



FIVELA ALARM-FREE: ESTUDO E PROJETO DE UMA FIVELA INDETETÁVEL NOS EQUIPAMENTOS DE DETEÇÃO DE METAIS PRESENTES NOS AEROPORTOS

FÁBIO MANUEL GONÇALVES TEIXEIRA
dezembro de 2017

FIVELA *ALARM-FREE*: ESTUDO E PROJETO DE UMA FIVELA INDETETÁVEL NOS EQUIPAMENTOS DE DETEÇÃO DE METAIS PRESENTES NOS AEROPORTOS

Fábio Manuel Gonçalves Teixeira

2017

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Engenharia Mecânica – Mestrado em Construções Mecânicas



FIVELA *ALARM-FREE*: ESTUDO E PROJETO DE UMA FIVELA INDETETÁVEL NOS EQUIPAMENTOS DE DETEÇÃO DE METAIS PRESENTES NOS AEROPORTOS

Fábio Manuel Gonçalves Teixeira

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Doutor Francisco José Gomes Da Silva e coorientação do Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho.

2017

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Engenharia Mecânica – Mestrado em Construções Mecânicas



JÚRI

Presidente

Manuel Jorge Dores de Castro

Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Orientador

Francisco José Gomes da Silva

Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Co-orientador

Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Arguente

Doutora Teresa Margarida Guerra Pereira Duarte

Professora Auxiliar, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto

isep

Fábio Teixeira

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor Francisco Silva, orientador da dissertação, agradeço o enorme apoio, a partilha de conhecimento e o estímulo. Acima de tudo por me acompanhar nesta minha jornada de crescimento a nível académico e pessoal.

Ao Co-orientador, Professor Doutor Raúl Campilho, pela sua grande contribuição na realização deste projeto.

Ao Engenheiro Ricardo Silva, Diretor de Produção e Inovação na SKYPRO, pela disponibilidade e grande contributo para a realização deste projeto.

Aos técnicos do departamento de Engenharia Mecânica do ISEP, pelo auxílio prestado na realização de todos os ensaios experimentais.

Aos meus colegas de curso, o meu maior apreço por toda ajuda que me deram na realização deste projeto.

À minha família e aos meus grandes amigos, por todo o apoio prestado durante este percurso.

Por último, a ti Sofia, por toda a tua ajuda, tempo e estímulo, para que eu conseguisse superar este enorme desafio.

isep

Fábio Teixeira

PALAVRAS CHAVE

Fivelas; Detetores de metais; Materiais compósitos; Método de Elementos Finitos; Moldação por injeção; Moldação por compressão a quente.

RESUMO

Nos tempos correntes, as fivelas, acessórios colocados nos cintos e/ou nos sapatos da tripulação de bordo, ainda contêm níveis consideráveis de metal, o que provoca uma perturbação do fluxo dos funcionários nas zonas de segurança dos aeroportos. Desta forma, o objetivo deste projeto foi estudar e desenvolver uma fivela em material não metálico, em parceria com a empresa *SKYPRO*, de forma a colmatar este problema.

Após o estudo inicial das características mecânicas das fivelas metálicas presentes no mercado da aviação, optou-se por dois materiais de compósitos de fibras curtas para desenvolver a nova fivela “*alarm-free*”, pois as suas propriedades assemelham-se às do material metálico. Análises de Elementos Finitos mostraram que ambos os materiais compósitos permitiam, sem comprometer significativamente as suas características mecânicas, dimensionar a fivela “*alarm-free*” de igual forma ao que se pode encontrar no mercado atualmente. Sendo assim, por último, projetaram-se duas ferramentas, um molde de injeção e um molde de compressão, para permitir o fabrico da fivela “*alarm-free*” num contexto industrial, usando os dois materiais compósitos em discussão.

Em conclusão, as fivelas “*alarm-free*” produzidas a partir destes dois materiais compósitos poderão tornar-se uma alternativa viável às atuais fivelas da aviação, permitindo assim menos desconforto por parte do pessoal de cabine nos postos de segurança dos aeroportos.

KEYWORDS

Buckles; Metal-detectors; Composite materials; Finite Element Analysis; Injection mold; Compression mold.

ABSTRACT

In current times, buckles, accessories to belts and shoes worn by the boarding crew, still contain significant levels of metal, which causes disturbances at the airport's security areas. In order to overcome this problem, the objective of this project was to study and develop an alarm-free buckle using non-metallic materials, in association with the SKYPRO company.

After the initial study of the mechanical properties of metallic buckles usually used in the aviation market, two composite materials of short fiber were chosen to develop the new alarm-free buckle, since their properties resemble those of the metallic material. A Finite Element Analysis showed that both composite materials allowed, without significantly compromising their physical characteristics, to design the alarm-free buckle as it is currently in the market. Taking all this information in consideration, two tools, an injection mold and a compression mold were designed to allow the production of the alarm-free buckle in an industrial context.

In conclusion, the "alarm-free" buckles produced from these two composite materials could become a viable alternative to current aviation buckles, thus allowing less discomfort of the cabin crew at airport security posts.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

EDS	<i>Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy</i>
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
CAM	<i>Computer-Aided Manufacturing</i>
CNC	<i>Computer Numeric Control</i>
IATA	<i>International Air Transport Association</i>
PET	Politereftalato de etileno
PAN	Poliacrilonitrilo
SMC	<i>Sheet Molding Compound</i>
CFSMC	<i>Carbon Fiber Sheet Molding Compound</i>
AFP	<i>Automated Fiber Placement</i>
MEF	Método de Elementos Finitos
TAP	Transportadora Aérea Portuguesa
PE	Polietileno
PP	Polipropileno
PA	Poliamida
PS	Poliestireno
PC	Policarbonato
PMMA	Polimetil-Metacrilato

Lista de Unidades

MPa	Megapascal
GPa	Gigapascal
mm	Milímetros
km	Quilómetros
N	Newton
kN	KiloNewton

Lista de Símbolos

°C	grau Celsius
FeCl ₃	Cloreto de ferro (III)
HCl	Ácido Clorídrico
CrO ₃	Óxido de Crómio
Na ₂ SO ₄	Sulfato de Sódio
Au	Ouro
C	Carbono
Cu	Cobre

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. O SISTEMA DE TRANSPORTE AÉREO E A SUA ENVOLVENTE (ADAPTADO DE SCHMITT E GOLLNICK (2016)).	36
FIGURA 2. EVOLUÇÃO DOS MATERIAIS (ADAPTADO DE ASHBY (2005)).	45
FIGURA 3 FAMÍLIAS DE MATERIAIS (ADAPTADO DE ASHBY (2005)).	46
FIGURA 4. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DAS CLASSES DE MATERIAIS REPRESENTADOS (ADAPTADO DE CALLISTER E RETHWISH (2009)).	48
FIGURA 5. GRÁFICO DE ASHBY E VS. P (ADAPTADO DE ASHBY (2005)).	48
FIGURA 6. REPRESENTAÇÃO DE UM MONÓMERO E DE UM POLÍMERO (ADAPTADO DE CALLISTER E RETHWISH (2009)).	49
FIGURA 7. ARRANJO MOLECULAR: (A) POLÍMERO AMORFO E (B) POLÍMERO SEMI-CRISTALINO (ADAPTADO DE MALLICK (2008)).	50
FIGURA 8. REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UM POLÍMERO TERMOENDURECÍVEL (ADAPTADO DE MALLICK (2008)).	51
FIGURA 9. CLASSIFICAÇÃO DOS VÁRIOS TIPOS DE COMPÓSITOS (ADAPTADO DE CALLISTER E RETHWISH (2009)).	52
FIGURA 10. REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS REFORÇOS FIBROSOS (A) FIBRAS CONTÍNUAS E ALINHADAS, (B) DESCONTÍNUAS E ALINHADAS, (C) DESCONTÍNUAS E ORIENTADAS ALEATORIAMENTE (ADAPTADO DE CALLISTER E RETHWISH (2009)).	52
FIGURA 11. PLANOS ORTOGONAIS PRINCIPAIS E SIMÉTRICOS (ADAPTADO DE MALLICK (2008)).	58
FIGURA 12. REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UM COMPÓSITO UNIDIRECIONAL (ADAPTADO DE MALLICK (2008)).	58
FIGURA 13. MODOS BÁSICOS DE SOLICITAÇÃO DA CAMADA (ADAPTADA DE MOURA, MORAIS, MAGALHÃES (2011)).	60
FIGURA 14. ESQUEMA DA PRODUÇÃO DE UM COMPOSTO DE MOLDAÇÃO (ADAPTADO DE MALLICK (2008)).	65
FIGURA 15. PRODUÇÃO DE UM PRÉ-IMPREGNADO (ADAPTADO DE MALLICK (2008)).	65
FIGURA 16. OBTENÇÃO DE UM BARCO DE RECREIO POR MOLDAÇÃO MANUAL (ADAPTADO DE GAY, HOA E TSAI (2002)).	66

FIGURA 17. ESQUEMA DO PROCESSO DE MOLDAÇÃO POR COMPRESSÃO (ADAPTADO DE NICOLETTO, RIVA E STOCCHI (2016)).	67
FIGURA 18. BRAÇO DA SUSPENSÃO FRONTAL DO “LAMBORGHINI SESTO ELEMENTO” EM CFSMC, PRODUZIDO PELO PROCESSO DE MOLDAÇÃO POR COMPRESSÃO [27].	68
FIGURA 19. ILUSTRAÇÃO DE UMA MÁQUINA DE INJEÇÃO JUNTAMENTE COM O MOLDE (ADAPTADO DE AZAIEZ, CHIBA, CHINESTA E POITOU (2002)).	68
FIGURA 20. ESQUEMA DO PROCESSO AUTOMATED FIBER PLACEMENT (ADAPTADO DE DEBOUT, 2011).	70
FIGURA 21. VISTA DE UM MOLDE DE DUAS PLACAS (ADAPTADO DE KAZMER (2007)).	71
FIGURA 22. ESTRUTURA DE UM MOLDE DE INJEÇÃO (ADAPTADO DE KAZMER (2007)).	72
FIGURA 23. SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO: A) INDIRETO; B) DIRETO. A – CANAL DE INJEÇÃO DA BUCHA; CANAL DE DISTRIBUIÇÃO PRIMÁRIO; C- CANAL DE DISTRIBUIÇÃO SECUNDÁRIO; D – ENTRADAS OU PONTOS DE INJEÇÃO; E – PRODUTO MOLDADO; F – POÇO FRIO (ADAPTADO DE HARADA (2004)).	73
FIGURA 24. SISTEMA DE EXTRAÇÃO POR PLACA EXTRATORA (ADAPTADO DE HARADA (2004)).	74
FIGURA 25. REPRESENTAÇÃO DOS CANAIS DE REFRIGERAÇÃO (ADAPTADO DE HARADA (2004)).	75
FIGURA 26. POSTIÇOS COLOCADOS NAS PLACAS CAVIDADE E MACHO DO MOLDE (ADAPTADO DE DA CRUZ (2002)).	76
FIGURA 27. ESQUEMA DE UM MOLDE DE COMPRESSÃO E A SUA FIXAÇÃO AOS PRATOS DE UMA PRENSA (ADAPTADO DE CALLISTER E RETHWISH (2009)).	76
FIGURA 28. CALÇOS PARA VÃO DE EXTRAÇÃO (ADAPTADO DE HARADA (2004)).	78
FIGURA 29. DIAGRAMA DE ENCURVADURA; CARGAS DE EULER (ADAPTADO DE ROSATO (2000)).	80
FIGURA 30. REPRESENTAÇÃO NO PLANO DE UMA MALHA GROSSA DE UM DENTE DE UMA ENGRENAGEM (ADAPTADO DE COOK (1995)).	82
FIGURA 31. LOGÓTIPO DA EMPRESA SKYPRO.	87
FIGURA 32. EMPRESAS PARCEIRAS DA SKYPRO (FONTE: SKYPRO COMPANY PRESENTATION).	88
FIGURA 33. TRÊS MODELOS DE FIVELAS FORNECIDOS PELA SKYPRO PARA ANÁLISE E CARACTERIZAÇÃO.	90
FIGURA 34. DETALHE DOS ENCAIXES DE CADA UMA DAS FIVELAS.	90
FIGURA 35. GARRA PARA FIXAR AS FIVELAS À MÁQUINA DE ENSAIOS DE TRAÇÃO.	92

FIGURA 36 DIMENSÕES DA GARRA DE FIXAÇÃO.	92
FIGURA 37. EQUIPAMENTO DE ENSAIOS SHIMADZU AG-XPLUS 100 KN	95
FIGURA 38. CORTE EFETUADO PARA FACILITAR O ENCAIXE DA GARRA INFERIOR.	95
FIGURA 39. MONTAGEM DOS COMPONENTES NECESSÁRIOS PARA A EXECUÇÃO DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO.	96
FIGURA 40. MICROSCÓPIO OLYMPUS SÉRIE BX2	106
FIGURA 41. VÁRIOS CAMINHOS POSSÍVEIS PARA A OBTENÇÃO DA FIVELA EM MATERIAL COMPÓSITO.	110
FIGURA 42. REFORÇO DE FIBRA DE CARBONO NA FORMA DE TECIDO (FORNECEDOR TORAYCA).	111
FIGURA 43. REPRESENTAÇÃO DO PROCESSO DE MOLDAÇÃO MANUAL PARA OBTENÇÃO DA FIVELA.	111
FIGURA 44. REFORÇO DE FIBRA DE CARBONO NA FORMA DE FIO (FORNECEDOR TORAYCA).	112
FIGURA 45. BRAÇO ROBÓTICO DE DEPOSIÇÃO DE REFORÇO PRÉ-IMPREGNADO SOB A FORMA DE FIO.	112
FIGURA 46. ESQUEMA REPRESENTATIVO DO PROCESSO AUTOMÁTICO PARA OBTENÇÃO DA FIVELA COM REFORÇO DE FIBRAS CONTÍNUAS	113
FIGURA 47. PRIMEIRO GRÁFICO GERADO NO PROGRAMA CES EDUPACK PARA SE PROCEDER À SELEÇÃO DOS MATERIAIS.	115
FIGURA 48. GRÁFICO GERADO NO PROGRAMA CES EDUPACK REPRESENTATIVO DOS MATERIAIS RESULTADOS DA SELEÇÃO DOS MATERIAIS.	116
FIGURA 49. PRÉ-IMPREGNADO QUE ORIGINA O HEXMC (FONTE: HEXMC USER GUIDE [49]).	118
FIGURA 50. MATERIAL COMPÓSITO HEXMC [(FONTE: HEXMC USER GUIDE [49]).	118
FIGURA 51. ANÁLISE SWOT RELATIVA AO PROCESSO DE INJEÇÃO.	140
FIGURA 52. ANÁLISE SWOT RELATIVA AO PROCESSO DE COMPRESSÃO A QUENTE.	141
FIGURA 53. MOLDE DE INJEÇÃO.	142
FIGURA 54. PLACA DA CAVIDADE E POSTIÇO, ILUSTRANDO O SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO.	143
FIGURA 55. PLACAS E COMPONENTES INFERIORES DO MOLDE DE INJEÇÃO	143
FIGURA 56. DIMENSÕES CONSIDERADAS PARA O CÁLCULO DA ÁREA PROJETADA DA CAVIDADE.	146
FIGURA 57. POSIÇÃO ESQUEMÁTICA DOS CALÇOS E DA PLACA MACHO NO MOLDE DE INJEÇÃO (ADAPTADA HARADA (2004)).	148

FIGURA 58. ÁREA DE CONTACTO DE UM CALÇO DO MOLDE DE INJEÇÃO.	149
FIGURA 59. DIMENSÕES ADMITIDAS PARA O CÁLCULO DO PERÍMETRO DA CAVIDADE.	150
FIGURA 60. MOLDE DE COMPRESSÃO (101) – PLACA MACHO; (102) – PLACA CAVIDADE; (103) – CALÇO; (104) – PLACA INFERIOR DE SUPORTE; (105) – PLACA DE EXTRAÇÃO; (106) – PLACA SUPORTE DE EXTRAÇÃO.	157
FIGURA 61. DIMENSÕES CONSIDERADAS PARA O CÁLCULO DA ÁREA PROJETADA DA CAVIDADE.	159
FIGURA 62. POSIÇÃO ESQUEMÁTICA DOS CALÇOS E DA PLACA MACHO NO MOLDE DE COMPRESSÃO (ADAPTADA HARADA (2004)).	161
FIGURA 63. ÁREA DE CONTACTO DE UM CALÇO DO MOLDE DE COMPRESSÃO.	162
FIGURA 64. DIMENSÕES PARA O CÁLCULO DO PERÍMETRO DA CAVIDADE	163
FIGURA 65. ILUSTRAÇÃO DO SISTEMA DE EXTRAÇÃO E PARTE INFERIOR DO MOLDE DE COMPRESSÃO. (110) – EXTRATOR; (106) – PLACA SUPORTE DE EXTRAÇÃO; (105) – PLACA DE EXTRAÇÃO; (112) – BARRA DE EXTRAÇÃO; (111) – CILINDRO PNEUMÁTICO.	167

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1. PROPRIEDADES DOS MATERIAIS (ADAPTADO DE ASHBY E JONES (2006)).	44
TABELA 2. PROPRIEDADES DAS RESINAS TERMOENDURECÍVEIS (ADAPTADO DE DA SILVA, ALVES E MARQUES (2013)).	51
TABELA 3. PROPRIEDADES DE REFORÇOS E DE MATERIAIS NA SUA FORMA MACIÇA (ADAPTADA DE MOURA, MORAIS, MAGALHÃES (2011)).	53
TABELA 4. TENSÕES DE RUTURA DE ALGUNS COMPÓSITOS UNIDIRECIONAIS (ADAPTADA DE MOURA, MORAIS, MAGALHÃES (2011)).	61
TABELA 5. DESCRIÇÃO DE ALGUMAS FUNÇÕES DOS COMPONENTES DE UM MOLDE.	72
TABELA 6. COEFICIENTE DE EFICIÊNCIA DOS CANAIS DE ARREFECIMENTO (ADAPTADO DE HARADA (2004)).	81
TABELA 7. EQUIPAMENTOS NECESSÁRIOS PARA A PRODUÇÃO DO DISPOSITIVO.	93
TABELA 8. PARÂMETROS E ABORDAGEM DE MAQUINAÇÃO ESCOLHIDOS.	93
TABELA 9. VALORES MÁXIMOS NUMÉRICOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA PARA CADA UMA DAS FIVELAS ENSAIADAS.	97
TABELA 10. REGISTO FOTOGRÁFICO DAS RUTURAS DAS FIVELAS.	97
TABELA 11. RESULTADOS DA ANÁLISE MICROGRÁFICA EFETUADAS À ZONA DE RUTURA DAS FIVELAS.	101
TABELA 14. RESULTADOS DO ENSAIO EDS.	105
TABELA 12. METODOLOGIA PARA A PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA A ANÁLISE METALOGRAFICA.	106
TABELA 13. REGISTO DAS MICROGRAFIAS DAS AMOSTRAS FIVELA 2, 3, 6 E 7.	108
TABELA 15. COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO MATERIAL ZAMAK 3 (FONTE: EASTERN ALLOYS INC.).	114
TABELA 16. PROPRIEDADES MECÂNICAS E FÍSICAS DO MATERIAL ZAMAK 3 (FONTE: EASTERN ALLOYS INC.).	114
TABELA 17. PROPRIEDADES E TENSÕES DE RUTURA DO COMPÓSITO UNIDIRECIONAL C(T300)/EPOXY(934) [18].	117
TABELA 18. PROPRIEDADES DOS MATERIAIS IXEF 1032 E HEXMC [47, 49].	117
TABELA 19. MODELOS DAS FIVELAS CONSIDERADAS NO ESTUDO.	120

TABELA 20. DESCRIÇÃO DAS CONDIÇÕES FRONTEIRAS E PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO EFETUADA NA FIVELA Nº 2.	121
TABELA 21. PROPRIEDADES DO COMPÓSITO UNIDIRECIONAL C(T300)/EPOXY(934) [18].	124
TABELA 22. PROPRIEDADES DOS MATERIAIS DE FIBRAS CURTAS USADAS NAS SIMULAÇÕES.	124
TABELA 23. SIMULAÇÕES COM O MATERIAL ZAMAK 3.	125
TABELA 24. SIMULAÇÕES COM OS MATERIAIS COMPÓSITOS.	127
TABELA 25. SIMULAÇÃO COM O MODELO FIVELA Nº2 COMPOSTO POR UM VEIO MACIÇO E ARO EXTERIOR.	130
TABELA 26. SIMULAÇÃO COM O MODELO FIVELA Nº 2 EM MATERIAL IXEF 1032.	132
TABELA 27. SIMULAÇÃO DO MODELO DE FIVELA Nº 2 COM O MATERIAL HEXMC.	134
TABELA 28. ALTERAÇÕES GEOMÉTRICAS DO MODELO FIVELA Nº1 E MODELO FIVELA Nº 2.	135
TABELA 29. RESUMO DOS RESULTADOS DAS DIFERENTES SIMULAÇÕES.	136
TABELA 30. REDEFINIÇÃO DA GEOMETRIA DO PRODUTO.	138
TABELA 31: PARÂMETROS RECOMENDADOS DE INJEÇÃO [44].	139
TABELA 32. LISTA DE COMPONENTES DO MOLDE DE INJEÇÃO.	144
TABELA 33. VARIÁVEIS PARA O CÁLCULO DA FORÇA DE FECHO.	146
TABELA 34. VARIÁVEIS PARA O CÁLCULO DA ÁREA DE CONTACTO.	147
TABELA 35. VARIÁVEIS PARA O DIMENSIONAMENTO DOS CALÇOS E ESPESSURA MÍNIMA DA PLACA MACHO.	148
TABELA 36. VARIÁVEIS PARA O CÁLCULO DA FORÇA DE EXTRAÇÃO.	150
TABELA 37. VARIÁVEIS PARA O DIMENSIONAMENTO DOS EXTRATORES.	151
TABELA 38. VARIÁVEIS PARA O CÁLCULO DO ESFORÇO DE CORTE.	152
TABELA 39. VARIÁVEIS PARA O DIMENSIONAMENTO DAS GUIAS PRINCIPAIS.	153
TABELA 40. VARIÁVEIS PARA O DIMENSIONAMENTO DOS PERNOS DE RETORNO.	154
TABELA 41. VARIÁVEIS PARA O CÁLCULO DA QUANTIDADE DE CALOR A RETIRAR ÀS PEÇAS.	155
TABELA 42. VARIÁVEIS PARA O CÁLCULO DO CAUDAL DO FLUÍDO DE ARREFECIMENTO.	156
TABELA 43. LISTA DE COMPONENTES DO MOLDE DE COMPRESSÃO.	158
TABELA 44. VARIÁVEIS PARA O CÁLCULO DA FORÇA DE FECHO.	159

TABELA 45. VARIÁVEIS PARA O CÁLCULO DA ÁREA DE CONTACTO.	160
TABELA 46. VARIÁVEIS PARA O DIMENSIONAMENTO DOS CALÇOS E ESPESSURA MÍNIMA DA PLACA MACHO.	161
TABELA 47. VARIÁVEIS PARA O CÁLCULO DA FORÇA DE EXTRAÇÃO.	163
TABELA 48. VARIÁVEIS PARA O DIMENSIONAMENTO DOS EXTRATORES.	164
TABELA 49. VARIÁVEIS PARA O CÁLCULO DO ESFORÇO DE CORTE.	165
TABELA 50. VARIÁVEIS PARA O CÁLCULO DAS FORÇAS EQUIVALENTES APLICADAS NOS COMPONENTES DE EXTRAÇÃO.	166
TABELA 51. VARIÁVEIS PARA O DIMENSIONAMENTO DAS GUIAS PRINCIPAIS.	168

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	29
1.1	Enquadramento	29
1.2	Objetivos	30
1.3	Metodologia	30
1.4	Estrutura	31
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	35
2.1	Transporte aéreo e sua envolvente.....	35
2.1.1	Movimentação mundial de pessoas e bens	38
2.1.2	Problemas de segurança	40
2.2	Roupa e acessórios para tripulação de bordo.....	41
2.3	Materiais	43
2.3.1	Famílias de materiais.....	45
2.3.2	Materiais poliméricos.....	48
2.3.2.1	Polímeros termoplásticos	49
2.3.2.2	Polímeros termoendurecíveis.....	50
2.3.3	Materiais compósitos de matriz polimérica.....	52
2.3.3.1	Comportamento mecânico dos compósitos de fibras contínuas	55
2.3.3.2	Comportamento mecânico de compósitos de fibras curtas.....	61
2.4	Processos de fabrico ligados aos materiais compósitos de matriz polimérica.....	63
2.4.1	Semi-produtos.....	64
2.4.2	Moldação manual.....	66
2.4.3	Moldação por compressão.....	67

2.4.4	Moldação por injeção.....	68
2.4.5	Moldação automatizada de deposição de fibra (Automated fiber placement).....	69
2.5	Moldes metálicos.....	70
2.5.1	Molde de injeção.....	71
2.5.1.1	Sistema de alimentação.....	73
2.5.1.2	Sistema de extração.....	74
2.5.1.3	Sistema de refrigeração.....	74
2.5.1.4	Postiços.....	75
2.5.2	Molde de compressão.....	76
2.5.3	Projeto de moldes metálicos.....	77
2.5.3.1	Cálculo da força de fecho.....	77
2.5.3.2	Dimensionamento dos calços e da placa macho.....	77
2.5.3.3	Dimensionamento do sistema de extração.....	78
2.5.3.4	Cálculo do caudal do fluido de arrefecimento.....	80
2.6	Método dos elementos finitos.....	81
2.6.1	Princípio do método.....	82
3	DESENVOLVIMENTO.....	87
3.1	Caracterização da empresa (Abotoa, S.A.).....	87
3.2	Caracterização do problema.....	89
3.3	Requisitos.....	90
3.4	Caracterização inicial da fivela.....	91
3.4.1	Ensaio de tração.....	91
3.4.1.1	Dispositivo especial para auxílio no ensaio de fivelas.....	91
3.4.1.2	Condições estipuladas para os ensaios.....	95
3.4.1.3	Resultados dos ensaios.....	96

3.4.1.4	Análise das superfícies e modos de fratura	97
3.4.1.5	Análise crítica	103
3.4.2	Análise da composição química	104
3.4.2.1	Metodologia de ensaio EDS (Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy)	104
3.4.2.2	Resultados.....	104
3.4.3	Análise metalográfica	105
3.4.3.1	Metodologia de preparação das amostras	106
3.4.3.2	Resultados.....	108
3.4.3.3	Análise crítica dos resultados	109
3.5	Tempestade de ideias/anteprojeto (brainstorming).....	109
3.6	Estudo da matéria-prima a utilizar.....	114
3.6.1	Condições	114
3.6.2	Seleção de materiais	115
3.6.3	Conclusões da seleção de materiais.....	119
3.6.4	Possíveis fornecedores/mercado	119
3.7	Aplicação do Método de Elementos Finitos	120
3.7.1	Geometrias consideradas.....	120
3.7.2	Abordagem às simulações: condições fronteira e parâmetros	121
3.7.3	Simulações.....	125
3.7.4	Síntese de resultados	136
3.7.5	Análise crítica dos resultados	137
3.7.6	Necessidades de redefinição geométrica do produto.....	138
3.8	Processos de fabrico envolvidos	139
3.8.1	Descrição e parâmetros.....	139
3.8.2	Análise SWOT dos diferentes processos	140
3.9	Projeto das ferramentas necessárias	141

3.9.1	Molde de injeção	141
3.9.1.1	Cálculo da força de fecho.....	146
3.9.1.2	Área de contacto.....	147
3.9.1.3	Dimensionamento dos calços e da placa macho	148
3.9.1.4	Dimensionamento do sistema de extração	149
3.9.1.5	Verificação das guias principais	153
3.9.1.6	Dimensionamento dos pernos de retorno.....	154
3.9.1.7	Cálculo do caudal do fluido de arrefecimento	155
3.9.2	Molde de compressão	157
3.9.2.1	Cálculo da força de fecho.....	159
3.9.2.2	Área de contacto.....	160
3.9.2.3	Dimensionamento dos calços e placa macho	161
3.9.2.4	Dimensionamento do sistema de extração	162
3.9.2.5	Escolha do cilindro pneumático e ilustração do sistema de extração	165
3.9.2.6	Verificação das guias principais	167
4	CONCLUSÕES	171
4.1	Conclusões	171
4.2	Trabalhos futuros	172
5	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO	175
5.1	Bibliografia.....	175
5.2	Outras fontes de informação	177
6	ANEXOS.....	181
6.1	Anexo I	182
6.2	Anexo II.....	184

INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

1.2 Objetivos

1.3 Metodologia

1.4 Estrutura

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

Após a Segunda Guerra Mundial a aviação comercial assistiu a um grande desenvolvimento, transformando-se o avião num dos principais meios de transporte de passageiros e mercadorias. Ao longo dos anos, grupos de *designers*, engenheiros e operacionais altamente qualificados e inovadores têm desenvolvido e aperfeiçoado o transporte aéreo, permitindo o seu funcionamento com extrema segurança e fiabilidade.

Em todo o mundo existem funcionários nos aeroportos ajudando os milhões de pessoas que voam a bordo dos aviões, permitindo a estas usufruir do seu voo ao máximo. Além desses, um número elevado de controladores de tráfego aéreo comunica com os pilotos das aeronaves, garantindo que o percurso é feito em rotas já definidas, aumentando assim a sua segurança através dos céus. A bordo, a tripulação encarrega-se de acolher os passageiros, indicando-lhes os seus lugares, fazendo avisos e garantindo a sua comodidade.

O número de cidadãos que utilizam o avião como principal meio de transporte tem vindo a aumentar, tirando vantagem da descida drástica dos preços dos bilhetes nas últimas décadas. O seu desejo de ver o mundo e fazer negócios globalmente levou à necessidade de se abrirem novas rotas, contruírem novas infraestruturas, novos aviões, aumentar o número de funcionários e acautelar ainda mais a segurança. Devido ao número elevado de pessoas que passa todos os dias através dos aeroportos, estes locais apresentam-se como potenciais alvos para o terrorismo e outras formas de crime. Existem regras, métodos e equipamentos específicos, aos quais os passageiros e funcionários são submetidos, tais como detetores de metais e máquinas raio-x que causam perda de tempo e momentos de maior constrangimento. Deste modo, é da maior relevância o desenvolvimento de produtos constituídos por elementos não metálicos permitindo assim, tanto à tripulação como aos passageiros, ultrapassar estes mecanismos de segurança com maior fluidez.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo principal o estudo e desenvolvimento de uma fivela não detetável nos equipamentos detetores de metais, presentes nos aeroportos.

Para que o resultado final seja passível de ser atingido, estabeleceram-se os seguintes objetivos intermédios:

- Pesquisa bibliográfica sobre os conteúdos abordados neste trabalho;
- Proceder ao estudo geométrico de um conjunto de amostras de fivelas metálicas existentes no mercado e reprodução de um modelo 3D, recorrendo-se a *software* de desenho computacional;
- Desenvolver e produzir uma garra de fixação, para auxiliar a colocação das amostras na máquina de tração;
- Executar ensaios de tração para se analisar a resistência mecânica do produto em estudo;
- Efetuar ensaio de espectroscopia de energia dispersiva (EDS) e de metalografia;
- Recorrendo-se ao *software* ABAQUS®, simular o modelo e analisar os resultados obtidos;
- Comparar processos de fabrico para produção do componente não metálico;
- Projetar e desenvolver ferramentas complementares aos processos de fabrico, nomeadamente moldes metálicos;
- Fazer uma análise crítica aos resultados.

1.3 Metodologia

Com o intuito de serem cumpridos os objetivos anteriormente descritos, seguiu-se o seguinte procedimento:

- Análise geométrica de amostras do produto já existente no mercado e desenho em *software* apropriado, obtendo-se um modelo 3D;

- Elaboração de um esboço da garra de fixação para auxiliar nos ensaios de tração;
- Desenho e simulação com programas *Computer-Aided Design* e *Computer-Aided Manufacturing* (CAD/CAM) e com recurso a uma máquina com *Computer Numeric Control* (CNC), obtenção da garra de fixação;
- Ensaios de tração a várias amostras de fivelas;
- Ensaios de metalografia;
- Ensaio de EDS para obtenção da composição química do produto;
- Simulação de fivelas parametrizadas em modelação 3D com recurso ao *software* ABAQUS®;
- Análise crítica dos resultados obtidos nos ensaios mecânicos e na simulação;
- Análise aos processos de fabrico envolvidos;
- Projeto de ferramentas (molde de injeção e molde de compressão);
- Conclusões de todo o projeto desenvolvido;
- Elaboração da presente dissertação.

1.4 Estrutura

Esta dissertação está dividida em quatro grandes capítulos: a Introdução onde se integra o leitor sobre a finalidade deste projeto; a Revisão Bibliográfica onde se procede a uma abordagem teórica sobre os conteúdos relacionados com este trabalho; o Desenvolvimento onde se descreve todos os resultados obtidos de forma progressiva; e por fim conclui-se, critica-se os resultados e apresenta-se os trabalhos futuros.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Transporte aéreo e sua envolvente

2.2 Roupa e acessórios para tripulação de bordo

2.3 Materiais

2.4 Processos de fabrico ligados aos materiais compósitos de
matriz polimérica

2.5 Moldes metálicos

2.6 Método dos elementos finitos

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Transporte aéreo e sua envolvente

Transporte é definido como todas as atividades que permitem o movimento de pessoas, animais, matérias-primas ou mercadorias de uma origem para um novo destino. Dos vários modos de transporte existentes, destacam-se os rodoviários, ferroviários, marítimos e aéreos. Cada um destes transportes contempla diferentes infraestruturas e diferentes tipos de veículos e rege-se por procedimentos e normas exclusivas. O transporte aéreo oferece como vantagem a velocidade, a confiança e segurança, mas com um custo muito mais elevado em comparação com outros meios de transporte. Com o progresso contínuo, as pessoas tornaram-se capazes de viajar longas distâncias e alcançarem novos destinos de uma forma mais rápida, comparativamente ao passado [1].

Dando foco ao transporte aéreo, este é considerado um dos maiores pilares da movimentação moderna. Desde o primeiro voo atravessando o Oceano Atlântico, sem escalas, que *Charles Lindbergh* efetuou em 1927, este modo de transporte transformou-se definitivamente num dos motores do comércio e das viagens a nível global. Incorporando aviões e os respetivos fabricantes, aeroportos, companhias aéreas, os serviços de controlo de tráfego aéreo, legislação e regulamentação, este sistema tem assistido a um crescimento sustentado, incutindo desafios às diferentes áreas da engenharia, levando assim à necessidade de mais investigação e desenvolvimento de métodos avançados de resolução de problemas [2].

Existem vários tipos de aeronaves, desde as mais conhecidas de asas fixas, a helicópteros e mais recentemente os sistemas não tripulados. Estes veículos assumem-se como os elementos mais reconhecidos dentro do universo do transporte aéreo. O perfeito avião é descrito como um aparelho com capacidade de voar constantemente, sem consumo de combustível, não necessitando de manutenção nem sofrendo deterioração. Não produziria qualquer tipo de ruído e seria operado a partir de um pequeno local situado no solo. Apesar de este sonho ser

impossível de ser alcançado, engenheiros apostando na investigação, têm-se dedicado e feito um notável esforço para alcançar ou melhorar qualquer um destes aspetos [2].

A Figura 1 fornece uma separação dos vários constituintes deste sistema complexo que tem como objetivo principal prestar um serviço de transporte de passageiros e carga. As companhias aéreas são responsáveis pela operação dos aviões e promovem o transporte aéreo como um produto a ser vendido. Os serviços de navegação aérea garantem o controlo aéreo e o fluxo de aviões ao redor do mundo, seguro e programado. Por outro lado, os aeroportos têm um papel determinante neste grande sistema, providenciam infraestruturas e garantem a ligação entre o solo terrestre e o meio aéreo. A política em geral, representada pelos organismos internacionais, desenvolve e aplica a estrutura legal e exerce um papel fundamental na regulamentação deste sistema. De salientar que outros meios de transporte operam para complementar este serviço e, ao mesmo tempo, competem com ele. Tal como as referenciadas, muitas outras partes interessadas, como as agências de viagens, grupos prestadores de serviços ou manutenção, a aviação militar e a aviação em geral, também pertencem e contribuem para este grande sistema. Contudo a responsabilidade ambiental em termos de alterações climáticas e impacto sonoro têm-se tornado numa grande preocupação para esta indústria [1].

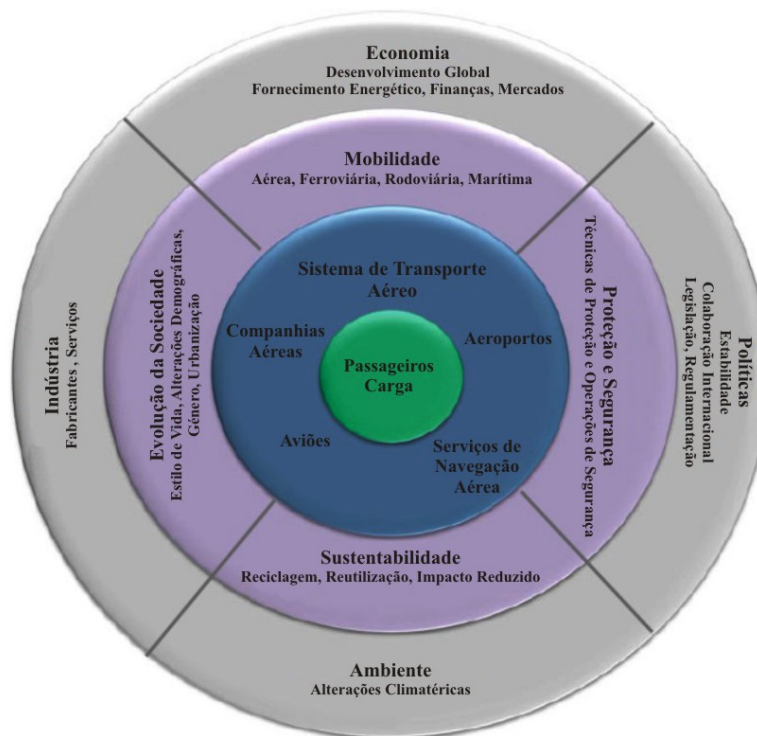


Figura 1. O sistema de transporte aéreo e a sua envolvente (Adaptado de Schmitt e Gollnick (2016)).

