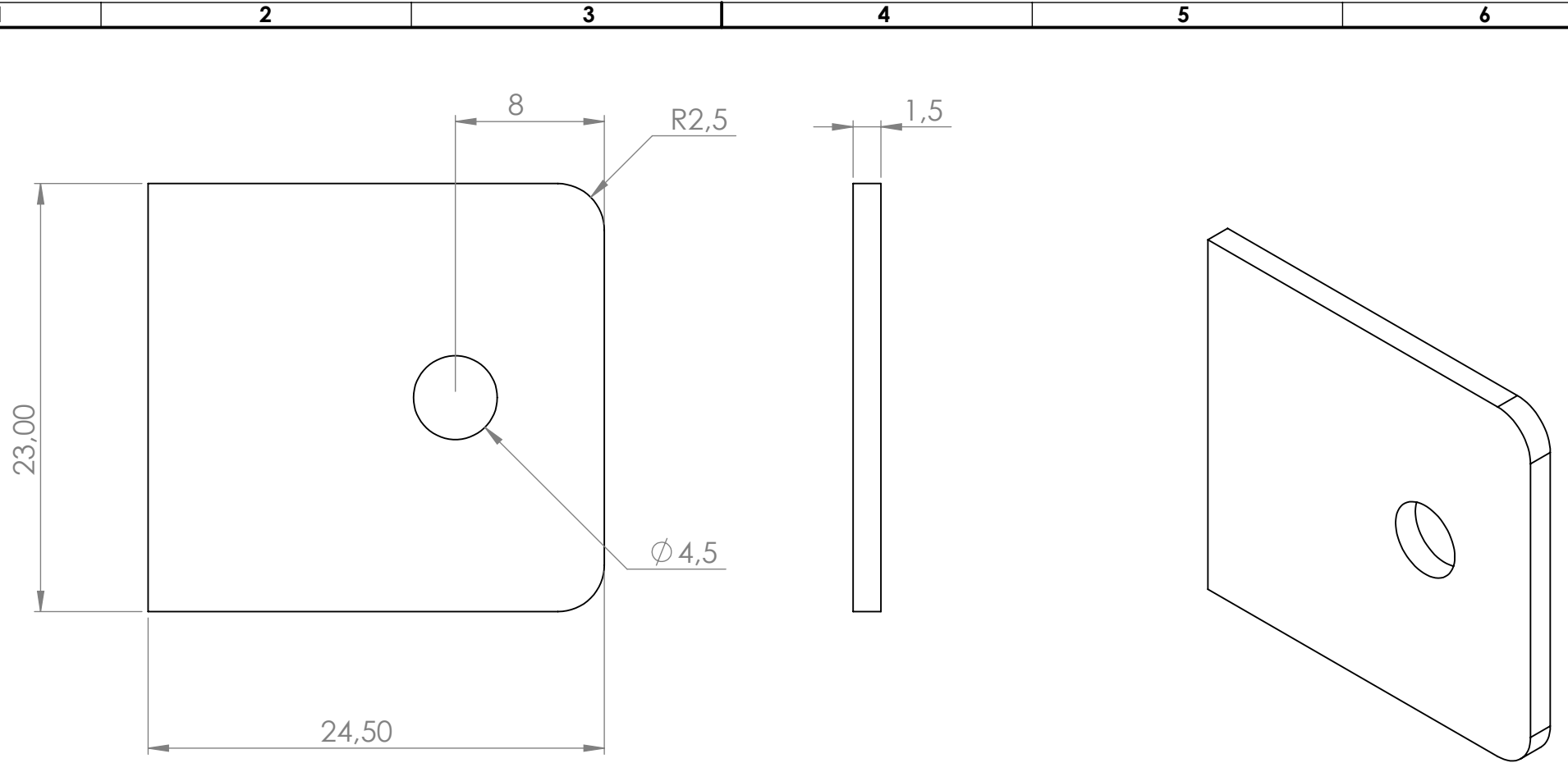



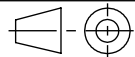
	Nome	Data	 <b>Mestrado</b>				Quantidade	2
Des.	zegui	11-03-2024					Massa (kg)	
Vist.							Tratamento	Anodizar
Aprov.	zegui	13-04-2024	ISO 2768	mK	Escala- 1:2	 A4	Material	Aluminio
Nome	JG#2411172010						Descrição	Fresa
							Desenho	1181412-115 1/1

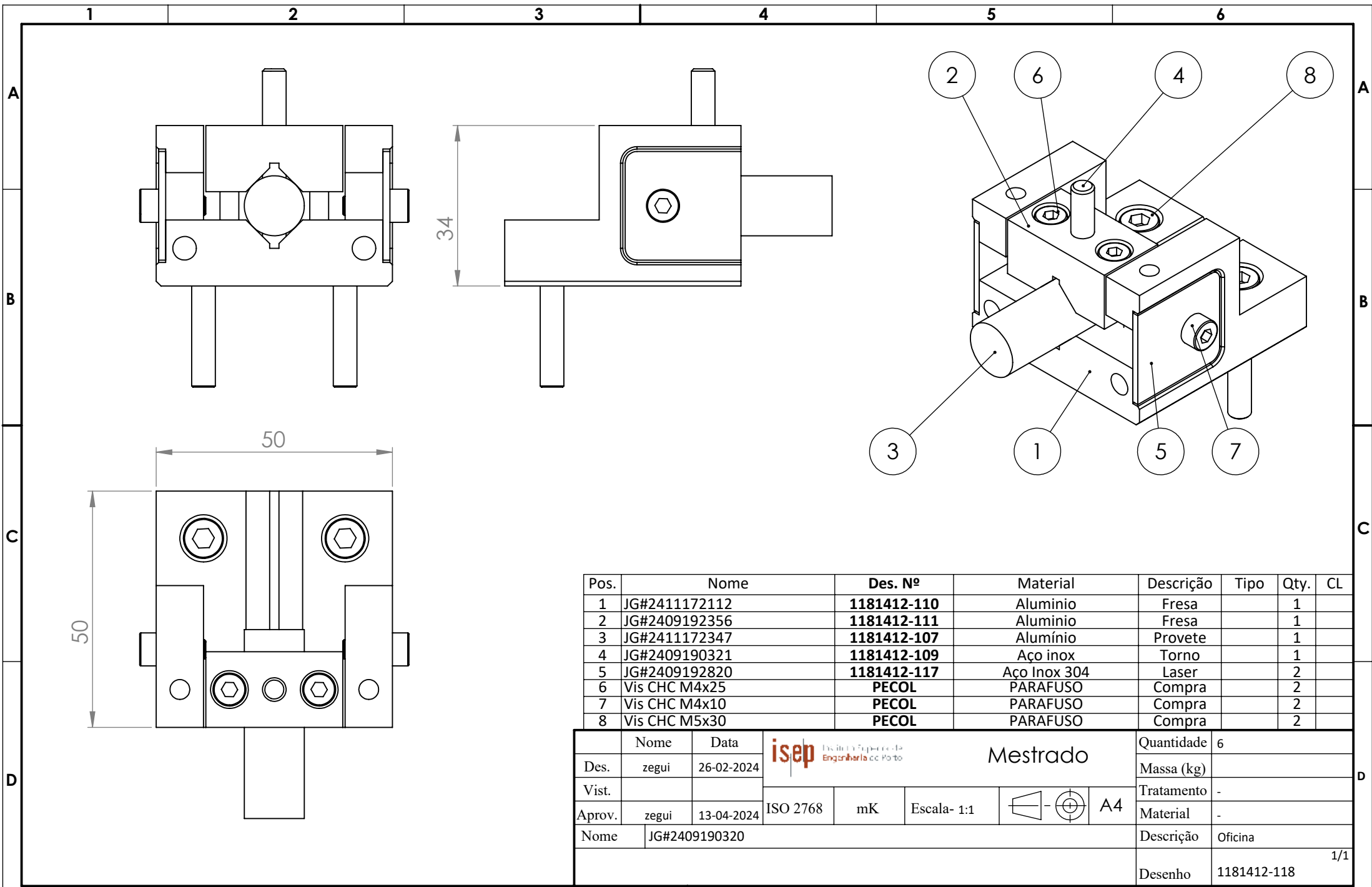


Pos.	Nome	Des. Nº	Material	Descrição	Tipo	Qty.	CL
1	JG#2411171920	1181412-108	Aço	Fresa		1	
2	JG#2411172010	1181412-115	Aluminio	Fresa		1	
3	Vis CHC M8x20	PECOL	PARAFUSO	Compra		3	



Nome	Data	Mestrado				Quantidade	CL
Des. zegui	11-03-2024					2	
Vist.						Massa (kg)	
Aprov. zegui	13-04-2024	ISO 2768	mK	Escala- 1:3		A4	Tratamento -
Nome	JG#2411172213					Material -	
						Descrição	Oficina
						Desenho	1181412-116
							1/1

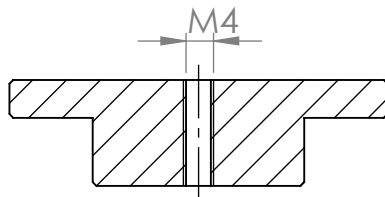


	Nome	Data	 <b>Mestrado</b>				Quantidade	24
Des.	zegui	11-03-2024					Massa (kg)	
Vist.							Tratamento	-
Aprov.	zegui	09-04-2024	ISO 2768	mK	Escala- 3:1	 A4	Material	Aço Inox 304
Nome	JG#2409192820						Descrição	Laser
							Desenho	1181412-117 1/1

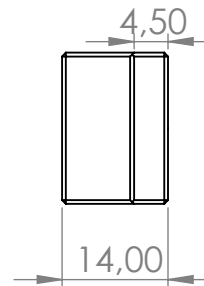
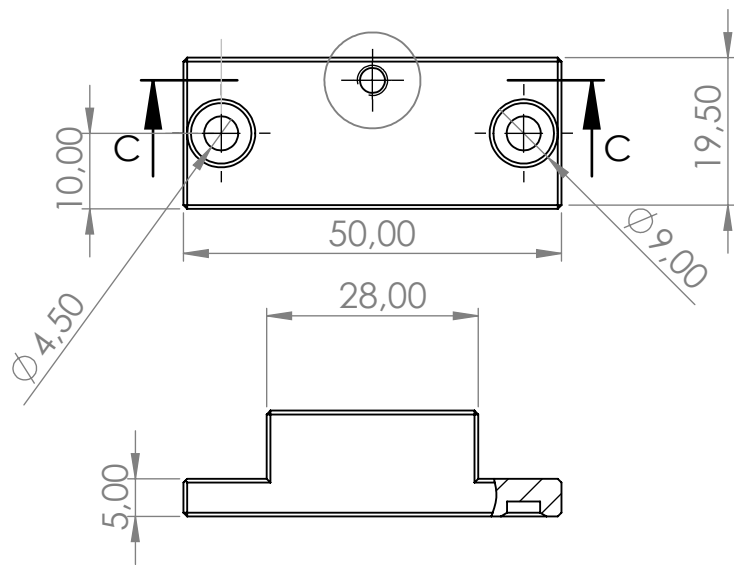
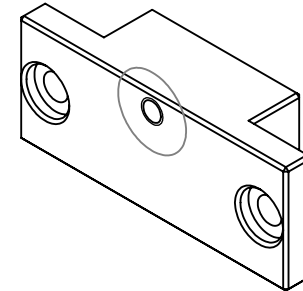



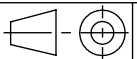
Pos.	Nome	Des. Nº	Material	Descrição	Tipo	Qty.	CL
1	JG#2411172112	<b>1181412-110</b>	Aluminio	Fresa		1	
2	JG#2409192356	<b>1181412-111</b>	Aluminio	Fresa		1	
3	JG#2411172347	<b>1181412-107</b>	Alumínio	Provete		1	
4	JG#2409190321	<b>1181412-109</b>	Aço inox	Torno		1	
5	JG#2409192820	<b>1181412-117</b>	Aço Inox 304	Laser		2	
6	Vis CHC M4x25	<b>PECOL</b>	PARAFUSO	Compra		2	
7	Vis CHC M4x10	<b>PECOL</b>	PARAFUSO	Compra		2	
8	Vis CHC M5x30	<b>PECOL</b>	PARAFUSO	Compra		2	

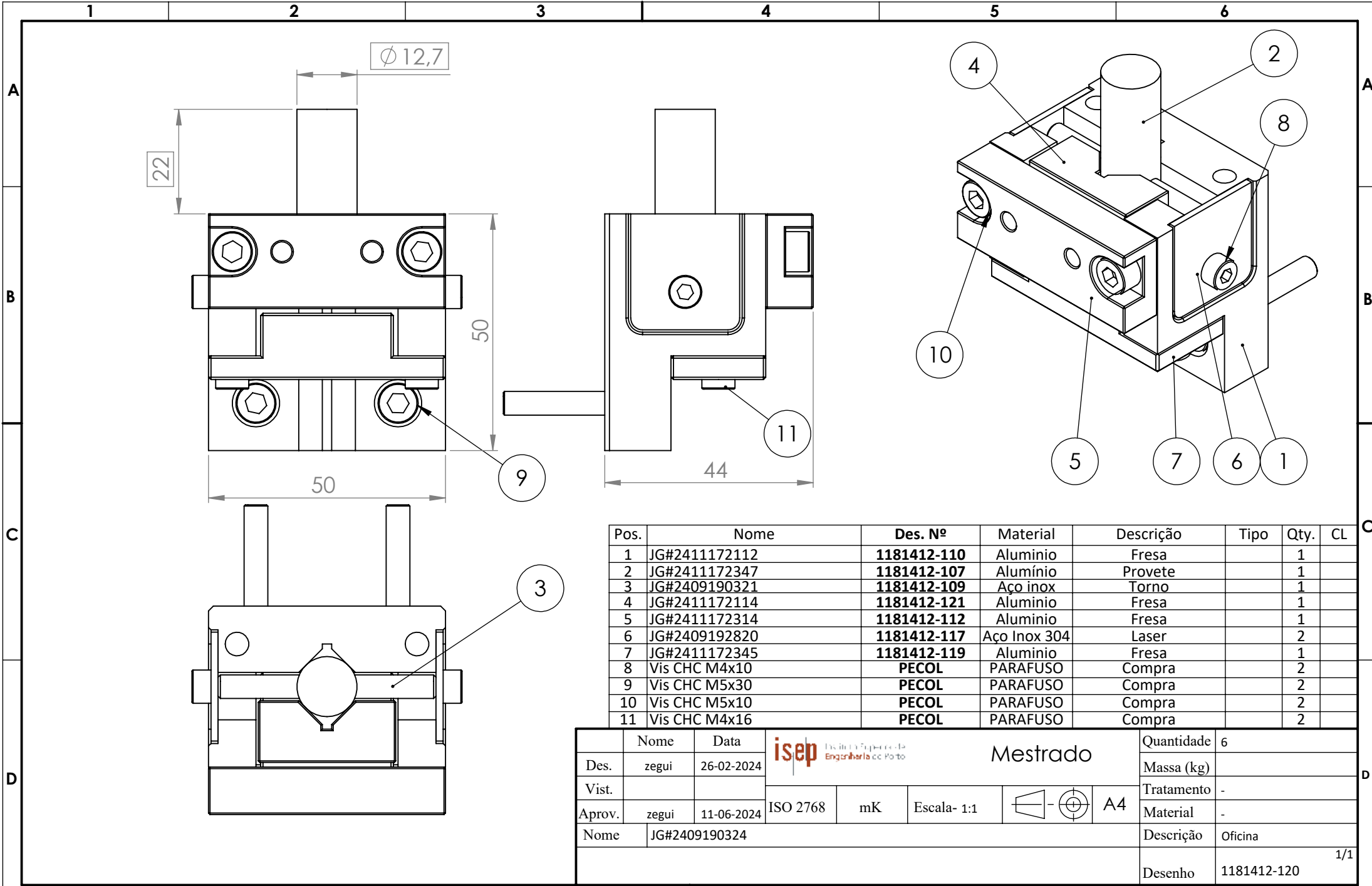
Nome		zegui	Data	26-02-2024	 <b>Mestrado</b>			Quantidade	6
Des.		zegui	26-02-2024	Massa (kg)					
Vist.				ISO 2768    mK    Escala- 1:1  A4			Tratamento		-
Aprov.		zegui	13-04-2024				Material		-
Nome		JG#2409190320			Descrição		Oficina		
					Desenho		1181412-118		



SECTION C-C  
SCALE 1 : 1

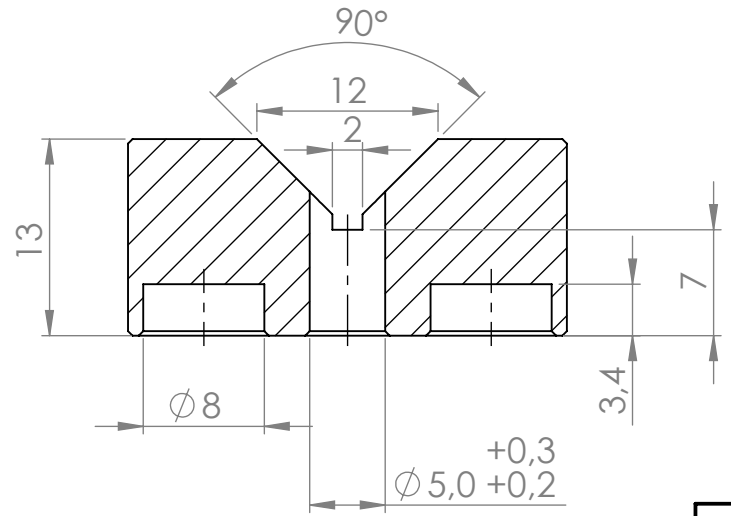
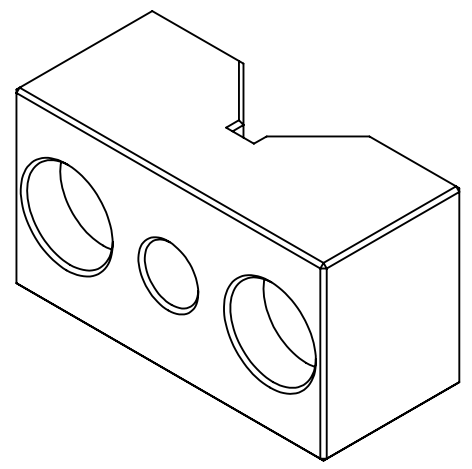
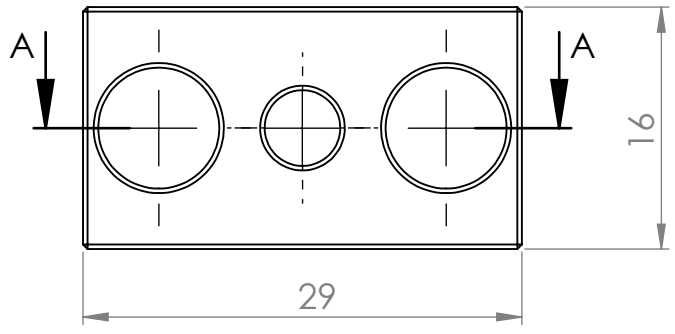


	Nome	Data	 <b>Mestrado</b>				Quantidade	6
Des.	zegui	11-03-2024					Massa (kg)	
Vist.							Tratamento	Anodizar
Aprov.	zegui	13-04-2024	ISO 2768	mK	Escala- 2:1	 A4	Material	Aluminio
Nome	JG#2411172345						Descrição	Fresa
							Desenho	1181412-119 1/1



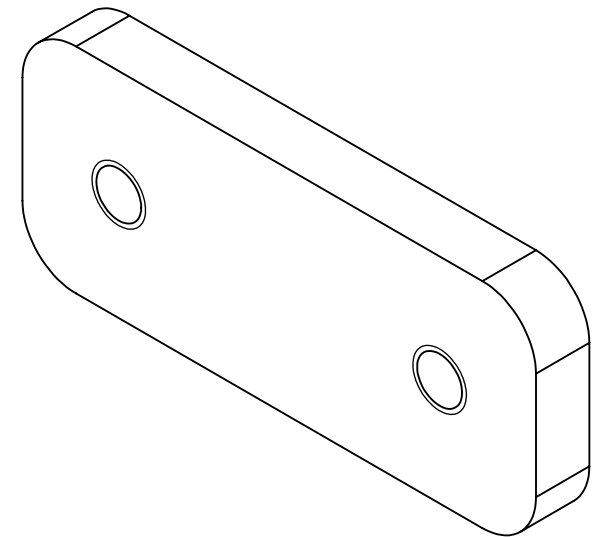
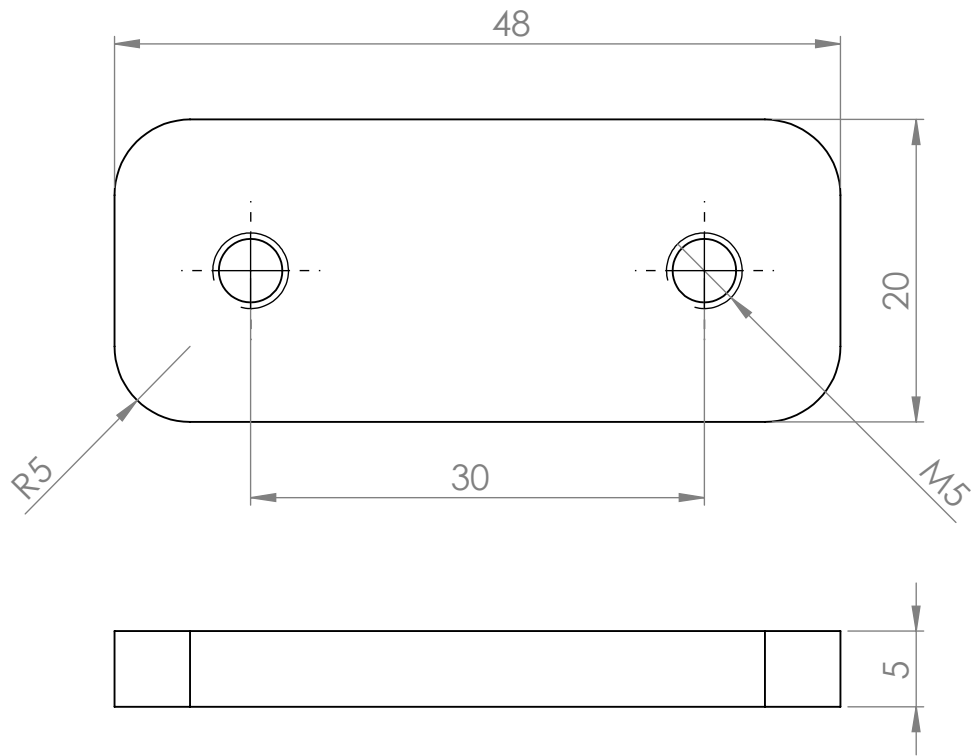
Pos.	Nome	Des. Nº	Material	Descrição	Tipo	Qty.	CL
1	JG#2411172112	<b>1181412-110</b>	Alumínio	Fresa		1	
2	JG#2411172347	<b>1181412-107</b>	Alumínio	Provete		1	
3	JG#2409190321	<b>1181412-109</b>	Aço inox	Torno		1	
4	JG#2411172114	<b>1181412-121</b>	Alumínio	Fresa		1	
5	JG#2411172314	<b>1181412-112</b>	Alumínio	Fresa		1	
6	JG#2409192820	<b>1181412-117</b>	Aço Inox 304	Laser		2	
7	JG#2411172345	<b>1181412-119</b>	Alumínio	Fresa		1	
8	Vis CHC M4x10	<b>PECOL</b>	PARAFUSO	Compra		2	
9	Vis CHC M5x30	<b>PECOL</b>	PARAFUSO	Compra		2	
10	Vis CHC M5x10	<b>PECOL</b>	PARAFUSO	Compra		2	
11	Vis CHC M4x16	<b>PECOL</b>	PARAFUSO	Compra		2	



Nome	zegui	Data	26-02-2024	Instituto Superior de Engenharia do Porto	Mestrado			Quantidade	6
Des.	zegui							Massa (kg)	
Vist.				ISO 2768	mK	Escala- 1:1	A4	Tratamento	-
Aprov.	zegui	11-06-2024						Material	-
Nome	JG#2409190324							Descrição	Oficina
								Desenho	1181412-120
									1/1

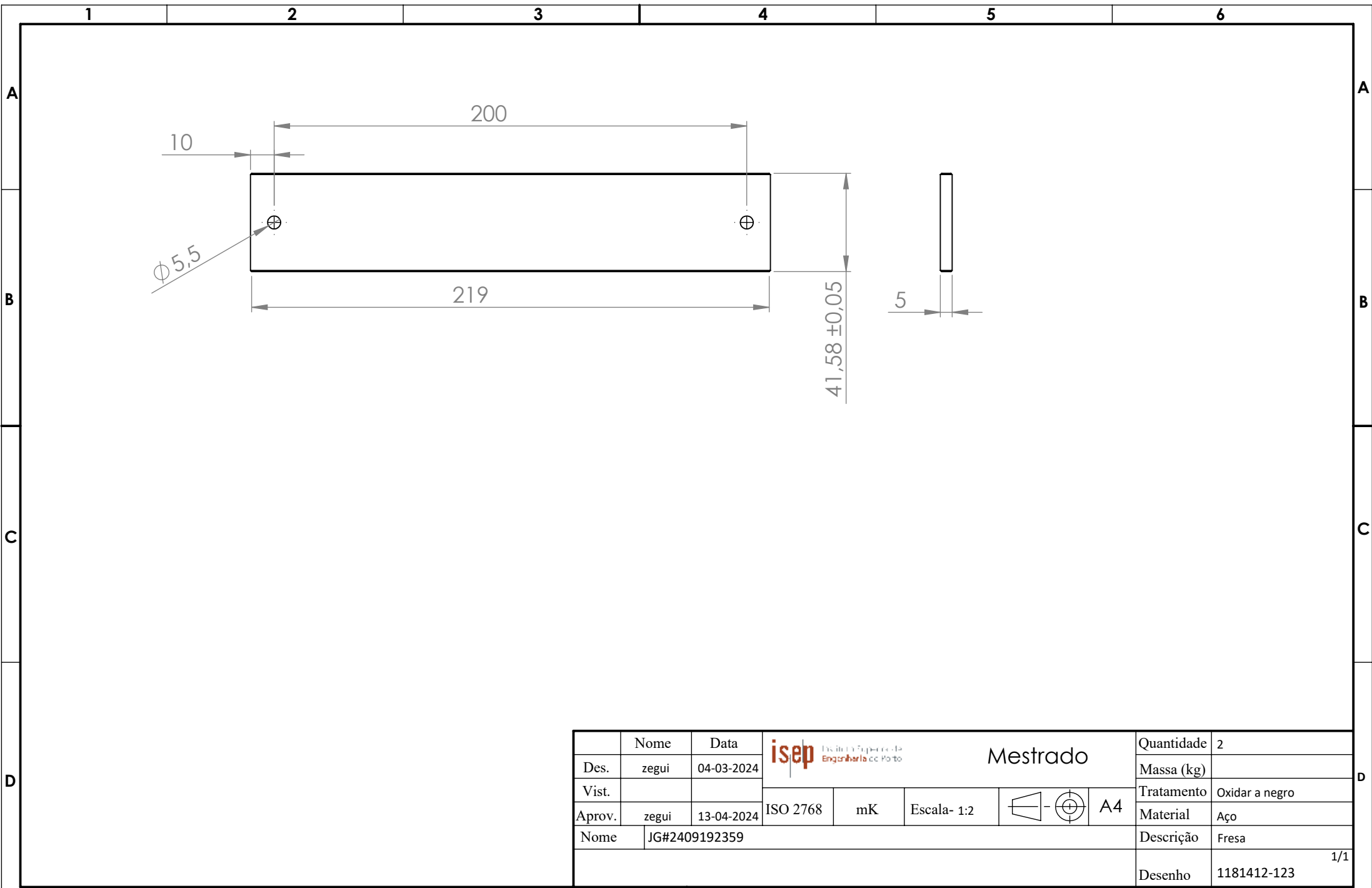


Cortar arestas

	Nome	Data	 <b>Mestrado</b>				Quantidade	12
Des.	zegui	26-02-2024					Massa (kg)	
Vist.							Tratamento	Anodizar
Aprov.	zegui	13-04-2024	ISO 2768	mK	Escala- 2:1	 A4	Material	Aluminio
Nome	JG#2411172114						Descrição	Fresa
							Desenho	1181412-121
								1/1