No início da aviação comercial, o transporte aéreo era considerado uma estratégia nacionalizada que munia de oportunidades a sociedade de cada país. Assim, cada companhia aérea era detida pelos países respetivos, e era usada como estratégia de *marketing* para mostrar a imagem e o poder de cada nação. O negócio principal das companhias aéreas foi e é o transporte de pessoas ou carga, em longas distâncias, o que possibilita a abertura de portas a novos negócios e uma maior troca comercial entre países. O serviço que elas oferecem depende diretamente do modelo de negócio. Como as companhias nacionais tiveram a sua origem histórica no desejo de haver uma ligação a países estrangeiros, a oferta destas companhias é tipicamente voos intercontinentais de longo curso. Estes voos são executados recorrendo a aviões com grande capacidade como *Airbus A380* ou o *Boeing B747-8*. A recente e forte mudança no tipo de negócio tem vindo das companhias aéreas denominadas *Low Cost*. Elas concentram-se em fornecer o serviço dentro de um continente, praticam baixas tarifas, eliminam custos de serviços oferecidos pelas companhias mais tradicionais e reduzem ao máximo despesas relacionadas com funcionários [1, 2].

O aeroporto é um elemento essencial, que permite o acesso de passageiros e carga para o avião na origem para o destino. Tem por outro lado um papel importante para uma cidade ou região. É uma janela para o mundo exterior e é de todo o interesse o seu desenvolvimento. Pode ter uma simples estrutura com uma pequena pista de descolagem/aterragem, um edifício preparado para receber os passageiros, tratar das bagagens, balcões para o *check-in* e uma base para preparar o voo e o avião. Por outro lado, existem aeroportos enormes, com capacidade para receber grandes quantidades de passageiros e de aviões por dia, com infraestruturas sofisticadas, hotéis, centros de conferências e áreas de comércio. Dependendo da sua finalidade, um aeroporto pode ser classificado como:

- Aeroporto internacional;
- Aeroporto nacional;
- Aeródromo militar;
- Heliporto.

Um aeroporto com elevado número de passageiros por ano é um ótimo ativo para se gerar receita. A maioria dos aeroportos internacionais geram muita receita com serviços adicionais. Assim, é do maior interesse cativar os passageiros a manterem-se o maior tempo possível dentro das instalações dos aeroportos [1].

O transporte aéreo será um dos grandes pilares da mobilidade no futuro. Como descrito no *ACARE Vision 2020* [3], este sistema de transporte teve um intenso crescimento nas últimas décadas. Este documento descreve que, espectavelmente, até 2020 existirá um crescimento que triplicará a movimentação de passageiros e duplicará o número de aviões no espaço aéreo Europeu, em comparação com o ano de 2015 [3]. Esta maior quantidade de aeronaves prevista causará limitações nos aeroportos e espaço aéreo, principalmente na Europa e América do Norte. Em zonas em crescimento como a Ásia e a América do Sul, não se atingirá ainda esses limites. Ao mesmo tempo, o aspeto ambiental tornou-se um objetivo inevitável para o desenvolvimento futuro. Uma vez que o *Vision 2020* provavelmente não será alcançado, a *European Aviation Community* desenvolveu a visão *Flighpath 2050* para as próximas quatro décadas, com o objetivo de reduzir em 75% as emissões de CO₂ [4].

2.1.1 Movimentação mundial de pessoas e bens

Desde os primórdios da era humana, a mobilidade foi um pré-requisito para a sobrevivência e evolução. Durante séculos, a movimentação humana também se tornou um pilar essencial para a prosperidade e bem-estar. Mobilidade, por definição, é a habilidade das pessoas se moverem de uma localização para outra, podendo ser efetuada por diversos tipos de transporte. Indivíduos têm a capacidade de se moverem individualmente ou em grupo, a pé ou em bicicletas, carros, barcos ou até mesmo aviões. Com o desenvolvimento natural da tecnologia, foi possível viajar distâncias mais longas e alcançar lugares longínquos mais rapidamente. Como exemplo, primitivamente, uma deslocação de 50 km poderia ultrapassar as nove horas de viagem. Hoje em dia, com a mesma duração, poder-se-á alcançar a maior parte dos continentes. Este progresso tecnológico associado aos baixos preços dos bilhetes de transportes, bem como à expansão do acesso à Internet e o recurso ao Inglês como língua de trabalho global, facilitou a pessoas de diferentes classes, culturas e origem geográfica, terem a oportunidade de partilhar informação e se relacionarem em qualquer parte do Mundo [1, 5].

Os indivíduos deslocam-se por motivos de trabalho, lazer, família ou migração. É uma necessidade estar fisicamente num espaço com vários outros, incluindo colegas de trabalho, amigos, família, ou só pelo simples facto de conhecer novos lugares e observar novas paisagens. Poderá existir a exceção devido à existência de guerra e assim o movimento não ser opcional, mas sim por uma questão de sobrevivência. Já o movimento de objetos e bens de produtores

para consumidores tem outra finalidade. Esta troca mundial resulta da forma como o Mundo é colocado em exposição e a facilidade com que clientes compram e usufruem dos produtos adquiridos em supermercados locais, restaurantes, shoppings ou até mesmo obtidos pela Internet [6].

A mobilidade à volta do mundo é o estado de arte dos dias de hoje. Sem este fluxo de bens, serviços, pessoas e ideias, as cidades começariam a vacilar, as economias diminuiriam em termos de crescimento e a sociedade degradar-se-ia. Este intercâmbio social, aliado ao crescimento das cidades e da mobilidade mundial tem contribuído não só para a sustentabilidade da atividade humana, bem como para a globalização da economia [6].

Uma quantidade fixa de pessoas ou uma carga podem ser transportadas com recurso a um grande número de veículos de transporte com uma capacidade limitada, ou ser utilizado um menor número de veículos, mas com maior capacidade de armazenamento. Este é um aspeto da maior importância em termos de utilização de energia e na criação de formas de transporte eficiente. Dependendo do tipo de viagem e da distância, se o problema de capacidade estiver relacionado com o veículo de transporte e se este não estiver ocupado a 100%, poder-se-á aumentar a carga ou o número de pessoas, o que o torna mais eficiente. Por outro lado, se o problema for o fluxo de transporte, no futuro, será necessário proceder-se ao aumento das infraestruturas, como os aeroportos, rodovias ou estações ferroviárias para amenizar o problema [1].

Neste contexto o transporte aéreo fornece capacidades únicas, é o mais rápido e o que oferece o melhor desempenho, comparativamente com os outros meios de transporte. Além disso, não está limitado a qualquer fronteira continental. Este transporte pode ligar cidades de qualquer parte do Mundo sem ser impedido por barreiras naturais como oceanos ou montanhas. Desta forma desempenha um papel vital nas trocas internacionais e no desenvolvimento do turismo. Segundo a *International Air Transport Association* (IATA), em 2015 as companhias aéreas mundiais transportaram em segurança 3,5 biliões de pessoas (um crescimento de 240 milhões comparado com o ano transato) e 51 milhões de toneladas de carga. Conseguiram alcançar estes

valores devido a um grupo de cerca de 10 milhões de colaboradores, uma frota de 26 mil aviões e uma média de 100 mil voos por dia numa rede mundial composta por 51 mil rotas [7].

2.1.2 Problemas de segurança

Nos dias que correm habita-se um Mundo cada vez mais complexo, onde a ameaça constante de terrorismo é um facto bem presente. Nenhuma parte do globo está imune e o transporte aéreo tem sido um alvo de excelência para terroristas que procuram divulgar a sua causa e promover os seus objetivos no cenário internacional. Enquanto os números de ataques caíram significativamente, a ameaça não. A emergência nas últimas décadas do fundamentalismo religioso e de terroristas suicidas apresenta-se como uma verdadeira ameaça para a aviação civil. Este aterrorizar constante é lembrado com a tragédia de 11 de setembro de 2001 ou, mais recentemente e com escala inferior, no aeroporto de Bruxelas a 22 de março de 2016 [8].

Os governos são os parceiros mais próximos da aviação no campo da segurança. Fundamentalmente, são estes a quem compete a responsabilidade de garantir a segurança nacional, já que têm um vasto leque de recursos e maior aptidão em comparação com esta indústria. A aviação confia nas entidades governamentais, para que estas forneçam orientação e informação de modo a garantir-se principalmente a segurança dos passageiros e da tripulação. Após o ataque de 11 de setembro, foram introduzidas consideráveis mudanças na segurança aérea, incluindo a criação de zonas de triagem nos aeroportos, utilização de monitores raio-x para uma revista a 100% das bagagens para procura essencialmente de explosivos e detetores de metais para inspeção dos passageiros. Os Estados Unidos da América foram ainda mais longe e aumentaram significativamente o número de *Marshals* a bordo dos aviões, para uma maior proteção dos voos, e criaram uma lista de indivíduos identificados como possível ameaça nacional para assim negarem o embarque destes para território americano ou sujeitá-los a um maior controlo nos aeroportos [7, 9].

A triagem nos aeroportos antes do embarque de passageiros e bagagens faz parte da rotina de uma viagem aérea. Os viajantes adicionam automaticamente este fator nos seus planos, quando têm a intenção de viajar. A investigação e desenvolvimento levados a cabo nesta área melhorou a qualidade e aumentou a oferta de equipamentos a serem utilizados nos locais dos aeroportos

destinados à segurança. *Chris Yates*, analista de segurança aérea no *Jane's Information Group*, afirmou que frequentemente os passageiros são apenas submetidos a uma simples passagem por um detetor de metal, antes de lhes ser permitido a entrada no avião [8]. Tal rudimentar medida de segurança mostrou muitas vezes ser insuficiente na segurança de uma viagem de avião. Tal comentário reflete as deficiências reconhecidas em muitos destes equipamentos. Estes simplesmente não detetam todas as formas de armas perigosas. Mesmo com tais debilidades, os detetores de metais continuam a ser da maior importância para garantir a segurança dos aeroportos. É claro que a deteção e o reconhecimento de uma arma, tanto por via de detetores de metais, ou por máquinas de raio-x, poderá não ser suficiente. É um trabalho que depende também da competência do operador. Por razões óbvias, é mais difícil detetar uma bomba do que uma arma. Os terroristas não submetem as bagagens para revista com etiquetas afirmando “frágil, bomba incluída”. Ou procuram detonar uma bomba dentro do aeroporto, antes da segurança, como foi o caso do ataque ao aeroporto de Bruxelas, ou então em pleno voo. Infelizmente, neste sentido, o avanço tecnológico tem permitido o contornar da segurança por parte destes extremistas [8].

Atualmente, zonas melhoradas de controlo de segurança nos aeroportos proporcionam uma melhor deteção por meio do uso de scanner e máquinas de raio-X de multi-vistas, equipadas com sistemas de deteção de explosivos, mais rápidas e precisas que os seus antecessores. Contudo, a reação do público após os ataques de 11 de setembro de 2001 às medidas de segurança adotadas tem sido positiva, embora este seja sempre um fator criador de algum aborrecimento [8].

2.2 Roupas e acessórios para tripulação de bordo

Por cada voo efetuado, de entre os milhares que ocorrem por dia, existe um conjunto de colaboradores pertencentes a uma determinada companhia aérea que garantem o bom funcionamento do avião, o bem-estar e a segurança dos passageiros. Denominados por membros de tripulação, é recorrente fazer-se a distinção entre tripulação de cabine e tripulação de voo. Os primeiros, também designados por hospedeira/o de bordo, desempenham funções de segurança na cabine dos viajantes, possuem qualificações e o dever para desempenharem

procedimentos de evacuação do avião em situações de emergência. Os segundos incorporam os pilotos e os copilotos, membros essenciais para operarem as aeronaves comerciais [10].

A tripulação de cabine tem um elevado grau de contacto com os passageiros, sendo essencial transmitir uma imagem positiva da companhia aérea à qual pertencem. Uma parte dessa imagem é transmitida pelo uniforme que utilizam, bem como pelo compromisso pessoal para desempenhar a sua função. Sempre que têm o uniforme colocado, têm de ter especial atenção à sua postura, linguagem e apresentação pessoal. É essencial terem um comportamento que vá ao encontro das normas da empresa que representam [11].

É reconhecido que o uniforme de toda a tripulação de bordo representa a imagem de marca da companhia aérea que os emprega. É também importante que este seja desenhado e produzido com o objetivo em mente de ser prático. Os materiais usados e o estilo escolhido para o uniforme não devem afetar a habilidade da tripulação para executar os seus deveres. Por não existirem regras específicas de como devem ser produzidos os uniformes, e uma vez que estes são da inteira responsabilidade das companhias aéreas, a *International Air Transport Association* e a *Flight Safety Foundation* fazem as seguintes recomendações [10]:

- As companhias aéreas devem ter em conta o local e o clima de destino para que a roupa a ser usada seja adaptada e adequada nessas mesmas condições climáticas;
- Os uniformes devem ser distinguidos e fáceis de identificar num eventual cenário de emergência;
- A roupa deve ser confortável e permitir um movimento livre;
- As companhias aéreas devem considerar o uso de materiais que forneçam proteção do calor radiante;
- Se forem usadas insígnias, estas devem ser colocados sobre o casaco e a camisa, onde aplicável;
- Os sapatos ou botas devem ser planos ou de salto baixo e fechados com laços ou cintas, para não serem perdidos;
- Acessórios (ou seja, gravata, correntes, colares, lenços, etc.), ao serem utilizados, devem ter em consideração a segurança;
- Emblemas de metal devem ser concebidos de modo a não causar lesões;

- É recomendável que a tripulação use o seu uniforme completo na descolagem e na aterragem, para lhes oferecer melhor proteção na eventualidade de uma emergência e para uma melhor identificação por parte dos passageiros;
- Os uniformes devem oferecer resistência aquando de uma exposição a uma fonte de calor.

A tripulação precisa de ser capaz de exercer as suas funções com pouca preocupação com as suas roupas e acessórios. O trabalho desempenhado envolve um risco incerto, assim, o uniforme deverá ser destinado a vários ambientes e condições de trabalho.

2.3 Materiais

O número de materiais disponíveis para uma escolha por parte de engenheiros é vasto, a rondar os 120000 [12]. Embora a normalização tenda a reduzir este número, o continuo aparecimento de novos materiais, muito devido à inovação ocorrida nas últimas décadas, tem contribuído para o aumento do leque de opções. Aquando do desenvolvimento de um produto, a tarefa de escolher o material e o melhor processo de fabrico é normalmente atribuída ao projetista. Este procura alcançar a melhor solução, dependendo sempre da finalidade para que o produto será desenvolvido. A maioria destes objetos tem por fim uma utilização funcional, como a roda de água, a máquina a vapor ou a turbina a gás. Outros têm simplesmente aspeto decorativo, como uma escultura ou um quadro artístico. Um não conhecimento e compreensão na totalidade das propriedades de um material, por parte do projetista, poderá levar a objetos defeituosos e por consequência, à ocorrência de desastres. Servindo de exemplo, decorria o ano de 1912, quando o *Royal Mail Ship Titanic* embateu contra um iceberg que lhe danificou o casco, o que mais tarde foi suficiente para o afundar do navio. Uma análise metalográfica ao aço utilizado para a construção do *Titanic* revelou que este tinha uma temperatura de transição dúctil-frágil elevada, o que o tornava impróprio para ser usado a temperaturas baixas em serviço. Assim, uma melhor escolha do aço pelos construtores navais poderia ter evitado um dos maiores desastres do século passado [12, 13].

Para uma melhor compreensão, a Tabela 1 apresenta as principais propriedades que caracterizam os materiais e as quais, sendo conhecidas pelos projetistas, permitem uma escolha adequada para um determinado produto, dependendo sempre da função a desempenhar.

Tabela 1. Propriedades dos materiais (Adaptado de Ashby e Jones (2006)).

Económicas	Preço e disponibilidade	Térmicas	Condutividade térmica
	Reciclabilidade ⁰⁰ e		Calor específico
Físicas	Peso específico		Coefficiente de expansão térmica
Mecânicas	Módulo de elasticidade	Interação com o ambiente	Corrosão
	Tensão limite de elasticidade		Desgaste
	Tensão de rutura	Produtivas	Dificuldade em produzir
	Resistência à fadiga		Acabamento
	Dureza	Estéticas	Cor
	Resistência à fratura		Textura
	Ductilidade		
	Fluência		

A idade em que cada Homem viveu tem como apelido os materiais que este utilizou: Pedra, Bronze e Ferro. Nos dias que correm, não se presencia uma era de um só material, pois existe uma imensidão de materiais. Nunca houve uma época de tão rápido crescimento e com tamanha variedade de propriedades dos materiais. Evoluiu-se tão rápido que os projetistas que concluíram a sua vida académica há vinte anos atrás, atualmente não estão familiarizados com grande parte dos materiais que, entretanto, foram descobertos e melhorados.

Esta evolução e o seu ritmo de crescimento são ilustrados na Figura 2. Os materiais utilizados na pré-história foram principalmente os cerâmicos e os vidros, polímeros naturais e os compósitos, em que estes últimos, tornaram-se referência principalmente da construção de habitações recorrendo a pedra e palha. As armas - sempre a vanguarda da tecnologia - eram construídas a partir de pedras e madeira. O desenvolvimento da química permitiu primeiramente a extração de cobre e bronze, e mais tarde ferro, estimulando um enorme avanço na tecnologia. Nesta fase, a tecnologia do ferro fundido permitiu a este material o domínio dos metais na engenharia. Desde a evolução do aço (a partir de 1850) iniciou-se uma época em que os restantes materiais pouco ou nada eram escolhidos. Após 1960, a era pós-guerra, iniciou-se uma mudança. Nos anos

seguintes, o desenvolvimento de novas ligas metálicas abrandou e a indústria dos polímeros e dos compósitos teve um crescimento rápido, que se vem acentuando, muito por culpa da escolha de indústria como a aeronáutica e automóvel por este tipo de materiais [12, 14].

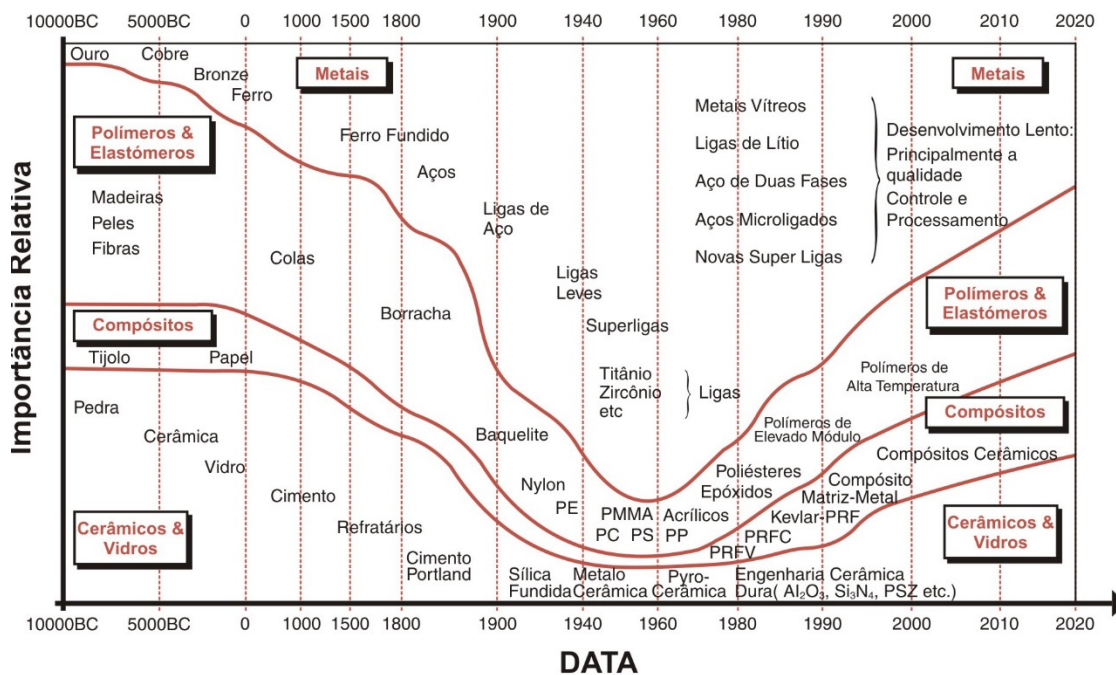


Figura 2. Evolução dos materiais (Adaptado de Ashby (2005)).

2.3.1 Famílias de materiais

Devido ao elevado número de materiais existente, é de toda a utilidade classificá-los segundo grupos de materiais, com características, propriedades, processos de fabrico e aplicações similares. A Figura 3 representa esquematicamente as seis famílias gerais: metais, polímeros, elastómeros, cerâmicos, vidros e os híbridos/compósitos.

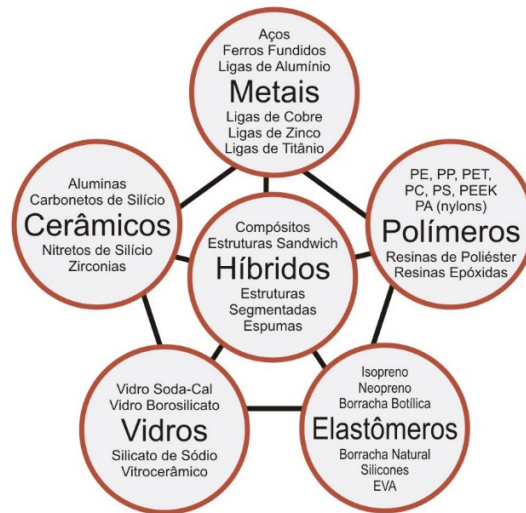


Figura 3 Famílias de materiais (Adaptado de Ashby (2005)).

Os metais têm elevado módulo de elasticidade, o que se traduz numa elevada rigidez. A maioria, quando puro, apresenta um aspeto suave, macio e é facilmente deformável. Quando misturados, e através de tratamentos mecânicos e ciclos térmicos, formam ligas metálicas mais resistentes, embora continuem a ter comportamento dúctil, o que possibilita serem deformados por processos de conformação. De todas as classes são os que apresentam menor resistência à corrosão. Os cerâmicos também têm um elevado módulo de elasticidade mas, contrariamente aos metais, apresentam comportamento frágil. E porque estes materiais não têm ductilidade, têm muito pouca tolerância a concentrações de tensões, como furos ou ranhuras, ou para tensões devido a contacto, como por exemplo, pontos de fixação. Os materiais dúcteis têm a capacidade de acomodar de uma forma mais uniforme as concentrações de tensões e, por isso, podem ser utilizados em solicitações estáticas ou dinâmicas, desde que não seja ultrapassado o seu limite de tensão de cedência. Pelo contrário, os cerâmicos não o podem. Assim, estes materiais têm uma utilização mais restrita que os metálicos. Todavia, têm características extremamente atraentes. São duros e resistentes à abrasão, daí o seu uso em rolamentos e ferramentas de corte. Mantêm também a sua resistência mesmo a altas temperatura e resistem bem à corrosão.

Os vidros são materiais não cristalinos (sólidos amorfos). Os mais conhecidos são o vidro soda-cal e o borossilicato, presentes em produtos como as garrafas e peças de loiça. A ausência de

uma estrutura cristalina impede a plasticidade. Assim como os cerâmicos, os vidros são duros, frágeis e vulneráveis a concentrações de tensão.

Os polímeros estão na outra extremidade do espectro. Têm módulos de elasticidade reduzidos e bastante inferiores aos dos metais. Um polímero pode ser resistente e flexível a 20°C, e a 4°C ser frágil. Poucos apresentam resistência satisfatória acima dos 200°C. Contudo, se estas características forem aceitáveis para o projetista, as vantagens dos polímeros podem ser exploradas. Quando a resistência específica for importante, ou seja, a resistência por peso específico, os polímeros são tão bons como os metais. São fáceis de moldar, apresentam boa resistência à corrosão e um baixo coeficiente de fricção.

Os elastómeros são compostos por longas cadeias de monómeros acima da sua temperatura de transição vítrea, T_g . As ligações covalentes que ligam as unidades da cadeia de polímeros permanecem intactas acima de T_g , mas as ligações de hidrogénio e de *Van der Waals*, que abaixo de T_g mantêm as cadeias intactas, fundem. Isto traduz-se em propriedades únicas por parte destes materiais. O módulo de elasticidade é muito baixo comparativamente ao dos metais e este cresce com a temperatura, ao contrário dos outros materiais, cujo valor tende a diminuir. Têm também uma elevada deformação elástica. Como as suas propriedades diferem tanto de família para família, foi necessário criar testes especiais para os caracterizar.

Por fim, a família dos híbridos/compósitos, que não são mais do que a combinação de dois ou mais materiais. Combinam as propriedades mais atrativas de um conjunto de materiais e, ao mesmo, tempo tenta-se evitar as piores. Este grupo inclui estruturas *sandwich*, espumas, laminados e também a maioria dos materiais naturais. Os compósitos reforçados com fibras são os mais conhecidos, compostos principalmente por uma matriz polimérica e reforços de fibras de vidro, carbono ou aramida (nome comercial *Kevlar*). Quando este ou outros híbridos utilizam polímeros como componente, não devem ser utilizados acima dos 250 C. Esta conjugação de materiais muita vezes é cara e difícil de moldar, mas o seu desempenho e a sua leveza justificam o investimento [12, 14].

2.3.2 Materiais poliméricos

Após a revolução industrial, começou-se a utilizar o metal em grande escala. A natureza sempre o fez, não com metais, mas com os polímeros. Quase todos os sistemas biológicos são constituídos a partir de polímeros, não só desempenhando funções estruturais (como ossos e cartilagem), mas também regulando reações químicas (como as células). O Homem sempre usou estes polímeros naturais, mas só a partir do século passado é que foi capaz de produzi-los sinteticamente. Por meio da cristalização, reticulação, ou por orientação das cadeias poliméricas, novos polímeros têm vindo a ser desenvolvidos. Estes novos métodos têm aumentado a resistência ao calor, bem como a resistência mecânica, o que permite abrir novos caminhos para a aplicação destes materiais. Como já referenciado, os polímeros têm menor resistência mecânica e menor rigidez comparativamente aos metais (Figura 4 e Figura 5) [14-17].

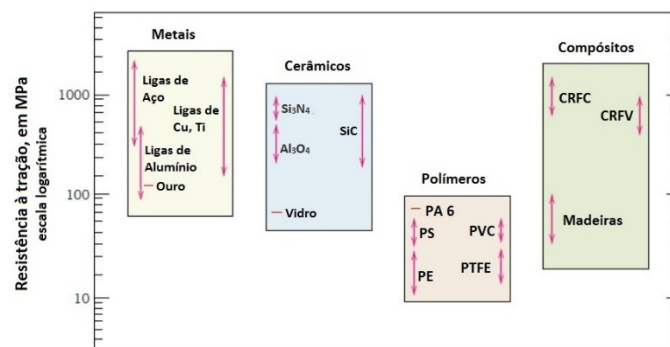


Figura 4. Resistência à tração das classes de materiais representados (Adaptado de Callister e Rethwish (2009)).

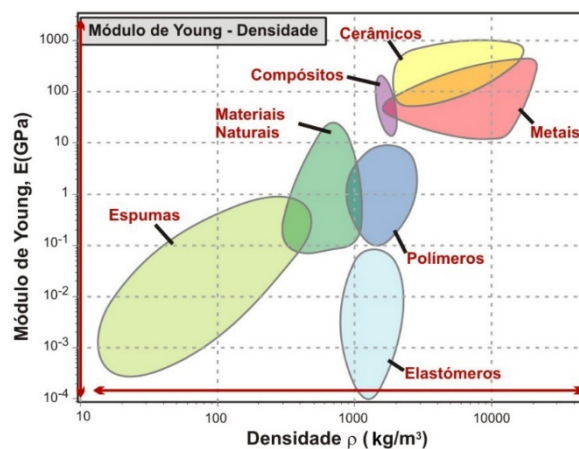


Figura 5. Gráfico de Ashby E vs. ρ (Adaptado de Ashby (2005)).

Todos os polímeros são constituídos por longas cadeias de átomos de carbono e hidrogénio (designadas monómeros), unidas entre si por ligações covalentes. A união de vários monómeros origina uma longa cadeia designada por macromolécula. Estas macromoléculas reagem quimicamente entre si, através de um processo denominado polimerização, que leva à formação de uma molécula de grandes dimensões, o polímero.

Na Figura 6 é feita a representação de um simples monómero e de um conjunto destes, originando um polímero. A designação destes materiais pode tornar-se por vezes complexa, pela variedade existente. No caso em que é usado um simples monómero, o prefixo “poli” é acrescentado ao nome do monómero (ex. etileno-polietileno; estireno-poliestireno). Em contrapartida, alguns polímeros resultam de dois tipos de monómeros que formam uma sequência alternada. Deste modo, o polímero obtido pela reação entre o etileno glicol e o ácido teraftálico designa-se por politereftalato de etileno (PET) [15-18].

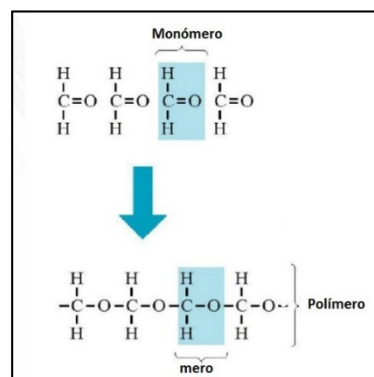


Figura 6. Representação de um monómero e de um polímero (Adaptado de Callister e Rethwish (2009)).

2.3.2.1 Polímeros termoplásticos

Os termoplásticos muitas vezes são apelidados de plásticos. O termo polímero é atribuído a uma representação ideal de uma estrutura de longas cadeias moleculares, enquanto o termo plástico é atribuído a um polímero com impurezas, resultantes do seu processamento e da inclusão de aditivos, intencionalmente para produzir efeitos específicos, quer durante o fabrico, ou numa fase já de produto acabado. A principal característica dos termoplásticos é a sua grande capacidade de se deformarem, após a aplicação de calor. Podem ser moldados e remoldados

(com o devido cuidado) sem que no final percam as suas propriedades. Aquando do seu arrefecimento, os que cristalizam parcialmente são designados por semi-cristalinos (Polietileno (PE), Polipropileno (PP), Poliamida (PA), etc.). Os restantes são intitulados de polímeros amorfos ou vítreos (Poliestireno (PS), Policarbonato (PC), Polimetil-Metacrilato (PMMA), etc.) (Figura 7). Os termoplásticos amorfos não são usados a temperaturas superiores à de T_g . Por outro lado, os parcialmente cristalinos podem ser usados acima da T_g e abaixo da temperatura de fusão, T_f [16, 17].

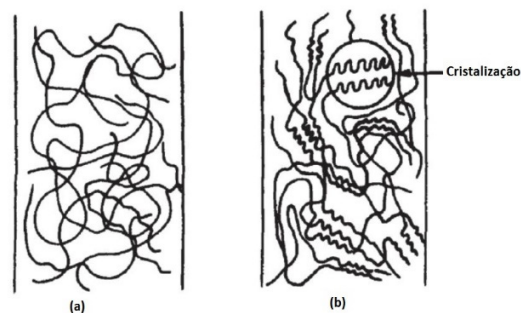


Figura 7. Arranjo molecular: (a) polímero amorfo e (b) polímero semi-cristalino (Adaptado de Mallick (2008)).

Os valores de resistência mecânica variam entre 10 a 100 MPa no estado de não reforçado (Figura 4). O módulo de Young varia entre 0,3 a 3 GPa (Figura 5). Contudo, estes valores raramente são utilizados em cálculo, já que estas propriedades dependem muito da temperatura de serviço e do tempo de carga. A fluência dos termoplásticos (que relaciona o aumento da deformação com o tempo sob carga/tensão constante) é muito mais elevada do que a dos metais. A temperaturas altas, após prolongada solitação de cargas, ou com as duas condições em simultâneo, ocorre uma perda considerável da resistência mecânica [14-17].

2.3.2.2 Polímeros termoendurecíveis

Os termoendurecíveis, também designados por resinas (Tabela 2), resultam normalmente da mistura dos componentes (resina, catalisador e endurecedor), que reagem e endurecem à temperatura ambiente ou a altas temperaturas. O produto final obtido é densamente reticulado (ligações covalentes por todo o polímero), e também é conhecido por polímero em rede tridimensional.

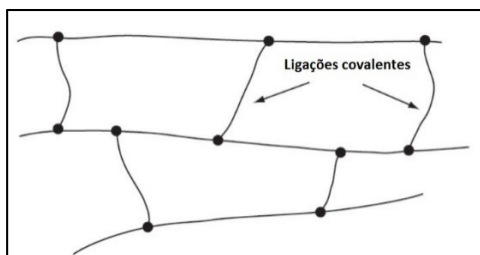


Figura 8. Representação esquemática de um polímero termoendurecível (Adaptado de Mallick (2008)).

A ligação gerada durante a polimerização da resina no estado líquido, juntamente com o endurecedor e o catalisador, gera uma estrutura amorfa. Esta ligação impede, no endurecimento, a fusão ou o escoamento viscoso como nos termoplásticos. Deste modo, os termoendurecíveis, não podem ser conformados a quente após o endurecimento. Aquecendo-se em demasia o material, este decompõe-se. Este processo, geralmente designado por cura é irreversível, o que não permite a reciclagem por ação térmica. Os epóxidos e os poliésteres são os termoendurecíveis mais genéricos, maioritariamente usados em matrizes poliméricas reforçadas com fibras. Os epóxidos são usados em larga escala no fabrico de adesivos para ligações estruturais [14-17].

Tabela 2. Propriedades das resinas termoendurecíveis (Adaptado de Da Silva, Alves e Marques (2013)).

Material	Peso específico $10^3(\text{kg}/\text{m}^3)$	Módulo de Young (GPa)	Resistencia à tração (MPa)	Deformação na rutura (%)	Dureza Vickers	Aplicações
Epóxida	1,1-1,4	2-5	50-100	2-8	10-20	Matriz de compósitos, adesivos
Poliéster insaturado	1,1-1,5	2-4,5	40-90	2,2,5	10-20	Matriz de compósitos
Viniléster	1,1-1,2	3,5-4	65-85	3-6	-	Elevada resistência química, por isso muito utilizada com reforço em tubagens e reservatórios
Fenólica	1,2-1,5	2,5-4,5	30-60	1-3	8-15	Matriz de compósitos, adesivos

2.3.3 Materiais compósitos de matriz polimérica

Os compósitos resultam da junção de dois ou mais materiais distintos a nível macroscópico. A Figura 9 representa esquematicamente as várias subcategorias deste tipo de materiais. O exemplo típico e mais vulgar de materiais compósitos são os reforçados com fibras, que resultam da dispersão de fibras num material ligante, designado por matriz. A Figura 10 ilustra as diferenças entre reforços de fibras contínuas, descontínuas e a sua orientação.

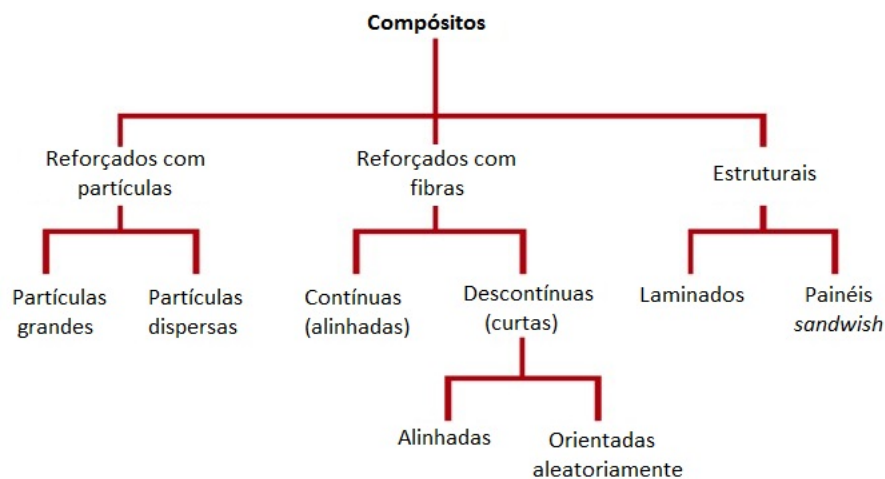


Figura 9. Classificação dos vários tipos de compósitos (Adaptado de Callister e Rethwish (2009)).

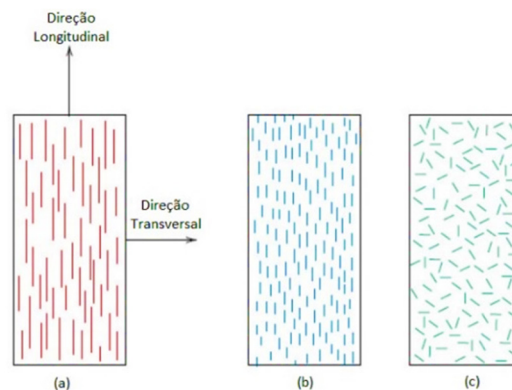


Figura 10. Representação esquemática dos reforços fibrosos (a) fibras contínuas e alinhadas, (b) descontínuas e alinhadas, (c) descontínuas e orientadas aleatoriamente (Adaptado de Callister e Rethwish (2009)).

Os compósitos de matriz polimérica, muito utilizados na indústria aeronáutica, aeroespacial e automóvel, em componentes desportivos e elétricos, aliados ao seu baixo peso específico, possuem boas características mecânicas (Figura 4 e Figura 5), o que lhes permite ser uma boa solução ao uso tradicional de materiais metálicos. Uma das principais razões destas boas

propriedades mecânicas resulta do facto de as fibras, no seu estado maciço, apresentarem valores mais elevados em comparação com os outros materiais. A Tabela 3 representa a comparação entre propriedades de diferentes reforços e de materiais convencionais. Desta forma consegue-se, de um modo geral, confirmar essa diferenciação.

Tabela 3. Propriedades de reforços e de materiais na sua forma maciça (Adaptada de Moura, Morais, Magalhães (2011)).