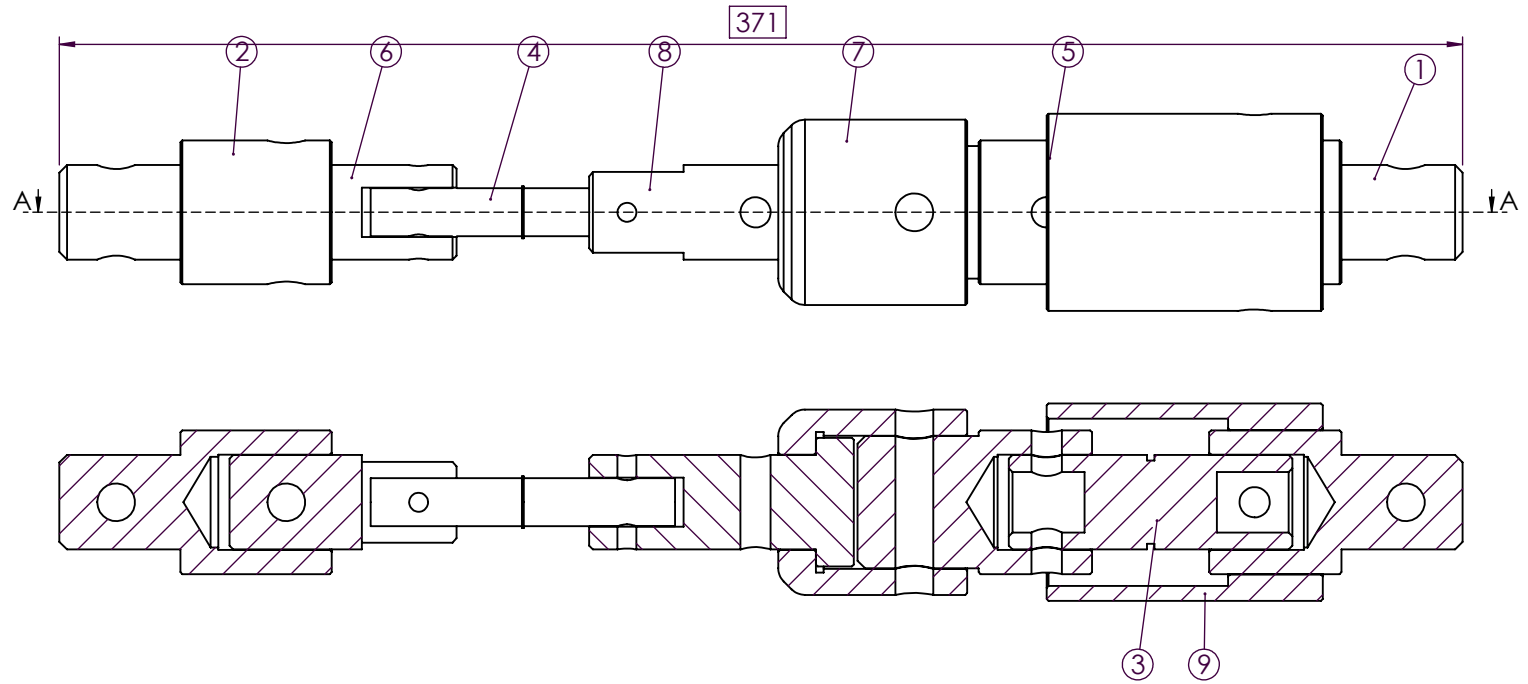
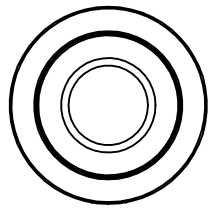
	Nome	Data	 <b>Mestrado</b>				Quantidade	12
Des.	zegui	04-03-2024					Massa (kg)	
Vist.							Tratamento	-
Aprov.	zegui	13-04-2024	ISO 2768	mK	Escala- 2:1	 A4	Material	Aço Inox
Nome	JG#2409192355						Descrição	Laser
							Desenho	1181412-122
								1/1



	Nome	Data	 <b>Mestrado</b>				Quantidade	2
Des.	zegui	04-03-2024					Massa (kg)	
Vist.							Tratamento	Oxidar a negro
Aprov.	zegui	13-04-2024	ISO 2768	mK	Escala- 1:2	 A4	Material	Aço
Nome	JG#2409192359						Descrição	Fresa
							Desenho	1181412-123 1/1

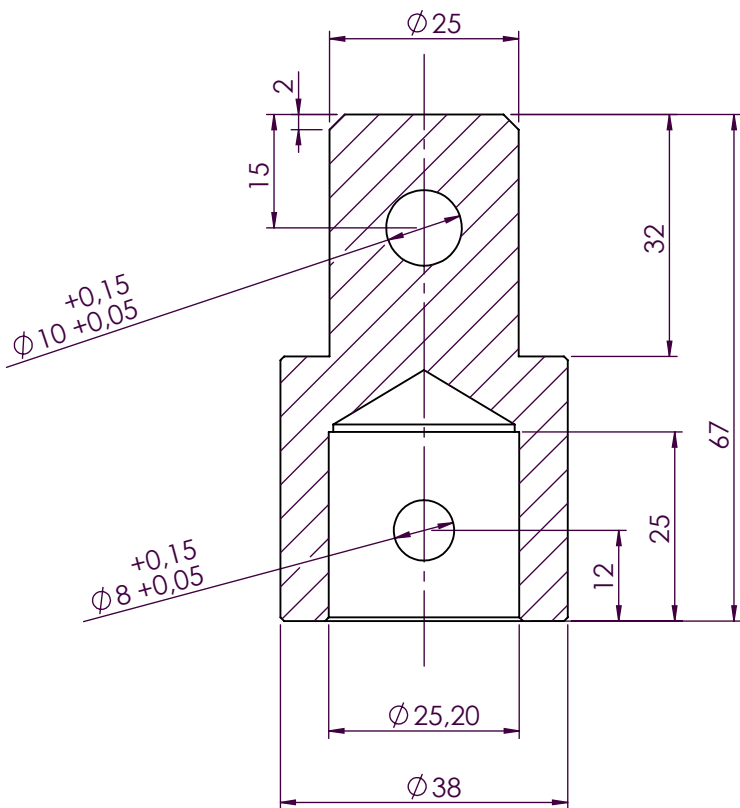
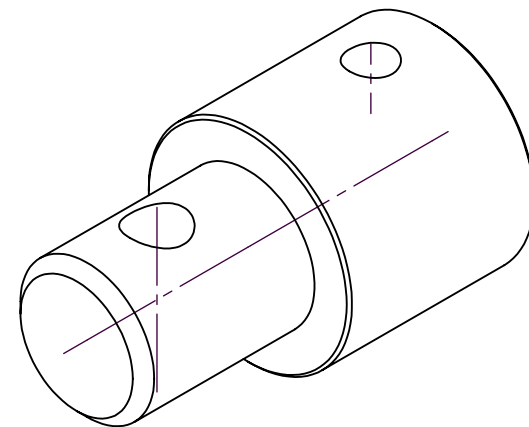
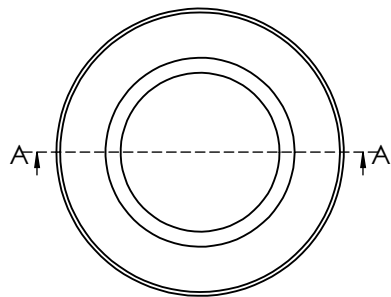
## **ANEXO C- FERRAMENTA PARA O ENSAIO DE TRAÇÃO DAS JUNTAS TOPO A TOPO**




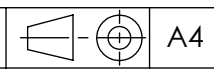


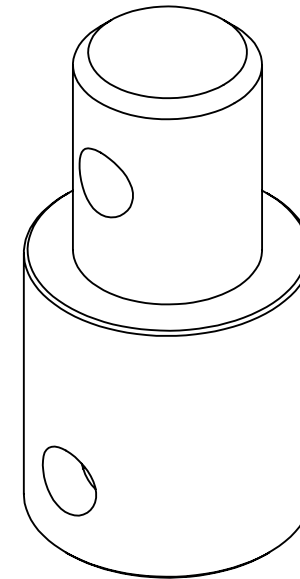
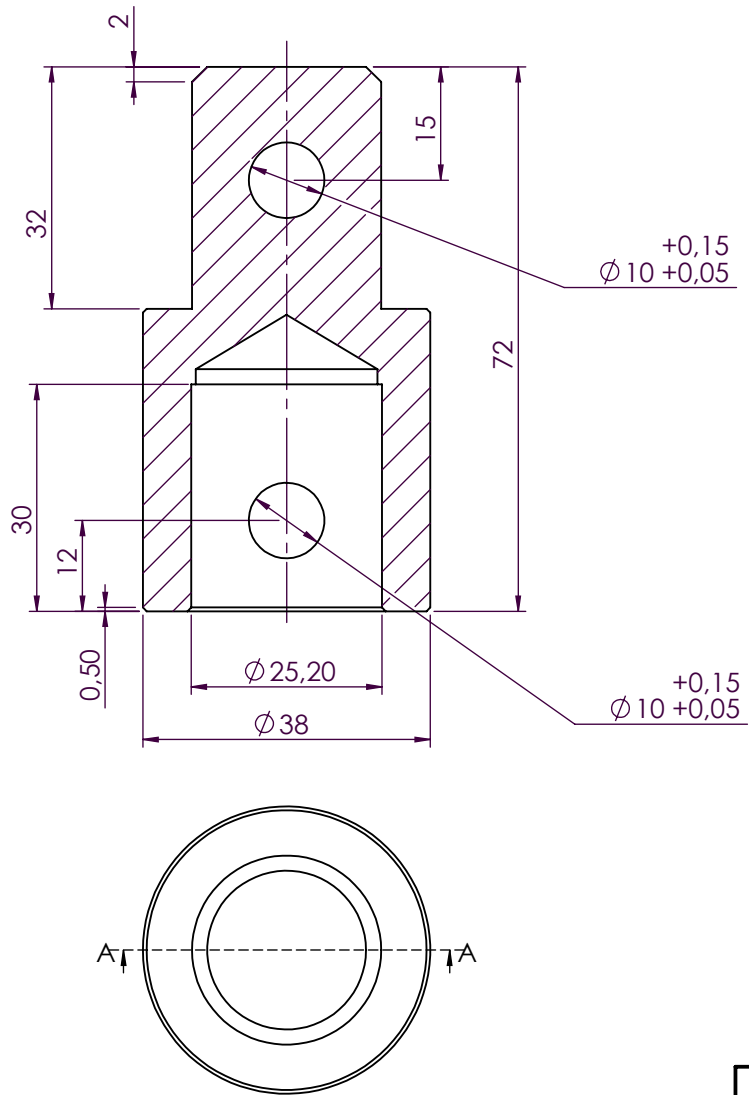
Pos.	Name	Drawing nº	Material	Description	Type	Qty.	CL
1	FA#2406171308	20240001-100	Aço FR3	Torno		1	
2	FA#2406175831	20240001-106	Aço FR3	Torno		1	
3	FA#2406180550	20240001-107	Junta rotativa	Torno		1	
4	FA#2406180657	Not Use	Vários	Outro		1	
5	FA#2406172716	20240001-102	Aço FR3	Torno		1	
6	FA#2406174707	20240001-105	Aço FR3	Torno		1	
7	FA#2406173306	20240001-103	Aço FR3	Torno		1	
8	FA#2406173819	20240001-104	Aço FR3	Torno		1	
9	FA#2406172100	20240001-101	Aço FR3	Torno		1	