Material Fibra	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração (MPa)	Peso específico (kg/m³)	Módulo específico (E/ρ)	Resistencia específica (σ_u/ ρ)
Vidro E	72	3,5	2,54	28,5	1,38
Vidro S	87	4,3	2,49	35,0	1,70
Carbono (Pitch)	690	2,2	2,15	321	1,00
Carbono (PAN)	345	3,1	1,85	186	1,24
Aramida	131	3,6	1,45	90	2,48
Materiais convencionais					
Aço	210	0,34-2,2,1	7,8	26,9	0,043-0,27
Ligas de Alumínio	70	0,14-0,62	2,7	25,9	0,052-0,23
Vidro	70	0,7-2,1	2,5	28	0,28-0,84

Os compósitos são na maior parte das vezes materiais anisotrópicos, cujas propriedades variam em detrimento da direção. Tal deve-se ao facto de existir um alinhamento das fibras aquando do seu processamento. As fibras não podem ser utilizadas unicamente em aplicações estruturais, embora possuam um papel fundamental no desempenho final de um compósito. Cabe à matriz uniformizar as tensões pelas fibras, dar uma forma estável e proteger a superfície do compósito. A facilidade de processamento, juntamente com a baixa densidade, transformou este tipo de material num dos mais importantes para um vasto leque de aplicações. Embora as fibras de vidro sejam as mais utilizadas nos compósitos de matriz polimérica, tem-se assistido a uma utilização crescente de fibras de carbono como reforço [15-18].

O compósito que utiliza como reforço fibra de vidro pode ser composto por fibras contínuas ou descontínuas (fibras curtas). Este tipo de material é produzido em grande escala e o reforço é muito popular devido aos seguintes aspetos:

- Através do estado fundido do vidro, obtém-se facilmente fibras com boa resistência;
- É relativamente acessível economicamente e fácil de encontrar no mercado;
- Pode-se fabricar um compósito utilizando uma grande variedade de processos;
- Por possuir inércia química, quando combinado com os diversos polímeros, obtém-se um compósito útil para uma variedade de ambientes corrosivos.

Apresentam-se sob a forma de fio (*roving*), manta ou tecido. Os polímeros reforçados com este tipo de fibras são muito aplicados em partes não estruturais dos carros e dos navios, reservatórios de pressão e contentores de armazenamento. Na indústria dos transportes tem-se realizado um esforço para aumentar o uso destes materiais em veículos, para baixar o seu peso e aumentar a sua eficiência [16-18].

As fibras de carbono são reforços de alto rendimento, que permitem obter assim compósitos com elevada resistência mecânica e módulo de elasticidade na direção das fibras. Este tipo de reforços designa-se com base na sua resistência e comercializam-se com base na seguinte descrição:

- UHM – fibras com módulo de elasticidade superior a 500 GPa;
- HM – fibras com módulo de elasticidade superior a 300 GPa;
- IM – para fibras até 300 GPa;
- Fibras de baixo módulo – com valores inferiores a 100 GPa;
- HT, para fibras de resistência à tração superiores a 3000 MPa.

Os processos de produção das fibras de carbono são algo complexos e centram-se sobretudo na decomposição térmica de vários precursores orgânicos: a celulose, que dá origem às chamadas “*rayon fibers*”, o poliacrilonitrilo (PAN) e o alcatrão (“*pitch*”). Os diferentes precursores conduzem a fibras de carbono com características mecânicas distintas. Mesmo sendo reforços com um custo de aquisição elevado, os compósitos poliméricos reforçados com fibra de carbono têm vindo a ser usados extensivamente na indústria do desporto (em canas de pesca e tacos de golfe), em componentes estruturais de aviões, helicópteros e mais recentemente em automóveis. Assim, exercem um papel crucial na substituição de componentes até aqui metálicos [15-18].

2.3.3.1 Comportamento mecânico dos compósitos de fibras contínuas

Os materiais compósitos têm um comportamento mecânico característico, que difere dos outros materiais mais convencionais usados em Engenharia. Os constituídos por fibras contínuas apresentam resistência e rigidez elevadas, e são por isso indicados para aplicações de exigência estrutural. Apresentam geralmente uma estrutura laminada, isto é, são constituídos por várias camadas, todas alinhadas todas segundo a mesma direção. Deste modo, é fundamental a caracterização do comportamento mecânico da camada, que pode ser considerada um compósito unidirecional. As propriedades das fibras e da matriz determinam as distribuições internas de tensões. Assim, é de grande importância existirem modelos que, baseados nas propriedades dos constituintes, prevejam as propriedades dos laminados. Estes são estudados de dois pontos de vista:

- Micromecânica – estuda a interação e o teor dos materiais constituintes para posteriormente prever as propriedades da camada;
- Macromecânica – pressupondo um material homogêneo e unicamente os efeitos das propriedades dos constituintes a nível macroscópico, para estudo do comportamento do material compósito.

No regime elástico, os aços apresentam-se como isotrópicos, em que as suas propriedades elásticas são independentes da orientação. Ao contrário, devido à grande disparidade das propriedades da matriz em relação à fibra, a camada é fortemente anisotrópica. A outra hipótese admitida é o comportamento linear elástico [16-19]. Numa análise geral de sólidos anisotrópicos e em que este comportamento é representativo da maioria das situações, a relação tensão-deformação, também conhecida por Lei de *Hooke*, expressa-se por [19]:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \text{ (MPa)} \quad (1)$$

em que o termo C_{ijkl} é o tensor de rigidez. Os seus termos também se designam muitas vezes por Constantes Elásticas. Da simetria do tensor das tensões, σ_{ij} com $i, j = 1, 2, 3$, isto é,

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ji} \text{ (MPa)} \quad (2)$$

e do tensor das deformações, ε_{kl} também simétrico, com $k, l = 1, 2, 3$, isto é,

$$\varepsilon_{kl} = \varepsilon_{lk} \text{ (adimensional)} \quad (3)$$

resulta que

$$C_{ijkl} = C_{jikl}, C_{ijkl} = C_{ijlk}. \quad (4)$$

Pode-se então resumir a Lei de *Hooke* à forma matricial

$$\sigma = C\varepsilon \text{ (MPa)} \quad (5)$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{1111} & C_{1122} & C_{1133} & C_{1123} & C_{1113} & C_{1112} \\ C_{2211} & C_{2222} & C_{2233} & C_{2223} & C_{2213} & C_{2212} \\ C_{3311} & C_{3322} & C_{3333} & C_{3323} & C_{3313} & C_{3312} \\ C_{2311} & C_{2322} & C_{2333} & C_{2323} & C_{2313} & C_{2312} \\ C_{1311} & C_{1322} & C_{1333} & C_{1323} & C_{1313} & C_{1312} \\ C_{1211} & C_{1222} & C_{1233} & C_{1223} & C_{1213} & C_{1212} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{12} \end{Bmatrix} \text{ (MPa).}$$

Numa forma diferente, reduz-se os índices para uma melhor compreensão,

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{12} \end{Bmatrix} \text{ (MPa).} \quad (6)$$

Aparentemente, a equação (6) sugere que são necessárias 6 por 6 = 36 constantes elásticas para caracterizar completamente um sólido elástico anisotrópico. Utilizando-se o método da energia de deformação, U_{ij} , ou seja, energia de deformação por unidade de volume, que relaciona a tensão e a deformação tem-se que [20]:

$$\frac{\partial U_{ij}}{\partial \varepsilon_{ij}} = \sigma_{ij}. \quad (7)$$

Recorrendo à expressão anterior e derivando-a duas vezes consecutivas, o resultado é outra propriedade simétrica,

$$C_{ij} = C_{ji}. \quad (8)$$

Assim, da Lei de *Hooke* generalizada, o número das constantes elásticas independentes para um material anisotrópico fica reduzido a 21.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ & & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ & & & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ & & & & C_{55} & C_{56} \\ & & & & & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{12} \end{Bmatrix} \text{ (MPa)}. \quad (9)$$

No caso de um material isotrópico, este tem propriedades idênticas e independentes da direção. Assim, a matriz rigidez é bastante simplificada, com $C_{11} = C_{22} = C_{33}$, $C_{12} = C_{13} = C_{23}$ e $C_{44} = C_{55} = C_{66}$

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ & & & C_{44} & 0 & 0 \\ & & & & C_{44} & 0 \\ \textit{Simétrico} & & & & & C_{44} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Neste caso, apenas são necessárias duas constantes elásticas independentes, já que se verifica a seguinte relação [21]:

$$C_{44} = \frac{c_{11} - c_{12}}{2}. \quad (11)$$

A camada de um laminado é ortotrópica, ou seja, tem três planos de simetria mutuamente perpendiculares (Figura 11). Num plano de simetria, as propriedades mecânicas são constantes. Assim, a matriz de rigidez de um material ortotrópico generalizada é expressa da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ & & & C_{44} & 0 & 0 \\ \textit{Simétrico} & & & & C_{55} & 0 \\ & & & & & C_{66} \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Como é visível, restam 9 constantes independentes necessárias para a caracterização do comportamento tensão-deformação de uma camada, E_{11} , E_{22} , E_{33} , G_{12} , G_{13} , G_{23} , ν_{12} , ν_{13} e ν_{23} .

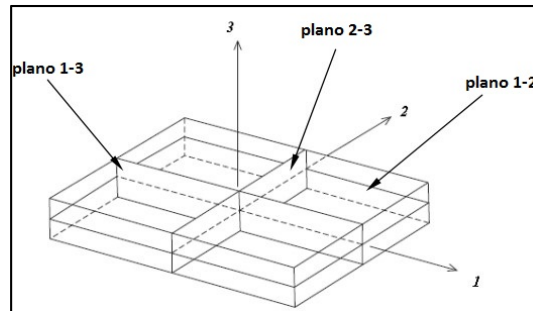


Figura 11. Planos ortogonais principais e simétricos (Adaptado de Mallick (2008)).

Compósitos unidirecionais reforçados com fibra são uma classe especial de materiais ortotrópicos, em que as fibras estão orientadas segundo uma direção, neste caso, no plano 1-2 (Figura 12). Assim, assume-se que as propriedades na direção 2 e 3 (direções transversais) são iguais ou $E_{22} = E_{33}$, $G_{12} = G_{13}$ e $\nu_{12} = \nu_{13}$ [16].

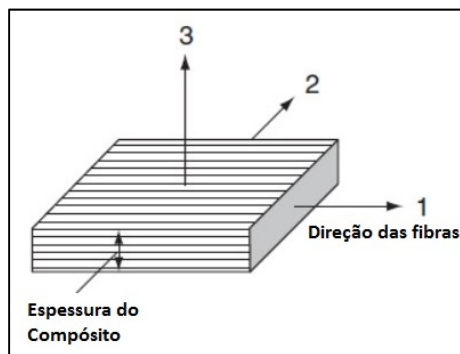


Figura 12. Representação esquemática de um compósito unidirecional (Adaptado de Mallick (2008)).

Assumindo-se as fibras em paralelo com o eixo longitudinal (Figura 12) e que V_f é o volume de fração de fibras e V_m o volume de fração da matriz, se não existir outro componente pertencente ao compósito é obvio que $V_m = 1 - V_f$. Pressupondo-se uma ligação perfeita entre as fibras e a matriz, então o módulo longitudinal é igual a:

$$E_L = E_f V_f + E_m (1 - V_f) = E_{11} \text{ (GPa)}. \quad (13)$$

A equação (13) é conhecida pela Lei das Misturas. De notar que o módulo de elasticidade das fibras é uma ou duas ordens de grandeza superior ao da matriz, e como V_f se encontra entre 0.5 e 0,65, há um grande interesse em que o módulo das fibras seja elevado, para se obter um compósito bastante rígido. O módulo transversal, E_T poder-se-á definir como [17],

$$E_T = \frac{E_f E_m}{E_m V_f + E_f (1 - V_f)} = E_{22} \text{ (GPa)}. \quad (14)$$

As constantes elásticas necessárias para caracterizar um material ortotrópico são:

$$E_{11} = E_L \text{ (GPa)} \quad (15)$$

$$E_{22} = E_{33} = E_T \text{ (GPa)} \quad (16)$$

$$G_{12} = G_{13} = \frac{G_f G_m}{G_m V_f + G_f (1 - V_f)} \text{ (GPa)} \quad (17)$$

$$\nu_{12} = \nu_{13} = \nu_f V_f + \nu_m (1 - V_f) \text{ (adimensional)}. \quad (18)$$

Para identificar as duas constantes finais, estas podem ser obtidas por [17],

$$\nu_{21} = \nu_{12} \frac{E_{22}}{E_{11}} \text{ (adimensional)}. \quad (19)$$

A equação seguinte permite calcular o restante coeficiente de Poisson [17],

$$\nu_{23} = \nu_{12} \frac{(1 - \nu_{21})}{(1 - \nu_{12})} \text{ (adimensional)} \quad (20)$$

e posteriormente o último módulo de corte [18]

$$G_{23} = \frac{E_{22}}{2(1 + \nu_{23})} \text{ (GPa)}. \quad (21)$$

O rácio,

$$\frac{E_{22}}{E_{11}} \quad (22)$$

é usualmente referido como medida da ortotropia do material. Uma das grandes dificuldades na aplicação destes modelos micromecânicos é a ausência de valores seguros para certas propriedades anisotrópicas das fibras (E_{f2} , ν_{f12} , G_{f12} , G_{f23}). Estas têm vindo a ser obtidas de resultados experimentais efetuados aos compósitos, combinadas juntamente com os modelos micromecânicos. A Tabela 3 referencia os valores das propriedades de diversas fibras. Quanto às matrizes, tem-se como valores habituais $E_m = 2$ a 5 GPa e $\nu_m = 0,35$ a $0,42$. Contudo, existe a

necessidade de serem efetuados ensaios aos compósitos para se comprovar as propriedades, para efeitos de projeto [17-19].

O modo de rutura de uma camada é algo complexo e difícil de prever, já que poderá existir formação e crescimento de fendas, bem como plasticidade do material. Para uma melhor compreensão, é importante definir os modos básicos de solitação da camada (Figura 13), aos quais correspondem as seguintes tensões de rutura [18].

- σ_{ut1} – Tensão de rutura longitudinal à tração (MPa);
- σ_{uc1} – Tensão de rutura longitudinal à compressão (MPa);
- σ_{ut2} – Tensão de rutura transversal à tração (MPa);
- σ_{uc2} – Tensão de rutura transversal à compressão (MPa);
- τ_{u12} – Tensão de rutura de corte (MPa).

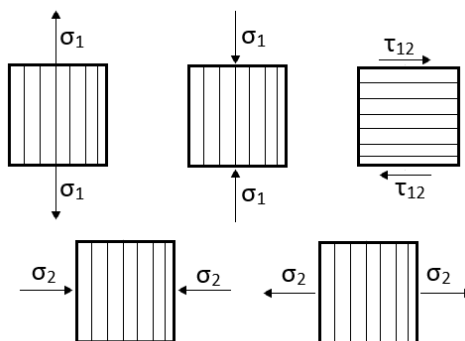


Figura 13. Modos básicos de solitação da camada (Adaptada de Moura, Morais, Magalhães (2011)).

A Tabela 4 apresenta alguns valores típicos de tensões de rutura de alguns materiais compósitos. À semelhança do que acontece com os módulos longitudinal e transversal, são enormes as diferenças entre as resistências longitudinais e transversais dos compósitos unidirecionais. Mais uma vez, tal é verificado devido ao contributo das fibras para maior resistência longitudinal. Por sua vez, transversalmente é a matriz que suporta as tensões aplicadas.

Tabela 4. Tensões de rutura de alguns compósitos unidirecionais (Adaptada de Moura, Morais, Magalhães (2011)).

Compósito	Reforço	V_f	σ_{ut1} (MPa)	σ_{uc1} (MPa)	σ_{ut2} (MPa)	σ_{uc2} (MPa)	τ_{u12} (MPa)
C(T300)/Epoxy(934)	UD	0,60	1314	1280	43	168	48
C(T800H)/Epoxy(3900-2)	UD	0,65	2840	1550	52	165	58
C(AS4)/Epoxy(3501-6)	UD	0,63	2280	1440	57	228	71

Uma análise estrutural consiste na comparação das tensões originadas por cargas aplicadas com a tensão admissível do material. Para materiais isotrópicos, como o aço ou o alumínio, recorre-se ao critério de von Mises para se fazer a comparação entre tensões. Como os materiais compósitos não são materiais isotrópicos não se deverá utilizar este critério. Desse modo, alguns critérios foram propostos para se prever a rutura destes materiais. Como é evidente, trata-se de um assunto cuja complexidade é inegável. Por consequência, a obtenção das propriedades dos materiais, bem como o conhecimento das suas tensões de rutura, é o primeiro passo para esta análise. A teoria considerada mais simplicista é conhecida como critério da tensão máxima. Este critério prevê a rutura do material quando as tensões nas direções principais, aplicadas no material, ultrapassem as tensões de rutura correspondentes. Consequentemente, para se garantir a não rutura do material, tem de se verificar as seguintes condições[18-22]:

$$-\sigma_{uc1} < \sigma_1 < \sigma_{ut1} \quad (23)$$

$$-\sigma_{uc2} < \sigma_2 < \sigma_{ut2} \quad (24)$$

$$|\tau_{12}| < \tau_{u12}, \quad (25)$$

onde os valores numéricos das resistências à compressão são considerados positivos.

2.3.3.2 Comportamento mecânico de compósitos de fibras curtas

Os compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras curtas têm uma considerável importância a nível económico e tecnológico. Têm boa rigidez e resistência mecânica e permitem a produção de componentes com geometrias complexas, com um custo moderado e

com altas taxas de fabricação. Os processos mais usados recorrendo a estes materiais são a moldação por injeção e a moldação por compressão [23]. Ao se fazer uma comparação com os reforçados com fibras contínuas, os de fibras curtas, apresentam valores de módulo de elasticidade e de resistência algo inferiores. Tal deve-se ao facto de as frações volúmicas de reforço serem substancialmente inferiores, tipicamente 20 % comparadas com cerca de 65 % nos compósitos de fibras contínuas. Esta redução resulta da necessidade de uma boa processabilidade, para poderem ser usados nos processos já mencionados de produção. Contrariamente, as fibras curtas tendem a distribuir-se aleatoriamente ao longo do volume do compósito, o que impede a obtenção da resistência alcançada com os compósitos unidireccionais na direção das fibras. Neste caso, porém, a menor anisotropia do material simplifica a análise do projeto, e permite que esta se aproxime à análise efetuada com materiais isotrópicos [18].

A eficácia do reforço constituído por fibras curtas depende, em certa medida, do seu comprimento. No compósito, as fibras têm uma distribuição espacial estática, e neste caso é necessário o cálculo de constantes elásticas médias. Como existe dois casos principais, é importante fazer-se uma distinção, conforme a relação entre o comprimento médio das fibras L_f e a espessura da peça t [18,24]. Se L_f for bastante inferior a t , situação ocorrida geralmente na produção de compósitos fabricados pelo processo de moldação por injeção, então assume-se que as fibras têm uma distribuição espacial tridimensional [24]. A abordagem mais simples e a mais aplicada é baseada na redução da rigidez do material, geralmente 20%. Poder-se-á admitir uma distribuição totalmente aleatória, o que permite assumir o compósito obtido como um material isotrópico [25]. Se por outro lado, L_f for da ordem de grandeza não inferior a t , as fibras tendem a orientar-se aleatoriamente em planos paralelos à espessura, e por consequência o compósito apresenta isotropia planar. Esta é uma situação habitual verificada no processo de moldação por compressão, em que se recorre a mantas de fibras aleatórias. Para este caso, *Christensen* e *Waals* propuseram as seguintes equações, para o cálculo das constantes elásticas médias, que partem das propriedades do compósito unidirecional [25]:

$$\bar{E} = \frac{1}{u_1} (u_1^2 - u_2^2) \text{ (GPa)} \quad (26)$$

$$\bar{\nu} = \frac{u_2}{u_1} \text{ (adimensional)} \quad (27)$$

com

$$u_1 = \frac{3}{8}E_1 + \frac{1}{2}G_{12} + \frac{(3 + 2\nu_{12} + \nu_{12}^2)G_{23}k_2}{2(G_{23} + k_2)} \text{ (GPa)} \quad (28)$$

$$u_2 = \frac{1}{8}E_1 - \frac{1}{2}G_{12} + \frac{(1 + 6\nu_{12} + \nu_{12}^2)G_{23}k_2}{2(G_{23} + k_2)} \text{ (GPa)}. \quad (29)$$

No entanto, k_2 não é uma constante de Engenharia. Porém a equação de *McCullough* permite relacioná-la com outras constantes da seguinte forma [26],

$$k_2 = \frac{E_2}{2(1 - \nu_{23} - 2\nu_{23}^2 \frac{E_2}{E_1})} \text{ (GPa)}. \quad (30)$$

2.4 Processos de fabrico ligados aos materiais compósitos de matriz polimérica

A chave do sucesso de qualquer processo de produção é o custo-eficiência e o nível de confiança do método produtivo. Estes dependem de uma larga taxa de produção e de uma qualidade contínua que se verifique de peça em peça. A evolução tecnológica bastante acentuada ocorrida nos últimos anos, e o elevado grau de automatização, têm permitido aos vários processos de fabrico tornarem-se economicamente mais competitivos. Estes fatores permitiram aos materiais compósitos adquirirem uma expansão contínua, que os levou a impor-se nas mais diversas áreas, como a indústria aeronáutica, automóvel, desporto e construção civil [27].

Os diversos processos para obtenção de compósitos de matriz polimérica podem ser classificados, genericamente, como processos de molde aberto ou fechado. Os componentes obtidos por moldes fechados apresentam duas ou mais superfícies (dependendo da geometria do molde) com bom acabamento e permitem grandes taxas de produção. Em contraste, os moldes abertos só apresentam uma superfície com bom acabamento. Outro modo de diferenciação entre estes processos resulta de uma divisão pela natureza da matriz, que poderá ser termoendurecível ou termoplástica. No primeiro caso, o controlo do ciclo de aquecimento garante a iniciação da cura e o ciclo de arrefecimento a consolidação da peça. Devido à elevada fluidez inicial da resina, é possível utilizar pressões baixas na obtenção das peças. Quando se

utilizam matrizes termoplásticas, é necessário um aquecimento inicial, para provocar o amolecimento e fusão. Combinado com pressões elevadas, atinge-se a consolidação do material [18].

2.4.1 Semi-produtos

Os semi-produtos são pré-combinações de fibras com matriz que são numa fase posterior processados, com o intuito de se obter peças finais em material compósito. São de extrema importância porque permitem que processos como a compressão sejam bastantes competitivos, uma vez que a matéria-prima já se encontra processada e necessária unicamente uma moldagem para se obter a peça final. Distinguem-se principalmente dois semi-produtos: os compostos de moldação e os pré-impregnados [17, 18].

O composto de moldação mais utilizado é o SMC (*Sheet Molding Compound*). É constituído por fibras impregnadas em resina (poliéster ou viniléster). Esta mistura é colocada entre dois filmes termoplásticos e passa posteriormente entre rolos para uma boa união dos constituintes, consolidando o composto sob a forma de uma folha (Figura 14). Os SMC apresentam tipicamente 30% de fibras em peso e podem conter fibras curtas, longas ou uma combinação das duas. Tipicamente, são utilizados contendo reforço de fibras de vidro. Nos últimos anos, tem-se vindo a alargar o leque de opções oferecido por estes produtos [17,27]. O CFSMC (*Carbon Fiber Sheet Molding Compound*) é em tudo idêntico ao típico SMC, com a diferença de apenas um dos constituintes. Faz parte da sua composição proporções cortadas de fita de fibra de carbono (fibras curtas), o que se traduz numa elevada rigidez e resistência final do composto. Estes apresentam 53% de fibras em peso e as peças finais são obtidas pelo processo de moldação por compressão, que recorre a moldes metálicos. Como valores de referência, a sua resistência mecânica situa-se entre os 240 MPa e os 280 MPa. O seu módulo de elasticidade situa-se nos 35 GPa. O primeiro automóvel onde se utilizou este material estruturalmente foi o *Dodge Viper convertible*, decorria o ano de 2003. A *Automobili Lamborghini*, em parceria com a *Callaway Golf*, desde do ano de 2007, deram continuidade ao desenvolvimento deste produto, inovando e tornando possível a sua utilização em outros tipos de peças estruturais, nomeadamente em tacos de golfe e em braços de suspensão do automóvel *Sesto Elemento* [28-31].

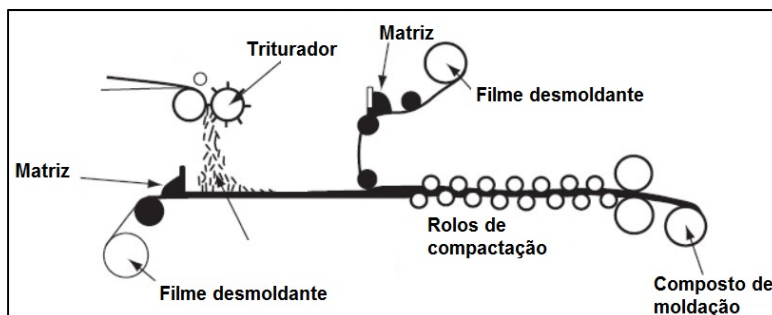


Figura 14. Esquema da produção de um composto de moldação (Adaptado de Mallick (2008)).

Os pré-impregnados são fabricados com a disposição de fibras contínuas e resina entre folhas de silicone, para posterior consolidação. Os reforços podem ser fibras contínuas de vidro, carbono ou até mesmo aramida, na forma unidirecional ou em tecidos. Tipicamente, o volume de fibras ronda os 50%. Este tipo de semi-produto tem um custo elevado, e normalmente são utilizados em aplicações de grande exigência, como é o caso da indústria aeronáutica. A Figura 15 representa esquematicamente o seu processamento em que, inicialmente, as fibras passam por um banho de resina, geralmente epóxida. Posteriormente passam por um forno, onde é controlado o grau de avanço da reação do pré-impregnado. À resina são adicionados inibidores para impedirem a cura total, antes do processamento final. Após a passagem pelo forno, são adicionadas folhas desmoldantes de silicone e o composto é laminado para a obtenção da sua espessura final [16,18].

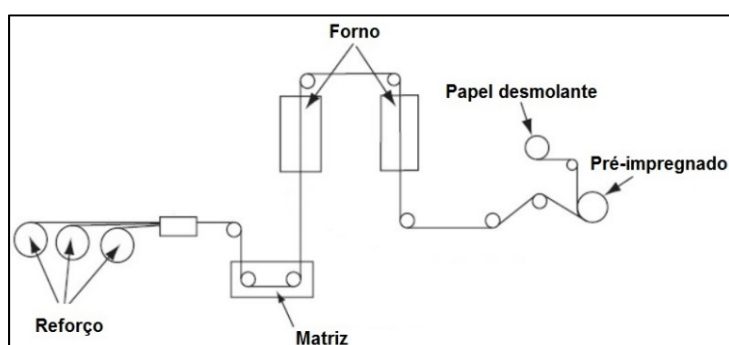


Figura 15. Produção de um pré-impregnado (Adaptado de Mallick (2008)).

2.4.2 Moldação manual

O método primitivo de produção de compósitos estruturais de matriz polimérica reforçados com fibras é designado por moldação manual (Figura 16). Como o próprio nome o referencia, obtêm-se peças manualmente, em molde aberto. É um processo confiável, mas pela sua natureza é uma técnica pouco produtiva. É indicado para pequenas séries (inferior a 1000 peças por ano). Geralmente, a mão-de-obra não necessita de elevada qualificação, mas tem um peso elevado no custo final do produto. As etapas gerais de fabrico englobam a aplicação de um agente desmoldante sobre a face do molde a utilizar para facilitar à posteriori a desmoldação. Seguidamente, recorre-se a uma resina poliéster, denominada por “gel-coat”, que pretende garantir um bom acabamento superficial. Procede-se então ao empilhamento e impregnação dos reforços (manta, tecido) juntamente com a resina já catalisada, sobrepõe-se camada a camada, até se atingir a espessura desejada. Devido à libertação de voláteis aquando da reação química, ocorrida pela junção dos constituintes da resina, é aconselhável que o local de trabalho seja equipado com um bom sistema de ventilação. As vantagens do processo relacionam-se com o baixo investimento inicial, simplicidade e poucas restrições em termos geométricos dos produtos a realizar. É indicado para a produção de peças de grande dimensão, como estruturas de pequenos barcos de recreio (Figura 16) e reforço de pilares de pontes [16, 18, 30].

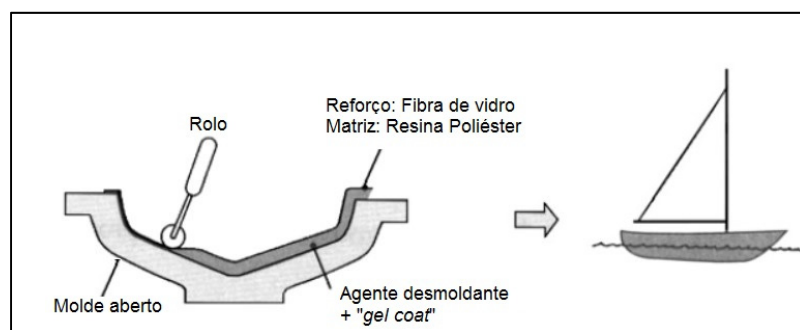


Figura 16. Obtenção de um barco de recreio por moldação manual (Adaptado de Gay, Hoa e Tsai (2002)).

2.4.3 Moldação por compressão

A moldação por compressão é um processo primário na obtenção de peças em material compósito, principalmente na indústria automóvel, nos tempos correntes. Utiliza-se este processo de transformação para converter semi-produtos, tipicamente SMC, em componentes na sua forma final. Estes são moldados em moldes de compressão metálicos, devido às temperaturas e pressões atingidas no ciclo produtivo. É comum a escolha deste processo para obtenção de um elevado volume de peças. Como representado na Figura 17, o molde é colocado numa prensa hidráulica e é pré-aquecido a uma temperatura que varia entre os 130°C e 160°C. O material é colocado no seu interior e ocupa tipicamente 60 % - 70% da superfície da cavidade do molde. A parte superior desloca-se verticalmente, até se atingir a pressão pretendida, que varia esta entre 0,5 e 15 MPa. O material começa a fluir, até ocupar toda a cavidade. Após o terminar do ciclo idealizado de cura – 1 a 4 minutos, o molde abre e a peça é ejetada [17, 18, 27, 32].

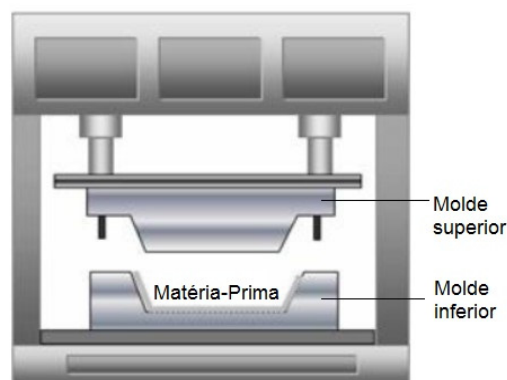


Figura 17. Esquema do processo de moldação por compressão (Adaptado de Nicoletto, Riva e Stocchi (2016)).

Várias etapas deste processo são passíveis de serem automatizadas, o que aumenta ainda mais a cadência do processo, como a preparação do molde, a colocação do material na cavidade e a extração da peça final [18]. As peças mais produzidas obtidas por este método contêm reforço de fibra de vidro, já que a sua função final não engloba requisitos estruturais. Contudo, o desenvolvimento de produtos como os CFSMC permitiu a obtenção de componentes com boas propriedades mecânicas, sem a necessidade de alterações do processo [32]. A Figura 18 ilustra um componente estrutural do automóvel *Lamborghini Sesto Elemento*, em CFSMC, obtido por este processo de moldação.



Figura 18. Braço da suspensão frontal do “Lamborghini Sesto Elemento” em CFSMC, produzido pelo processo de moldação por compressão [27].

2.4.4 Moldação por injeção

A moldação por injeção é o processo com maior volume de obtenção de componentes de matriz polimérica. Como a moldação por compressão, este processo requer o recurso a moldes metálicos, devido às temperaturas e pressões atingidas durante o processamento. Mesmo que possam ser utilizados outros reforços, as fibras de vidro são as mais comuns. Tipicamente as fibras ocupam entre 30% a 50% do peso. Devido à utilização de fibras curtas com orientação aleatória, as peças obtidas apresentam propriedades mecânicas moderadas. Produtos com matriz termoplástica e reforço de fibra de vidro obtidos pelo processo de injeção, apresentam como grande vantagem a possibilidade de processamento com a utilização de equipamentos convencionais, utilizados na produção de componentes poliméricos termoplásticos. Estes produtos são fornecidos em formato granulado reforçado e são de fácil manuseamento [18, 31].

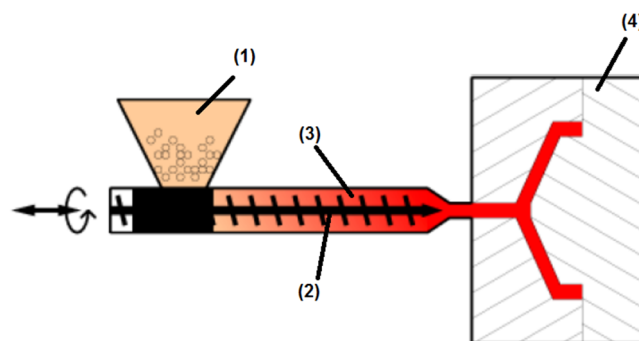


Figura 19. Ilustração de uma máquina de injeção juntamente com o molde (Adaptado de Azaiez, Chiba, Chinesta e Poitou (2002)).

Uma máquina típica e respetivo molde de injeção estão esquematizados na Figura 19. O processo apresenta a seguinte sequência: inicia-se pelo fecho do molde (4); o material é inserido

no alimentador (1); em seguida, é transportado pelo fuso (2) até à câmara de injeção (3) onde o granulado atinge um estado de fusão. Após suficiente aquecimento e homogeneização, inicia-se a injeção no interior do molde (4) através de um movimento repentino de translação do fuso. Segue-se a fase de pressurização e posteriormente a fase da plastificação. De seguida, aguarda-se pelo arrefecimento do molde e, finalmente, extrai-se a peça a uma temperatura que não permita nenhuma distorção. Depois da remoção da peça, após um intervalo pausado, por vezes necessário para se efetuar algumas operações manuais, inicia-se um novo ciclo. O molde está normalmente a uma temperatura entre os 20°C e os 120°C, e a câmara de injeção à temperatura de fusão do material a utilizar, normalmente entre os 200°C a 350°C. A pressão de injeção ronda os 30 a 150 MPa [18, 31]. Neste processo, conseguem-se obter produtos com geometria bastante complexa numa única operação. O grande inconveniente é a possibilidade de o material adquirir alguma anisotropia, fruto da forma como a matéria-prima flui no interior do molde [18, 31].

2.4.5 Moldação automatizada de deposição de fibra (*Automated fiber placement*)

A moldação manual é um processo algo limitado em termos produtivos, devido à dependência de mão de obra qualificada. Em contrapartida, processos automatizados onde a intervenção humana é extremamente reduzida têm sido muito utilizados na fabricação de compósitos. Assim, nos últimos anos, uma técnica tem vindo a ser muito utilizada para a produção de peças de grande dimensão, com aplicação na indústria aeronáutica. O AFP (*Automated Fiber Placement*) consiste na deposição de um grande número de filamentos de fibra, pré-impregnados em resina termoendurecível (Figura 20). A máquina automatizada é constituída por um braço robótico de 5 eixos na qual é acoplada na sua extremidade uma cabeça que faz a deposição da matéria-prima. O controlo é feito numericamente e desta forma garante-se uma elevada precisão durante todo o processo. O corte dos filamentos é feito diretamente na cabeça de deposição, sem necessidade de paragem do processo. Um rolo de compactação agregado na extremidade da cabeça, aplica pressão no material depositado contra o molde, assim existe uma maior consolidação e remove qualquer quantidade de ar que por algum motivo fique preso. Na Figura 20 faz-se uma representação esquemática deste processo [33, 34].

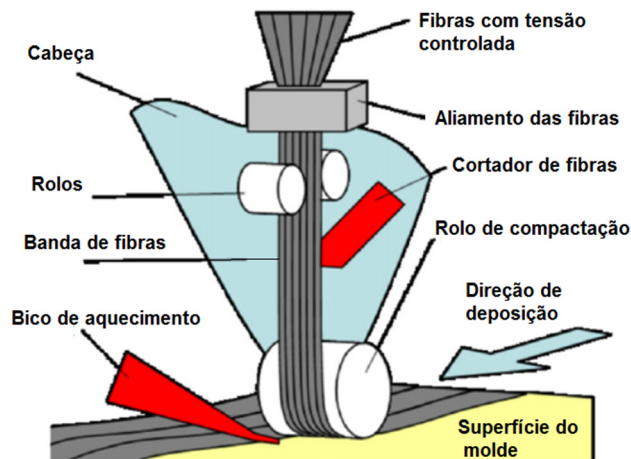


Figura 20. Esquema do processo *Automated Fiber Placement* (Adaptado de Debout, 2011).

2.5 Moldes metálicos

O molde é um componente de grande importância, tanto no processo de injeção como no de compressão. A sua função principal consiste em garantir a moldação da matéria-prima em diversos produtos com diferentes formas geométricas. Para além de uma ferramenta complexa e algo dispendiosa, o molde afeta significativamente a qualidade dimensional da peça, o que pode tornar o processo ineficiente. Tipicamente, existem fatores que influenciam diretamente o desempenho de um molde, a destacar:

- Ciclo de moldação;
- Número de cavidades do molde (mais expressivo num molde de injeção);
- Força necessária para o fecho do molde;
- Abertura do molde;
- Aquecimento;
- Refrigeração;
- Contração do material a moldar.

A forma como o molde é projetado e conservado afeta em muito a sua eficiência. Assim, é importante o conhecimento dos componentes que estruturam um molde, a salientar os referenciados na Figura 21.