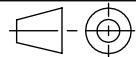
Nome		Data	<b>Projecto e Fabrico de Sistemas Mecânicos, Lda.</b>				Quantidade	1
Des.	Fazenda	03/06/2024					Massa (kg)	312.78
Vist.			Tratamento	Nenhum				
Aprov.	Fazenda	06/06/2024	ISO 2768	mK	Escala: 1:2	A4	Material	Vários
Nome	FA#2406181124		Descrição				Oficina	
<i>This drawing is owned by Gislotica, Lda. It is prohibited to copy, reproduce or divulgation without Gislotica's written authorization. All rights reserved.</i>							Desenho	20240001-108

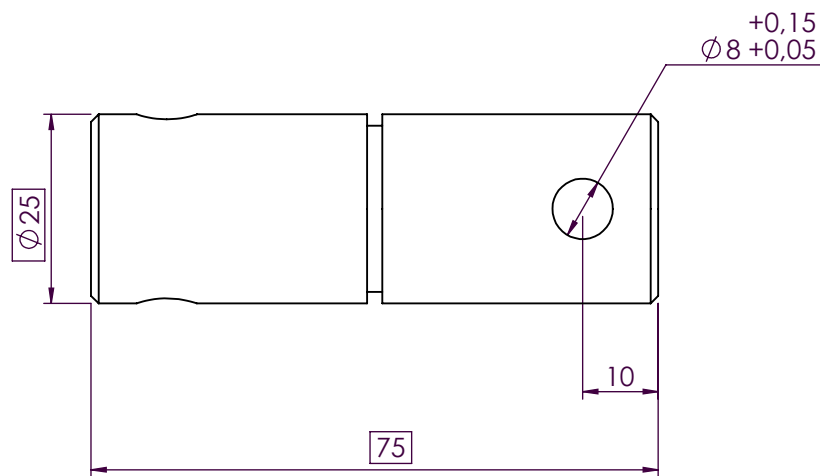
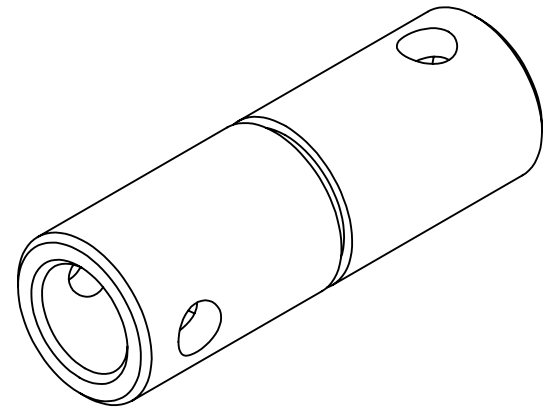
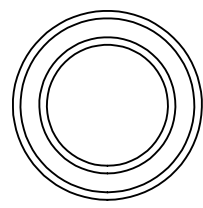
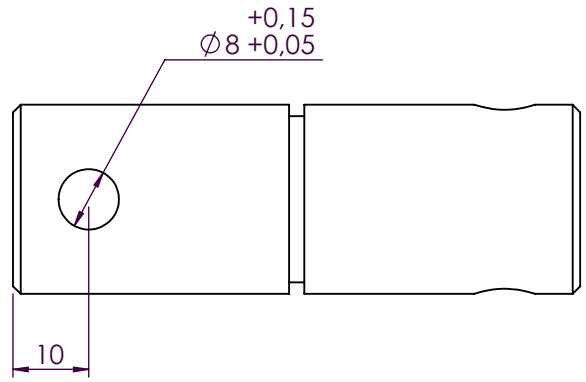




	Nome	Data	 <b>Projecto e Fabrico de Sistemas Mecânicos, Lda.</b>				Quantidade	1
Des.	Fazenda	03/06/2024					Massa (kg)	38.63
Vist.			Tratamento	Oxidar a Negro				
Aprov.	Fazenda	06/06/2024	Material	Aço FR3				
Nome	FA#2406171308				Descrição	Torno		
<i>This drawing is owned by Gislotica, Lda. It is prohibited to copy, reproduce or divulgation without Gislotica's written authorization. All rights reserved.</i>							Desenho	20240001-100

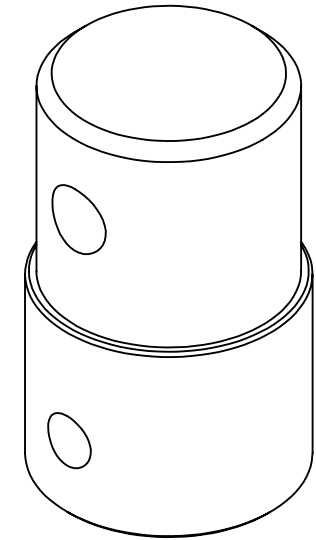
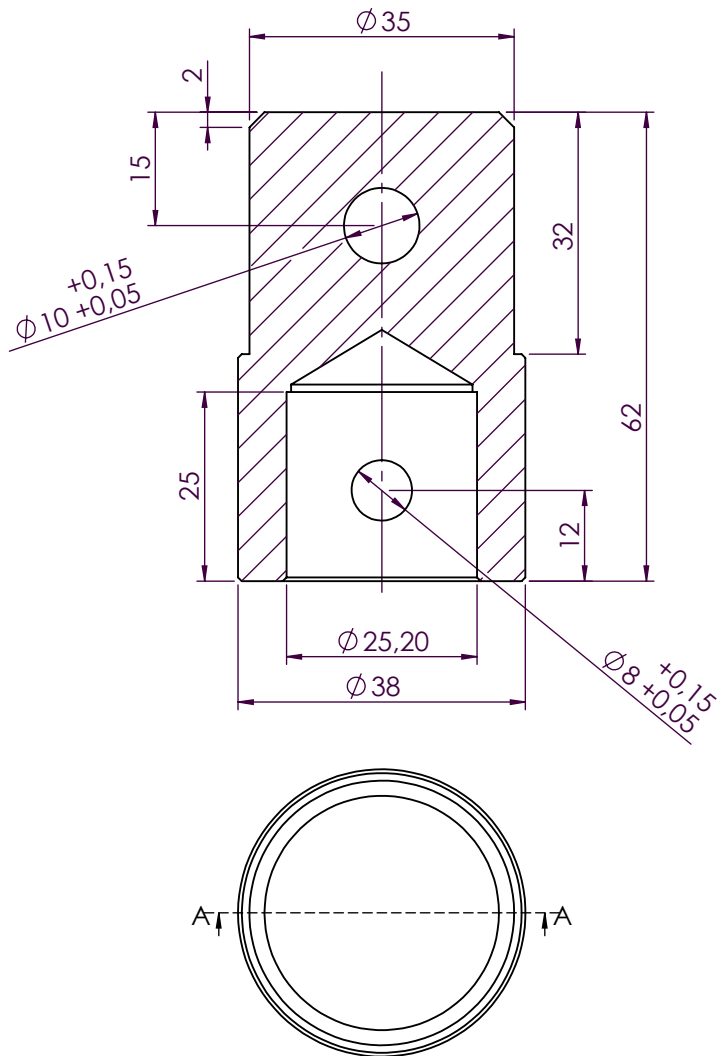




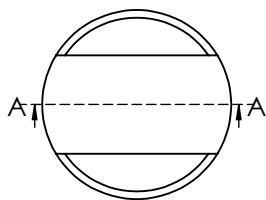
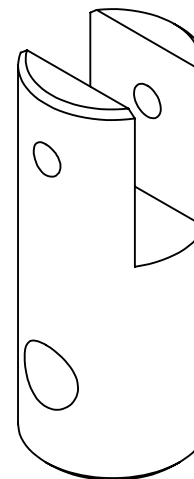
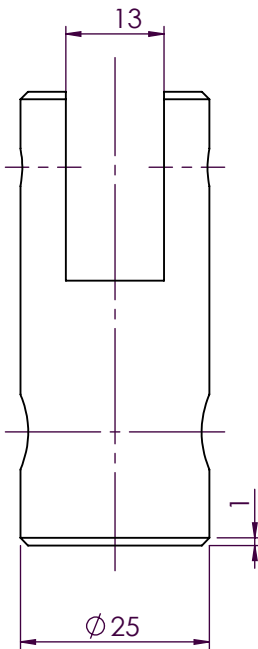
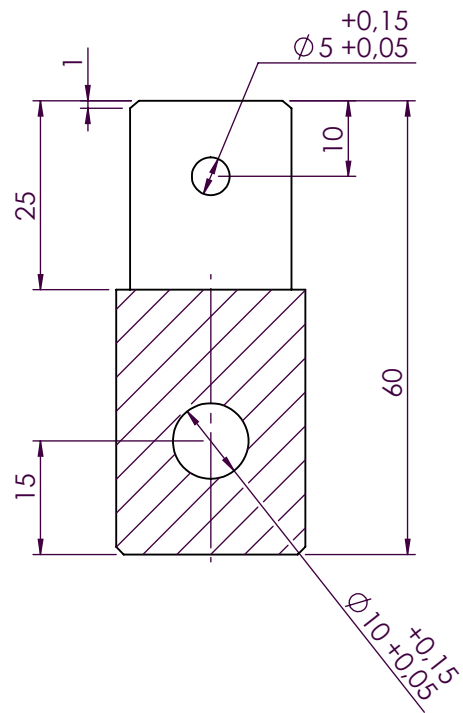
	Nome	Data	 <b>Projecto e Fabrico de Sistemas Mecânicos, Lda.</b>				Quantidade	1	
Des.	Fazenda	03/06/2024					Massa (kg)	40.99	
Vist.			Tratamento	Oxidar a Negro					
Aprov.	Fazenda	06/06/2024	ISO 2768	mK	Escala- 1:2	 A4	Material	Aço FR3	
Nome	FA#2406175831						Descrição	Torno	
<i>This drawing is owned by Gislotica, Lda. It is prohibited to copy, reproduce or divulgation without Gislotica's written authorization. All rights reserved.</i>								Desenho	20240001-106




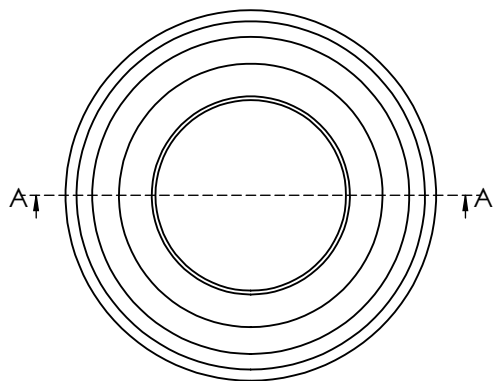
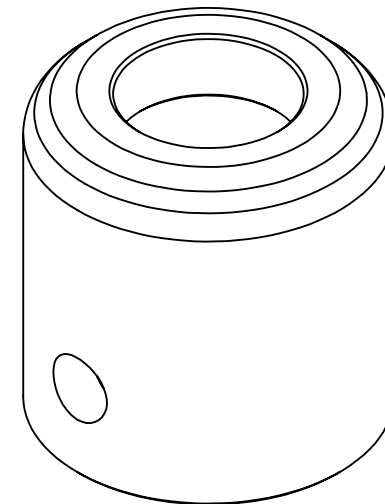
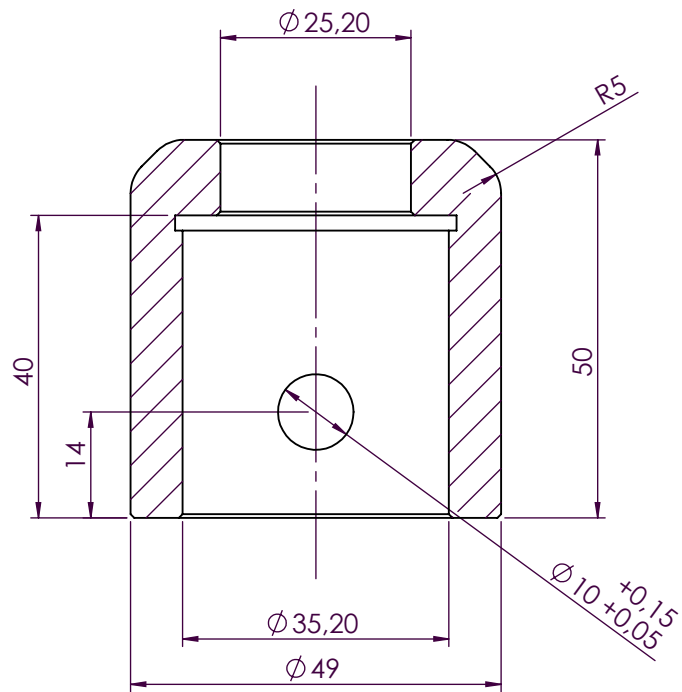
	Nome	Data	 <b>Projecto e Fabrico de Sistemas Mecânicos, Lda.</b>				Quantidade	0
Des.	Fazenda	03/06/2024					Massa (kg)	27.50
Vist.			Tratamento	Nenhum				
Aprov.	Fazenda	06/06/2024	ISO 2768	mK	Escala- 1:2	 A4	Material	Junta rotativa
Nome	FA#2406180550					Descrição	Torno	
<i>This drawing is owned by Gislotica, Lda. It is prohibited to copy, reproduce or divulgation without Gislotica's written authorization. All rights reserved.</i>							Desenho	20240001-107