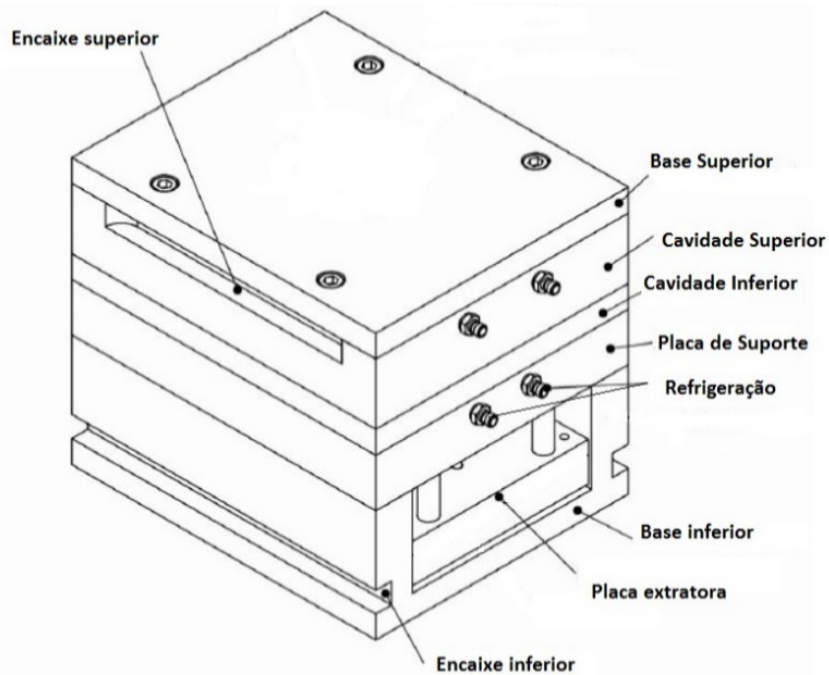


Figura 21. Vista de um molde de duas placas (Adaptado de Kazmer (2007)).

Na sua forma mais convencional o molde contém duas placas, em que as duas metades se afastam segundo o eixo de desmoldagem (plano de separação). Além disso, para uma maior eficiência no arrefecimento, o molde poderá ser dotado de canais com água em circulação. O sistema de extração permite auxiliar a remoção da peça da cavidade, o que aumenta o ciclo produtivo.

2.5.1 Molde de injeção

Na Figura 22 representa-se a estrutura mais simples de um molde de injeção, porém existem diferenças entre o molde de injeção e o molde de compressão. Uma característica diferente no molde de injeção é a existência de uma bucha e de um canal de injeção, que permite a entrada do material fundido diretamente na cavidade. Normalmente, a metade móvel possui o sistema de extração que pode ser atuado por um sistema hidráulico pertencente à máquina injetora [35, 36]. A Tabela 5 descreve os componentes deste molde e as suas funções.

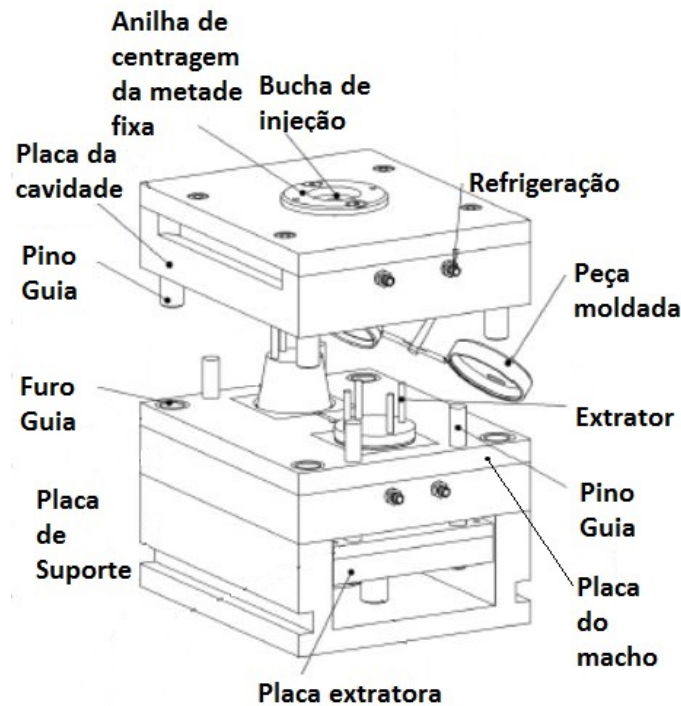


Figura 22. Estrutura de um molde de injeção (Adaptado de Kazmer (2007)).

Tabela 5. Descrição de algumas funções dos componentes de um molde.

Componente	Função
Anilha de centragem	Centra o molde no prato fixo da máquina injetora.
Bucha de injeção	É usado para conduzir o material no estado fundido até à cavidade.
Placa da cavidade	Placa onde se encaixa a cavidade (componente que dá o formato externo da peça injetada).
Placa de suporte	Serve de fixação da parte fixa e móvel do molde à máquina injetora.
Pino guia	Seve de guiamento e centraliza a parte móvel do molde com a parte fixa.
Extrator	Extraí a peça que fica agarrada ao macho após a abertura do molde.
Placa do macho	Placa onde se encaixam todos os componentes moldantes do macho (ex. postigos).
Placa extratora	Utilizada para acionar os extratores.

2.5.1.1 Sistema de alimentação

O trajeto percorrido pelo material plástico no estado fundido inicia-se na máquina injetora e termina na cavidade do molde. Este é normalmente composto pelo canal de injeção da bucha, pelo canal de distribuição (primário e/ou secundário) e pelas entradas ou pontos de injeção. Pelo facto de o material polimérico possuir um tempo relativamente pequeno de fusão, recomenda-se o uso de canais de distribuição curtos, para se evitar a solidificação do mesmo no seu interior [37].

De forma superficial, subdivide-se o sistema de alimentação em direta e indireta. No primeiro sistema, o material fundido flui diretamente do canal da bucha e injeção para a cavidade do molde. A alimentação indireta distingue-se pelo facto de ser formada comumente pelo canal de injeção da bucha, poço frio, canais de distribuição e pontos de injeção (Figura 23) [37].

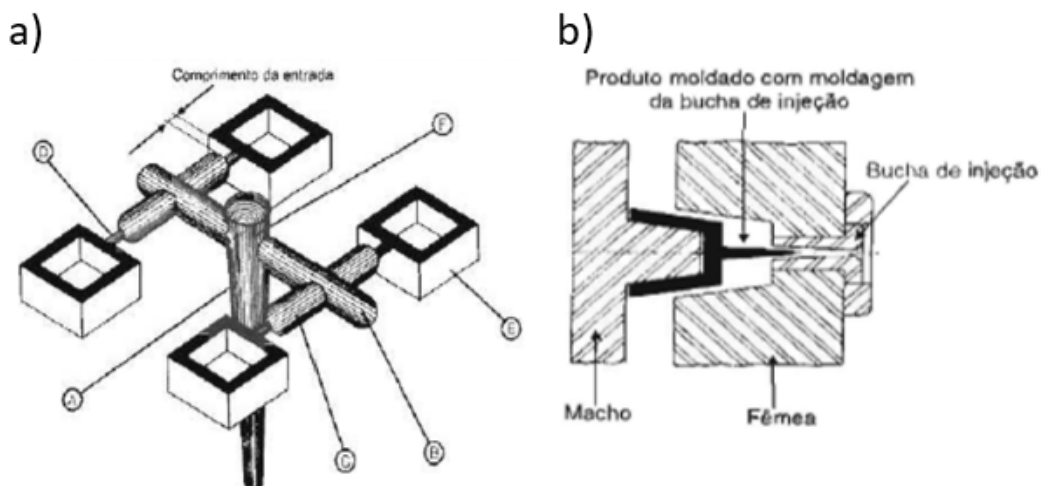


Figura 23. Sistema de alimentação: a) indireto; b) direto. A – Canal de injeção da bucha; Canal de distribuição primário; C- Canal de distribuição secundário; D – Entradas ou pontos de injeção; E – Produto moldado; F – Poço frio (Adaptado de Harada (2004)).

2.5.1.2 Sistema de extração

Na generalidade dos casos, a peça fica detida no macho (parte móvel do molde). A existência de sistema de extração permite separar a peça do macho aquando da abertura do molde. Este sistema é composto por placas extratoras que se movem por meios hidráulicos ou por uma barra extratora localizada na máquina injetora. As placas extratoras vão acionar os componentes da extração (extratores). Todavia, existem vários meios de se realizar a extração de uma peça moldada, a destacar [37]:

- Placa impulsionadora: pinos, camisa, lâmina, placa extratora, tirante;
- Ar comprimido;
- Núcleo rotativo.

Na Figura 24 é representado o esquema da placa impulsionadora que desloca os pinos extratores. Este é o sistema de extração de maior facilidade de colocação nos moldes [37].

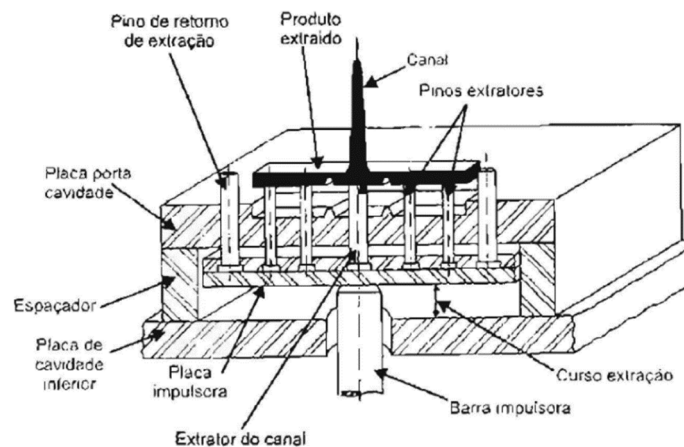


Figura 24. Sistema de extração por placa extratora (Adaptado de Harada (2004)).

2.5.1.3 Sistema de refrigeração

A refrigeração é um dos detalhes mais importantes no projeto de um molde, devido à influência na qualidade da peça injetada. Um bom arrefecimento dará lugar a uma boa estabilidade dimensional e aspeto superficial da peça obtida. De forma resumida, o sistema de refrigeração

não é utilizado para baixar a temperatura de todo o molde, mas sim para manter os machos e as cavidades a uma temperatura estável, até um ponto de solidificação suficiente que permita a extração da peça [36].

Na sua grande maioria, os moldes são refrigerados com água que flui por canais de refrigeração geralmente furados diretamente nas cavidades e nos machos (Figura 25). É o método mais usual, devido ao fator económico e facilidade de obtenção. Os canais de refrigeração devem possuir no mínimo 12 mm de diâmetro e estar localizados a uma distância de 25 mm da peça, já que uma proximidade excessiva poderá originar arrefecimento localizado, o que contribuirá para a diminuição do fluxo de material, o que provoca marcas superficiais inadequadas.

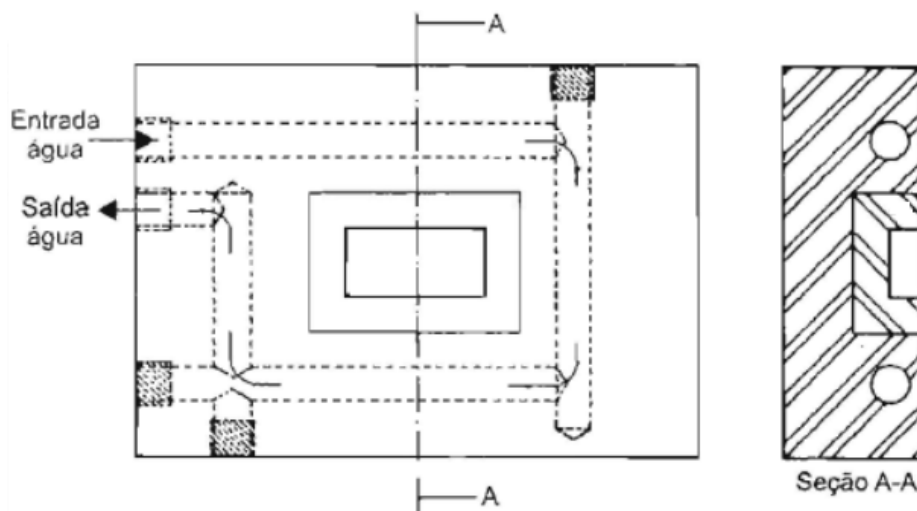


Figura 25. Representação dos canais de refrigeração (Adaptado de Harada (2004)).

2.5.1.4 Postiços

Sempre que possível, uma solução mais favorável passa pela utilização de postiços nas placas da cavidade e do macho (Figura 26). Esta opção é uma mais valia em termos de manutenção uma vez que, quando danificados, não existe a necessidade de retificar todo o molde. A sua grande vantagem passa por permitir, na produção de pequenas séries, utilizar-se o mesmo molde para se obter uma diversidade de peças e basta apenas proceder-se à mudança dos postiços [36].

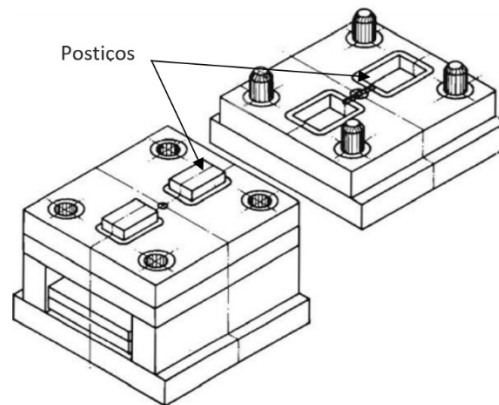


Figura 26. Postigos colocados nas placas cavidade e macho do molde (Adaptado de *Da Cruz* (2002)).

2.5.2 Molde de compressão

Um molde de compressão tem um funcionamento e componentes idênticos ao de injeção. As placas de fixação são cimentadas aos pratos de uma prensa (máquina utilizada no processo). Normalmente, só uma das partes possui movimento, tipicamente a superior. O material é colocado manualmente na cavidade à pressão ambiente e a extração pode ser feita pelo movimento ascendente das placas superiores, se existir ligação entre estas e a placa de extração, ou por um sistema exterior que promova a ascensão de um ou vários pinos extratores (dependente da dimensão da peça a moldar), após a abertura do molde (Figura 27). É necessário um sistema de refrigeração, de modo a promover uma temperatura estável para facilitar a moldação e a extração, e assim aumentar-se a eficiência do molde [15, 32].

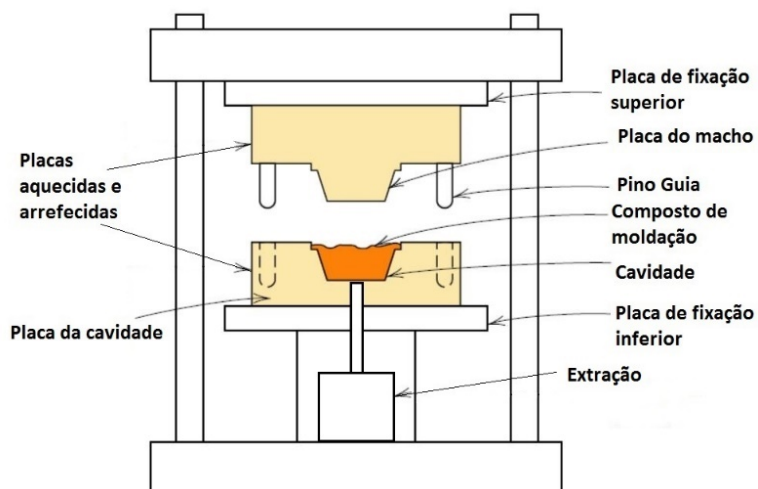


Figura 27. Esquema de um molde de compressão e a sua fixação aos pratos de uma prensa (Adaptado de *Callister e Rethwish* (2009)).

2.5.3 Projeto de moldes metálicos

Aquando da iniciação do projeto de moldes, dever-se-á ter em consideração o peso, tamanho e geometria da peça para, num momento posterior, se decidir a localização e quantidade de cavidades, bem como a posição mais adequada para as entradas, elementos de extração e a necessidade de se optar por postigos. Contudo, existem um determinado número de cálculos que se devem efetuar para se obter um molde indicado às necessidades, e assim não se cair no exagero em termos dimensionais, número de componentes e peso [37].

2.5.3.1 Cálculo da força de fecho

A força de fecho consiste na força necessária para manter o molde fechado durante o processo, e pode ser determinada pela seguinte expressão [38]:

$$F = \frac{AP * Nc * PI * CS}{1000}, \quad (31)$$

onde:

- F – Força de fecho [kN];
- AP – Área projetada [mm²];
- PI – Pressão de moldação [MPa];
- Nc – Número de cavidades;
- CS – coeficiente de segurança.

2.5.3.2 Dimensionamento dos calços e da placa macho

Os calços (Figura 28) suportam a placa macho e garantem o devido espaço para colocação do sistema de extração.

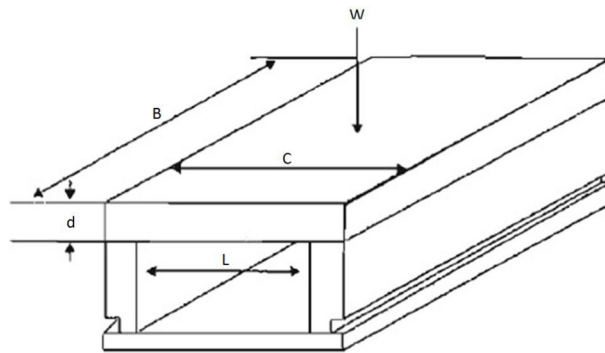


Figura 28. Calços para vão de extração (Adaptado de Harada (2004)).

A tensão a que os calços estão sujeitos e a espessura mínima da placa macho podem ser determinadas com recurso às seguintes expressões [37]:

$$\sigma_m = \frac{W L}{8 Z}, \quad (32)$$

$$Z = \frac{B d^2}{6} \text{ e} \quad (33)$$

$$\sigma_m = \frac{W}{A}, \quad (34)$$

onde:

- σ_m – Tensão admissível [MPa];
- W – Carga aplicada [N];
- L – Distância entre calços [mm];
- A – Área [mm²];
- B – Comprimento da placa [mm];
- C – Largura da placa [mm];
- D – Espessura da placa [mm].

2.5.3.3 Dimensionamento do sistema de extração

Para o cálculo da força necessária para extrair o material moldado, pode recorrer-se às expressões [35]:

$$P = \frac{S_t E A \mu}{d \left(\frac{d}{2t} - \frac{d}{4t} \gamma \right)} e \quad (35)$$

$$S_t = (\alpha \Delta T) d, \quad (36)$$

onde:

- P – Força de extração [N];
- S_t – Contração térmica do material em relação ao diâmetro [mm];
- E – Módulo de elasticidade do material a moldar [MPa];
- A – Área total de contacto entre a peça e o molde [mm²];
- α – Coeficiente de expansão do material a moldar [K⁻¹];
- ΔT – Diferença de temperatura entre a injeção e a extração da peça;
- d – Diâmetro do círculo equivalente ao perímetro da cavidade [mm];
- μ - Coeficiente de fricção entre o material a moldar e o material do molde;
- t – Espessura da peça [mm]
- γ – Coeficiente de Poisson do material a moldar.

Para o dimensionamento dos extratores/guias, pode-se assumir que se trata de uma coluna sujeita à encurvadura. Desta forma, recorre-se ao método da carga de *Euler* [35]:

$$F = \frac{m \times \pi^2 \times E \times I}{L^2}, \text{ com} \quad (37)$$

$$I = \frac{\pi \times r^4}{4} = \frac{\pi \times d^4}{64}, \quad (38)$$

onde:

- F – Carga na coluna/extrator [N];
- m – Constante de Euler (Figura 29);
- E – Módulo de elasticidade do material [MPa];
- I – Momento de inércia da secção [mm⁴];
- L – Comprimento da coluna/extrator [mm];
- R – Raio da secção da coluna/extrator [mm];
- D – Diâmetro da secção da coluna/extrator [mm].

Cargas de Euler				
Carga de Euler	Caso 1 Uma extremidade livre e a outra fixa	Caso 2 (Caso básico) Duas extremidades articuladas	Caso 3 Uma extremidade articulada e outra fixa	Caso 4 Duas extremidades fixas
Representação Esquemática				

Figura 29. Diagrama de encurvadura; Cargas de Euler (Adaptado de Rosato (2000)).

2.5.3.4 Cálculo do caudal do fluido de arrefecimento

A seguinte expressão permite calcular a quantidade de calor a retirar à peça moldada [38]:

$$Q = \frac{m \times Cp \times (T_1 - T_2)}{C}, \quad (39)$$

onde:

- Q - Quantidade de calor a ser retirado [kJ/s];
- m - Quantidade de material injetado no molde [kg];
- Cp - calor específico do material polimérico [kJ/kg K];
- T₁ - Temperatura de injeção do material [°C];
- T₂ - Temperatura de extração do material [°C];
- C - Duração do ciclo de arrefecimento [s].

O caudal mássico de fluido necessário para o arrefecimento é dado por [37]:

$$\dot{m} = \frac{Q}{K \times cp \times (T_s - T_e)}, \quad (40)$$

onde:

- \dot{m} - Caudal mássico do fluído para o arrefecimento [kg/s];
- Q – Quantidade de calor a ser retirado [kJ/s];
- K – Coeficiente de eficiência (Tabela 6);
- Cp – calor específico do fluído [kJ/kg °C];
- T_s - Temperatura de saída do fluído no molde [°C];
- T_e – Temperatura de entrada do fluído no molde [°C].

Tabela 6. Coeficiente de eficiência dos canais de arrefecimento (Adaptado de *Harada* (2004)).

	K
Canais de refrigeração perfurados na placa da cavidade ou nos núcleos machos	0,64
Canais de refrigeração perfurados nas placas de encosto	0,5
Canais de refrigeração que usam tubos de cobre	0,1

2.6 Método dos elementos finitos

O Método de Elementos Finitos (MEF) é um método numérico utilizado pela sua excelência na resolução de problemas complexos da engenharia estrutural. Iniciado devido em grande ao trabalho de Courant (1943), foi na década de 50 que engenheiros aeronáuticos desenvolveram o método, com vista à análise e resolução de problemas estruturais em aeronaves. Volvida uma década, as suas potencialidades começaram a ser amplamente aplicadas nas mais variadas áreas, desde a medicina, industria automóvel, problemas de escoamentos de fluidos e transferência de calor. O MEF é uma técnica exigente em termos de cálculo, pois envolve operações aritméticas sobre matrizes de grandes dimensões. Atualmente, diversos códigos têm vindo a ser desenvolvidos e melhorados como o *Ansys* ou o *Ábaqus*, que permitem a sua utilização em computadores pessoais, o que aumenta o leque de análises possíveis com um tempo de processamento mais baixo [39, 40].

2.6.1 Princípio do método

Uma análise de Elementos Finitos não cria uma fórmula como solução. Pelo contrário, a solução é aproximada, a menos que o problema seja extremamente simples e que uma conveniente fórmula exata já esteja disponível. No presente método, os corpos (sólidos, líquidos ou gasosos) são discretizados num conjunto de subdivisões chamados de elementos finitos.

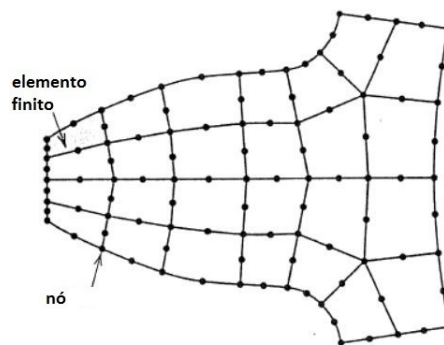


Figura 30. Representação no plano de uma malha grossa de um dente de uma engrenagem (Adaptado de Cook (1995)).

Estes elementos são considerados para serem interligados em pontos específicos denominados nós ou pontos nodais. A distribuição de variáveis tais como o deslocamento, solicitações, temperatura, pressão ou velocidade, não é conhecida dentro do elemento contínuo. Assume-se então que a variação destes domínios dentro de um elemento finito pode ser aproximada a uma função matemática. Estas funções de aproximação são definidas em cada nó. Para se obter uma solução próxima da exata, é necessário um número considerável de elementos e nós, pelo que se torna necessária uma resolução computacional em detrimento do cálculo manual. Refinando-se a malha, aumenta-se o número de elementos e nós e aproxima-se da solução exata, mas aumenta-se igualmente o tempo de processamento, tipicamente de forma exponencial. Segue-se o cálculo de variáveis secundárias, como as deformações e as tensões, e esta informação é utilizada para o dimensionamento de componentes, otimização da geometria ou para se estudar soluções alternativas [39, 40].

O comportamento de um sistema depende da geometria ou do domínio do mesmo, das propriedades do material ou meio, condições fronteira e carregamentos. Para sistemas de engenharia, a geometria ou domínio e as condições fronteira podem ser muito complexas e, por consequência, muito difíceis de tratar analiticamente. Na prática, a maioria destes problemas são resolvidos através de métodos numéricos e da modelação computacional. Este método consiste nas seguintes etapas descritas seguidamente:

- Modelação da estrutura a analisar;
- Especificação das propriedades dos materiais ou do meio;
- Especificação das ligações/contactos entre elementos do mecanismo;
- Especificação das condições fronteira e de carga;
- *Meshing* (criação da malha);
- Especificação do tipo de análise (linear, não linear, ...).

Um problema pode ser analisado como estático e linear, caso se verifique [39]:

- Deformações reduzidas (o padrão dos carregamentos não é alterado devido à deformação da estrutura);
- Materiais elásticos (não atingem a plasticidade);
- Cargas estáticas (as cargas são aplicadas à estrutura de uma forma lenta ou estática).

DESENVOLVIMENTO

3.1 Caracterização da empresa (Abotoa, S.A.)

3.2 Caracterização do problema

3.3 Requisitos

3.4 Caracterização inicial da fivela

3.5 Tempestade de ideias/anteprojeto (brainstorming)

3.6 Estudo da matéria-prima a utilizar

3.7 Aplicação do Método de Elementos Finitos

3.8 Processos de fabrico envolvidos

3.9 Projeto das ferramentas necessárias

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Caracterização da empresa (Abotoa, S.A.)

A empresa Abotoa, S.A. (SKYPRO) (Figura 31) foi formalmente criada em 2004, através de uma parceria na área do retalho com a LANIDOR (marca portuguesa líder na área têxtil). Ao fazer parte de uma rede de 200 lojas, obtiveram a experiência para compreender o consumidor e, com o calçado AEROSOLES (desde 2005), foram capazes de criar uma marca para profissionais - a AEROSOLES/PRO. Com esta nova marca de calçado profissional iniciaram o seu trajeto, criando parcerias com as mais importantes companhias europeias na área dos uniformes.



Figura 31. Logótipo da empresa SKYPRO.

Entre os anos 2004 e 2008 tiveram um crescimento contínuo de 40% ao ano, ciclo este quebrado pela primeira vez em 2009 devido à falência da AEROSOLES. No início de 2009, decidiram criar novas marcas e conceitos. Com uma enorme capacidade, resiliência e determinação em continuar com o negócio, conseguiram recuperar do passado e alcançaram um crescimento de 25% em volume de negócios no final de 2010.

A SKYPRO é a primeira marca a nível mundial dedicada exclusivamente ao calçado e a artigos de couro especialmente concebidos para os profissionais de companhias aéreas. Esta é uma extensão de um trabalho mais duradouro, iniciado em 2006 pela AEROSOLES, com o desenvolvimento de sapatos destinados ao uso profissional e com o fornecimento em 2008 para a sua primeira companhia aérea parceira, a TAP (Transportadora Aérea Portuguesa). O projeto cresceu durante estes anos com o aumento da confiança das companhias aéreas por todo o mundo (Figura 32), das quais se destacam as já fornecidas pela SKYPRO: *Aigle Azur* (França), *Lufthansa*, *Condor* e *German Wings* (Alemanha), *Neos* (Itália), *Eastern Airways* and *Air Tanker*

(Reino Unido), *Jetairfly* (Belgica), *Aegean* (Grécia), *Finnair* (Finlândia), *Luxair* (Luxemburgo), *SAS* (Escandinávia), *TAROM* (Roménia), *Air Astana* (Cazaquistão), *Air Mauritius* (Mauritânia), *Air Tahiti Nui Airlines* (Polinésia Francesa), *Ethiopian Airlines* (Etiópia), *Etihad* (Emirados Árabes Unidos), *Saudi Airlines* (Árabia Saudita), *Qatar Executive* (Qatar), *Qantas* e *Virgin Australia* (Austrália), *Delta Airlines* e *Southwest* (Estados Unidos da América).



Figura 32. Empresas parceiras da SKYPRO (fonte: SKYPRO Company Presentation).

Até 2010, a equipa já possuía um *know-how* surpreendente em sapatos e na indústria da moda, com uma rede de retalho importante e clientes na indústria da aviação, como a TAP, a TAAG (Transportes aéreos Angolanos) ou a Transaero. A SKYPRO percebeu que a maioria dos profissionais da aviação não estavam a utilizar os sapatos de trabalho certos para as exigências e decidiram criar um grupo de especialistas e pessoas talentosas para desenvolver a marca mais inovadora no mundo de sapatos para a tripulação de aviões – SKYPRO. A partir do ano de 2011, a SKYPRO tornou-se parte do dia a dia de milhares de profissionais de companhias aéreas em todos os continentes e passou a oferecer uma mistura de *know-how*, inovação e tecnologia que permite às tripulações de aviões trabalhar todo o dia em total conforto, saúde e segurança.

Em 2013 a SKYPRO apresentou os primeiros sapatos de homem destinados a profissionais de companhias aéreas do mundo, certificados de acordo com os requisitos da norma EN ISO 20347: 2012 *International Footwear Standard for Professional use shoes*. Um sapato certificado é um equipamento de proteção individual (EPI), que proporciona a proteção do usuário contra riscos encontrados no trabalho, em casa ou durante atividades de lazer. No contexto profissional, são

instrumentos para alcançar o que a união Europeia considera um direito fundamental, o da saúde e segurança no local de trabalho.

A empresa SKYPRO, de momento, em termos de Capital Acionista, distribui-se da seguinte forma: Jorge de Oliveira Pinto detém cerca de 63,3%, Clélia Georgina Ramos dos Santos Fernandes detém cerca de 11,7%, Teresa Maria Pimenta de França de Oliveira Pinto detém cerca de 11,7%, FCR REVITALIZAR NORTE detém 10,5%, Lisa Marcela Ramos dos Santos Fernandes detém cerca de 1,4% e por fim Ricardo Jorge Andrade Moreira da Silva detém cerca de 1,4%.

3.2 Caracterização do problema

Dentro do uniforme e dos vários acessórios usados no exercer da sua profissão, é comum o uso de cintos com fivelas metálicas por parte dos membros da tripulação de transportes aéreos. Dentro do aeroporto, estes indivíduos são sujeitos às mesmas rotinas e normas de segurança que qualquer passageiro que pretenda efetuar uma viagem de avião. Aquando da passagem pelas máquinas de deteção de metais, é necessário retirar todos os acessórios metálicos, incluindo o cinto. Esta operação por vezes torna-se repetitiva e bastante aborrecida, o que conduz a uma perda de tempo, que poderia ser evitada por parte destes funcionários.

O projeto que agora se apresenta teve como grande objetivo o estudo e desenvolvimento de uma fivela não metálica e não perceptível nas máquinas de deteção de metais presentes nos aeroportos. Foram fornecidos pela SKYPRO três modelos de fivelas existentes no mercado, que se encontram ilustradas na Figura 33.

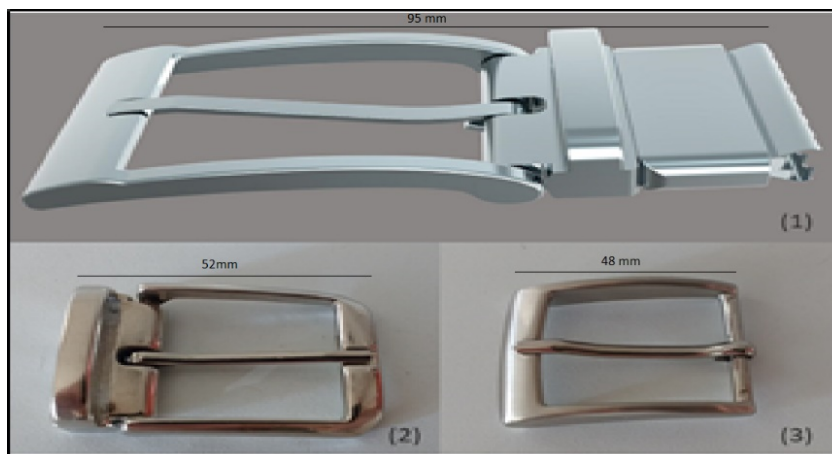


Figura 33. Três modelos de fivelas fornecidos pela SKYPRO para análise e caracterização.

3.3 Requisitos

Como proposta final, dever-se-ia obter uma fivela baseada nos três modelos fornecidos e ter preferencialmente os seguintes requisitos:

- Ser constituída na sua maioria por componentes obtidos em materiais não metálicos;
- Apresentar uma geometria simples com textura e aspeto visual idêntico às fivelas em material metálico;
- A redução da resistência mecânica da nova fivela não deveria ultrapassar os 40%;
- As fivelas nº1 e nº2 apresentam encaixes diferentes da fivela nº3 (Figura 34). Desta forma, a fivela a projetar deveria ser geometricamente idêntica à fivela nº3, o que facilita a escolha do processo de fabrico e a ligação cinto-fivela.

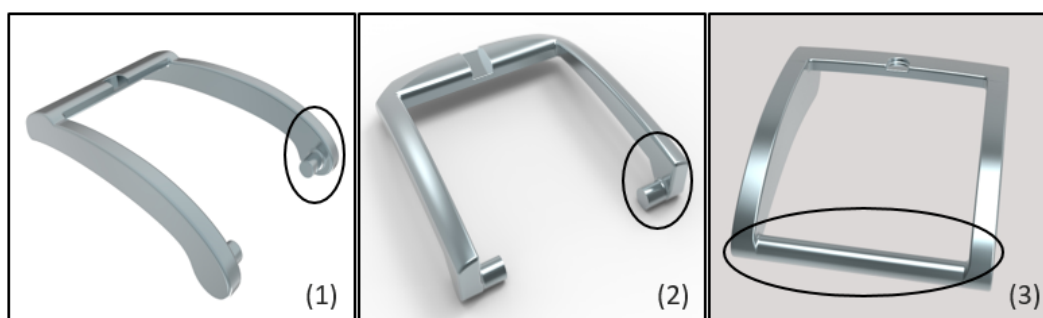


Figura 34. Detalhe dos encaixes de cada uma das fivelas.

3.4 Caracterização inicial da fivela

As três fivelas foram fornecidas em momentos e quantidades diferentes. Foram provisionadas três amostras da fivela nº1, numa fase inicial do projeto, para se dar início aos trabalhos de escolha de possíveis materiais a utilizar e processos de fabrico. Mais tarde receberam-se doze amostras da fivela nº 2 com as quais se efetuaram os ensaios de caracterização mecânica e o ensaio para se saber de que material eram constituídas as fivelas metálicas. Por fim, recebeu-se uma amostra da fivela nº3, com o intuito de ser utilizada como validação da geometria e a forma a propor.

3.4.1 Ensaios de tração

Estes ensaios foram efetuados para se caracterizar mecanicamente a fivela nº2. Esta resistência foi obtida aplicando-se no material esforços de tração. Numa fase mais avançada do projeto aquando da realização das simulações, recorreu-se a estes valores para se efetuar uma comparação com os resultados conseguidos numericamente.

3.4.1.1 Dispositivo especial para auxílio no ensaio de fivelas

A forma que as fivelas possuem não é compatível com as máquinas universais onde se efetuam os ensaios de tração. Deste modo, existiu a necessidade de se projetar e produzir um dispositivo para auxiliar a fixação das fivelas às garras da máquina de tração utilizada (Figura 35). A cota relacionada com a largura do dispositivo foi a de maior restrição, uma vez que não poderia ser superior à cota entre paredes interiores das fivelas, de maneira a proporcionar uma fácil conexão. Nas restantes dimensões não existiu qualquer restrição (Figura 36), contudo desenhou-se um equipamento robusto de forma a poder-se desprezar as deformações causadas pelo carregamento.

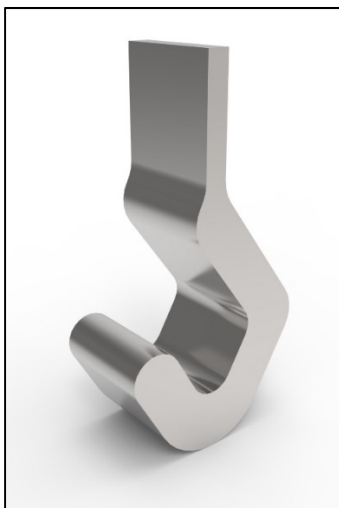


Figura 35 Garra para fixar as fivelas à máquina de ensaios de tração.

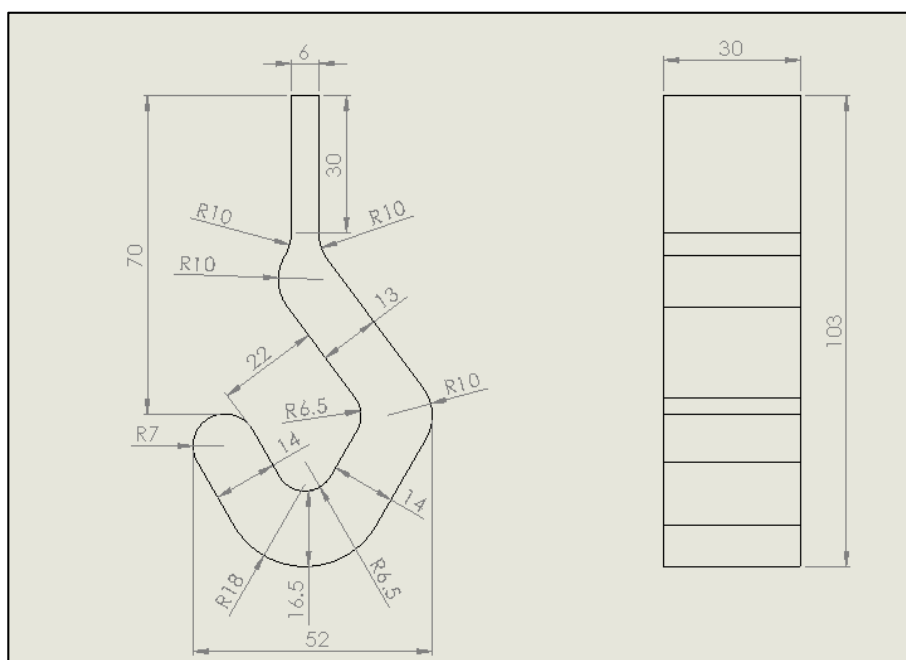


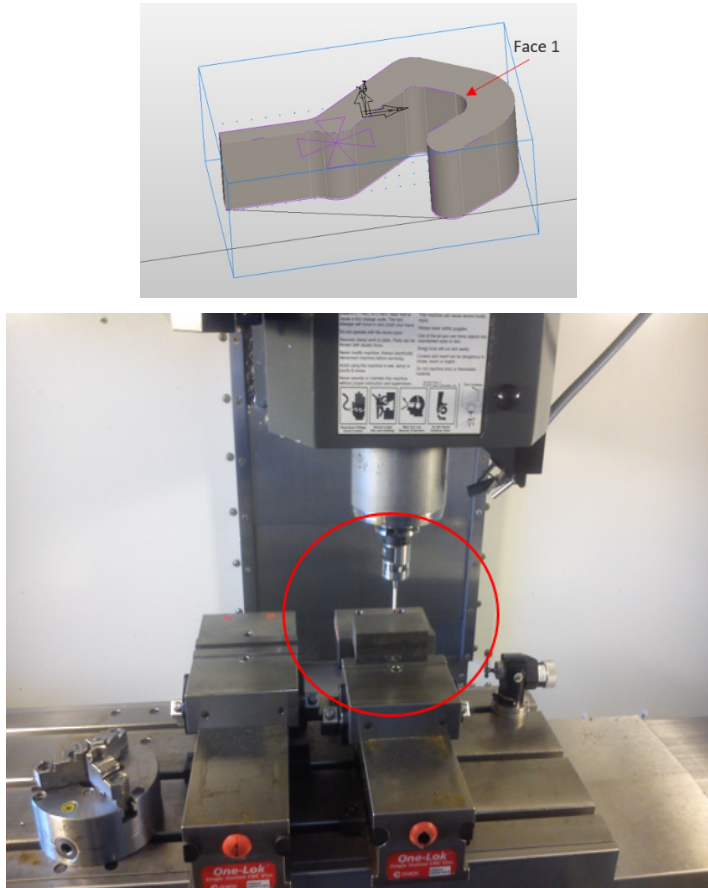
Figura 36 Dimensões da garra de fixação.