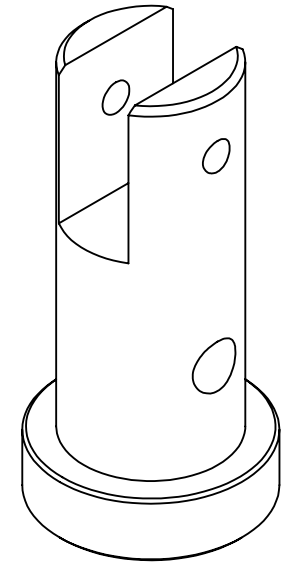
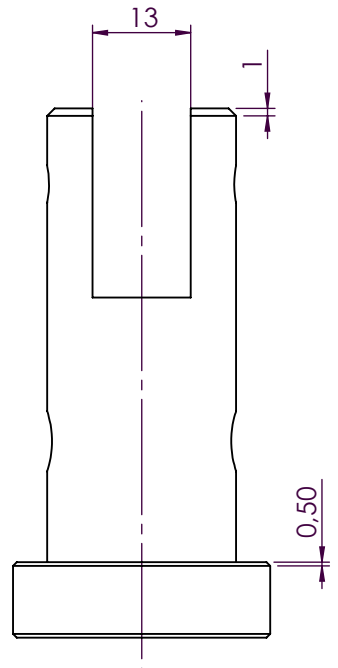
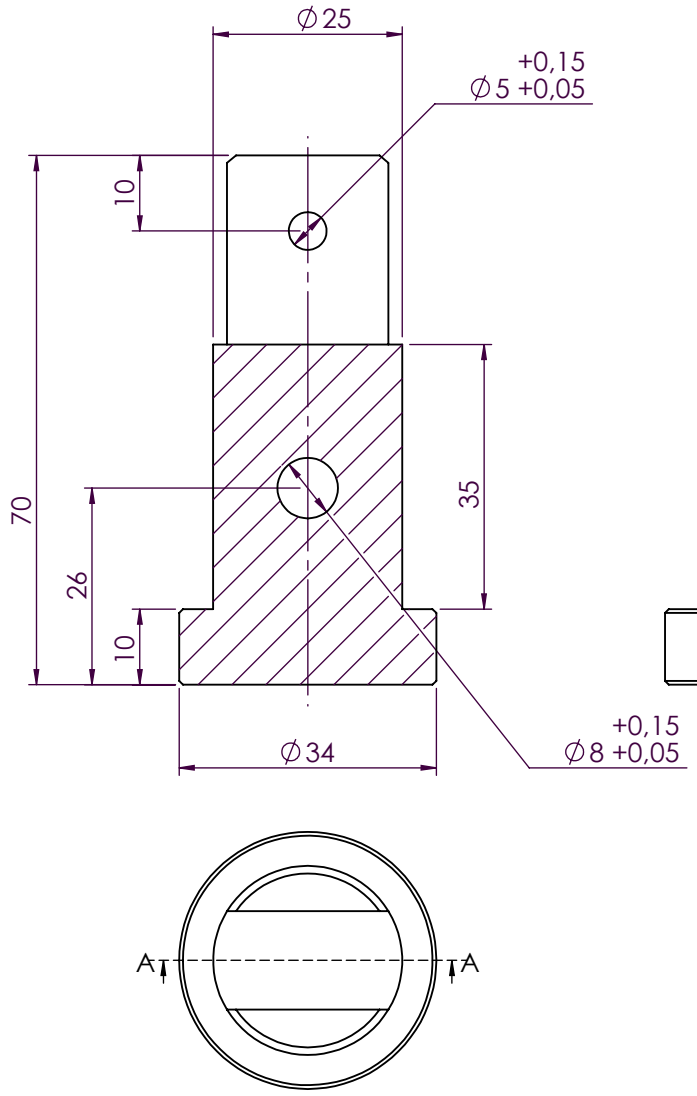
	Nome	Data	<b>Gislotica</b> <i>Projecto e Fabrico de Sistemas Mecânicos, Lda.</i>				Quantidade	1
Des.	Fazenda	03/06/2024					Massa (kg)	47.18
Vist.							Tratamento	Oxidação a Negro
Aprov.	Fazenda	06/06/2024	ISO 2768	mK	Escala- 1:2	A4	Material	Aço FR3
Nome	FA#2406172716						Descrição	Torno
This drawing is owned by Gislotica, Lda. It is prohibited to copy, reproduce or divulgation without Gislotica's written authorization. All rights reserved.							Desenho	20240001-102




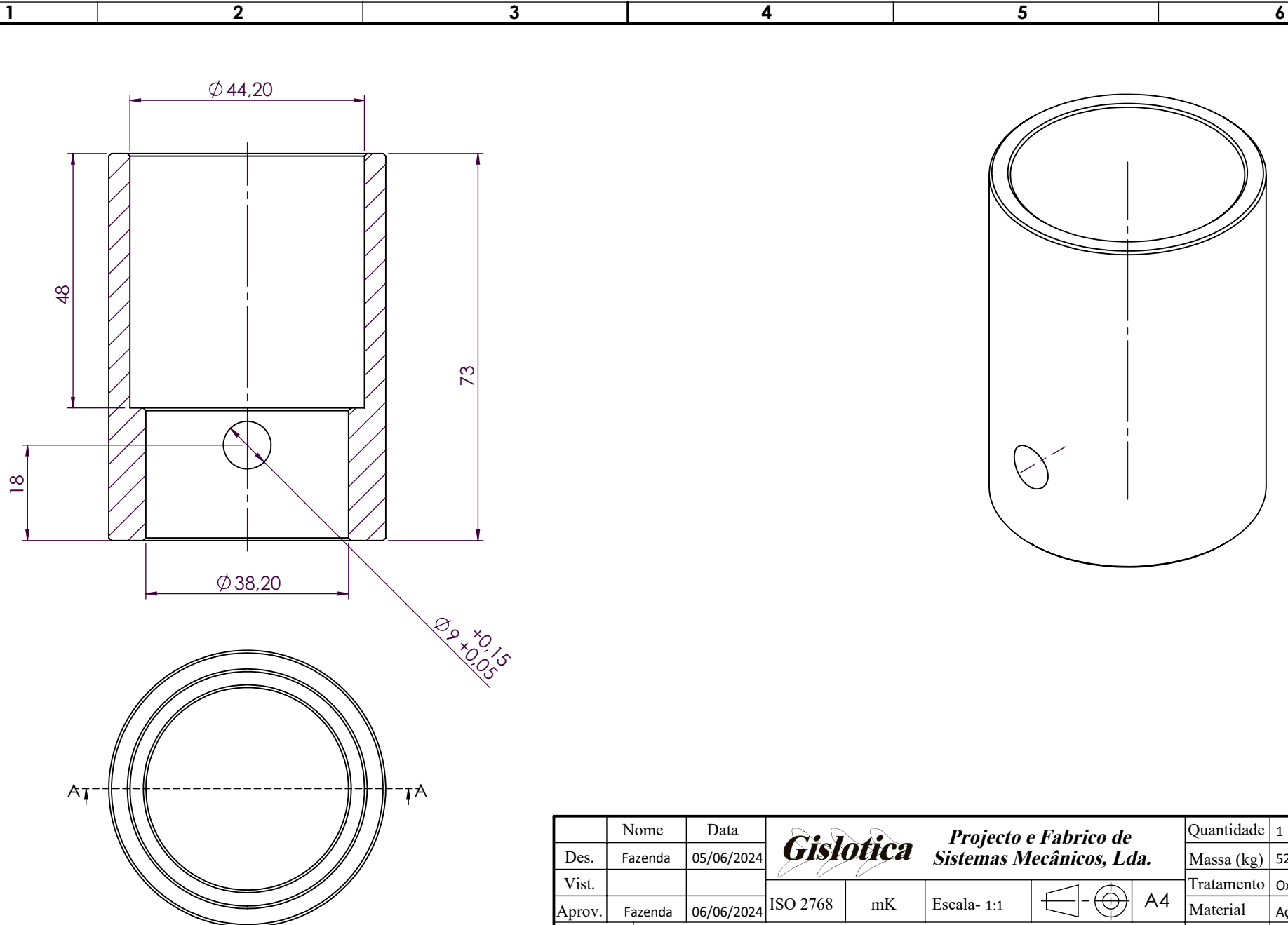
	Nome	Data	 <b>Projecto e Fabrico de Sistemas Mecânicos, Lda.</b>				Quantidade	1
Des.	Fazenda	03/06/2024					Massa (kg)	19.49
Vist.			Tratamento	Oxidação a Negro				
Aprov.	Fazenda	06/06/2024	Material	Aço FR3				
Nome	FA#2406174707				Descrição	Torno		
<i>This drawing is owned by Gislotica, Lda. It is prohibited to copy, reproduce or divulgation without Gislotica's written authorization. All rights reserved.</i>							Desenho	20240001-105




	Nome	Data	 <b>Projecto e Fabrico de Sistemas Mecânicos, Lda.</b>				Quantidade	1
Des.	Fazenda	03/06/2024					Massa (kg)	47.06
Vist.			Tratamento	Oxidação a Negro				
Aprov.	Fazenda	06/06/2024	Material	Aço FR3				
Nome	FA#2406173306				Descrição	Torno		
<i>This drawing is owned by Gislotica, Lda. It is prohibited to copy, reproduce or divulgation without Gislotica's written authorization. All rights reserved.</i>							Desenho	20240001-103



	Nome	Data	 <b>Projecto e Fabrico de Sistemas Mecânicos, Lda.</b>				Quantidade	1
Des.	Fazenda	03/06/2024					Massa (kg)	29.27
Vist.			Tratamento	Oxidação a Negro				
Aprov.	Fazenda	06/06/2024	Material	Aço FR3				
Nome	FA#2406173819		Descrição	Torno				
<i>This drawing is owned by Gislotica, Lda. It is prohibited to copy, reproduce or divulgation without Gislotica's written authorization. All rights reserved.</i>				Desenho	20240001-104	1/1		



	Nome	Data	 <b>Projecto e Fabrico de Sistemas Mecânicos, Lda.</b>				Quantidade	1
Des.	Fazenda	05/06/2024					Massa (kg)	52.94
Vist.			Tratamento	Oxidar a Negro				
Aprov.	Fazenda	06/06/2024	Material	Aço FR3				
Nome	FA#2406172100		Descrição	Torno				
<i>This drawing is owned by Gislótica, Lda. It is prohibited to copy, reproduce or divulgation without Gislótica's written authorization. All rights reserved.</i>				Desenho	20240001-101	1/1		

## **ANEXO D- FICHAS TÉCNICAS DOS ADESIVOS**



**Advanced Materials****Araldite® AV 138M-1 / Hardener HV 998-1****Structural Adhesives**

## TECHNICAL DATASHEET

**Araldite® AV 138M-1 / Hardener HV 998-1****Two component epoxy adhesive****Key properties**

- Excellent chemical resistance
- Temperature resistant to 140°C
- Thixotropic, gap filling paste

**Description**

Araldite® AV 138M-1 / Hardener HV 998-1 is a two component, room temperature curing paste adhesive of high strength. When fully cured the adhesive will have excellent performance at elevated temperatures and has high chemical resistance. It is suitable for bonding a wide variety of metals, ceramics, glass, rubbers, rigid plastics and other materials, and is widely used in many industrial applications where resistance to aggressive or warm environments are required.

**Typical product data**

Property	Araldite® AV 138M-1	Hardener HV 998-1	Mix
Colour - visual (A112)*	beige	grey	grey
Specific gravity	ca. 1.7	ca. 1.6	ca. 1.7
Viscosity (Pa.s)	thixotropic	thixotropic	thixotropic
Lap shear strength at 25 °C (A501)*	-	-	> 11 MPa
Pot Life (100 g at 25°C)	-	-	30 min

\* Specified data are on a regular basis analysed. Data which is described in this document as 'typical' is not analysed on a regular basis and is given for information purposes only. Data values are not guaranteed or warranted unless if specifically mentioned.

**Processing****Pretreatment**

The strength and durability of a bonded joint are dependent on proper treatment of the surfaces to be bonded.

At the very least, joint surfaces should be cleaned with a good degreasing agent such as acetone or other proprietary degreasing agents in order to remove all traces of oil, grease and dirt.

Low grade alcohol, gasoline (petrol) or paint thinners should never be used.

The strongest and most durable joints are obtained by either mechanically abrading or chemically etching ("pickling") the degreased surfaces. Abrading should be followed by a second degreasing treatment

Mix ratio	Parts by weight	Parts by volume
Araldite® AV 138M-1	100	100
Hardener HV 998-1	40	40

Resin and hardener should be blended until they form a homogeneous mix.

**Application of adhesive**

The resin/hardener mix is applied with a spatula, to the pretreated and dry joint surfaces.

A layer of adhesive 0.05 to 0.10 mm thick will normally impart the greatest lap shear strength to the joint.

The joint components should be assembled and clamped as soon as the adhesive has been applied. An even contact pressure throughout the joint area will ensure optimum cure.

**Mechanical processing**

Specialist firms have developed metering, mixing and spreading equipment that enables the bulk processing of adhesive. We will be pleased to advise customers on the choice of equipment for their particular needs.

**Equipment maintenance**

All tools should be cleaned with hot water and soap before adhesives residues have had time to cure. The removal of cured residues is a difficult and time-consuming operation.

If solvents such as acetone are used for cleaning, operatives should take the appropriate precautions and, in addition, avoid skin and eye contact.

**Typical times to minimum shear strength**

Temperature	°C	10	15	23	40	60	100
Time to reach a LSS	hours	14	8	4	-	-	-
of 1 MPa	minutes	-	-	-	75	20	4
Time to reach a LSS	hours	22	15	6	-	-	-
of 10 MPa	minutes	-	-	-	120	30	5

LSS = Lap shear strength.