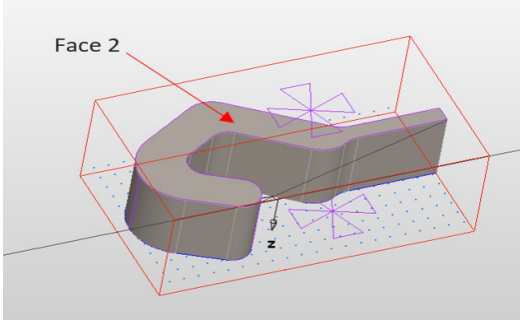
Efetuu-se o desenho 3D com recurso ao *software* CAD Solidworks. Para se simular a maquinação CAM e se obter o código CNC, recorreu-se ao *software* FeatureCAM. A abordagem, os equipamentos utilizados e parâmetros escolhidos, são descritos nas tabelas seguintes.

Tabela 7. Equipamentos necessários para a produção do dispositivo.

Dimensões do bloco de aço [mm]	107x63x43
Aço utilizado	DIN C45E
Ferramenta de desbaste	Dormer C437 $\phi = 12$ mm
Ferramenta de acabamento	Dormer C920 $\phi = 10$ mm
Máquina CNC utilizada	Haas VF-2SS

Tabela 8. Parâmetros e abordagem de maquinação escolhidos.

Objetivo:	Breve descrição da simulação efetuada no programa FeatureCAM para obtenção do código numérico.
Figura 1/2	
1º passo	Posição do “zero peça” Coordenadas (mm): X=0; Y=0; Z=36,5

<p>2º passo</p>	<p>Facejamento 7 mm até à face nº1 (desbaste e acabamento), Posição Z=43,5 mm a Z=36,5 mm; Desbaste – 6,5 mm; incremento de 0,5 mm; velocidade de corte: 685 rpm; Acabamento – 0,5 mm; velocidade de corte: 912 rpm.</p>
<p>Figura 3</p>	
<p>3º passo</p>	<p>Posição Z = 36,5 mm a Z = 30 mm; Desbaste e acabamento – 30 mm; incremento de 3 mm; velocidade de corte: 1474 rpm.</p>
<p>Figura 4</p>	
<p>4º passo</p>	<p>Rodar a peça e trocar a face em contacto com a base da mesa de trabalho da máquina; Determinar novo “zero peça”. Coordenadas (mm) X=0; Y=0; Z=30;</p>
<p>5º passo</p>	<p>Facejamento 8 mm até à face nº2 (desbaste e acabamento), Posição Z=38 mm a Z=30 mm; Desbaste – 7,5 mm; incremento de 0,5 mm; velocidade de corte: 685 rpm; Acabamento – 0,5 mm; velocidade de corte: 912 rpm.</p>

3.4.1.2 Condições estipuladas para os ensaios

Com o objetivo de se avaliar a resistência à tração das fivelas modelo nº2, utilizou-se o equipamento de ensaios localizado no laboratório de Ensaios Mecânicos do ISEP, da marca *Shimadzu* com o modelo *AG-Xplus* (Figura 37). Este equipamento possui uma célula de carga de 100 kN.



Figura 37. Equipamento de ensaios *Shimadzu AG-Xplus* 100 kN

Numa fase antecedente aos ensaios, procedeu-se ao corte do arco existente na parte traseira das amostras, de modo a facilitar o encaixe na garra inferior do equipamento (Figura 38).

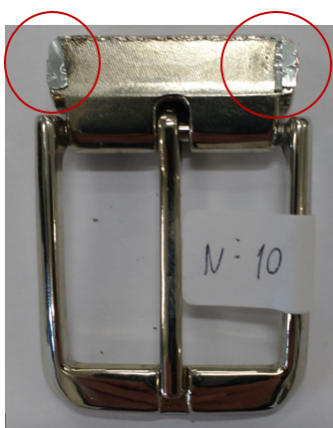


Figura 38. Corte efetuado para facilitar o encaixe da garra inferior.

Estipulou-se uma velocidade de ensaio de 2 mm/min e descreve-se na Figura 39 a montagem efetuada de todos os componentes necessários para a execução do ensaio de tração.

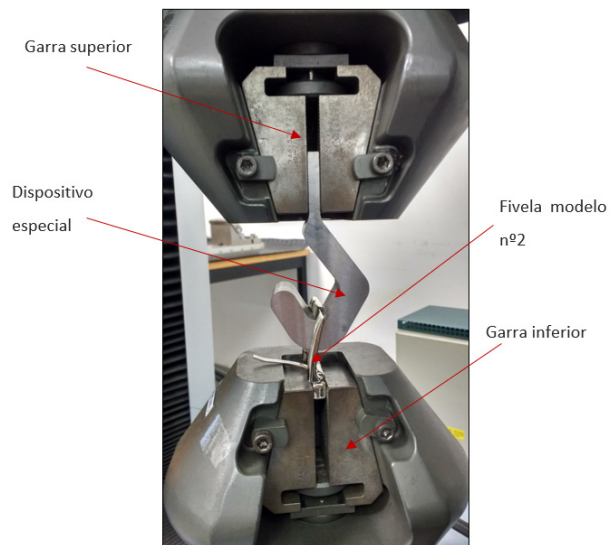


Figura 39. Montagem dos componentes necessários para a execução dos ensaios de tração.

3.4.1.3 Resultados dos ensaios

Após a execução dos doze ensaios de tração, procedeu-se à análise dos resultados e obteve-se o gráfico 1, Força-Deslocamento. Na Tabela 9 representa-se a força e a resistência máxima obtidas e que caracterizam cada uma das amostras analisadas.

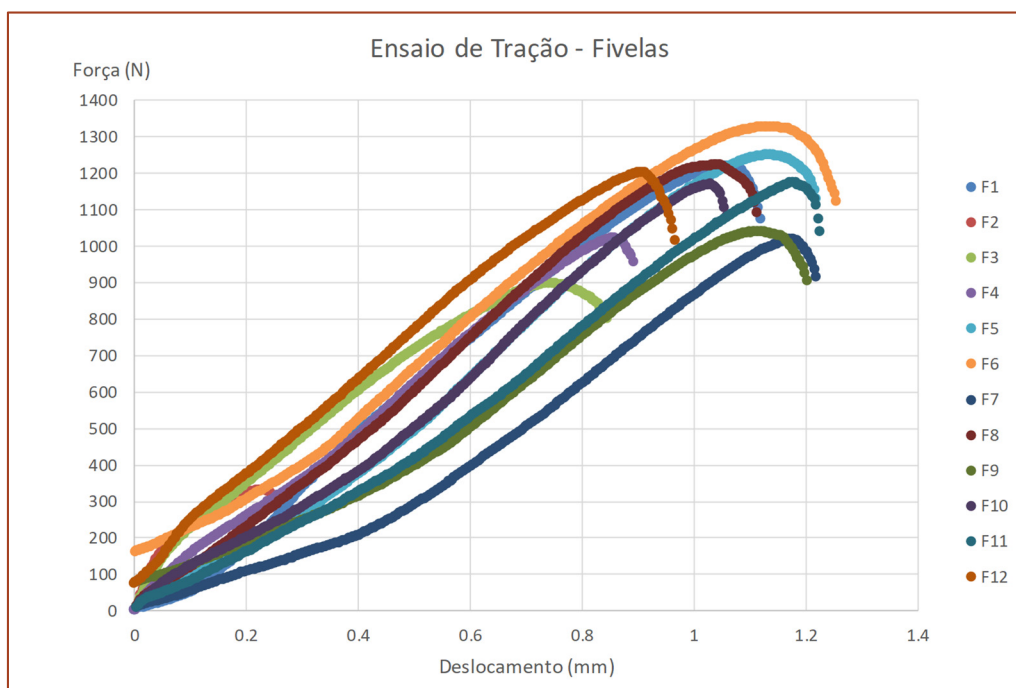


Gráfico 1. Força-Deslocamento de todos os modelos de Fivelas nº2 ensaiados.

Tabela 9. Valores máximos numéricos de resistência mecânica para cada uma das fivelas ensaiadas.




Designação	força máxima	tensão de rutura	média	desvio padrão
Fivela 1	1219 N	102 MPa	força máxima	
Fivela 2	332 N	27,8 MPa		
Fivela 3	898 N	75,2 MPa		
Fivela 4	1201 N	100,5 MPa	1156 N	116,9 N
Fivela 5	1249 N	104,6 MPa		
Fivela 6	1327 N	111,1 MPa		
Fivela 7	1018 N	85,2 MPa	tensão de rutura	
Fivela 8	1222 N	102,3 MPa		
Fivela 9	1038 N	86,9 MPa		
Fivela 10	1169 N	97,9 MPa	100,5 MPa	9,8 MPa
Fivela 11	1175 N	98,4 MPa		
Fivela 12	1202 N	100,6 MPa		




3.4.1.4 Análise das superfícies e modos de fratura





No final de cada ensaio procedeu-se ao registo fotográfico da zona de rutura e do lado em que esta ocorreu. De seguida na Tabela 10 efetua-se uma descrição dos registos observados.

Tabela 10. Registo fotográfico das ruturas das fivelas.



<p>Observação Fivela 2</p>	
<p>Observação Fivela 3</p>	
<p>Observação Fivela 6</p>	
<p>Comentários</p>	<p>Nos modelos descritos anteriormente, a rutura iniciou-se pelo gancho direito e, devido à continuação do ensaio, ocorreu rutura pelo braço esquerdo.</p> <p>Em nenhum dos ensaios houve rutura do gancho esquerdo.</p>

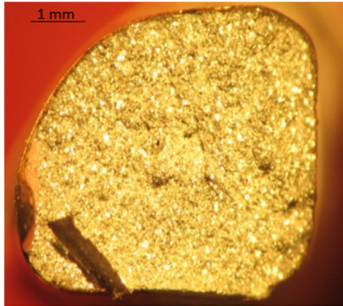
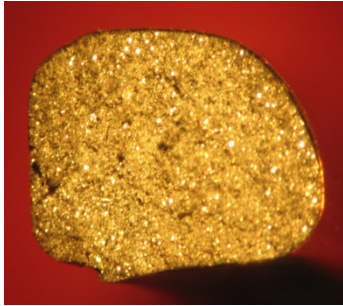
Observação Fivela 4	 A photograph of a metal hook assembly, labeled 'N=4'. The assembly consists of a main U-shaped hook with a central locking mechanism and two smaller components positioned above it.
Observação Fivela 5	 A photograph of a metal hook assembly, labeled 'N=5'. The assembly is similar to Fivela 4 but includes a small cylindrical component positioned above the main hook.
Observação Fivela 9	 A photograph of a metal hook assembly, labeled 'N=9'. The assembly is similar to Fivela 4 but includes a small cylindrical component positioned above the main hook.
Comentários	Nos ensaios anteriormente registados, ocorreu rutura total pelo gancho direito. Na fivela 5 e fivela 9 ocorreu rutura parcial no gancho esquerdo.

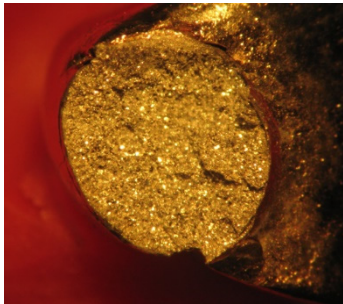
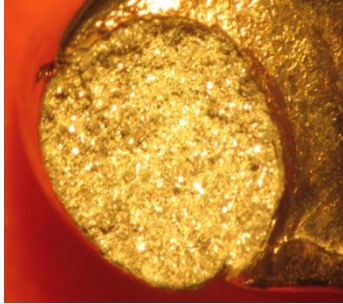
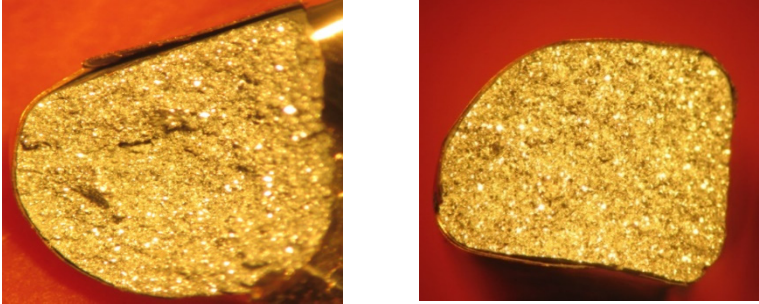
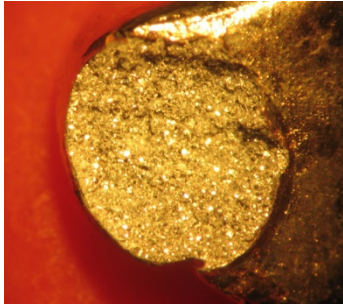
Observação Fivela 7	
Observação Fivela 8	
Observação Fivela 10	
Observação Fivela 11	

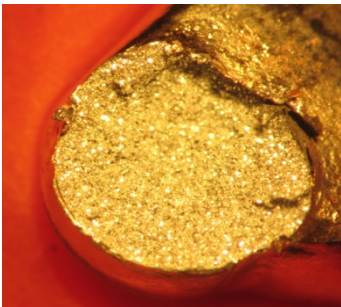
<p>Observação Fivela 12</p>	
<p>Comentários</p>	<p>Nos ensaios anteriores só ocorreu rutura parcial no gancho direito, devendo-se ao facto de estes ensaios terem sido interrompidos logo após o início da rutura.</p>

Efetuuou-se uma análise micrográfica a cada um dos modelos ensaiados, para possível identificação de defeitos nas zonas onde ocorreu rutura do material. Na Tabela 11 apresenta-se as imagens obtidas na análise efetuada.

Tabela 11. Resultados da análise micrográfica efetuadas à zona de rutura das fivelas.

<p>Imagem fivela 1 (lado esquerdo)</p>	
<p>Imagem fivela 3 (lado direito)</p>	

<p>Comentários</p>	<p>Na fivela 1 e fivela 3 ocorreu rutura, não só pelo gancho, mas também pelo braço.</p> <p>Verifica-se uma superfície algo rugosa, confirmando-se rutura não totalmente frágil, mas parcialmente dúctil.</p> <p>A rutura não ocorreu no mesmo local. Na fivela 3 ocorreu no braço direito e na fivela 1 no braço esquerdo.</p> <p>As superfícies são muito semelhantes, como se pode observar pelas imagens.</p>
<p>Imagem fivela 2 (lado direito)</p>	
<p>Imagem fivela 4 (lado direito)</p>	
<p>Imagem fivela 6 (lado esquerdo e lado direito)</p>	
<p>Imagem fivela 7 (lado direito)</p>	

<p>Imagem fivela 12 (lado direito)</p>	
<p>Comentários</p>	<p>A rutura ocorrida no braço esquerdo da fivela 6 é muito semelhante à ocorrida no braço da fivela 1 e 3.</p> <p>As ruturas das fivelas 7, 8, 9, 10, 11 e 12 ocorreram no mesmo local (ganchos) e possuem superfícies bastante semelhantes. Assim, por forma a evitar uma repetição exhaustiva, optou-se por mostrar só imagens da fivela 7 e 12.</p> <p>São visíveis superfícies algo rugosas, o que demonstra mais uma vez uma rutura não totalmente frágil.</p>

3.4.1.5 Análise crítica

Com os ensaios efetuados verificou-se que a média dos valores de força máxima se situava nos 1156 N, com um desvio padrão de 116,9 N. A média dos valores da tensão de rutura das amostras situava-se nos 100,5 MPa, com um desvio padrão de 9,8 MPa. O valor da Fivela 2, não foi considerado nestes cálculos.

Verificou-se que a primeira rutura ocorreu sempre no lado direito das fivelas ensaiadas. Tal facto poderia ser explicado devido à existência de um pequeno desalinhamento do eixo na ligação entre o dispositivo especial e a garra superior. Esta pequena anomalia só foi detetada no final da execução de todos os ensaios.

Da análise micrográfica efetuada às superfícies de rutura, salienta-se o facto de existir alguma ductilidade, o que permite afirmar a existência de deformação plástica por parte do material antes de atingir a sua rutura.

3.4.2 Análise da composição química

A composição química dos materiais é um dos fatores determinantes da sua microestrutura, que por sua vez influencia as suas propriedades. De forma a se obter uma completa caracterização das fivelas, procedeu-se à realização do ensaio de espectroscopia de energia dispersiva (EDS). Este permite uma análise qualitativa e quantitativa de grande parte dos elementos químicos presentes na tabela periódica.

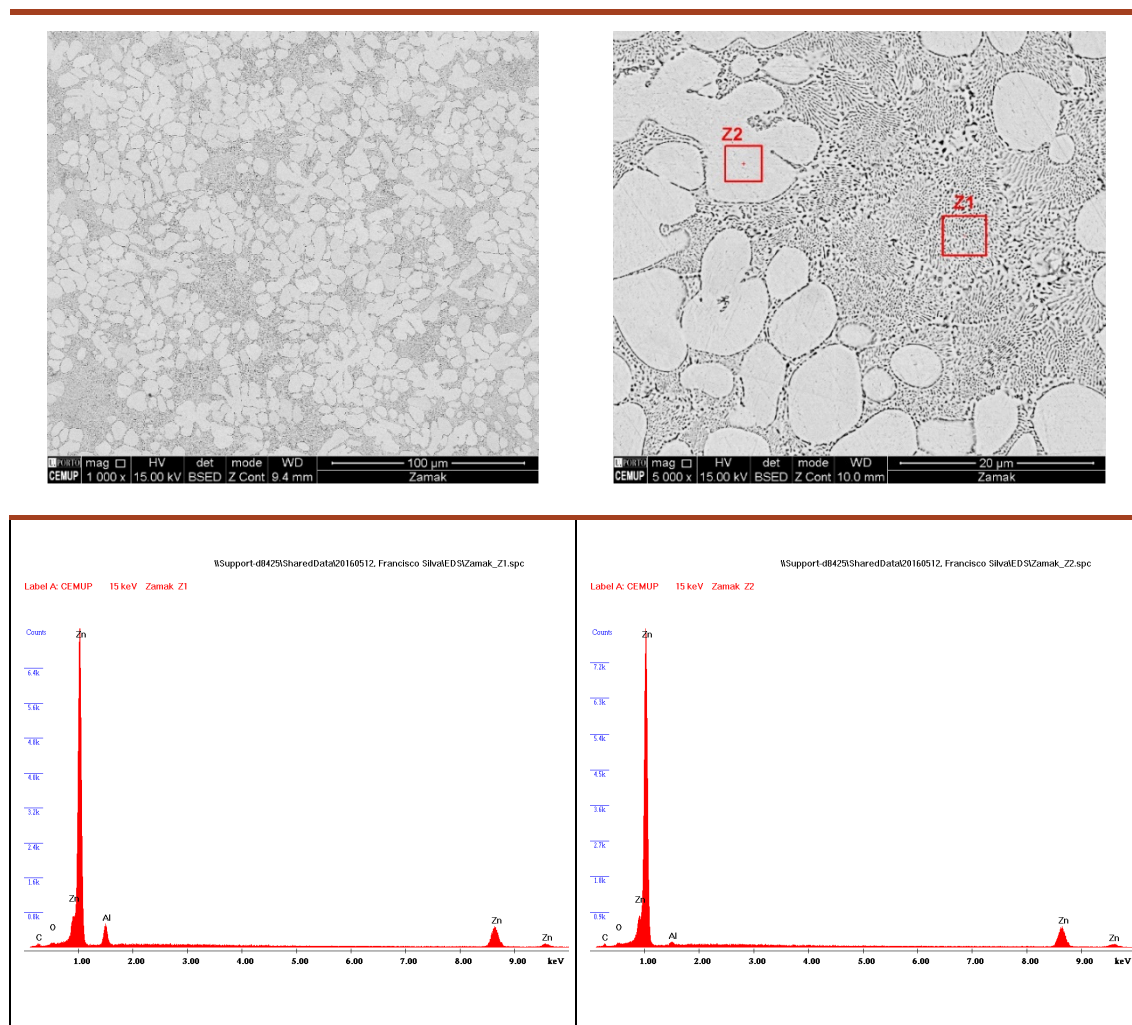
3.4.2.1 Metodologia de ensaio EDS (*Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy*)

O ensaio EDS é uma técnica de observação de superfícies onde se utiliza um feixe de eletrões com uma determinada energia, que atinge a superfície do material a analisar e obtém-se desta forma um vasto conjunto de informações que, após processamento, se transforma em imagens, espectros e mapas de análise química. Para a aplicação desta técnica, são requeridos materiais eletricamente condutores. No caso de não o serem, utiliza-se a pulverização catódica, que consiste no revestimento com ouro (Au), carbono (C) ou cobre (Cu) da amostra, tornando a amostra condutor [42].

3.4.2.2 Resultados

A Tabela 12 mostra os resultados obtidos no ensaio de EDS efetuado a uma amostra de uma fivela.

Tabela 12. Resultados do ensaio EDS.



Nos resultados obtidos pode-se confirmar os dados da análise de microestrutura, ou seja, o material que compõe as fivelas é formado por zinco e alumínio. No entanto, com este ensaio foi possível verificar a existência de duas fases distintas, Z1 e Z2, que se distinguem por uma maior percentagem de alumínio na fase Z1, comparativamente a Z2.

3.4.3 Análise metalográfica

Este tipo de ensaio teve como objetivo a observação e análise da estrutura micrográfica da zona de rutura dos modelos de fivelas ensaiados, com a finalidade de se avaliar possíveis defeitos que

tenham levado à rutura prematura do material. Recorreu-se a um microscópio ótico localizado nos Laboratórios de Ensaios Metalográficos do ISEP (Figura 40).





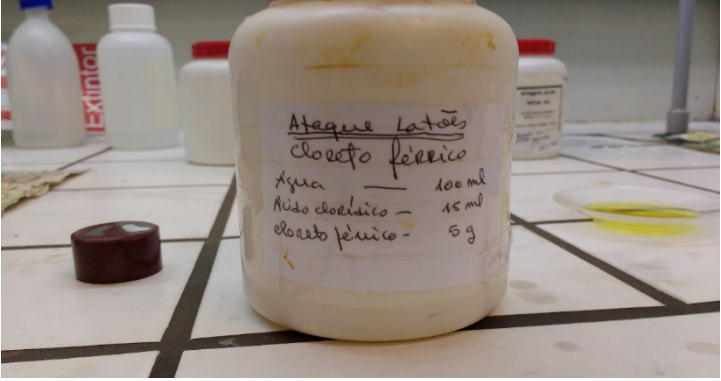
Figura 40. Microscópio *Olympus* série *BX2*

3.4.3.1 Metodologia de preparação das amostras

A Tabela 13 mostra todos os procedimentos efetuados para se preparar as amostras dos modelos das amostras ensaiados.

Tabela 13. Metodologia para a preparação das amostras para a análise metalográfica.

Imagem 1	
Metodologia	Seccionou-se uma parte das fivelas 2, 3, 6 e 7 contendo a superfície de rutura de cada uma delas. Procedeu-se ao embutimento das amostras em baquelite (resina epóxi termoendurecível).

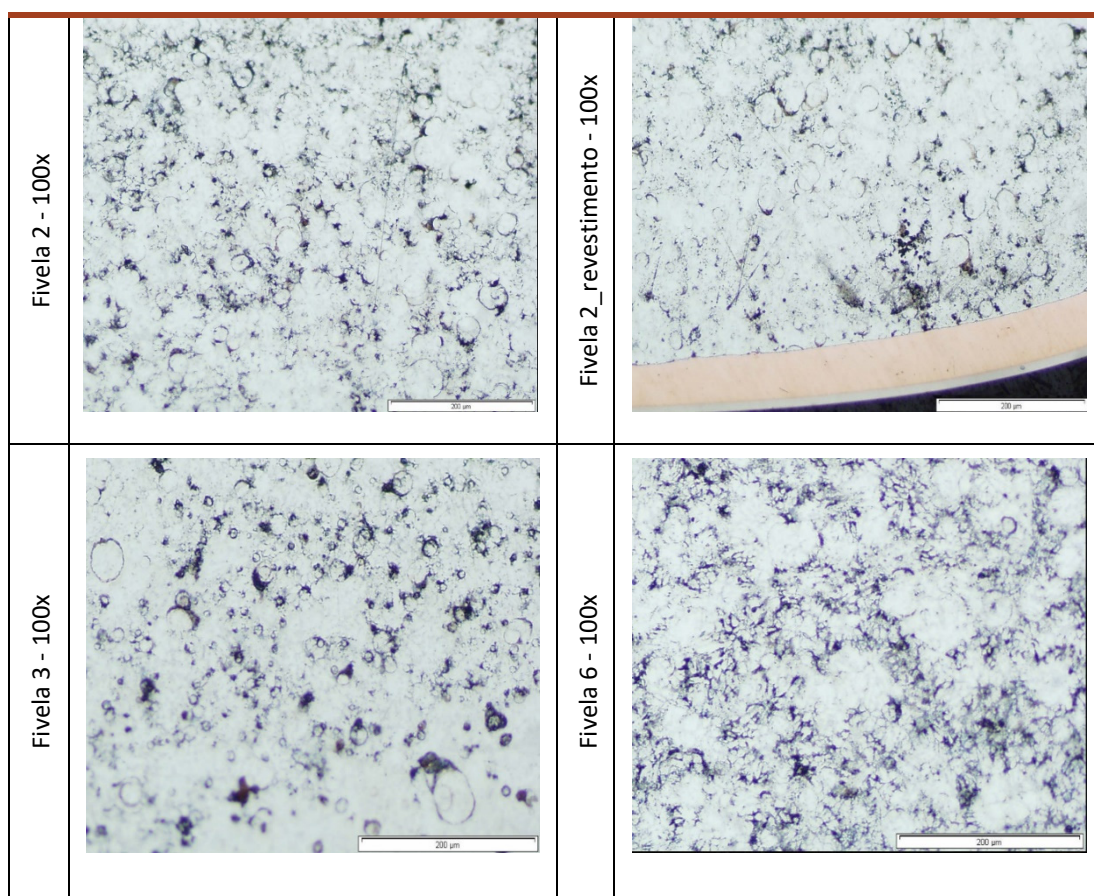
<p>Imagem 2</p>	
<p>Metodologia</p>	<p>Lixagem das superfícies com lixas de diferentes granulometrias (220, 500 e 1000), de forma a não se observar imperfeições nas amostras à vista desarmada. Rodou-se a amostra 90°, sempre que se procedeu à mudança de granulometria.</p>
<p>Imagem 3</p>	
<p>Metodologia</p>	<p>Polimento recorrendo a abrasivos de diamante de 3 μm e 1 μm. No final do processo, espera-se obter uma superfície plana e sem imperfeições.</p>
<p>Imagem 4</p>	
<p>Metodologia</p>	<p>Ataque químico utilizando cloreto de ferro (FeCl_3) e ácido clorídrico (HCl) tal como recomendado em "ASM Metallurgy and Microstructures" [41], com o objetivo de revelar a microestrutura das amostras.</p>

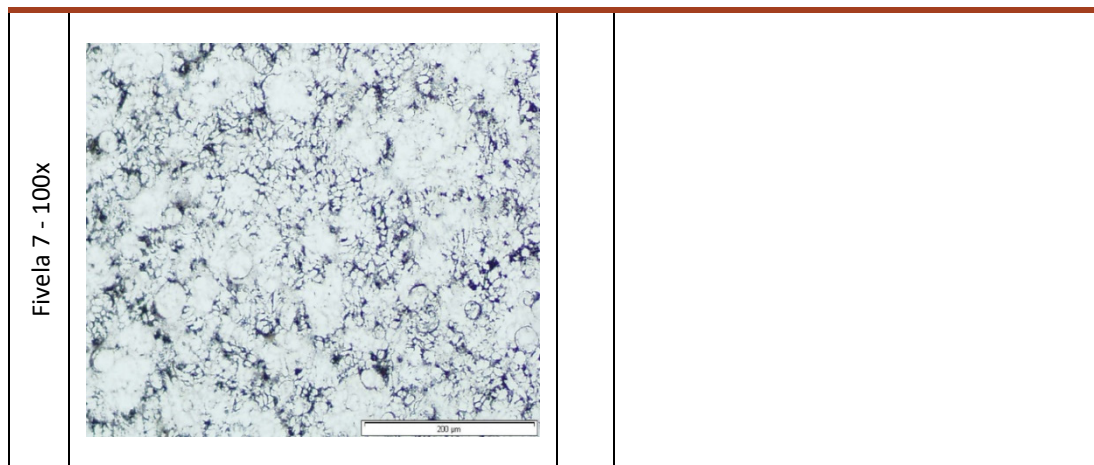
	Após o ataque químico, secaram-se as amostras e colocaram-se no microscópio ótico para se proceder à análise a diferentes ampliações.
--	---

3.4.3.2 Resultados

A Tabela 14 mostra os resultados obtidos no ensaio metalográfico e as respectivas ampliações.

Tabela 14. Registo das micrografias das amostras fivela 2, 3, 6 e 7.





3.4.3.3 Análise crítica dos resultados

Como não se analisou o revestimento, apenas é ilustrado na Tabela 14 o revestimento da amostra da fivela nº 2, como representativa de todas as outras amostras.

Com base na literatura, não foi possível encontrar resultados comparáveis com o ataque químico efetuado. No entanto, existem dados referentes ao ataque químico usando óxido de cromo (CrO_3), sulfato de sódio (Na_2SO_4) e água. Comparando os resultados obtidos e os resultados encontrados na literatura [41], é possível inferir que este material pode ser composto por uma liga de zinco contendo alumínio.

3.5 Tempestade de ideias/anteprojeto (*brainstorming*)

Partindo-se dos requisitos previamente estipulados, a escolha de materiais recaiu de forma natural nos materiais compósitos. Existem cinco principais famílias de materiais: 1) metais; 2) cerâmicos e vidros, que apresentam um comportamento demasiado frágil, não podendo desempenhar funções estruturais; 3) polímeros e elastômeros que, embora possuam características interessantes, não apresentam rigidez nem resistência mecânica suficiente para se produzir fivelas com comportamento mecânico satisfatório; e 4) materiais compósitos, que potencialmente possuem as características necessárias à execução deste trabalho.

Feita a escolha da classe de materiais a usar, colocou-se a questão relativa ao tipo de reforço, matriz e o processo de fabrico para obtenção da peça final. Dentro dos três reforços mais usados, destaca-se a fibra de carbono. Com excelentes propriedades mecânicas, é o material de eleição na substituição de componentes produzidos em materiais metálicos até ao momento. No fluxograma seguinte analisam-se os vários caminhos abordados para a obtenção de uma possível solução credível e inovadora.

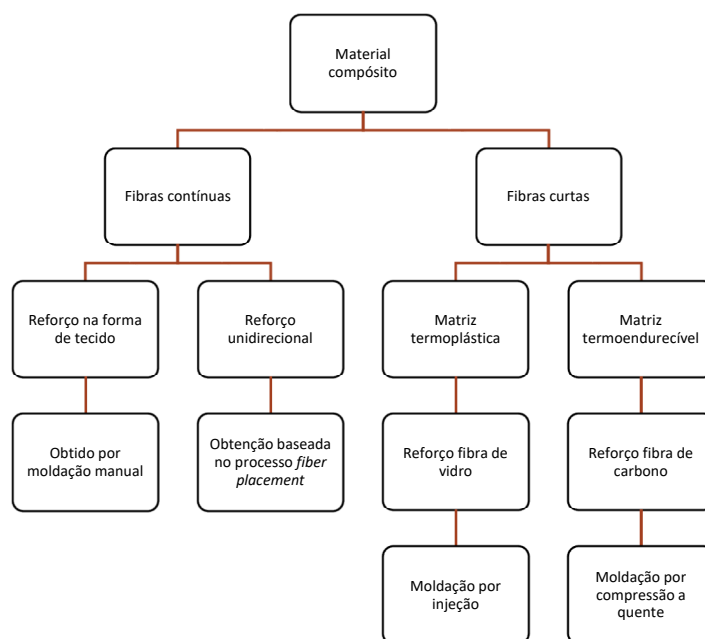


Figura 41. Vários caminhos possíveis para a obtenção da fivela em material compósito.

Para a obtenção de componentes em materiais compósitos, a moldação manual é o processo mais simples a ser utilizado. Como primeiro recurso propôs-se produzir um molde aberto e preencher-se a cavidade com sucessivas camadas de reforço impregnado numa resina. Como reforço poder-se-ia colocar tecido de fibras de carbono contínuas (Figura 42).



Figura 42. Reforço de fibra de carbono na forma de tecido (fornecedor *Torayca*).

A Figura 43 representa o método considerado para a obtenção da fivela por este processo.

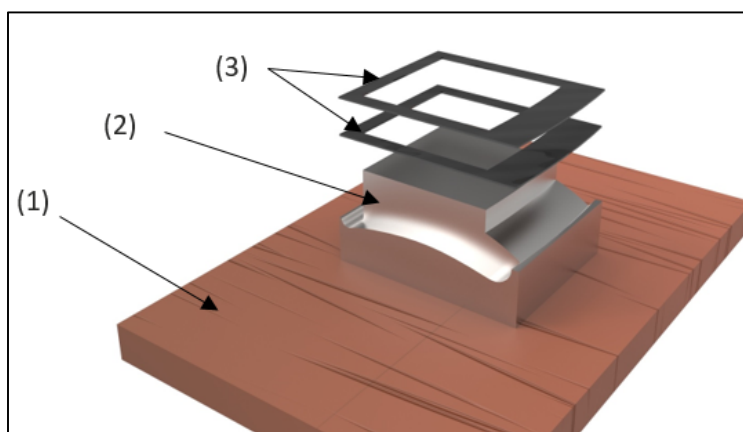


Figura 43. Representação do processo de moldação manual para obtenção da fivela.

O molde aberto (2), apoiado na mesa de trabalho (1), conteria uma cavidade com a forma da fivela nº3 (Figura 25). Preencher-se-ia a cavidade com várias camadas de reforço (3) até se atingir a espessura desejada. Neste ponto do projeto, escolheu-se esta fivela unicamente para efeitos representativos.

Mesmo sendo um processo bastante simples de executar, descartou-se esta solução já que existe um grande desperdício de material e não é possível retirar partido da boa resistência mecânica oferecida pelo reforço, tanto na direção longitudinal, como na transversal. Além disto, a necessidade de um corte interior no reforço provoca descontinuidade no material e conseqüente perda de resistência mecânica.

Numa tentativa de se utilizar as boas características mecânicas oferecidas pelas fibras contínuas, propôs-se uma solução mais excêntrica baseada no processo de moldação por *fiber placement*. A peça em material compósito seria obtida com o auxílio de um braço robótico com uma ferramenta rotativa acoplada na sua extremidade. Esta seria composta por um pequeno reservatório de resina, por onde passaria o reforço sob a forma de fio (Figura 44) e, no final, com o auxílio de um bico, que funcionaria como guia, seria depositado no molde (Figura 45).



Figura 44. Reforço de fibra de carbono na forma de fio (fornecedor *Torayca*).

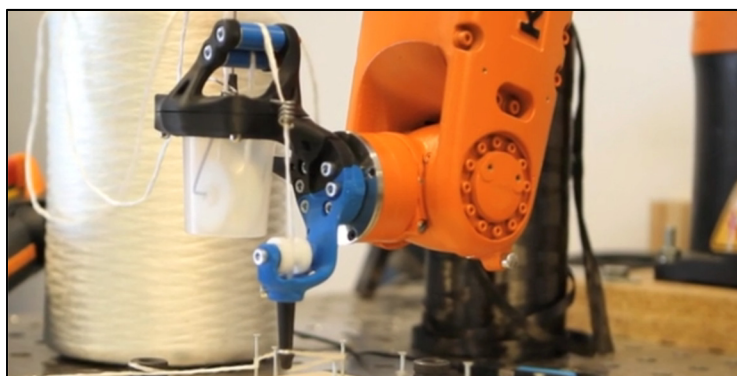


Figura 45. Braço robótico de deposição de reforço pré-impregnado sob a forma de fio.

Devido à complexidade da fivela, o molde seria fixo a uma garra que permitiria a sua rotação. Deste modo, o braço robótico seria capaz de contornar o molde e seria mais fácil a deposição de material.