**Typical cured properties**

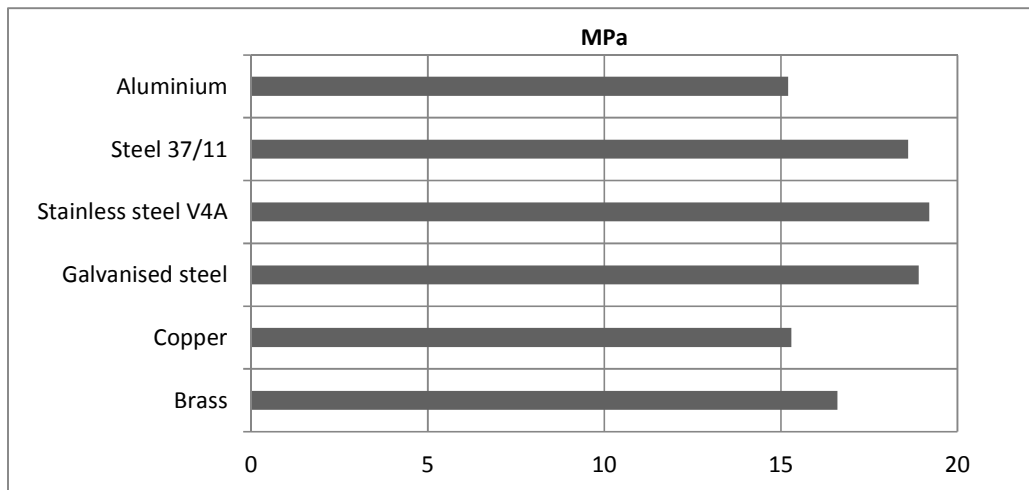
Unless otherwise stated, the figures given below were all determined by testing standard specimens made by lap-jointing 114 x 25 x 1.6 mm strips of aluminium alloy. The joint area was 12.5 x 25 mm in each case.

The figures were determined with typical production batches using standard testing methods. They are provided solely as technical information and do not constitute a product specification.

**Average lap shear strengths of typical metal-to-metal joints (ISO 4587) (typical average values)**

Cure: 16 hours at 40°C and test at 23°C

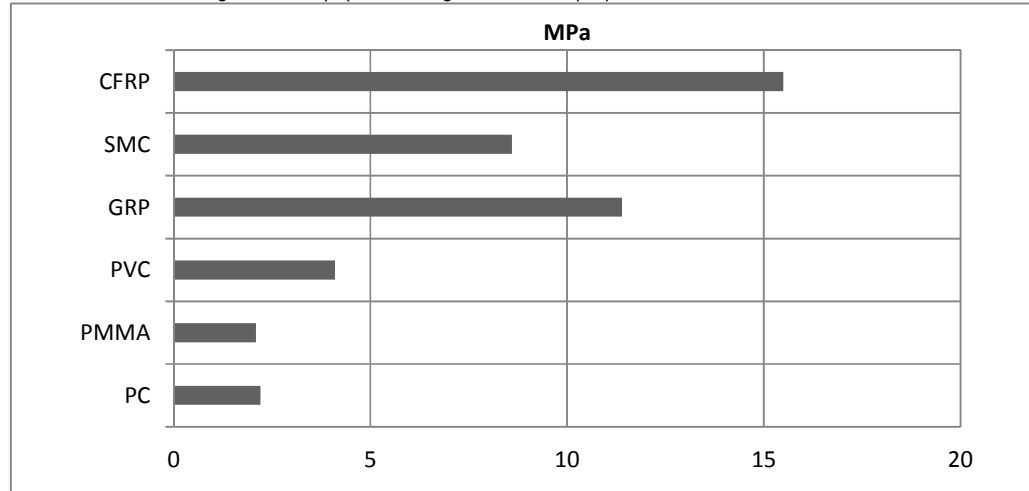
Pretreatment - Sand blasting



### Average lap shear strengths of typical plastic-to-plastic joints (ISO 4587) (typical average values)

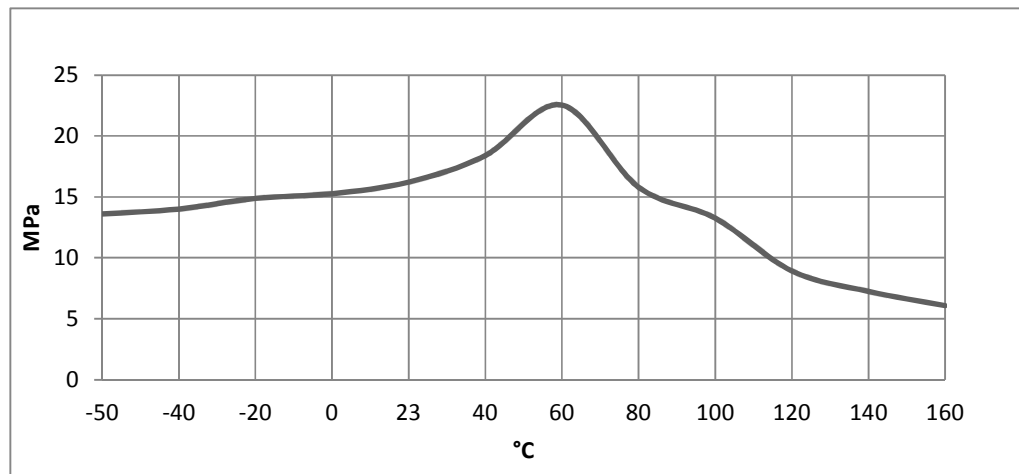
Cure: 16 hours at 40°C and test at 23°C

Pretreatment – abrading with sand paper and degrease with isopropanol



### Lap shear strength versus temperature (ISO 4587) (typical average values)

Cure: 16 hours at 40°C



Shore hardness (typical average value)

D86

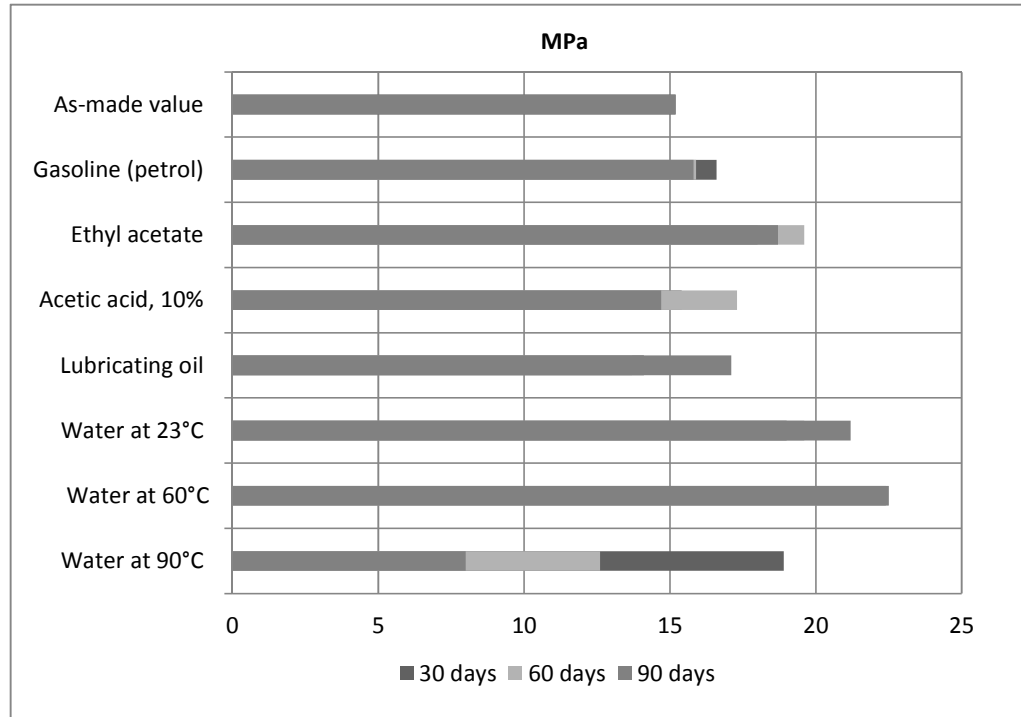
### Tensile Properties (ISO 527) (typical average values)

Cure 16 hours/ 40°C , tested at 23°C

Tensile strength	29 MPa
Tensile modulus	4.2 GPa
Elongation at break	0.8%

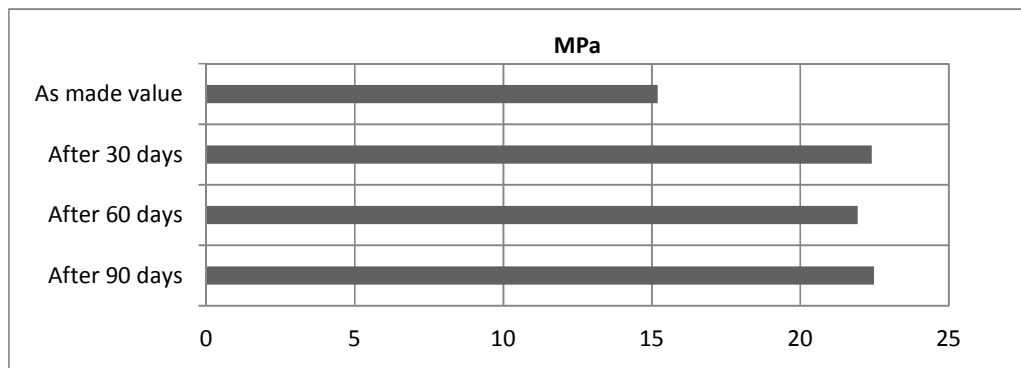
### Lap shear strength versus immersion in various media (typical average values)

Unless otherwise stated, L.S.S. was determined after immersion for 30, 60 and 90 days at 23°C. Cure: 16 hours at 40°C



### Lap shear strength versus tropical weathering (typical average values)

(40°C/ 92% Relative Humidity) On aluminium. Cured for 16 hours at 40°C and tested at 23°C. Pretreatment - Sand blasting



---

**Storage**

Araldite® AV 138M-1 and Hardener HV 998-1 must be stored at room temperature provided the components are stored in sealed containers. The expiry date is indicated on the label.

---

**Handling  
Precautions****Caution**

Our products are generally quite harmless to handle provided that certain precautions normally taken when handling chemicals are observed. The uncured materials must not, for instance, be allowed to come into contact with foodstuffs or food utensils, and measures should be taken to prevent the uncured materials from coming in contact with the skin, since people with particularly sensitive skin may be affected. The wearing of impervious rubber or plastic gloves will normally be necessary; likewise the use of eye protection. The skin should be thoroughly cleansed at the end of each working period by washing with soap and warm water. The use of solvents is to be avoided. Disposable paper - not cloth towels - should be used to dry the skin. Adequate ventilation of the working area is recommended. These precautions are described in greater detail in the Material Safety Data sheets for the individual products and should be referred to for fuller information.



Huntsman Advanced Materials warrants only that its products meet the specifications agreed with the user. Specified data are analysed on a regular basis. Data which is described in this document as 'typical' or 'guideline' is not analysed on a regular basis and is given for information purposes only. Data values are not guaranteed or warranted unless if specifically mentioned.

The manufacture of materials is the subject of granted patents and patent applications; freedom to operate patented processes is not implied by this publication.

While all the information and recommendations in this publication are, to the best of Huntsman Advanced Material's knowledge, information and belief, accurate at the date of publication, **nothing herein is to be construed as a warranty, whether express or implied, including but without limitation, as to merchantability or fitness for a particular purpose. In all cases, it is the responsibility of the user to determine the applicability of such information and recommendations and the suitability of any product for its own particular purpose.**

The behaviour of the products referred to in this publication in manufacturing processes and their suitability in any given end-use environment are dependent upon various conditions such as chemical compatibility, temperature, and other variables, which are not known to Huntsman Advanced Materials. It is the responsibility of the user to evaluate the manufacturing circumstances and the final product under actual end-use requirements and to adequately advise and warn purchasers and users thereof.

Products may be toxic and require special precautions in handling. The user should obtain Safety Data Sheets from Huntsman Advanced Materials containing detailed information on toxicity, together with proper shipping, handling and storage procedures, and should comply with all applicable safety and environmental standards.

Hazards, toxicity and behaviour of the products may differ when used with other materials and are dependent on manufacturing circumstances or other processes. Such hazards, toxicity and behaviour should be determined by the user and made known to handlers, processors and end users.

Except where explicitly agreed otherwise, the sale of products referred to in this publication is subject to the general terms and conditions of sale of Huntsman Advanced Materials LLC or of its affiliated companies including without limitation, Huntsman Advanced Materials (Europe) BVBA, Huntsman Advanced Materials Americas Inc., Huntsman Advanced Materials (UAE) FZE, Huntsman Advanced Materials (Guangdong) Company Limited, and Huntsman Advanced Materials (Hong Kong) Ltd.

Huntsman Advanced Materials is an international business unit of Huntsman Corporation. Huntsman Advanced Materials trades through Huntsman affiliated companies in different countries including but not limited to Huntsman Advanced Materials LLC in the USA and Huntsman Advanced Materials (Europe) BVBA in Europe.

All trademarks mentioned are either property of or licensed to Huntsman Corporation or an affiliate thereof in one or more, but not all, countries.

Copyright © 2018 Huntsman Corporation or an affiliate thereof. All rights reserved.

---

**Huntsman Advanced Materials  
(Switzerland) GmbH**

Klybeckstrasse 200  
CH - 4057 Basel  
Switzerland

Tel: +41 (0)61 299 11 11  
Fax: +41 (0)61 299 11 12

[www.aralditeadhesives.com](http://www.aralditeadhesives.com)

**Advanced Materials****Araldite® 420 A/B****Structural Adhesives****ARALDITE® 420 A/B****Two component epoxy adhesive system****Key properties**

- Very high lap shear and peel strength
- Bonds a wide variety of materials (metal, composite and thermoplastics)
- Good moisture resistance
- Extremely tough and resilient adhesive

**Description**

ARALDITE® 420 A/B is a two-component room temperature curing, epoxy adhesive paste of high strength and toughness. Performances can be enhanced by post-curing at elevated temperature. It is suitable for bonding a wide variety of metals, ceramics and many other substrates in common use.

**Product data**

Property	Araldite 420 A	Araldite 420 B	Mixed Adhesive
Colour (visual) (A112)*	Yellow	Blue	Dark green
Specific gravity	1.2	1.0	approx. 1.1
Viscosity at 25°C (A93) (Pa.s)*	100-300	0.6-1.4	35-45
Lap shear strength at 23°C (A501)*	-	-	> 30 MPa
Pot Life (100 gm at 25°C)			Ca. 60 min

\* Specified data are on a regular basis analysed. Data which is described in this document as 'typical' is not analysed on a regular basis and is given for information purposes only. Data values are not guaranteed or warranted unless if specifically mentioned.

**Processing****Pretreatment**

The strength and durability of a bonded joint are dependent on proper treatment of the surfaces to be bonded.

At the very least, joint surfaces should be cleaned with a good degreasing agent such as acetone, iso-propanol (for plastics) or other proprietary degreasing agents in order to remove all traces of oil, grease and dirt.

Low grade alcohol, gasoline (petrol) or paint thinners should never be used.

The strongest and most durable joints are obtained by either mechanically abrading or chemically etching ("pickling") the degreased surfaces. Abrading should be followed by a second degreasing treatment

Mix ratio	Parts by weight	Parts by volume
Araldite 420 A	100	100
Araldite 420 B	40	50

The resin and hardener should be blended until they form a homogeneous mix.

Araldite® 420 A/B is available in cartridges incorporating mixers and can be applied as ready to use adhesive with the aid of the tool recommended by Huntsman Advanced Materials

**Application of adhesive**

The resin/hardener mix is applied with a spatula, to the pretreated and dry joint surfaces.

A layer of adhesive 0.05 to 0.10 mm thick will normally impart the greatest lap shear strength to the joint.

The joint components should be assembled and clamped as soon as the adhesive has been applied. An even contact pressure throughout the joint area will ensure optimum cure.

**Mechanical processing**

Specialist firms have developed metering, mixing and spreading equipment that enables the bulk processing of adhesive.

We will be pleased to advise customers on the choice of equipment for their particular needs.

**Equipment maintenance**

All tools should be cleaned with hot water and soap before adhesives residues have had time to cure. The removal of cured residues is a difficult and time-consuming operation.

If solvents such as acetone are used for cleaning, operatives should take the appropriate precautions and, in addition, avoid skin and eye contact.

**Typical times to minimum shear strength**

Temperature	°C	23	40	60	100
Cure time to reach	hours	7.5			
LSS > 1N/mm <sup>2</sup>	minutes		100	35	< 5
Cure time to reach	hours	11	2	1	
LSS > 10N/mm <sup>2</sup>	minutes				20

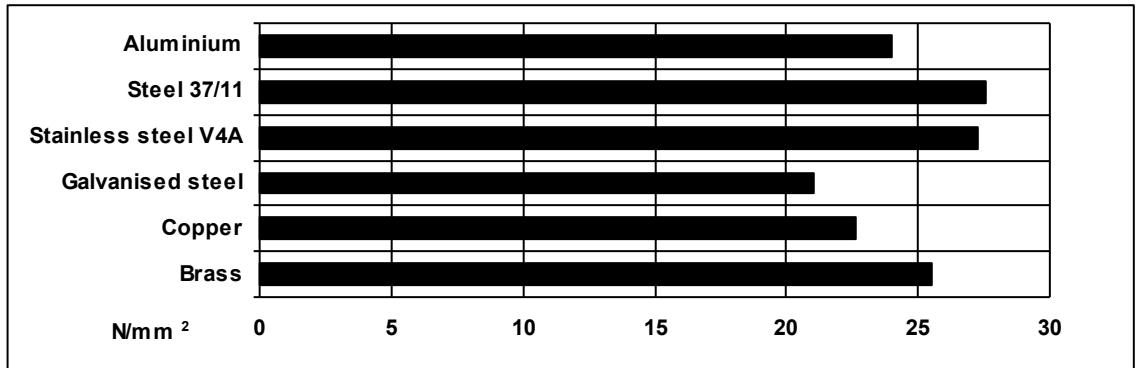
LSS = Lap shear strength.

**Typical cured properties**

Unless otherwise stated, the figures given below were all determined by testing standard specimens made by lap-jointing 114 x 25 x 1.6 mm strips of aluminium alloy. The joint area was 12.5 x 25 mm in each case.

The figures were determined with typical production batches using standard testing methods. They are provided solely as technical information and do not constitute a product specification.

Note: The data in this edition is based on recent retesting of the product.



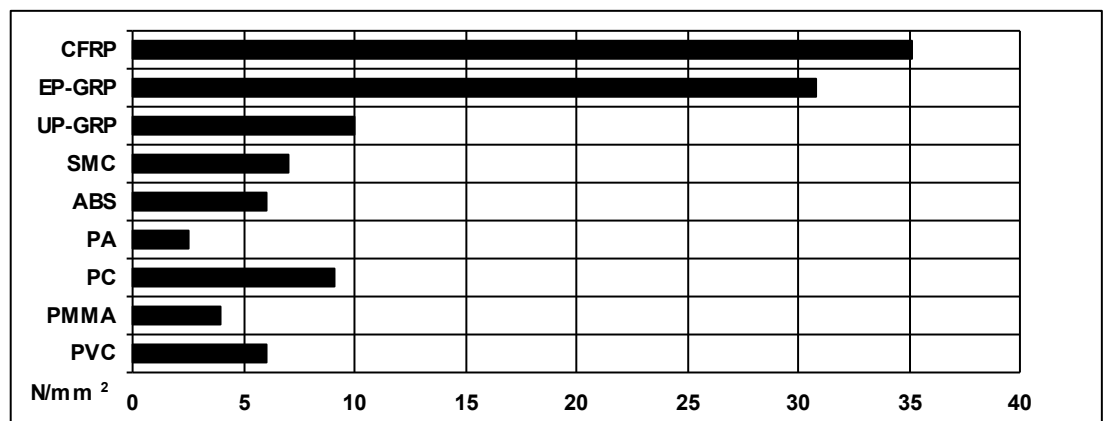
**Average lap shear strengths of typical metal-to-metal joints (ISO 4587) (typical average value)**

Cured for 16 hours at 40°C and tested at 23°C

Pretreatment - Sand blasting

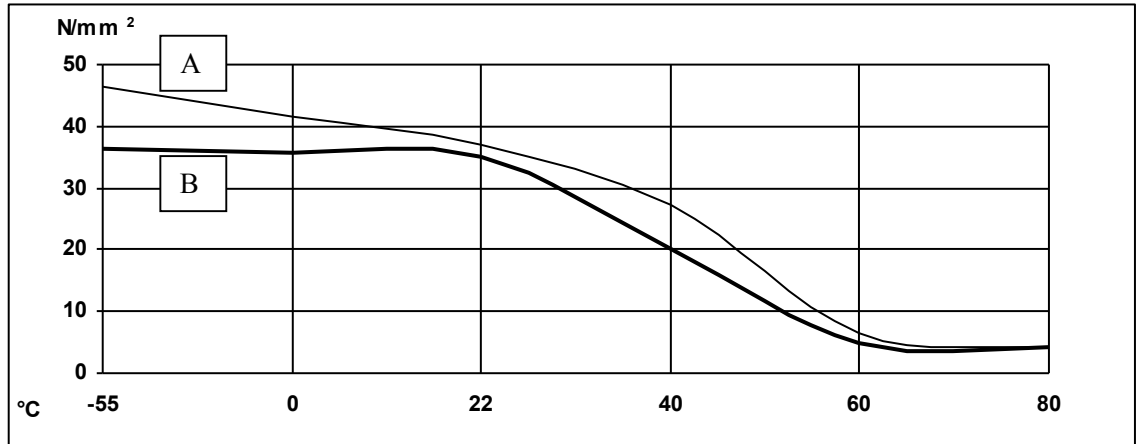
**Average lap shear strengths of typical plastic-to-plastic joints (ISO 4587) (typical average value)**

Cured for 16 hours at 40°C and tested at 23°C. Pretreatment - Lightly abrade and alcohol degrease.



**Lap shear strength versus temperature (ISO 4587) (typical average values)**

A: Cure: 4 hours at 50°C B: cure: 7 days at RT



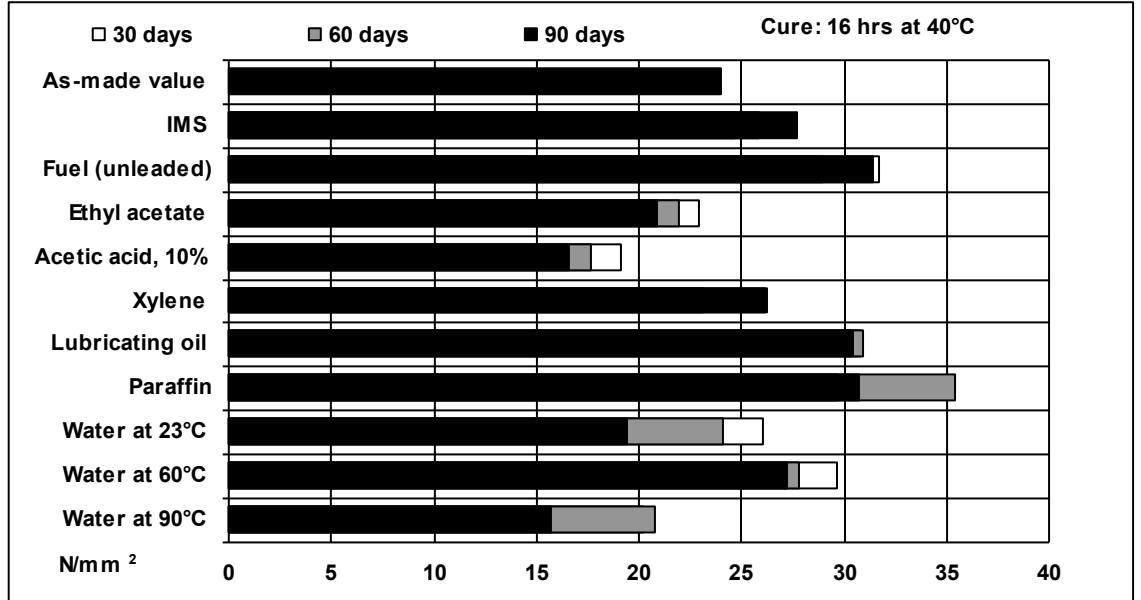
**Glass transition temperature (ISO 6721) (typical average value)**

Cure: 16 hours at 40°C

56°C by DMA

**Lap shear strength versus immersion in various media (typical average values)**

Unless otherwise stated, L.S.S. was determined after immersion for 30,60 and 90 days at 23°C



**Tensile strength at 23°C (ISO 527)**

(typical average value)

29 MPa

E-modulus

1495 MPa

Elongation at break

4.6 %

**Shore Hardness (D scale) (ISO 868/03)**

(typical average value)

75 D

Cure 16 hours/ 40°C , tested at 23°C,

50%RH

**Shear modulus G' (ISO 6721)**

Cure: 16 hours/ 40°C

**(typical average value)**

-20°C - 1.00 GPa

0°C - 880 MPa

23°C - 730 MPa

60°C - 74 MPa

90°C - 5.5 MPa

---

**Storage**

ARALDITE® 420A and Araldite® 420 B may be stored at room temperature provided the components are stored in sealed containers. The expiry date is indicated on the label.

---

**Handling precautions****Caution**

Our products are generally quite harmless to handle provided that certain precautions normally taken when handling chemicals are observed. The uncured materials must not, for instance, be allowed to come into contact with foodstuffs or food utensils, and measures should be taken to prevent the uncured materials from coming in contact with the skin, since people with particularly sensitive skin may be affected. The wearing of impervious rubber or plastic gloves will normally be necessary; likewise the use of eye protection. The skin should be thoroughly cleansed at the end of each working period by washing with soap and warm water. The use of solvents is to be avoided. Disposable paper - not cloth towels - should be used to dry the skin. Adequate ventilation of the working area is recommended. These precautions are described in greater detail in the Material Safety Data sheets for the individual products and should be referred to for fuller information.

**Huntsman Advanced Materials**

(Switzerland) GmbH  
Klybeckstrasse 200  
4057 Basel  
Switzerland

Tel: +41 (0)61 299 11 11  
Fax: +41 (0)61 299 11 12

[www.huntsman.com/advanced\\_materials](http://www.huntsman.com/advanced_materials)  
Email: [advanced\\_materials@huntsman.com](mailto:advanced_materials@huntsman.com)

Huntsman Advanced Materials warrants only that its products meet the specifications agreed with the user. Specified data are analysed on a regular basis. Data which is described in this document as 'typical' or 'guideline' is not analysed on a regular basis and is given for information purposes only. Data values are not guaranteed or warranted unless if specifically mentioned.