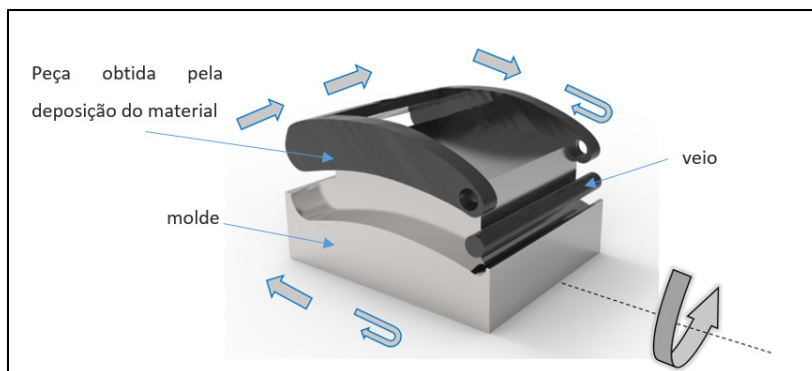


Figura 46. Esquema representativo do processo automático para obtenção da fivela com reforço de fibras contínuas

A rotação do molde é representada pela seta em torno do eixo. Este movimento facilitaria a deposição de material, e o trajeto efetuado pela ferramenta de deposição acoplada ao braço *robot* é esquematizada pelas restantes setas. Um veio maciço seria colocado e de seguida depositar-se-ia o material de forma a abraçar o veio e ligá-lo ao resto da peça. Desta forma, simplificar-se-ia o processo, uma vez que a geometria cilíndrica era mais difícil de se garantir com um molde aberto. Este trajeto seria controlado e repetido até que a espessura e a forma requerida fossem atingidas.

No outro lado do espectro de soluções encontram-se os reforços de fibras curtas. Estas, embora com propriedades mecânicas inferiores que as fibras contínuas, apresentam-se como um bom recurso à substituição de componentes em materiais metálicos. Apostando-se em duas matérias-primas com diferente reforço, fibras de vidro e carbono, procurou-se obter fivelas com resistência satisfatória e bom acabamento superficial. Recorrer-se-ia a processos como a moldação por compressão a quente e a injeção, com a mais valia de se poder utilizar equipamentos tradicionais e com taxas de produção elevadas.

Com estas quatro abordagens, tentou-se estudar todas as alternativas em termos de materiais e processos que poderiam oferecer uma boa solução para o projeto de uma fivela não metálica.

3.6 Estudo da matéria-prima a utilizar

Como resultado da análise química efetuada determinou-se que as fivelas são constituídas por material metálico Zamak 3. Para uma melhor compreensão sobre esta liga de zinco, a Tabela 15 e Tabela 16 apresentam a sua composição e as suas propriedades mecânicas, respetivamente.

Tabela 15. Composição química do material Zamak 3 (Fonte: *Eastern Alloys Inc.*).

Zn	Al	Mg	Cu	Fe	Pb	Cd	Sn
95,48-96,28	3,70-4,30	0,02-0,06	≤ 0,10	≤ 0,05	≤ 0,005	≤ 0,004	≤ 0,002

Tabela 16. Propriedades mecânicas e físicas do material Zamak 3 (Fonte: *Eastern Alloys Inc.*).

Tensão de rutura (MPa)	283
Módulo de Elasticidade (GPa)	85,5
Coefficiente de Poisson	0,27
Alongamento (%)	10
Dureza (HB)	82
Densidade (kg/m³)	6600
Temperatura de Fusão (°C)	381-387

É da maior importância o conhecimento e a compreensão das propriedades deste material, uma vez que servirão de termo de comparação para se efetuar a seleção de materiais.

3.6.1 Condições

Após a fase onde se procedeu à determinação do material das fivelas, foi necessário definir-se as premissas para se efetuar uma correta seleção de materiais, das quais se destacaram:

- Exclusão das classes dos materiais metálicos, cerâmicos e vidros;
- A resistência mecânica seria tanto quanto possível próxima do Zamak 3, com valor de referência de 283 MPa;
- Considerou-se valores aceitáveis de rigidez (módulo de elasticidade), nunca inferiores à ordem de grandeza do material comparável, 85 GPa.

3.6.2 Seleção de materiais

Com base nas condições impostas e com o auxílio do programa CES EduPack, procedeu-se à seleção dos materiais. Este programa contém uma alargada base de dados e tem por base os gráficos de seleção de materiais de *Michael Ashby*. O primeiro gráfico em que se compara a resistência mecânica com o módulo de elasticidade e se excluiu os materiais de foro cerâmico, metálico e vidros, é apresentado na Figura 47.

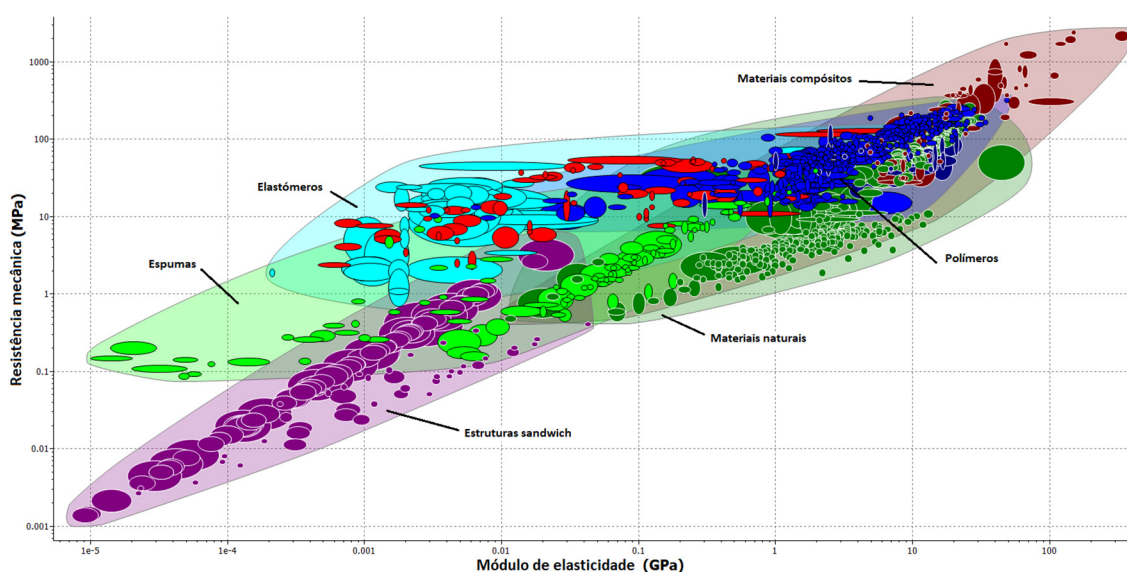


Figura 47. Primeiro gráfico gerado no programa CES EduPack para se proceder à seleção dos materiais.

De seguida impuseram-se as restantes premissas e limitou-se a resistência mecânica a valores superiores a 270 MPa, o que permitiu uma pequena redução em relação à resistência do Zamak 3 e o módulo de Young a valores entre 1 e 200 GPa. Por fim, gerou-se o gráfico apresentado Figura 48, com a panóplia de materiais que cumprem todos os requisitos estipulados em termos de propriedades mecânicas.

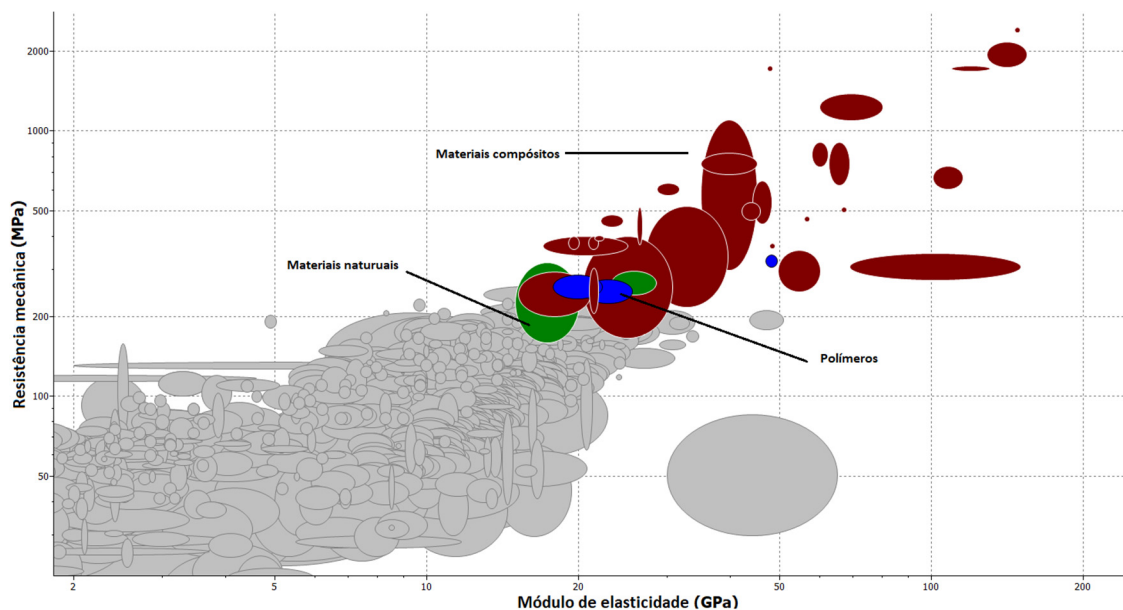


Figura 48. Gráfico gerado no programa CES EduPack representativo dos materiais resultados da seleção dos materiais.

Como representado na Figura 48, obtiveram-se os seguintes materiais:

- dois materiais da classe das madeiras;
- poliarilamida com 50% ou 60% de reforço de fibra de vidro, representativos da classe dos polímeros;
- materiais compósitos de matriz poliéster ou epóxida, com reforço de fibras de vidro na forma de tecido ou reforço de fibras de carbono na forma unidirecional.

Excluindo-se as madeiras devido à sua anisotropia (propriedades variam com a direção), escolheram-se três materiais com características distintas, um com comportamento anisotrópico [C(T300)/ Epoxy(934)] e dois com comportamento isotrópico no plano (Ixef 1032 e HexMC), a destacar:

- C(T300)/ Epoxy(934), material compósito unidirecional de matriz polimérica, reforçado com fibras de carbono contínuas. Contém uma percentagem de volume de fibras (V_f) de 60% e as suas propriedades poderão ser analisadas na Tabela 17;
- Ixef 1032, nome comercial da poliarilamida, que é um material compósito de matriz termoplástica reforçado com 60% de fibras curtas de vidro, indicado para o processo de moldação por injeção. As suas propriedades são descritas na Tabela 18;

- HexMC, que é um material compósito de matriz termoendurecível, reforçado com fibras curtas de carbono, indicado para o processo de compressão a quente. As suas propriedades são descritas na Tabela 18;

Tabela 17. Propriedades e tensões de rutura do compósito unidirecional C(T300)/Epoxy(934) [18].

Módulo de elasticidade		Módulo de corte		Coeficiente de Poisson	
Direção longitudinal E11 (GPa)	Direção Transversal E22 = E33 (GPa)	G12 = G13 (GPa)	G23 (GPa)	v12 = v13	v23
138	9,65	4,55	3,40	0,30	0,42

Tensões de rutura				
Longitudinal à tração [σ_{t1} (MPa)]	Longitudinal à compressão [σ_{c1} (MPa)]	Transversal à tração [σ_{t2} (MPa)]	Transversal à compressão [σ_{c2} (MPa)]	Ao corte [τ_{12} (MPa)]
1314	1280	43	168	48

Tabela 18. Propriedades dos materiais Ixef 1032 e HexMC [47, 49].

	Módulo de elasticidade	Coeficiente de Poisson	Tensão de rutura
Material	E (GPa)	v	σ (MPa)
Ixef 1032	24	0,35	280
HexMC	38	0,30	300

Para uma melhor compreensão, e sabendo-se que o HexMC não é um material ainda muito divulgado e conhecido, de seguida faz-se uma pequena descrição deste material e no que este difere de outros materiais compósitos com reforço de fibras de carbono.

Os pré-impregnados, devido à existência de fibras contínuas na sua constituição, em contraste com as fibras curtas presentes nos SMC, apresentam propriedades mecânicas superiores. Em contrapartida, os SMC são menos dispendiosos e conseguem-se obter formas mais complexas através da moldação por compressão. Para preencher a lacuna existente entre estes dois tipos de materiais, a Hexcel Composites desenvolveu um semi-produto, designado *HexMCTM*, em tudo

idêntico ao processo simples de obtenção dos SMC, contudo, contendo propriedades similares às obtidas com os pré-impregnados carbono/epóxidos. Assim, consegue-se um rácio “propriedades-custo” que permite competir em inúmeras aplicações com os materiais metálicos. O HexMC provém de um pré-impregnado, como o ilustrado na Figura 49.



Figura 49. Pré-impregnado que origina o HexMC (Fonte: *HexMC user guide* [49]).

Este é cortado em tiras e colocado aleatoriamente, e o seu aspeto final é ilustrado na Figura 50.



Figura 50. Material compósito HexMC [(Fonte: *HexMC user guide* [49]).

O semi-produto final apresenta-se em formato de folha e é entregue em rolos. Dependendo da peça a ser moldada, a pressão no molde poderá ir dos 5 aos 15 MPa. A temperatura típica de cura encontra-se entre 120 e 160°C com uma duração de 5 minutos para peças de espessura até 2 mm e de 5 a 10 minutos se a espessura for superior. Contém tipicamente 57% de fibras em volume e a sua resistência mecânica situa-se entre 250 e 300 MPa. Com um módulo de elasticidade de 45 MPa, é ideal para peças que necessitem de elevada rigidez e baixo peso. Surpreendentemente, o HexMC apresenta uma pequena redução de resistência mecânica comparando com o pré-impregnado que lhe dá origem. O seu reforço, como já referenciado, é

constituído por fibras descontínuas e, por tal facto, este material apresenta comportamento isotrópico no plano [38, 39, 40, 41].

3.6.3 Conclusões da seleção de materiais

De forma a analisar no próximo passo o comportamento mecânico de diferentes materiais, existiu a necessidade, baseada nas classes e materiais que cumpriam os requisitos estipulados, de se escolher materiais oriundos de diferentes categorias e reforços e, se possível, com diferente comportamento mecânico. Assim, optou-se pelo C(T300)/Epoxy(934), com reforço unidirecional e comportamento anisotrópico, e dois materiais de classes diferentes, mas com comportamento quase isotrópico, o Ixef 1032 com reforço de fibras de vidro e o HexMC com reforço de fibras de carbono.

A grande vantagem desta seleção recai sobre a possibilidade de se testar diferentes materiais, em que cada um é obtido por diferentes processos de fabrico.

3.6.4 Possíveis fornecedores/mercado

O pré-impregnado C(T300)/Epoxy(934) é constituído pela resina epóxida CyCom 934 e pelo reforço de fibras de carbono contínuas T300. É um compósito fornecido pela Cytec Industries Inc.

O polímero poliarilamida com 60% de reforço de fibras de vidro curtas, com o nome comercial de Ixef 1032, é fornecido pela Solvay.

O HexMC é um compósito constituído por fibras de carbono descontínuas e, como já referido, é fornecido pela Hexcel Composites.

3.7 Aplicação do Método de Elementos Finitos

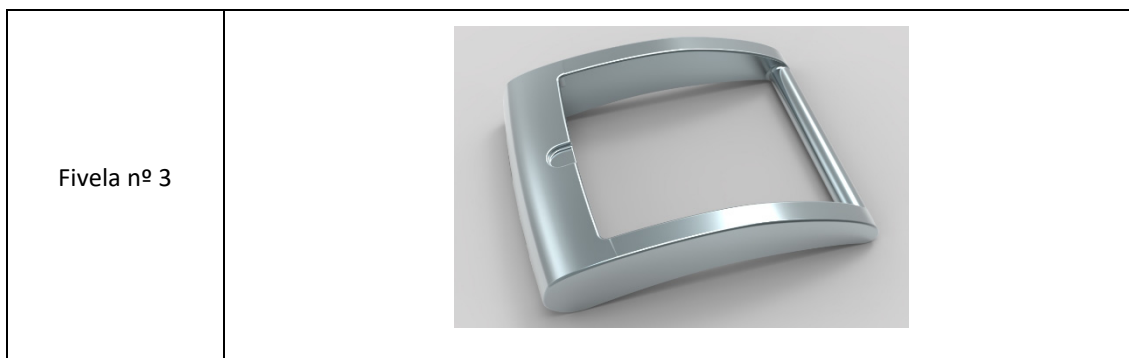
Nesta nova fase dos trabalhos pretendeu-se encontrar soluções, através dos materiais não metálicos já selecionados, que pudessem apresentar resistência mecânica, rigidez e processo de fabricação compatíveis com as necessidades previamente estabelecidas. Assim, efetuaram-se simulações por Elementos Finitos com vista a aproximar tanto quanto possível as propriedades destes materiais com as registadas com as fivelas de Zamak 3.

3.7.1 Geometrias consideradas

De seguida são mostrados na Tabela 19 os modelos ('renderizados') utilizados nas simulações pelo MEF. Alguns elementos que não interferiam na resistência da fivela em trabalho normal foram retirados, para minimizar o tempo de processamento.

Tabela 19. Modelos das fivelas consideradas no estudo.

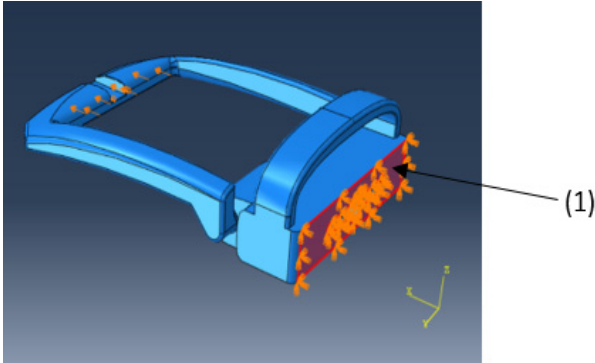
Fivela nº 1	 A 3D CAD model of a metal buckle, labeled 'Fivela nº 1'. It features a rectangular frame with rounded corners and a central locking mechanism on the right side.
Fivela nº2	 A 3D CAD model of a metal buckle, labeled 'Fivela nº2'. It has a similar rectangular frame design to Fivela nº1 but with a different locking mechanism on the right side.

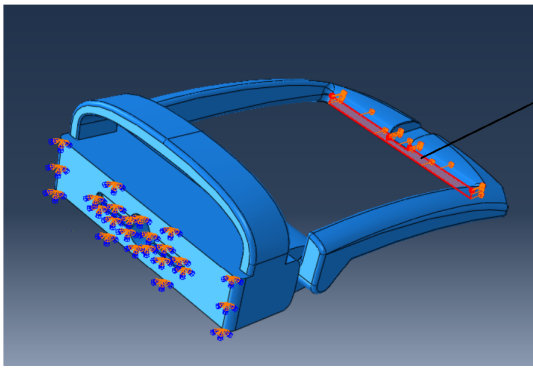
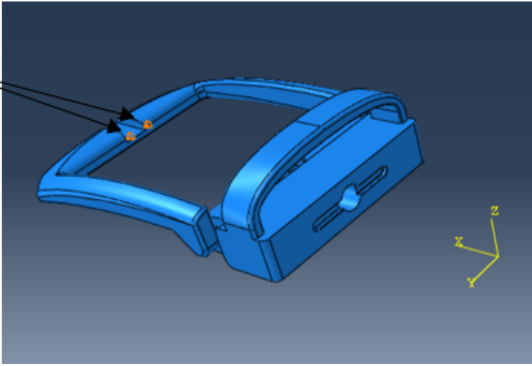
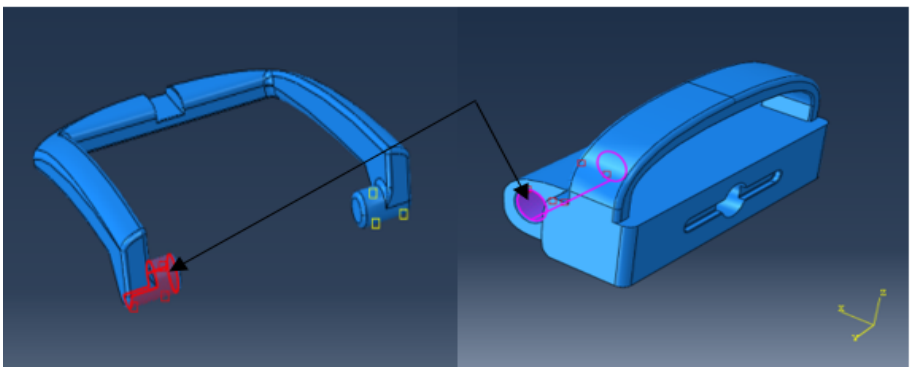


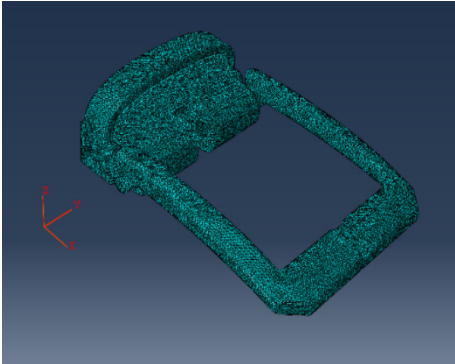
3.7.2 Abordagem às simulações: condições fronteira e parâmetros

As simulações foram executadas assumindo-se em todas elas as mesmas condições fronteira e parâmetros descritos na Tabela 20. Descreve-se seguidamente como exemplo e para uma melhor compressão a fivela nº 2 (Tabela 19). Como termo de comparação, aproximaram-se as simulações a um típico ensaio de tração, com a finalidade de se obter o gráfico Força-Deslocamento.

Tabela 20. Descrição das condições fronteiras e parâmetros da simulação efetuada na fivela nº 2.

Situação 1	
Comentários	<p>Na face (1) aplicou-se um encastramento, limitando-se os deslocamentos ($U_1=U_2=U_3=0$) e as rotações. Desta forma, consegue-se a equivalência ao aperto efetuado pela garra de fixação da máquina de tração.</p>

Situação 2	
Comentários	<p>Na face (2) aplicou-se um deslocamento. Nunca este foi inferior ao máximo deslocamento experimental registado para cada uma das peças simuladas.</p>
Situação 3	
Comentários	<p>Definiu-se um deslocamento nulo segundo a direção do eixo YY', nos dois pontos assinalados ($U_2=0$). Estes estão à mesma distância do eixo XX'. Deste modo, garante-se que o único deslocamento da peça é na direção desejada, segundo o eixo XX'.</p>
Situação 4	

Comentários	<p>Definiu-se uma interação entre as superfícies do veio e do furo assinalados. As características do contacto são as seguintes:</p> <ul style="list-style-type: none"> • comportamento tangencial – “<i>Frictionless</i>” – sem atrito ou sem fricção; • comportamento normal – “<i>Hard Contact</i>” – denominado por contacto duro, equivalente a dizer-se que não existe deformação de nenhuma das superfícies. <p>No lado oposto, defeniu-se o mesmo tipo de contacto.</p>
Situação 5	
Comentários	<p>Na geração da malha de Elementos Finitos, atribuiu-se um tamanho médio de 0,5 mm a cada elemento. A análise efetuada em todas as simulações foi estática e linear. Ou seja, assume-se comportamento linear elástico para todos os materiais, cargas aplicadas estaticamente e deformações reduzidas na peça.</p>

Como preâmbulo às simulações, convém salientar que, para caracterizar o comportamento de tensão-deformação de uma camada de qualquer material compósito unidirecional, é necessário conhecer as nove constantes independentes, $E_{11}, E_{22}, E_{33}, G_{12}, G_{13}, G_{23}, \nu_{12}, \nu_{13}$ e ν_{23} . A Figura 11 ilustra as direções principais, bem como os três planos ortotrópicos considerados para a análise. Assume-se que as propriedades na direção 2 e 3 (direções transversais) são iguais, ou seja, $E_{22} = E_{33}, G_{12} = G_{13}$ e $\nu_{12} = \nu_{13}$.

De seguida, apresenta-se na Tabela 21 as nove constantes independentes do compósito unidirecional selecionado, com a designação comercial C(T300)/Epoxy(934).

Tabela 21. Propriedades do compósito unidirecional C(T300)/Epoxy(934) [18].

Módulo de elasticidade		Módulo de corte		Coeficiente de Poisson	
Direção longitudinal E11 (GPa)	Direção Transversal E22 = E33 (GPa)	G12 = G13 (GPa)	G23 (GPa)	v12 = v13	v23
138	9,65	4,55	3,40	0,30	0,42

O Zamak 3 é um material metálico que possui comportamento isotrópico, em que as propriedades são as mesmas em todas as direções. Os dois compósitos de fibras curtas não apresentam esta isotropia. Devido ao processo de fabrico (moldação por injeção) e à orientação aleatória do Ixef 1032, adotando-se uma abordagem simplista, reduziu-se a rigidez do material (módulo de elasticidade) em 20% e, desta forma, assumiu-se nas simulações um comportamento isotrópico para este material. De uma forma mais conservadora, procedeu-se também à redução do valor das tensões de rutura do Ixef 1032 e do HexMC em 20%. A Tabela 22 apresenta os valores utilizados nas simulações para estes dois compósitos, já com a devida redução.

Tabela 22. Propriedades dos materiais de fibras curtas usadas nas simulações.

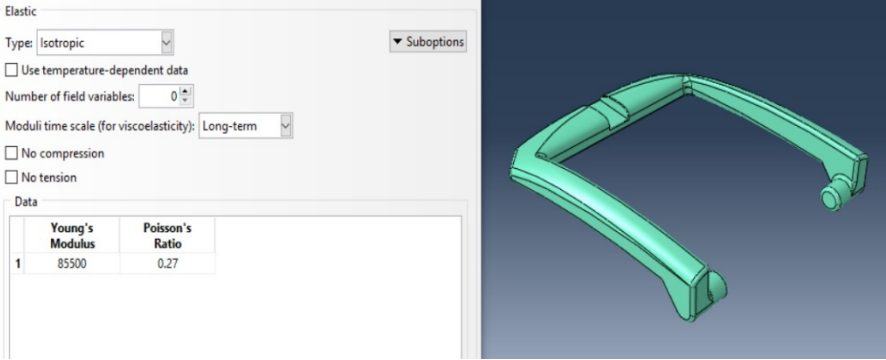
	Módulo de elasticidade	Coeficiente de Poisson	Tensão de rutura
Material	E (GPa)	v	σ (MPa)
Ixef 1032	19,2	0,35	224
HexMC	38	0,30	240

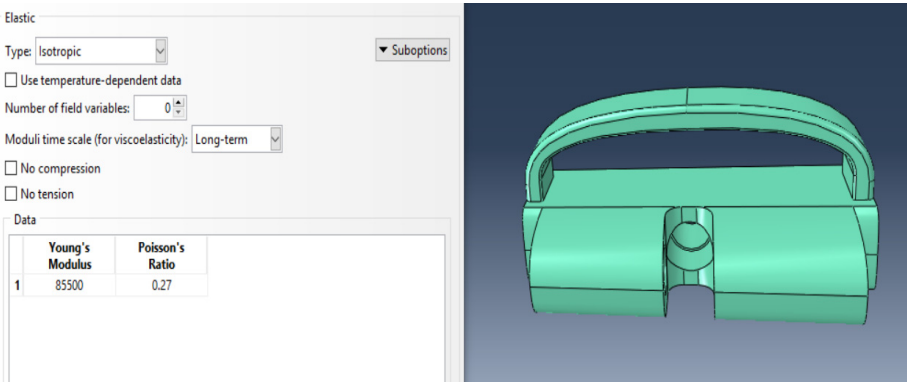
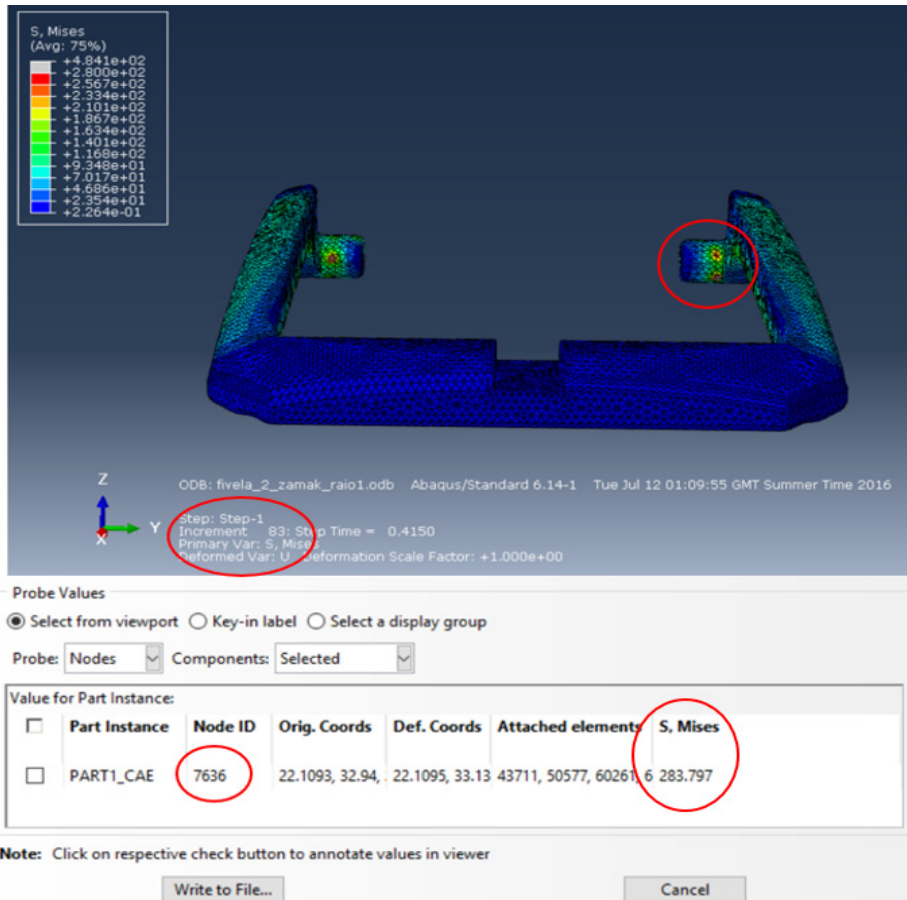
3.7.3 Simulações

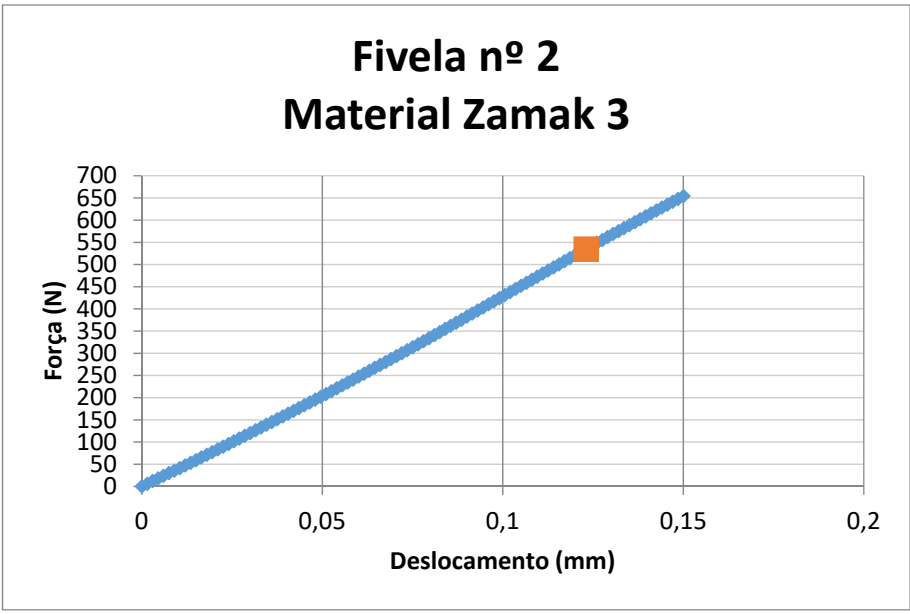
As simulações foram executadas recorrendo-se ao programa de Elementos Finitos Abaqus/CAE. Pretendeu-se saber qual a força máxima correspondente ao momento em que é atingida a tensão de rutura do material a analisar, tendo em conta a geometria da fivela considerada.

Primeiramente, e para que servisse como referência, foi efetuada a simulação tendo por base o material original da fivela, ou seja, o Zamak 3 (Tabela 23). Posteriormente, os resultados obtidos serão comparados com os valores obtidos nos ensaios de tração previamente realizados e analisados.

Tabela 23. Simulações com o material Zamak 3.

1ª Simulação	Simulou-se o modelo da fivela nº2 em material Zamak 3. Posteriormente comparou-se os valores de força máxima obtidos pela análise de Elementos Finitos com os conseguidos nos ensaios de tração.						
Parametrização da simulação	 <p>Elastic</p> <p>Type: <input type="text" value="Isotropic"/> ▼ Suboptions</p> <p><input type="checkbox"/> Use temperature-dependent data</p> <p>Number of field variables: <input type="text" value="0"/></p> <p>Moduli time scale (for viscoelasticity): <input type="text" value="Long-term"/></p> <p><input type="checkbox"/> No compression</p> <p><input type="checkbox"/> No tension</p> <p>Data</p> <table border="1" data-bbox="454 1444 670 1512"> <thead> <tr> <th></th> <th>Young's Modulus</th> <th>Poisson's Ratio</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>85500</td> <td>0.27</td> </tr> </tbody> </table>		Young's Modulus	Poisson's Ratio	1	85500	0.27
	Young's Modulus	Poisson's Ratio					
1	85500	0.27					

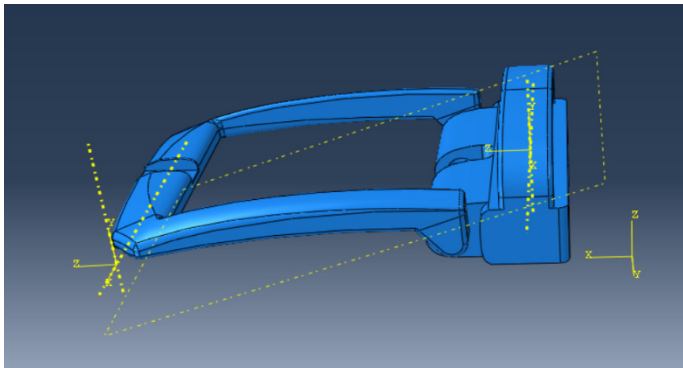
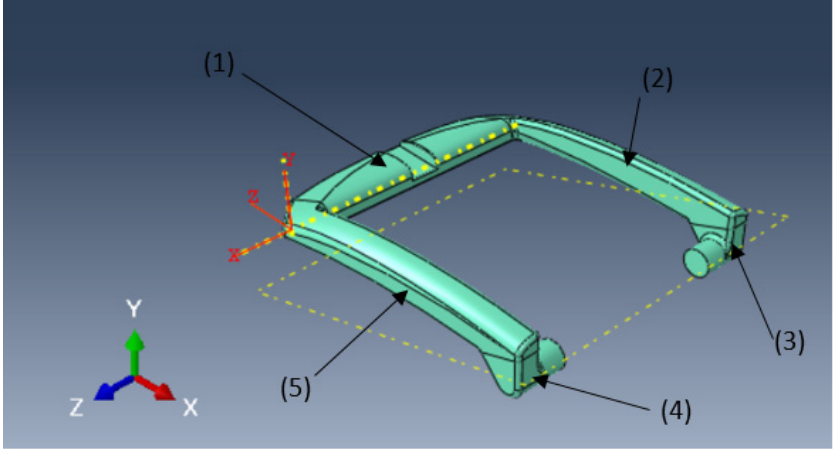
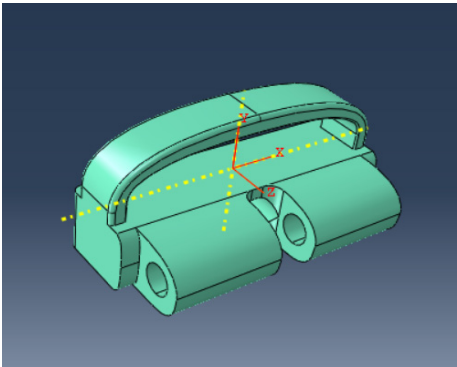
<p>Parametrização da simulação</p>													
<p>Comentários</p>	<p>Conforme se pode observar, o modelo utilizado nesta simulação é o nº 2 (conforme Tabela 19), utilizando-se as propriedades do Zamak 3 para teste. Os pinos da fivela, mesmo antes da simulação, aparentam ser o ponto mais frágil deste modelo já que, quando sujeitos à força de tracção, irão ter tendência a fletir e a sair do seu alojamento natural na peça de ligação ao cinto.</p>												
<p>Aspetto da malha na zona crítica</p>	 <table border="1" data-bbox="443 1653 1353 1794"> <thead> <tr> <th>Part Instance</th> <th>Node ID</th> <th>Orig. Coords</th> <th>Def. Coords</th> <th>Attached elements</th> <th>S, Mises</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PART1_CAE</td> <td>7636</td> <td>22.1093, 32.94,</td> <td>22.1095, 33.13</td> <td>43711, 50577, 60261</td> <td>6 283.797</td> </tr> </tbody> </table>	Part Instance	Node ID	Orig. Coords	Def. Coords	Attached elements	S, Mises	PART1_CAE	7636	22.1093, 32.94,	22.1095, 33.13	43711, 50577, 60261	6 283.797
Part Instance	Node ID	Orig. Coords	Def. Coords	Attached elements	S, Mises								
PART1_CAE	7636	22.1093, 32.94,	22.1095, 33.13	43711, 50577, 60261	6 283.797								

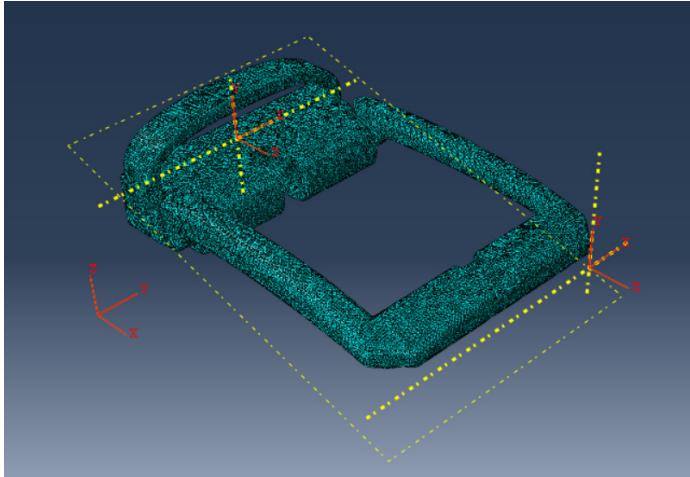
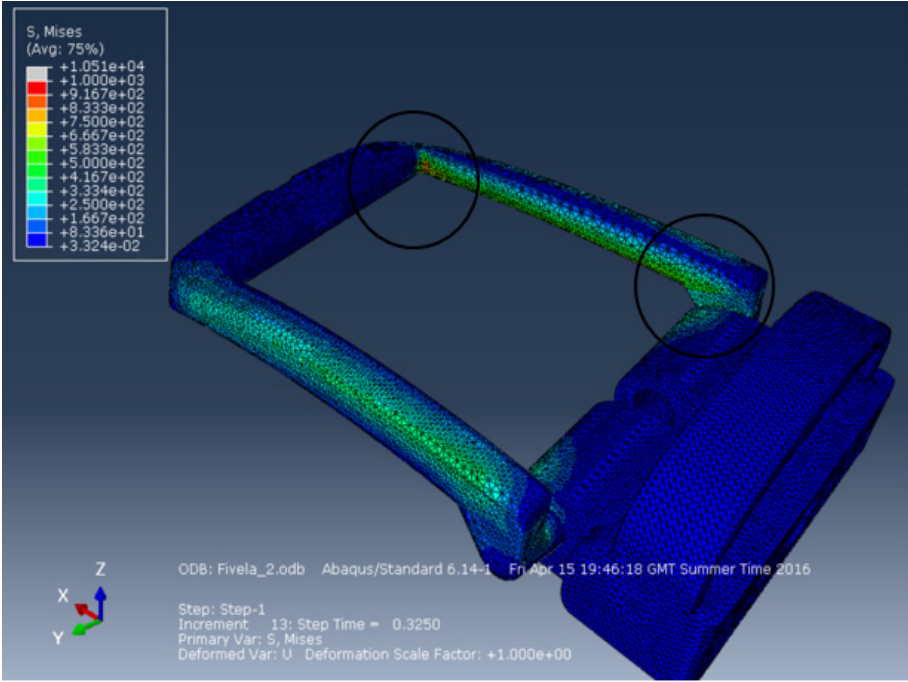
Comentários	Iniciou-se a simulação e com o decorrer desta, simultaneamente, analisou-se as tensões que se iam gerando na peça. Quando um nó atingisse o valor de tensão de rutura do material, neste caso 280 MPa, parar-se-ia a simulação e verificar-se-ia qual o valor do incremento correspondente a esse momento.												
Gráfico Força-Deslocamento referente à simulação	<p style="text-align: center;">Fivela nº 2 Material Zamak 3</p>  <table border="1"> <caption>Dados do Gráfico Força-Deslocamento</caption> <thead> <tr> <th>Deslocamento (mm)</th> <th>Força (N)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>0,05</td> <td>180</td> </tr> <tr> <td>0,1</td> <td>360</td> </tr> <tr> <td>0,12</td> <td>535</td> </tr> <tr> <td>0,15</td> <td>660</td> </tr> </tbody> </table>	Deslocamento (mm)	Força (N)	0	0	0,05	180	0,1	360	0,12	535	0,15	660
Deslocamento (mm)	Força (N)												
0	0												
0,05	180												
0,1	360												
0,12	535												
0,15	660												
Comentários	No final de cada simulação, gerou-se um gráfico Força-Deslocamento. O valor da força para o qual se atingem os 280 MPa foi de 535 N (aproximadamente 55 kgf) e o deslocamento correspondente foi de 0,12 mm.												

Seguidamente analisam-se os diversos passos das simulações realizadas com os materiais compósitos (Tabela 24), assim como os respetivos comentários.

Tabela 24. Simulações com os materiais compósitos.

2ª Simulação	<p>Modelo da fivela: nº 2</p> <p>Material: compósito unidirecional C(T300)/Epoxy(934) cujas propriedades estão descritas na Tabela 21.</p>
--------------	--

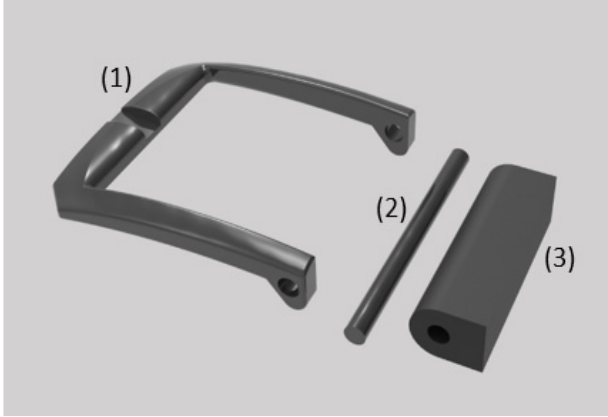
Situação 6	
Situação 7	
Comentários	<p>Um compósito é um material que apresenta propriedades anisotrópicas, ou seja, que variam consoante a direção. Depois de se definir as nove propriedades independentes descritas na Tabela 21, dividiu-se a parte da fivela ilustrada em quatro secções e em cada uma delas definiu-se as suas direções principais. Nas secções (2 e 5) utilizou-se o eixo ortogonal global, enquanto nas secções (1, 3 e 4) se definiu um eixo secundário (representado a amarelo).</p>
Situação 8	

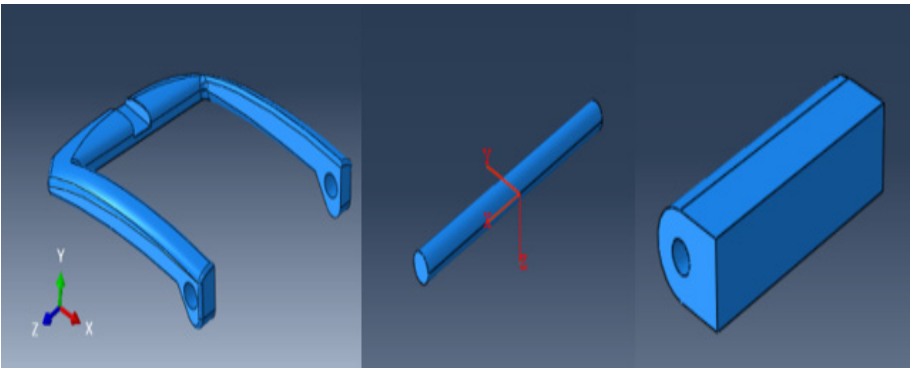
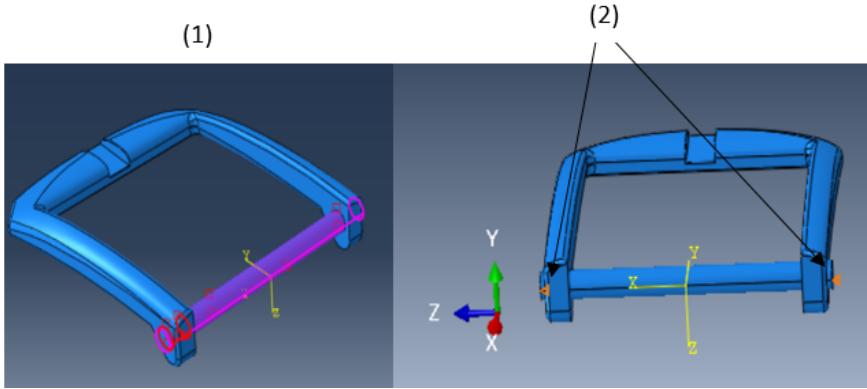
Comentários	Na peça representada também se recorreu a um eixo secundário para se indicar as direções principais.
Situação 9	
Comentários	Criou-se uma malha de Elementos Finitos e definiu-se as condições fronteira e os parâmetros descritos inicialmente.
Situação 10	

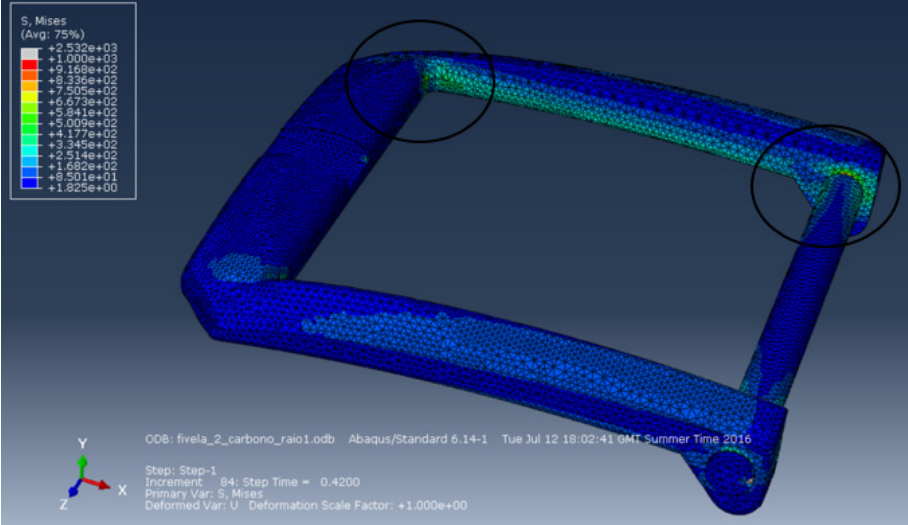
Comentários	Como é visível na Tabela 21, este apresenta valores elevados de tensão de rutura à tração, na direção longitudinal. Tal característica deveu-se à orientação das fibras nessa direção, obtendo-se elevados valores de resistência mecânica. Em contrapartida, os valores de resistência na direção transversal são muito inferiores (10 vezes). Este factor criou alguma incerteza na análise das zonas críticas da fivela, onde poderia existir esforço de tracção, de corte, ou uma junção dos dois.
-------------	--

Concluída esta análise, iniciou-se uma terceira simulação com uma nova abordagem (Tabela 25), considerando-se agora o veio que faz a ligação anterior da fivela.

Tabela 25. Simulação com o modelo fivela nº2 composto por um veio maciço e aro exterior.

3ª Simulação	<p>Modelo: fivela nº 2, agora com dois componentes (veio maciço e aro exterior).</p> <p>Material: compósito unidirecional de fibras contínuas C(T300)/ Epoxy(934).</p>
Situação 11	
Comentários	O componente (1) é o mesmo do modelo da fivela nº2. Contém dois furos que permitem o encaixe do veio maciço (2). O componente de encaixe (3) serve de auxílio e substitui a função de um cinto. Desta forma, existe uma face lisa onde é possível aplicar uma das condições fronteira.

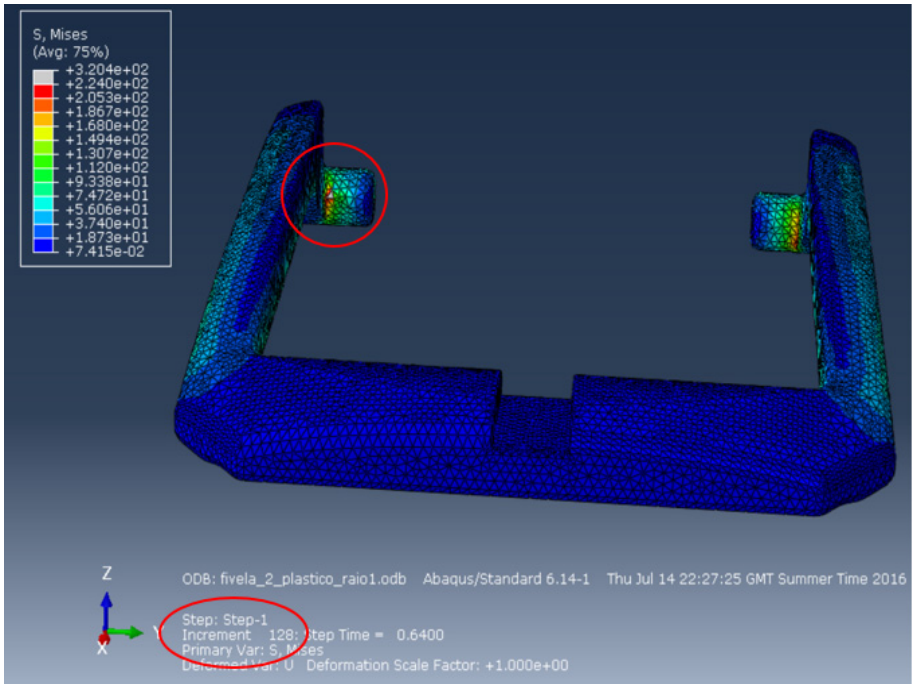
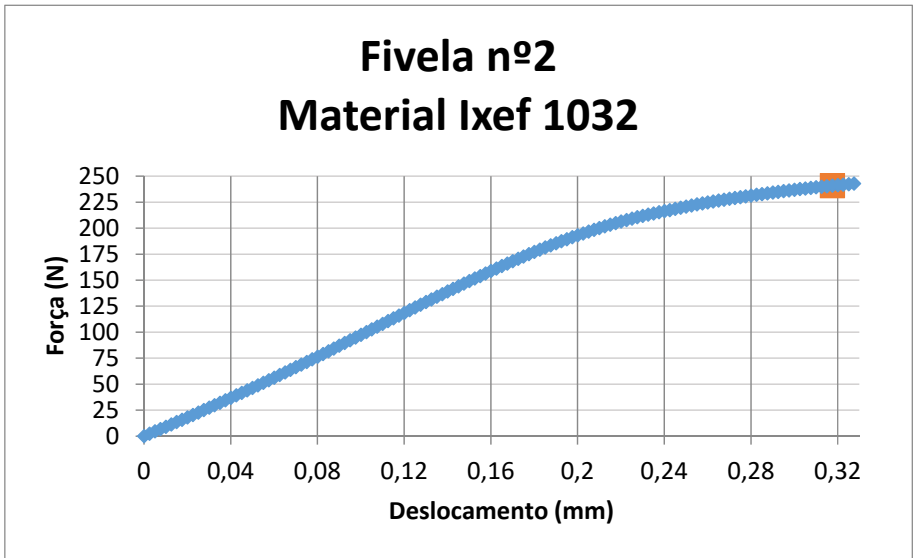
Situação 12	
Comentários	<p>Definiu-se os componentes 1 e 2 como material compósito. A direção principal do componente 1 é representada pelo eixo ortogonal principal. Para o componente 2 recorreu-se a um eixo secundário, representado a cor vermelha. O componente 3 definiu-se como uma liga de aço com módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson característicos deste material ($E = 210 \text{ GPa}$ e $\nu = 0,3$, respetivamente). Optou-se por considerá-lo como um material muito mais rígido e com comportamento isotrópico, de modo a não interferir na análise de tensões dos outros componentes.</p>
Situação 13	
Comentários	<p>As interações entre o veio e os dois furos (1) tinham as mesmas características descritas na situação 4. Aplicou-se também um deslocamento nulo ($U_3 = 0$) nos pontos assinalados (2), para se garantir que o veio não se desloca na direção do eixo ZZ'. O objetivo inicial era garantir um nível de atrito elevado na ligação entre o veio e os furos, de modo a aproximar a situação a um contacto real. Contudo, esta forma impossibilita o desenrolar da simulação. Assim, optou-se por esta solução menos complexa.</p>

<p>Situação 14</p>	
<p>Comentários</p>	<p>Existiu uma vez mais a dificuldade em se efetuar uma análise correta de tensões, já que o esforço de corte nas zonas assinaladas foi bastante acentuado. Um material compósito unidirecional, como já referido, contém propriedades extremamente atraentes do ponto de vista estrutural, na direção longitudinal das fibras. O problema encontra-se quando a solicitação é feita na direção transversal e se gera um esforço de corte acentuado. Devido às dúvidas geradas na análise de tensões da fivela com este tipo de material, procedeu-se à simulação de outras matérias-primas.</p>

A Tabela 26 mostra todos os resultados obtidos na simulação do modelo fivela nº2 com material Ixef 2032.

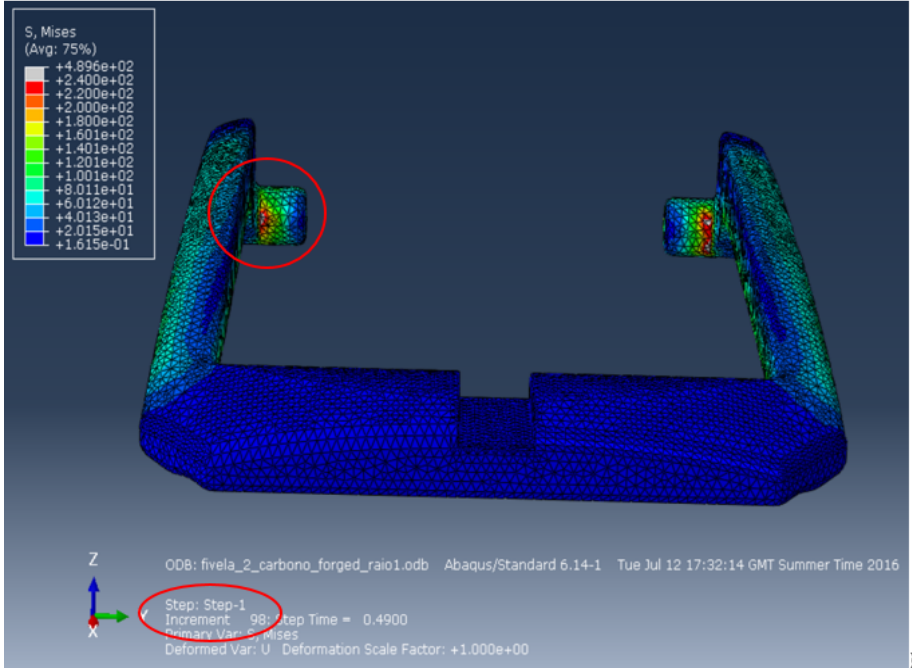
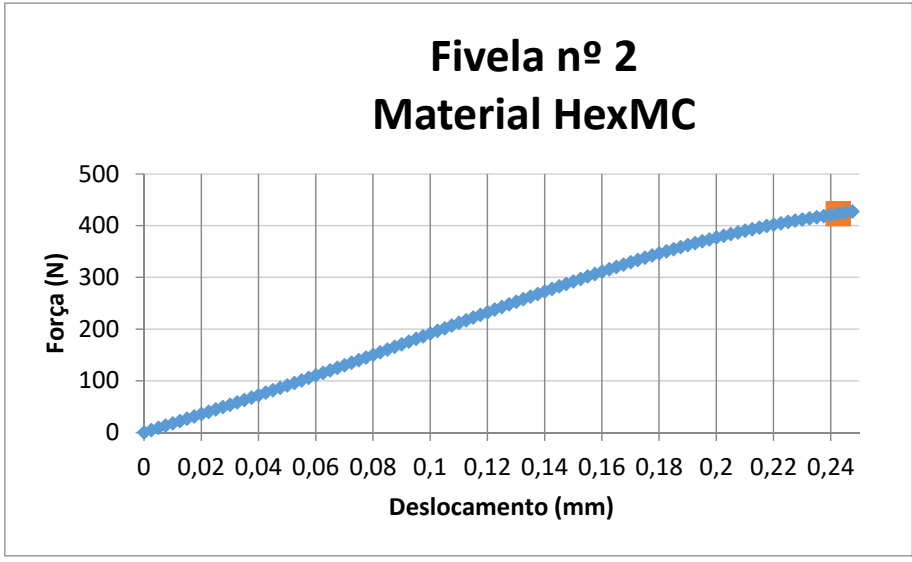
Tabela 26. Simulação com o modelo fivela nº 2 em material Ixef 1032.

<p>4ª Simulação</p>	<p>Foi analisado o modelo da fivela nº2 em material Ixef 1032. Os resultados obtidos foram comparados com os do material Zamak 3 e verificou-se qual a redução em termos de força máxima.</p>
---------------------	---

<p>Situação 15</p>	
<p>Gráfico nº2</p>	<p style="text-align: center;">Fivela nº2 Material Ixef 1032</p> 
<p>Comentários</p>	<p>Finalizou-se a simulação quando se atingiu na zona da fivela assinalada um tensão de rutura de 224 MPa. A força atingida foi de 241 N e o deslocamento de 0,32 mm. Relativamente ao Zamak 3, este material apresentou uma redução de 55% na resistência mecânica.</p>

A Tabela 27 mostra todos os resultados obtidos na simulação do modelo fivela nº2 com material HexMC.

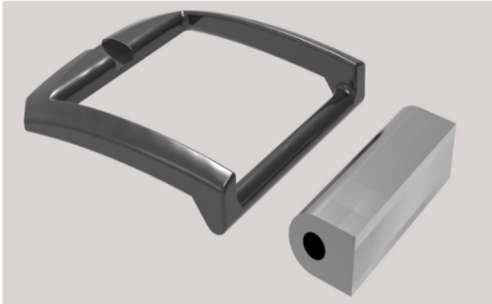
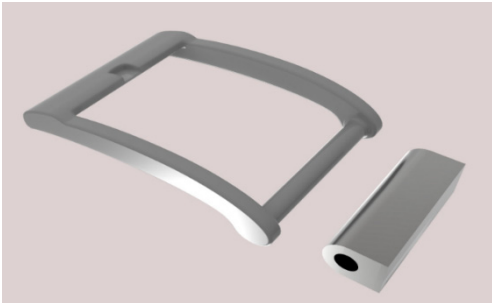
Tabela 27. Simulação do modelo de fivela nº 2 com o material HexMC.

<p>5ª Simulação</p>	<p>Modelo: fivela nº2 Material: HexMC.</p>																												
<p>Situação 16</p>																													
<p>Gráfico nº3</p>	<p style="text-align: center;">Fivela nº 2 Material HexMC</p>  <table border="1"> <caption>Data points for Fivela nº 2 Force-Displacement</caption> <thead> <tr> <th>Deslocamento (mm)</th> <th>Força (N)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>0,02</td> <td>~50</td> </tr> <tr> <td>0,04</td> <td>~100</td> </tr> <tr> <td>0,06</td> <td>~150</td> </tr> <tr> <td>0,08</td> <td>~200</td> </tr> <tr> <td>0,10</td> <td>~250</td> </tr> <tr> <td>0,12</td> <td>~300</td> </tr> <tr> <td>0,14</td> <td>~350</td> </tr> <tr> <td>0,16</td> <td>~400</td> </tr> <tr> <td>0,18</td> <td>~450</td> </tr> <tr> <td>0,20</td> <td>~480</td> </tr> <tr> <td>0,22</td> <td>~490</td> </tr> <tr> <td>0,24</td> <td>~420</td> </tr> </tbody> </table>	Deslocamento (mm)	Força (N)	0	0	0,02	~50	0,04	~100	0,06	~150	0,08	~200	0,10	~250	0,12	~300	0,14	~350	0,16	~400	0,18	~450	0,20	~480	0,22	~490	0,24	~420
Deslocamento (mm)	Força (N)																												
0	0																												
0,02	~50																												
0,04	~100																												
0,06	~150																												
0,08	~200																												
0,10	~250																												
0,12	~300																												
0,14	~350																												
0,16	~400																												
0,18	~450																												
0,20	~480																												
0,22	~490																												
0,24	~420																												

Comentários	Finalizou-se a simulação quando se atingiu na zona da fivela assinalada uma tensão de rutura de 240 MPa. A força atingida foi de 423 N e o deslocamento de 0,24 mm. Comparando-se com os valores do material Zamak 3, verificou-se uma redução de 21% na resistência mecânica.
-------------	--

Foram desenvolvidas novas simulações considerando os modelos de fivela nº 1 e nº 3. De modo a não transformar a descrição numa redundância, os resultados são sintetizados na Tabela 29. A Tabela 28 mostra as alterações efetuadas aos modelos iniciais das fivelas nº 1 e nº2.

Tabela 28. Alterações geométricas do modelo fivela nº1 e modelo fivela nº 2.

12ª - 17ª Simulação	Como a fivela nº3 apresentava diferenças geométricas significativas, nomeadamente um veio de encaixe que servia de ligação ao cinto, procedeu-se à alteração dos modelos das fivelas nº1 e nº2, alterando-se o tipo de encaixe.
Situação 17	
Situação 18	

Comentários	Para uma melhor distinção, denominou-se o modelo da situação 17 como “Fivela nº2 - peça inteira” e o da situação 18 como “Fivela nº1 - peça inteira”. Usou-se o componente auxiliar para facilitar as simulações, criando-se uma face lisa onde se pode aplicar o encastramento. Como já referido anteriormente, esta peça substitui a função de um cinto.
-------------	--

3.7.4 Síntese de resultados

Na Tabela 29 estão descritos os resultados obtidos de todas as simulações com os diferentes modelos e materiais.

Tabela 29. Resumo dos resultados das diferentes simulações.

	Incremento	Deslocamento (mm)	Força (N)	Redução (%)
Fivela nº1				
Zamak 3	25	0,06	558	
Ixef 1032	77	0,19	224	60
HexMC	61	0,15	425	24
Fivela nº2				
Zamak 3	83	0,12	535	
Ixef 1032	128	0,32	240	55
HexMC	98	0,24	423	21
Fivela nº3				
Zamak 3	25	0,06	424	
Ixef 1032	84	0,21	384	9
HexMC	46	0,11	374	12
Fivela nº1 peça inteira				
Zamak 3	33	0,08	506	
Ixef 1032	90	0,22	447	12
HexMC	50	0,12	403	20
Fivela nº2 peça inteira				
Zamak 3	44	0,11	504	
Ixef 1032	118	0,29	476	6
HexMC	78	0,19	496	2

3.7.5 Análise crítica dos resultados

A maior dificuldade sentida neste estudo prendeu-se com a análise dos materiais de fibras contínuas. A sua baixa resistência na direção transversal e a geometria das fivelas levou a concluir que estes não constituem uma boa solução. De destacar ainda a dificuldade de se processar este tipo de materiais, de modo a se obter uma fivela com resistência satisfatória.

Os compósitos compostos por fibras curtas provaram ser a escolha possível, como substituição do material metálico. Embora exista uma redução da resistência mecânica comparativamente ao Zamak 3 nas fivelas nº 1 e nº 2, as fivelas com o veio maciço de encaixe apresentaram valores com redução da resistência mecânica relativamente pequena.

A maior incerteza colocou-se na comparação do modelo real com os modelos simulados. Os valores de força máxima obtidos na simulação da fivela nº 2 em material metálico rondam os 535 N. Por outro lado, a média dos ensaios de tração foi de 1150 N. Ou seja, com o modelo analisado em Elementos Finitos, os valores obtidos são cerca de metade do modelo real. Esta discrepância de resultados pode ser explicada em parte pelas aproximações consideradas. Admitiu-se que o material apenas apresentava comportamento linear elástico, pelo que qualquer comportamento plástico é desprezado. Por outro lado, no modelo real poderá existir uma pequena deformação das superfícies que ligam os componentes da fivela. Como referido, aproximou-se estes contactos a uma ligação rígida em que não existe penetração de uma superfície na outra. A análise efetuada é bastante simplista e estes aspetos poderão não ser suficientes para justificar uma diferença tão acentuada dos valores de força máxima.

Efetuando-se uma comparação dos resultados obtidos entre as três matérias-primas (Zamak 3, Ixef 1032 e HexMC), verifica-se que o material menos rígido apresenta uma redução dos valores de força máxima na ordem dos 55%-60% e o material de rigidez intermédia na ordem de 20% a 24%. Analisando-se a geometria do modelo da fivela nº2 e nº1, conclui-se que a concentração de tensão existente no encaixe dos componentes corresponde ao local de maior probabilidade de rutura da peça.

Em sentido oposto, quando os modelos simulados continham o veio maciço de ligação (fivela nº 3, nº 1 peça inteira e nº 2 peça inteira), os três materiais apresentaram valores de força máxima muito semelhantes. Esperava-se um comportamento idêntico ao das fivelas iniciais (apresentadas na Tabela 19). Pelo contrário, essa redução não se verificou e os valores ficaram muito próximos uns dos outros. Este fenómeno poderia ser justificado devido à existência do veio maciço que liga as duas partes laterais da fivela. Deste modo, deveria existir uma maior distribuição dos esforços, aquando das simulações dos diferentes materiais.

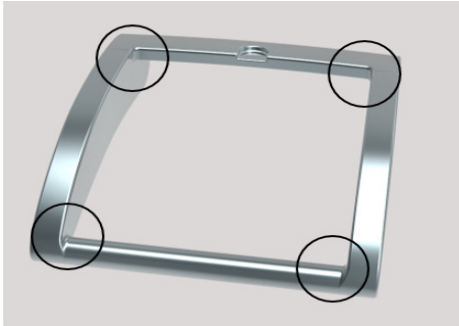
Uma vez que a fivela nº 3 tem como característica de fábrica o veio maciço, propõe-se que seja este modelo a base para uma possível fase de prototipagem. No entanto, não ficou evidente através deste estudo, e após a avaliação dos resultados das simulações, quais dos dois compósitos de fibras curtas permite obter uma fivela com resistência mecânica mais satisfatória.

O uso de materiais compósitos em fivelas levou a acreditar que esta solução é viável e apresenta resultados perfeitamente suficientes para suportarem as forças a que um conjunto cinto - fivela estão normalmente sujeitos.

3.7.6 Necessidades de redefinição geométrica do produto

A Tabela 30 mostra as alterações propostas de redefinição geométrica ao modelo de fivela nº3.

Tabela 30. Redefinição da geometria do produto.

Fivela para redefinição geométrica	
------------------------------------	--

Comentários	Propôs-se uma alteração aos raios do modelo da fivela nº3, assinalados na figura. O seu aumento facilita a análise de Elementos Finitos, uma vez que se diminui a concentração de tensões nessas zonas. Por outro lado, facilitará os processos de fabrico, tanto por moldação por injeção como por compressão a quente.
-------------	--

3.8 Processos de fabrico envolvidos

Paralelamente ao estudo pelo MEF, foram estudadas técnicas de fabrico que permitissem materializar a forma pretendida, sem que as propriedades dos materiais escolhidos fossem condicionadas. Com isto em mente, escolheu-se o processo de injeção e o processo de compressão a quente que seguidamente serão apresentados.

3.8.1 Descrição e parâmetros

No processo de injeção do material Ixef 1032, é de boa prática seguir alguns parâmetros de referência descritos na Tabela 31, de forma a não comprometer o processo e assim obter-se peças em conformidade.

Tabela 31: Parâmetros recomendados de injeção [44].

Temperatura do fuso	
Zona de compressão	250 - 280°C
Zona do bocal	260 - 290°C
Temperatura do molde	
120 - 140°C	
Pressão de injeção	
500 - 2500 bar	

No processo de compressão a quente do material HexMC, é de notar a necessidade de se conhecer a quantidade necessária de material para se preencher a cavidade. No caso em estudo, a fivela não contém uma forma muito complexa, contudo poder-se-á recorrer ao ficheiro CAD

para se saber o seu volume, num cálculo simples. Multiplicando-se pela densidade de 1,55 [49] e por um fator de 1,02 referente ao material que é repellido para fora da cavidade aquando o fecho do molde, obtém-se assim a massa necessária de material.

De forma a simplificar a descrição deste método de fabrico, resumem-se de seguida os passos mais importantes a efetuar [49]:

- Corte da matéria-prima;
- Pesagem do material até se obter a quantidade pretendida;
- Colocação do material no molde pré-aquecido até uma temperatura de ± 120 °C;
- Fecho do molde e aplicação de uma pressão estimada de 5 a 15 MPa;
- Cura do material durante um tempo estimado de 8 minutos;
- Abertura do molde e remoção da peça;
- Retirar o excesso de material das extremidades.

3.8.2 Análise SWOT dos diferentes processos

De forma a verificar a posição estratégica dos diferentes processos apresentados, a Figura 51 apresenta a análise SWOT relativa ao processo de injeção e a Figura 52 a análise SWOT relativa ao processo de compressão a quente.

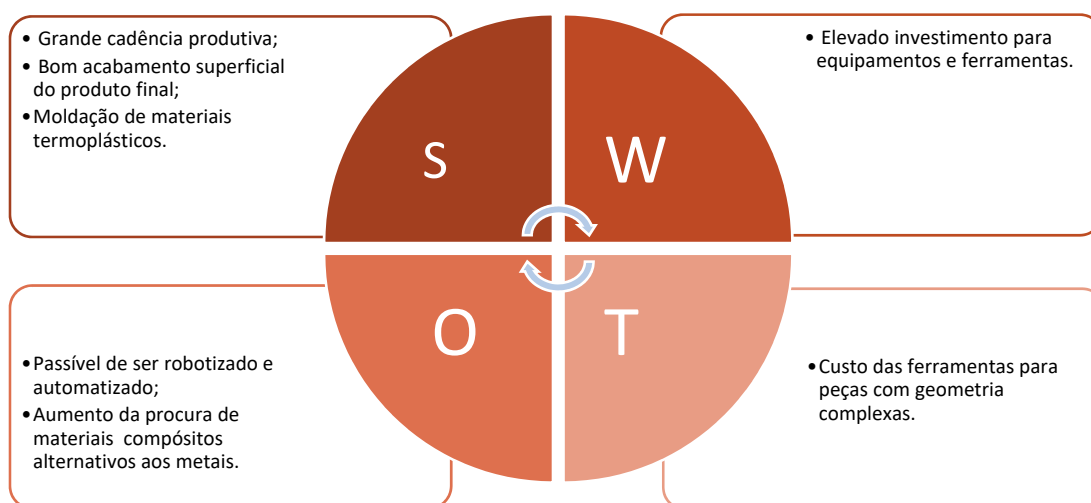


Figura 51. Análise SWOT relativa ao processo de injeção.

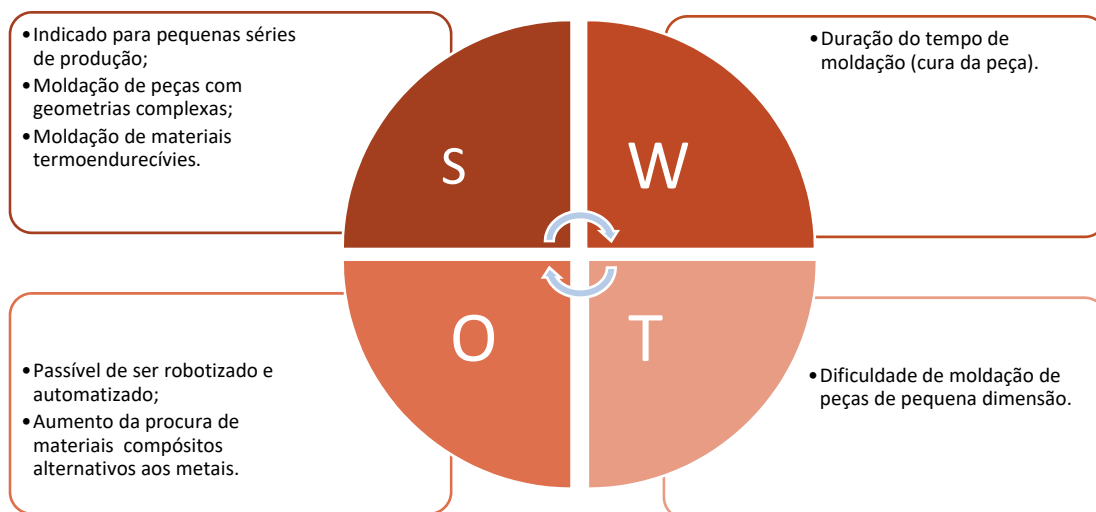


Figura 52. Análise SWOT relativa ao processo de compressão a quente.

3.9 Projeto das ferramentas necessárias

3.9.1 Molde de injeção

O molde de injeção, ilustrado na Figura 53, foi projetado com a finalidade de se produzirem pequenas séries de fivelas para posteriormente serem testadas. A utilização de postigos permite a produção de diferentes modelos de fivelas. Para isso, basta substituí-los por outros sem a necessidade de alterar os restantes componentes do molde. Para comprovar essa versatilidade, estes postigos foram projetados para se produzir duas fivelas diferentes por cada ciclo de moldação.

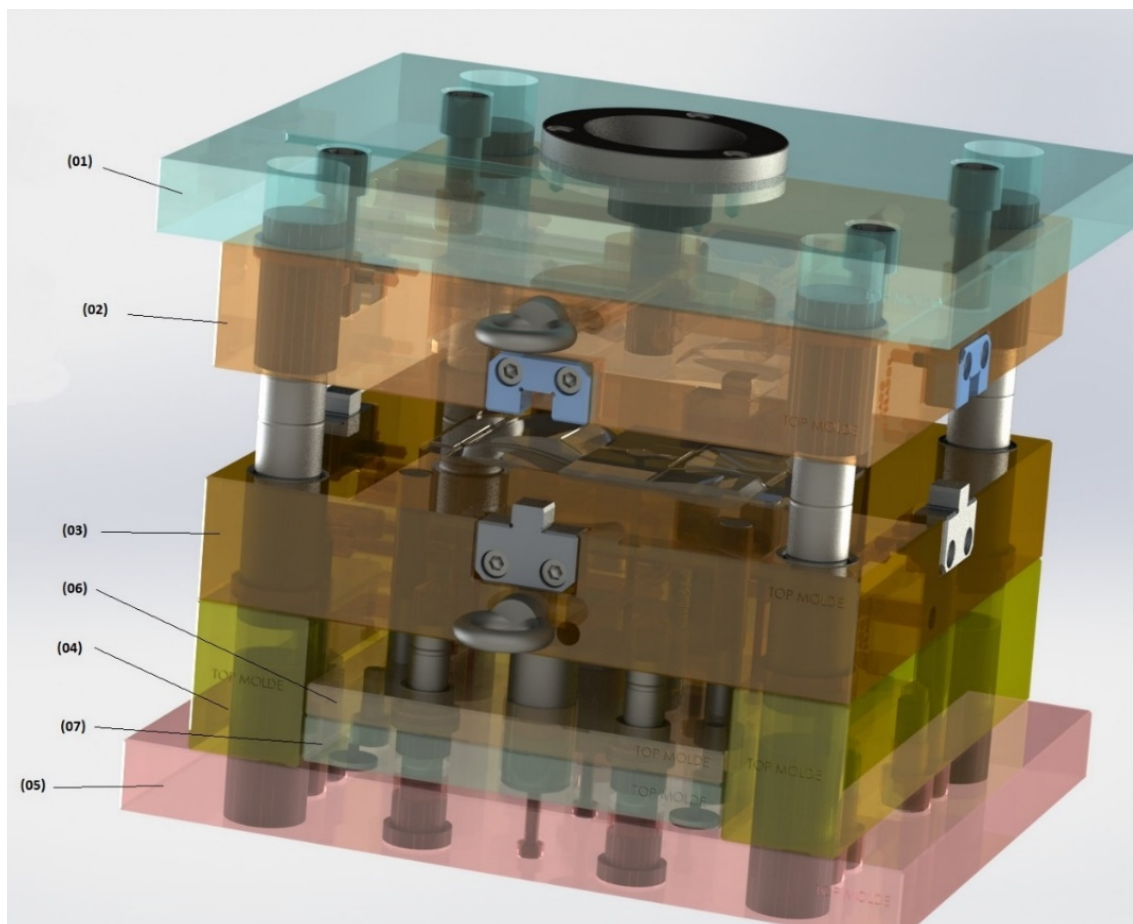


Figura 53. Molde de injeção.