The manufacture of materials is the subject of granted patents and patent applications; freedom to operate patented processes is not implied by this publication.

While all the information and recommendations in this publication are, to the best of Huntsman Advanced Material's knowledge, information and belief, accurate at the date of publication, **nothing herein is to be construed as a warranty, whether express or implied, including but without limitation, as to merchantability or fitness for a particular purpose. In all cases, it is the responsibility of the user to determine the applicability of such information and recommendations and the suitability of any product for its own particular purpose.**

The behaviour of the products referred to in this publication in manufacturing processes and their suitability in any given end-use environment are dependent upon various conditions such as chemical compatibility, temperature, and other variables, which are not known to Huntsman Advanced Materials. It is the responsibility of the user to evaluate the manufacturing circumstances and the final product under actual end-use requirements and to adequately advise and warn purchasers and users thereof.

Products may be toxic and require special precautions in handling. The user should obtain Safety Data Sheets from Huntsman Advanced Materials containing detailed information on toxicity, together with proper shipping, handling and storage procedures, and should comply with all applicable safety and environmental standards.

Hazards, toxicity and behaviour of the products may differ when used with other materials and are dependent on manufacturing circumstances or other processes. Such hazards, toxicity and behaviour should be determined by the user and made known to handlers, processors and end users.

Except where explicitly agreed otherwise, the sale of products referred to in this publication is subject to the general terms and conditions of sale of Huntsman Advanced Materials LLC or of its affiliated companies including without limitation, Huntsman Advanced Materials (Europe) BVBA, Huntsman Advanced Materials Americas Inc., Huntsman Advanced Materials (UAE) FZE, Huntsman Advanced Materials (Guangdong) Company Limited, and Huntsman Advanced Materials (Hong Kong) Ltd.

Huntsman Advanced Materials is an international business unit of Huntsman Corporation. Huntsman Advanced Materials trades through Huntsman affiliated companies in different countries including but not limited to Huntsman Advanced Materials LLC in the USA and Huntsman Advanced Materials (Europe) BVBA in Europe.

All trademarks mentioned are either property of or licensed to Huntsman Corporation or an affiliate thereof in one or more, but not all, countries.

Copyright © 2012 Huntsman Corporation or an affiliate thereof. All rights reserved

## PRODUCT DATA SHEET

# SikaForce®-710 L100

Long open time 2-component adhesive for panel bonding

**TYPICAL PRODUCT DATA (FURTHER VALUES SEE SAFETY DATA SHEET)**

Properties	Component A SikaForce®-710 L100	Component B SikaForce®-010
<b>Chemical base</b>	Polyols	Isocyanate derivatives
<b>Color (CQP001-1)</b>	Beige	Brown
	mixed	Beige
<b>Cure mechanism</b>	Polyaddition	
<b>Density (uncured)</b>	1.64 g/cm <sup>3</sup>	1.23 g/cm <sup>3</sup>
	mixed (calculated)	1.56 g/cm <sup>3</sup>
<b>Solid content</b>	100 %	100 %
<b>Mixing ratio</b>	by volume 100 : 25	
	by weight 100 : 19	
<b>Viscosity (CQP029-4)</b>	Rheometer, PP25, shear rate 10 s <sup>-1</sup> , d=1 mm	22 000 mPa·s <sup>A</sup>
	mixed	10 000 mPa·s <sup>A</sup>
<b>Application temperature</b>	15 – 30 °C	
<b>Pot-life (CQP536-3)</b>	100 minutes <sup>A</sup>	
<b>Open time (CQP526-3)</b>	135 minutes <sup>A</sup>	
<b>Press time (CQP590-4)</b>	1 MPa	210 minutes <sup>A</sup>
<b>Shore D hardness (CQP023-1 / ISO 48-4)</b>	72 <sup>B</sup>	
<b>Tensile strength (CQP543-1 / ISO 527)</b>	14 MPa <sup>B</sup>	
<b>Elongation at break (CQP543-1 / ISO 527)</b>	25 % <sup>B</sup>	
<b>Tensile lap-shear strength (CQP546-1 / ISO 4587)</b>	9 MPa <sup>B</sup>	
<b>Gross calorific potential (EN ISO 1716)</b>	14.5 MJ/kg	
<b>Shelf life</b>	12 months	9 months

CQP = Corporate Quality Procedure

<sup>A)</sup> 23 °C / 50 % r.h.<sup>B)</sup> 12 weeks at 23 °C / 50 % r.h.
**DESCRIPTION**

SikaForce®-710 L100 is a long open time 2-component polyurethane adhesive for bonding sandwich panels and similar constructions of various materials.

SikaForce®-710 L100 is tested according to FTP Code system and approved according to the IMO Marine Equipment Directives.

**PRODUCT BENEFITS**

- Long open time
- Room temperature curing
- IMO approved
- Solvent free

**AREAS OF APPLICATION**

SikaForce®-710 L100 is used primarily for bonding of metal, fiber cement, wood and glass fiber reinforced plastic to expanded and extruded polystyrene foam, polyurethane foam and mineral wool in the manufacturing of sandwich elements and other constructions.

This product is suitable for experienced professional users only. Tests with actual substrates and conditions have to be performed, ensuring adhesion and material compatibility.

**PRODUCT DATA SHEET**

SikaForce®-710 L100

Version 07.01 (03 - 2023), en\_IN

012104577100001030

## CURE MECHANISM

The curing of SikaForce®-710 L100 takes place by a chemical reaction of the two components. Higher temperatures speed up the curing process and lower slow it down.

## CHEMICAL RESISTANCE

In case of chemical or thermal exposure, conduct project related testing.

## METHOD OF APPLICATION

### Product preparation

Component A must be stirred thoroughly before use.

### Surface preparation

Surfaces must be clean, dry and free from grease, oil, dust and contaminants. After the cleaning process, a physical or chemical pretreatment might be required, depending on surface and type of material. The type of pretreatment must be determined by tests.

### Application

Typically a coat weight between 150 and 350 g/m<sup>2</sup> is applied, depending on the substrates to be bonded. The specific coat weight for a given substrate combination must be determined by tests.

The procedure for manual application is as follows: Ensure that the A-component is stirred thoroughly to avoid any sediment or separation, taking care not to stir too vigorously as this may introduce air into the product. Add the B-component in the specified ratio and stir thoroughly, ensuring a homogeneous mixture is achieved.

Apply before reaching half of the pot-life and join parts together within the open time. Consider that, if mixed in larger amounts, the exothermic reaction can reduce the pot-life and open time significantly.

For automated applications, contact the System Engineering Department of Sika Industry.

## Pressing

An adequate bonding pressure is necessary to obtain a voidless contact between the substrates and the adhesive. The specific pressure is, however, dependent on the core material and must be determined by tests. The pressure must always be below the maximum compressive strength of the core. After starting the press process, do not release the pressure until the press time has elapsed.

## Removal

Uncured SikaForce®-710 L100 may be removed from tools and equipment with SikaForce®-096 Cleaner. Once cured, the material can only be removed mechanically.

Hands and exposed skin have to be washed immediately using hand wipes such as Sika® Cleaner-350H or a suitable industrial hand cleaner and water.

Do not use solvents on skin.

## STORAGE CONDITIONS

SikaForce®-710 L100 has to be kept between 10 °C and 30 °C in a dry place. Do not expose it to direct sunlight or frost. After opening of the packaging, the content has to be protected against humidity.

The lowest allowed temperature during transportation is -20 °C for max. 7 days.

## FURTHER INFORMATION

The information herein is offered for general guidance only. Advice on specific applications is available on request from the Technical Department of Sika Industry.

Copies of the following publications are available on request:

- Safety Data Sheets

## BASIS OF PRODUCT DATA

All technical data stated in this document are based on laboratory tests. Actual measured data may vary due to circumstances beyond our control.

## HEALTH AND SAFETY INFORMATION

For information and advice regarding transportation, handling, storage and disposal of chemical products, users shall refer to the actual Safety Data Sheets containing physical, ecological, toxicological and other safety-related data.

## DISCLAIMER

The information, and in particular, the recommendations relating to the application and enduse of Sika products, are given in good faith based on Sika's current knowledge and experience of the products when properly stored, handled and applied under normal conditions in accordance with Sika's recommendations. In practice, the differences in materials, substrates and actual site conditions are such that no warranty in respect of merchantability or of fitness for a particular purpose, nor any liability arising out of any legal relationship whatsoever, can be inferred either from this information, or from any written recommendations, or from any other advice offered. The user of the product must test the product's suitability for the intended application and purpose. Sika reserves the right to change the properties of its products. The proprietary rights of third parties must be observed. All orders are accepted subject to our current terms of sale and delivery. Users must always refer to the most recent issue of the local Product Data Sheet for the product concerned, copies of which will be supplied on request.

## PRODUCT DATA SHEET

SikaForce®-710 L100  
Version 07.01 (03 - 2023), en\_IN  
012104577100001030

Sika India Pvt. Ltd.  
620, Diamond Harbour Road  
Commercial Complex II  
Kolkata - 700 034  
West Bengal, India  
Phone: +91 33 2447 2448  
info.india@in.sika.com



## ANEXO E- TABELA DE CUSTOS DAS FERRAMENTAS









Custo das peças da ferramenta rolete flutuante		
Componente	Quantidade	Custo (nº de peças x custo unitário)
Placas (1181412-101)	2	$85 \times 2 = 170$
Rolos (1181412-103)	2	$70 \times 2 = 140$
Veio roscado (1181412-104)	2	$25 \times 2 = 50$
Rolamento SKF 61800	4	$10 \times 4 = 40$
Separador (1181412-105)	4	*
Parafusos de cabeça hexagonal M6x12	4	*
Anéis espaçadores de $\phi_{\text{ext.}}=13\text{mm}$ , $\phi_{\text{int.}}=10\text{mm}$ , esp.=2mm	4	*
Anilhas nord-lock	4	*
<b>Total</b>	26	400 euros

\* Preço irrelevante face aos outros componentes

<b>Custo das peças da ferramenta para fabrico de juntas topo a topo</b>		
<b>Componente</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Custo (nº de peças x custo unitário)</b>
Placa vertical (1181412-108)	2	$2 \times 120 = 240$ euros
Pino de suporte (1181412-109)	12	$12 \times 10 = 120$ euros
Suporte com boca de lobo (1181412-110)	12	$12 \times 50 = 600$ euros
Mordente (1181412-111)	6	$6 \times 40 = 240$ euros
Suporte de mordente (1181412-112)	6	$6 \times 30 = 180$ euros
Pega (1181412-113)	2	$2 \times 15 = 30$ euros
Base (1181412-115)	2	$2 \times 110 = 220$ euros
Placa auxiliar (1181412-117)	24	$24 \times 0,2 = 4,80$ euros
Suporte de provete inferior (1181412-119)	6	$6 \times 25 = 150$ euros
Mordentes inferiores (1181412-121)	6	$6 \times 40 = 240$ euros
Barra de suporte (1181412-122)	6	$6 \times 2,43 = 14,58$ euros
Régua (1181412-123)	2	$2 \times 30 = 60$ euros
Parafusos CHC M8*20	6	*
Parafusos CHC M4*10	12	*
Parafusos CHC M4*16	12	*
Parafusos CHC M5*10	12	*
Parafusos CHC M5*30	12	*
Parafusos CHC M6*16	4	*
<b>Total</b>	<b>86</b>	<b>2099,38 euros</b>

\* Preço irrelevante face aos outros componentes

<b>Custo dos substratos da ferramenta para fabrico de juntas topo a topo</b>		
<b>Componente</b>	<b>Nº de peças</b>	<b>Custo</b>
Substratos (1181412-107)	<b>90</b>	$90 \times 12 = 1080$ euros

<b>Custo das peças da ferramenta para fabrico de juntas topo a topo</b>		
<b>Componente</b>	<b>Imagem da peça</b>	<b>Custo</b>
<b>Suporte inferior para fixação da ferramenta na mesa da máquina de tração (20240001-100)</b>		65 euros
<b>Suporte superior para fixação da ferramenta na célula de carga que está fixa no travessão móvel da máquina de tração (20240001-106)</b>		65 euros
<b>Junta de <i>cardan</i> (20240001-107)</b>		100 euros
<b>Peça cilíndrica que faz a ligação entre a junta de <i>cardan</i> e as peças que permitem a fixação do substrato inferior da junta topo a topo (20240001-102)</b>		65 euros
<b>Suporte superior que permite a fixação do substrato superior da junta topo a topo através de um pino com 5 mm de diâmetro (20240001-105)</b>		95 euros
<b>Cilindro oco que aloja a parte superior da peça (5) e a parte inferior do suporte (8) (20240001-103)</b>		80 euros
<b>Suporte inferior que permite a fixação do substrato inferior da junta topo a topo através de um pino com 5 mm de diâmetro. Esta peça pode rodar em torno do seu eixo longitudinal de forma que o furo do suporte coincida com o furo do substrato (20240001-104)</b>		95 euros
<b>Cilindro oco que aloja a junta de <i>cardan</i> e impede que a peça (5) tombe após a rotura da junta ou no caso de não estar qualquer junta fixa nos suportes (6) e (8) (20240001-101)</b>		85 euros
<b>Total</b>	-	650 euros

**Quantidade:** uma peça de cada.