Este molde foi projetado de forma concecional e foram tidos em conta os seguintes aspetos:

- Todas as placas foram selecionadas em aço 1.1730, visto ser barato e com boa maquinabilidade.
- Para os postigos, escolheu-se o aço 1.2738 com boa temperabilidade e maquinabilidade.
- A placa da cavidade (02) tem a mesma espessura do que a placa do macho (03), já que empiricamente se provou que estas placas podem ter a mesma espessura sem se comprometer a rigidez do molde, e colocaram-se casquilhos de suporte para auxiliar estas mesmas placas aquando da moldação das peças.

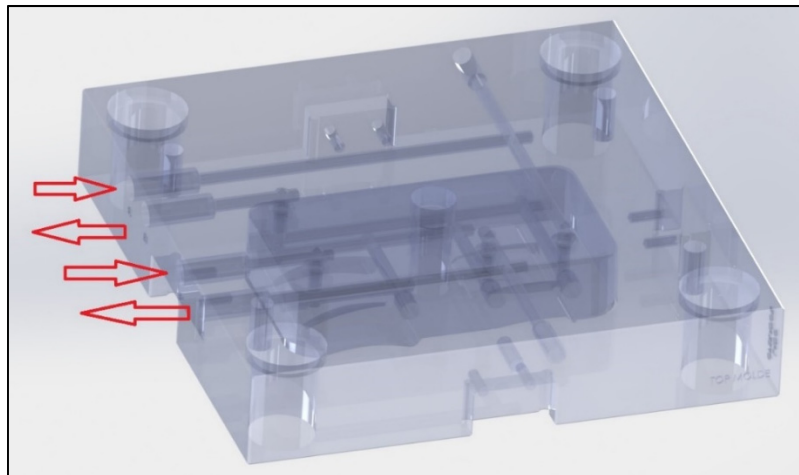


Figura 54. Placa da cavidade e postição, ilustrando o sistema de refrigeração.

Projetou-se o sistema de refrigeração (Figura 54) de forma a que o fluido percorresse as placas e entrasse pela base dos postições. Desta forma, consegue-se uma boa vedação sempre que se altere os postições, já que na base destes são colocados O-rings para cumprir tal função. Se a furação para este sistema fosse feita nas laterais dos postições, aquando da sua colocação seria muito difícil alinhar os furos com os das placas e garantir uma perfeita estanquicidade. Todos os orifícios estão colocados na parte de trás do molde e foram identificados para que o operador soubesse onde colocar as mangueiras de entrada e saída do fluido.

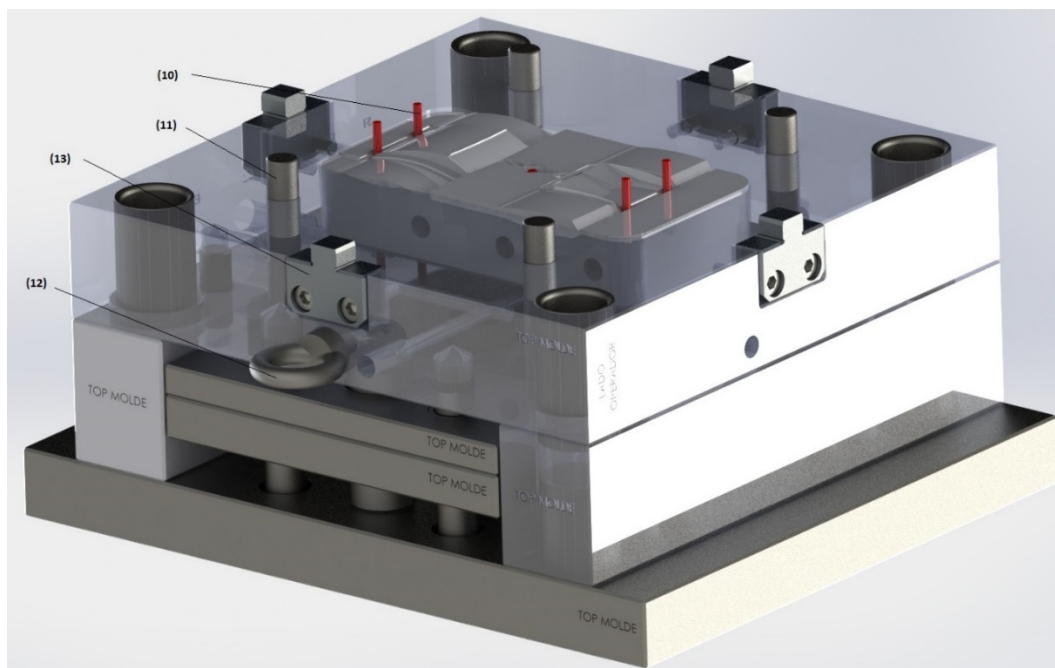


Figura 55. Placas e componentes inferiores do Molde de injeção

O sistema de extração está ilustrado na Figura 55 e teve-se em consideração os seguintes aspetos:

- A furação na placa macho e postigo para os extratores (10) está toleranciada com furos H7. Desta forma, consegue-se folga suficiente para a saída dos gases das cavidades;
- Utilizaram-se quatro pernos de retorno (11). Estes garantem que aquando do fecho do molde os extratores voltam à posição mais recuada;
- Colocou-se no molde olhais de elevação (12) para facilitar o transporte e a colocação do molde na máquina de injeção;
- As guias de ajuste fino (13) permitem alinhar com maior precisão a parte móvel com a parte fixa do molde, aquando do fecho do mesmo.

Após a modelação 3D do molde de injeção, efetuou-se uma listagem de todos os componentes mecânicos do molde, descrita na Tabela 32. Na sua maioria, optou-se por elementos normalizados fornecidos pela empresa HASCO.

Tabela 32. Lista de componentes do molde de injeção.

POS	Designação	Qtd.	Dimensões [mm]	Material DIN Ref. Fornecedor	Obs.
Lado Fixo					
02	Placa da cavidade	1	246x246x56	K20 W. Nr. 1.1730	HASCO
	Postigo cavidade	1	152x80x35	W. Nr. 1.2738	
01	Placa superior de suporte	1	246x246x27	K10 W. Nr. 1.1730	HASCO
	Guia principal	1	46x22x65	Z00	HASCO
	Guia principal	3	46x24x65	Z00	HASCO
	Anel de Centragem	1	90x13	Z7510	HASCO
	Bucha de injeção	1	18x56x4,5	Z51	HASCO
	Guia ajuste fino	4	38x22x13	W. Nr. 1.7131	
	Parafuso CHC	4	M12x30	DIN 912	

	Anilha de mola	4	M12x2,5	DIN 127	
	Parafuso CHC	3	M5x8	DIN 912	
	Parafuso CHC	8	M6x16	DIN 912	
	Olhal de Suspensão	1	M16	DIN 580	

Lado Móvel

03	Placa do macho	1	246x246x46	K20 W. Nr. 1.1730	HASCO
	Postiço macho	1	152x80x35	W. Nr. 1.2738	
05	Placa inferior de suporte	1	246x246x27	K10 W. Nr. 1.1730	HASCO
	Casquilho da guia principal	1	46x22	Z10	HASCO
	Casquilho da guia principal	3	46x24	Z10	HASCO
04	Calços	2	246x43x56	K40 W. Nr. 1.1730	HASCO
	Casquilho de centragem	4	30X60	Z20	HASCO
	Guia de extração	4	27x15x75	Z03	HASCO
	Casquilho de extração	4	25x25x20	Z10	HASCO
	Parafuso CHC	4	M12X85	DIN 912	
06	Placa de extração	1	246x158x17	K70 W. Nr. 1.1730	HASCO
07	Placa suporte extração	1	246x158x12	K60 W. Nr. 1.1730	HASCO
10	Pino Extrator	5	3,2x76,50	Z40	HASCO
11	Perno de Retorno	4	12x75	Z40	HASCO
	Parafuso de sextavado interno	4	M4x8	DIN 7991	
	Disco de encosto	4	28x3	Z55	HASCO
	Parafuso CHC	4	M12X30	DIN 912	
	Anilha de mola	4	M12x2,5	DIN 127	
	Casquilho de suporte	4	25x56	Z57	HASCO
13	Guia ajuste fino	4	38x30x11,50	W. Nr. 1.7131	
	Parafuso CHC	8	M6X16	DIN 912	
	Parafuso CHC	4	M5x35	DIN 912	
12	Olhal de Suspensão	1	M16	DIN 580	

3.9.1.1 Cálculo da força de fecho

A força de fecho foi determinada com recurso à equação (31). Segundo Jones [38], um coeficiente de segurança de 1,5 é adequado para o projeto de moldes de injeção. Para a pressão de injeção máxima, o fornecedor do material termoplástico indica o valor de 98 MPa [49]. A Tabela 33 apresenta as variáveis necessárias para o cálculo da força de fecho.

Tabela 33. Variáveis para o cálculo da força de fecho.

Variáveis		Valores
Pressão de injeção [MPa]	PI	98
Coeficiente de segurança	CS	1,5
Número de cavidades	Nc	2
Área Projetada [mm ²]	AP	935

A Figura 56 indica as dimensões consideradas para se obter o valor aproximado da área projetada de uma peça e de um canal de alimentação.

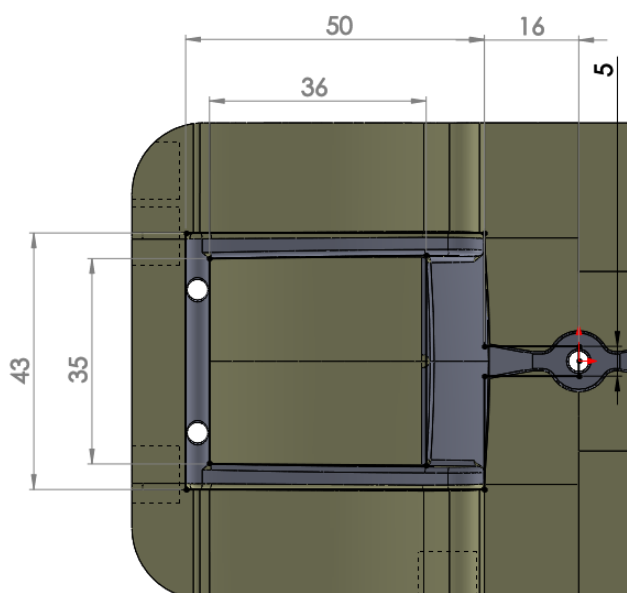


Figura 56. Dimensões consideradas para o cálculo da área projetada da cavidade.

$$AP = (50 * 43 - 35 * 37) + (5 * 16) = 935 \text{ mm}^2$$

$$F = \frac{935 \times 2 \times 98 \times 1,5}{1000} = 274,890 \text{ kN}$$

3.9.1.2 Área de contacto

A área de contacto refere-se às faces das placas de fecho que vão distribuir os esforços, essencialmente de compressão. Se esta área for demasiada pequena, a força de fecho distribui-se por uma superfície menor, o que resulta num aumento de pressão e torna o molde propenso a falhas.

A força de fecho final é a obtida através da máquina de injeção. Uma possível escolha recai sobre o modelo da *Milacron Machine MAGNA T SERVO 55* com uma força de fecho de 550 kN. Esta escolha é meramente indicativa, uma vez que poder-se-á optar por outros modelos de máquinas injetoras, nunca com capacidade de fecho inferior a 274,9 kN.

Para o cálculo da área de contacto utilizam-se as variáveis apresentadas na Tabela 34:

Tabela 34. Variáveis para o cálculo da área de contacto.

Força de compressão [N]	F_c
Área de contacto [mm ²]	A
Tensão admissível do material [MPa]	σ_m
Tensão de rutura do material [MPa]	R_m
Coefficiente de Segurança	CS

Postiços com material W. Nr. 1.2738

$$\sigma_m = \frac{R_m}{CS} = \frac{996}{5} = 199,2 \text{ MPa}$$

$$F_c = A * \sigma_m$$

$$A = \frac{550 \times 10^3}{199,2} \cong 2761 \text{ mm}^2$$

Placas com material W. Nr. 1.1730

$$\sigma_m = \frac{R_m}{CS} = \frac{560}{5} = 112 \text{ MPa}$$

$$F_C = A * \sigma_m$$

$$A = \frac{550 \times 10^3}{112} \cong 4911 \text{ mm}^2$$

3.9.1.3 Dimensionamento dos calços e da placa macho

Na Figura 57 e na Tabela 35 estão representadas as dimensões utilizadas nas equações de dimensionamento.

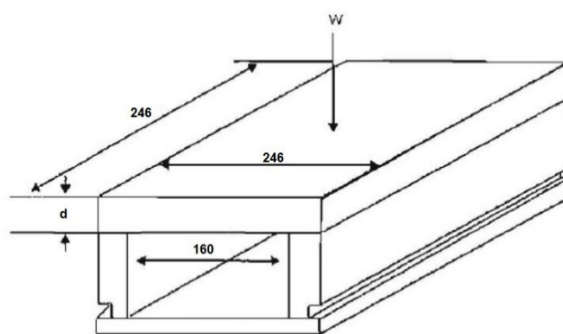


Figura 57. Posição esquemática dos calços e da placa macho no molde de injeção (Adaptada Harada (2004)).

Tabela 35. Variáveis para o dimensionamento dos calços e espessura mínima da placa macho.

Variáveis		Valores
Tensão admissível [MPa]		
Material W. Nr. 1.1730	σ_m	112
Material W. Nr. 12738		199,2
Distância entre calços [mm]	L	160
Módulo de resistência à flexão [mm ³]	Z	-
Área [mm ²]	A	-
Comprimento da placa [mm]	B	246
Largura da placa [mm]	C	246
Carga aplicada [N]	W	550000
Espessura da placa [mm]	d	-

As equações (32), (33) e (34) permitem a obtenção dos valores de tensão a que os calços estão sujeitos e a espessura mínima da placa macho, com base nas variáveis da Tabela 35.

$$\sigma_m = \frac{W L}{8 Z} \rightarrow Z = \frac{550000 \times 160}{199,2 \times 8} = 55221 \text{ mm}^3$$

$$Z = \frac{B d^2}{6} \rightarrow d = \pm \sqrt{\frac{55221 \times 6}{246}} = \pm 36,70 \text{ mm}$$

A placa macho deve possuir uma espessura mínima de 36,70 mm.

$$\sigma_m = \frac{(W/2)}{A} \rightarrow A = \frac{(550000/2)}{112} = 2455 \text{ mm}^2$$

Cada calço deve ter no mínimo uma área de aproximadamente 2455 mm². Na Figura 58 confirma-se que cada calço possui uma área de 8282 mm².

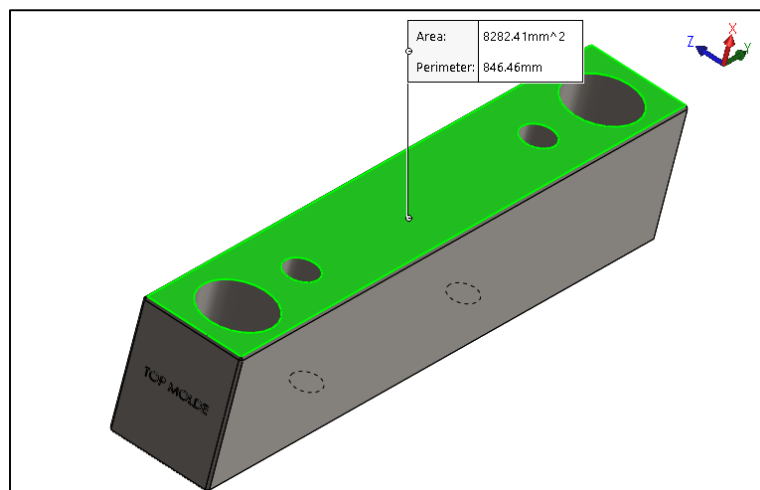


Figura 58. Área de contacto de um calço do molde de injeção.

3.9.1.4 Dimensionamento do sistema de extração

Para o cálculo da força de extração utilizaram-se as equações (35) e (36) e na Tabela 36 estão representados os valores utilizados.

Tabela 36. Variáveis para o cálculo da força de extração.

Variáveis		Valores
Força de extração [N]	P	-
Contração térmica do plástico relativamente ao diâmetro [mm]	S_t	-
Módulo de elasticidade do Ixef 1032 [MPa]	E	24000
Área total de contacto entre a peça e o molde [mm ²]	A	1870
Coefficiente de expansão térmica do material Ixef 1032 [K ⁻¹]	α	$1,4 \times 10^{-5}$
Diferença de temperatura entre a injeção e a extração da peça [°C]	ΔT	(280 - 40)
Diâmetro do círculo equivalente ao perímetro da cavidade [mm]	d	105
Coefficiente de fricção entre o Ixef 1032 e o aço	μ	0,465
Espessura da peça [mm];	t	4
Coefficiente de <i>Poisson</i> do Ixef 1032	γ	0,35

Para o cálculo da variável “d”, assume-se um perímetro igual ao assinalado na Figura 59.

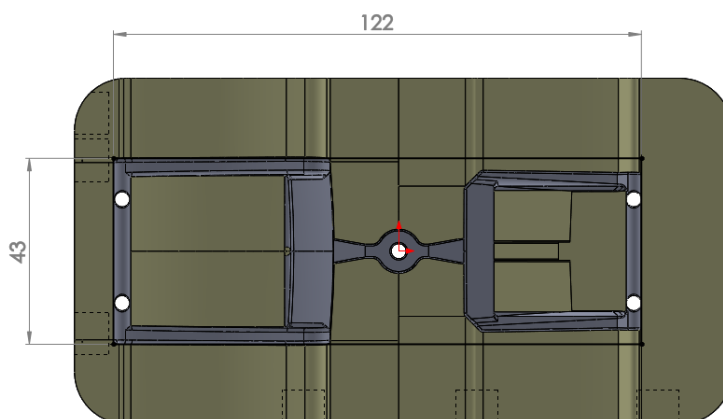


Figura 59. Dimensões admitidas para o cálculo do perímetro da cavidade.

$$\text{Perímetro da cavidade} = 2 \times (122 + 43) = 330 \text{ mm}$$

$$d = \frac{330}{\pi} = 105 \text{ mm}$$

$$S_t = 1,4 \times 10^{-05} \times (280 - 40) \times 105 = 0,353 \text{ mm}$$

$$P = \frac{0,353 \times 24000 \times 1870 \times 0,465}{105 \times \left(\frac{105}{2 \times 4} - \frac{105}{4 \times 4} \times 0,35 \right)} \cong 6480 \text{ N}$$

Recorreu-se às equações (37) e (38) para determinar o diâmetro mínimo dos extratores e a Tabela 37 representa o valor das variáveis utilizadas.

Tabela 37. Variáveis para o dimensionamento dos extratores.

Variáveis		Valores
Carga por cada extrator [N]	F	-
Cargas de Euler (Figura 29)	m	1
Módulo de Young do material do extrator [MPa]	E	210E+03
Momento de inércia da secção [mm ⁴]	I	-
Comprimento do extrator [mm]	L	74,50
Diâmetro da secção do extrator [mm]	d	-

Na Figura 29 estão representados os diagramas de encurvadura para obtenção da variável “m” para aplicação do critério de Euler.

$$F = \frac{6480}{5} = 1296 \text{ N}$$

$$1296 = \frac{1 \times \pi^2 \times 210 \times 10^3 \times I}{74,50^2} \rightarrow I = 3,47 \text{ mm}^4$$

$$3,47 = \frac{\pi \times d^4}{64} \rightarrow d = \sqrt[4]{\frac{3,47 \times 64}{\pi}} = \pm 2,90 \text{ mm}$$

Opta-se por utilizar cinco extratores de 3,2 mm de diâmetro. Um dos extratores foi colocado no centro do molde, para se efetuar a extração dos canais de alimentação, enquanto os restantes quatro foram colocados de forma a facilitar a extração das peças.

Os extratores vão sujeitar as peças a um esforço de corte. Para não ocorrer nenhum dano é necessário fazer-se a seguinte verificação [35].

$$A_c = d \times \pi \times h \quad (41)$$

$$F_c = A_c \times \sigma_r, \quad (42)$$

A Tabela 38 mostra os valores das variáveis para se proceder à verificação.

Tabela 38. Variáveis para o cálculo do esforço de corte.

Variáveis		Valores
Área de corte na zona de extração da peça [mm ²]	A	-
Diâmetro do extrator [mm]		3,2
Espessura na zona de extração da peça [mm]	d	4
Força aplicada no extrator [N]	F _x	1296
Tensão de rutura do material [MPa]	σ _r	280
Força de corte necessária para a rutura da peça [N]	F _c	-

$$A_c = 3,2 \times \pi \times 4 = 40,21 \text{ mm}^2$$

$$F_c = 40,21 \times 280 = 11259 \text{ N}$$

$$F_x(1296 \text{ N}) < F_c(11259 \text{ N})$$

Verifica-se que os extratores não originam rutura por corte nas peças.

3.9.1.5 Verificação das guias principais

O curso máximo de extração é de 40 mm. Aplicaram-se guias de 120 mm, com curso útil de 65 mm. Dividiu-se a força de fecho da máquina de injeção (550 kN) pelas quatro guias presentes no molde e, recorrendo-se às equações (37) e (38) e às variáveis apresentadas na Tabela 39, dimensionou-se as guias principais.

$$F_{guia} = \frac{550000}{4} = 137500 \text{ N}$$

Tabela 39. Variáveis para o dimensionamento das guias principais.

Variáveis		Valores
Carga por cada guia [N]	F	137500
Constante dependente do modo de conexão guia placa Figura 29	m	1
Módulo de Young do material do extrator [MPa]	E	210E+03
Momento de inércia da secção [mm ⁴]	I	-
Comprimento útil da guia [mm]	L	75
Diâmetro da secção da guia [mm]	d	-

$$137500 = \frac{1 \times \pi^2 \times 210 \times 10^3 \times I}{65^2} \rightarrow I = 280,29 \text{ mm}^4$$

$$280,29 = \frac{\pi \times d^4}{64} \rightarrow d = \sqrt[4]{\frac{280,29 \times 64}{\pi}} = 8,69 \text{ mm}$$

O diâmetro mínimo que as guias deverão possuir para não ocorrer o fenómeno de encurvadura é 8,69 mm. Para o conjunto de placas selecionadas, as guias normalizadas recomendadas têm um diâmetro de 24 mm. Com estas dimensões as guias suportam o esforço aplicado.

3.9.1.6 Dimensionamento dos pernos de retorno

Para o cálculo dos pernos de retorno assume-se um comprimento útil de 75 mm, correspondente à distância entre a face da placa do macho e a cabeça dos pernos. De uma forma algo conservadora, supõe-se que a força efetuada pela máquina de injeção é distribuída unicamente pelos quatro pernos. Dimensiona-se recorrendo às equações (37) e (38) e a Tabela 40 mostra os valores utilizados.

Tabela 40. Variáveis para o dimensionamento dos pernos de retorno.

Variáveis		Valores
Carga por cada perno de retorno [N]	F	187500
Cargas de Euler (Figura 29)	m	1
Módulo de Young do material do extrator [MPa]	E	210x10 ³
Momento de inércia da secção [mm ⁴]	I	-
Comprimento útil do perno de retorno [mm]	L	105
Diâmetro da secção do perno de retorno [mm]	d	-

$$137500 = \frac{1 \times \pi^2 \times 210 \times 10^3 \times I}{75^2} \rightarrow I = 373,1 \text{ mm}^4$$

$$373,17 = \frac{\pi \times d^4}{64} \rightarrow d = \sqrt[4]{\frac{373,17 \times 64}{\pi}} = \pm 9,34 \text{ mm}$$

O diâmetro mínimo que os pernos de retorno deverão possuir é 9,34 mm. Optou-se por pernos com um diâmetro de 12 mm. Assim os pernos de retorno suportam o esforço aplicado.

3.9.1.7 Cálculo do caudal do fluido de arrefecimento

Recorrendo às expressões (39) e (40) e utilizando-se os valores mostrados na Tabela 41 é possível estimar a quantidade de calor necessário a retirar às peças.

Tabela 41. Variáveis para o cálculo da quantidade de calor a retirar às peças.

Variáveis		Valores
Quantidade de calor a ser retirado [kJ/s]	Q	
Quantidade de material injetado no molde [kg]	m	0,016
Calor específico do material polimérico [kJ/kg K]	Cp	1,6
Temperatura de injeção do material [°C]	T ₁	280
Temperatura do molde [°C]	T ₂	130
Duração do ciclo de arrefecimento [s]	C	10 s

Para se determinar a quantidade de material a injetar no molde, recorre-se às capacidades dos programas CAD para se determinar o volume das peças a moldar. Multiplicando-se esse valor pela densidade e acrescentando-se uma percentagem para englobar o material dos canais, obtém-se o seguinte resultado:

$$(1,87 \text{ cm}^3 + 4,93 \text{ cm}^3) \times 1,3 = 8,84 \text{ cm}^3$$

$$8,84 \text{ cm}^3 \times 1,77 \text{ g/cm}^3 = 15,65 \text{ g} \cong 0,016 \text{ kg}$$

Para se estimar a duração do ciclo de arrefecimento, recorreu-se à seguinte equação empírica, indicada pelo fornecedor do material Ixef 1032 [45], onde cada milímetro de espessura da peça (w), traduz um aumento de 2,5 segundos no ciclo de arrefecimento:

$$t = w \times (2,5 \text{ segundos}) \quad (43)$$

Desta forma, considerando-se uma espessura de 4 mm, estima-se o valor de $t = 10$ segundos para a duração do ciclo de arrefecimento.

$$Q = \frac{0,016 \times 1,6 \times (280 - 130)}{10} = 0,384 \text{ kJ/s}$$

O caudal mássico de fluído necessário para o arrefecimento é dado pela equação (40).

Tabela 42. Variáveis para o cálculo do caudal do fluído de arrefecimento.

Variáveis		Valores
Caudal mássico do fluído para o arrefecimento [kg/s]	\dot{m}	
Quantidade de calor a ser retirado [kJ/s]	Q	0,384
Coefficiente de eficiência (Tabela 6)	K	0,64
Calor específico do fluído (água) [kJ/kg °C];	cp	4,19
Temperatura de saída [°C]	T _s	140
Temperatura de entrada [°C].	T _e	135

A temperatura de saída tem em consideração a máxima variação permitida (5°C) para uma máxima eficiência do arrefecimento:

$$\dot{m} = \frac{0,384}{0,64 \times 4,19 \times (140 - 135)} = 0,029 \text{ kg/s} = 0,029 \text{ l/s}$$

3.9.2 Molde de compressão

Projetou-se o molde de compressão com o intuito de se produzir uma pequena série de fivelas. Este contém dois postigos, o que permite obter duas peças por cada ciclo de moldação. A placa do macho (101) (Figura 60) é fixada diretamente nos pratos da prensa, o que permite prescindir de uma placa suporte.

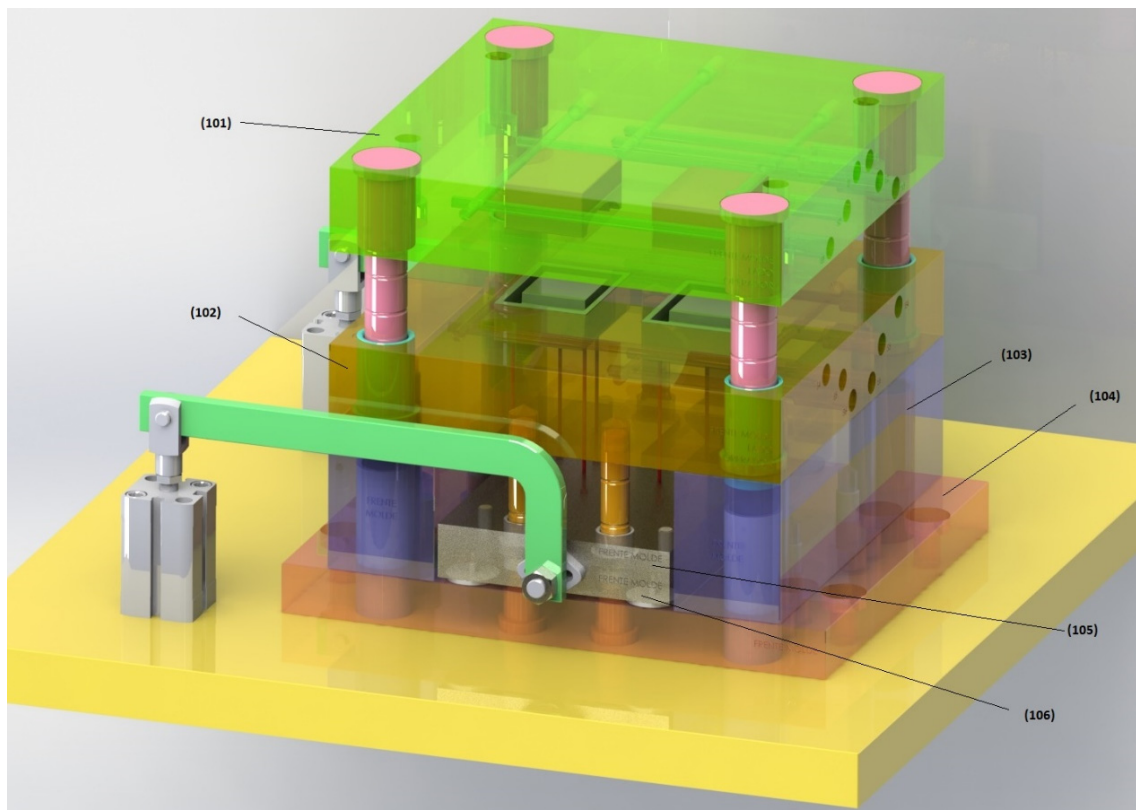


Figura 60. Molde de compressão (101) – Placa macho; (102) – Placa cavidade; (103) – Calço; (104) – Placa inferior de suporte; (105) – Placa de extração; (106) – Placa suporte de extração.

O sistema de refrigeração é semelhante ao do molde de injeção, onde todos os canais estão codificados para não existirem dúvidas por parte do operador onde colocar as mangueiras de entrada e saída. Existiu a necessidade de projetar um sistema de extração diferente do usual, já que neste tipo de molde a placa superior é que tem movimento e a inferior mantém-se estática durante todo o processo. Em relação aos materiais escolhidos, optou-se pelos mesmos materiais do molde de injeção, ou seja, aço 1.1730 para as placas e aço 1.2738 para os postigos. Após a modelação 3D do molde de compressão, efetua-se uma listagem de todos os componentes mecânicos do molde descrita na Tabela 43.

Tabela 43. Lista de componentes do molde de compressão.

POS	Designação	Qtd.	Dimensões [mm]	Material DIN Ref. Fornecedor	Obs.
Lado Móvel					
101	Placa do macho	1	246x246x46	K20 W. Nr. 1.1730	HASCO
	Guia principal	1	46x22x60	Z03	HASCO
	Guia principal	4	46x24x60	Z03	HASCO
	Postiço macho	2	65x50x30	W. Nr. 1.2738	
Lado Fixo					
	Placa da cavidade	1	246x246x76	K20 W. Nr. 1.1730	HASCO
	Postiço cavidade	2	55x75x25	W. Nr. 1.2738	
	Casquilho da guia principal	1	46x22	Z10	HASCO
	Casquilho da guia principal	3	46x24	Z10	HASCO
	Calço	2	246x116x76	K42 W. Nr. 1.1730	HASCO
	Casquilho de centragem	4	30x80	Z20	HASCO
	Placa inferior de suporte	1	246x246x27	K10 W. Nr. 1.1730	HASCO
	Guia de extração	4	27x15x85	Z03	HASCO
	Casquilho de extração	4	17x15	Z10	HASCO
	Parafuso CHC	4	M12X105	DIN 912	
105	Placa de extração	1	246x158x17	K70 W. Nr. 1.1730	HASCO
106	Placa suporte extração	1	246x158x12	K60 W. Nr. 1.1730	HASCO
110	Pino extrator	4	2x100	Z40	HASCO
	Parafuso de cabeça de embeber	4	M4x8	DIN 912	
	Anilha de encosto	4	28x3	Z55	HASCO
	Parafuso CHC	4	M12X30	DIN 912	
	Anilha de mola	4	M12x2,5	DIN 127	

3.9.2.1 Cálculo da força de fecho

Devido às semelhanças com o molde de injeção, recorreu-se à mesma equação (31) para determinar a força de fecho. Para este cálculo manteve-se um coeficiente de segurança de 1,5. O fornecedor do material composto com reforço de fibras de carbono indica uma pressão necessária de 5 a 15 MPa, para uma boa cura e moldação da peça [49]. A Tabela 44 apresenta as variáveis necessárias para este cálculo.

Tabela 44. Variáveis para o cálculo da força de fecho.

Variáveis		Valores
Pressão de moldação [MPa]	PI	15
Coeficiente de segurança	CS	1,5
Número de cavidades	Nc	2
Área Projetada [mm ²]	AP	1027,17

A Figura 61 indica as dimensões consideradas para se obter o valor aproximado da área projetada da cavidade.

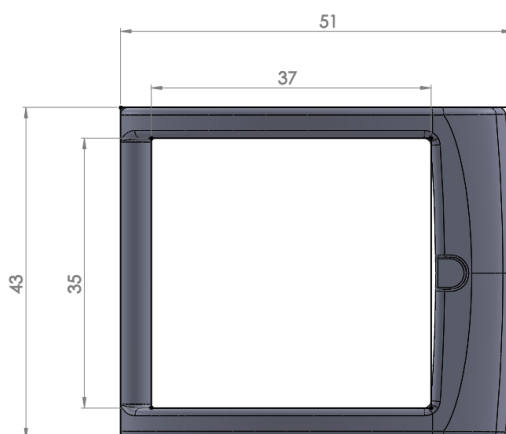


Figura 61. Dimensões consideradas para o cálculo da área projetada da cavidade.

$$AP = (51 \times 43 - 35 \times 37) = 898 \text{ mm}^2$$

$$F = \frac{906 \times 2 \times 15 \times 1,5}{1000} = 40,410 \text{ kN}$$

3.9.2.2 Área de contacto

A área de contacto refere-se às faces dos postigos da cavidade e do macho em contacto, que vão distribuir os esforços, essencialmente de compressão. A força de fecho final é obtida através de uma prensa. Uma possível escolha recai sobre o modelo da *Beckwood Hydraulic Press DHS-5R* com uma força de fecho de 5,5 toneladas (53,9 kN). Esta escolha é meramente indicativa, uma vez que qualquer outro modelo de prensas hidráulicas com capacidade no mínimo igual a 5 toneladas é indicado para esta finalidade.

Para o cálculo da área mínima de contacto, utilizou-se a equação (34) e as variáveis apresentadas na Tabela 45.

Tabela 45. Variáveis para o cálculo da área de contacto.

Força de compressão [N]	F_c
Área de contacto [mm ²]	A
Tensão admissível do material [MPa]	σ_m
Tensão de rutura do material [MPa]	R_m
Coeficiente de Segurança	CS

Postigos com material W. Nr. 1.2738

$$\sigma_m = \frac{R_m}{CS} = \frac{996}{5} = 199,2 \text{ MPa}$$

$$F_c = A * \sigma_m$$

$$A = \frac{53936}{199,2} = 270,8 \text{ mm}^2$$

Os postigos não sofreram problemas de compressão uma vez que a área mínima de contacto é de 270,8 mm² e a área de contacto entre os postigos é igual a 1796 mm².

3.9.2.3 Dimensionamento dos calços e placa macho

Na Figura 62 estão representadas as dimensões utilizadas nas equações de dimensionamento. Na Tabela 46 apresentam-se as variáveis presentes nas equações.

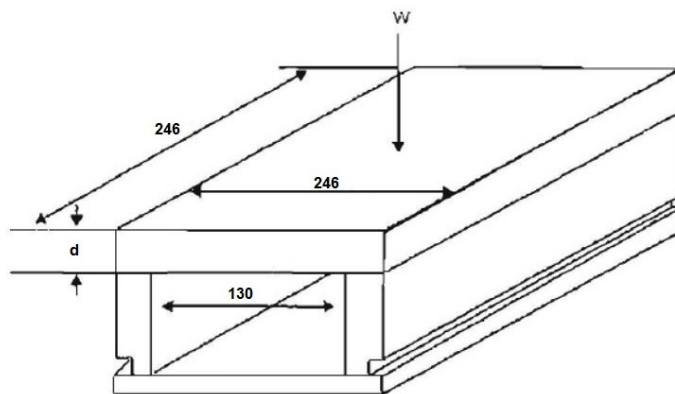


Figura 62. Posição esquemática dos calços e da placa macho no molde de compressão (Adaptada Harada (2004)).

Tabela 46. Variáveis para o dimensionamento dos calços e espessura mínima da placa macho.

Variáveis		Valores
Tensão admissível [MPa] Material W. Nr. 1.1730	σ_m	112
Distância entre calços [mm]	L	130
Módulo de resistência à flexão [mm ³]	Z	-
Área [mm ²]	A	-
Comprimento da placa [mm]	B	246
Largura da placa [mm]	C	246
Carga aplicada [N]	W	107910
Espessura da placa [mm]	d	-

As equações (32) e (33) permitem a obtenção dos valores de tensão a que os calços estão sujeitos e a espessura mínima da placa macho.

$$\sigma_m = \frac{W L}{8 Z} \rightarrow Z = \frac{107910 * 130}{199,2 * 8} = 8802,90 \text{ mm}^3$$

$$Z = \frac{B d^2}{6} \rightarrow d = \pm \sqrt{\frac{8802,90 * 6}{246}} = 14,65 \text{ mm}$$

A placa macho deve possuir uma espessura mínima de 14,65 mm. Para acoplar os postigos e o sistema de refrigeração, optou-se por uma placa com a espessura de 46 mm.

$$\sigma_m = \frac{W}{A} \rightarrow A = \frac{107910}{112} = 963,48 \text{ mm}^2$$

Cada calço deve ter no mínimo uma área de 963,48 mm². Na Figura 63 confirma-se que cada calço possui uma área de 12243 mm². Escolheu-se calços com uma área muito maior do que a mínima calculada, de forma a não ser necessária a utilização de casquilhos de suporte.

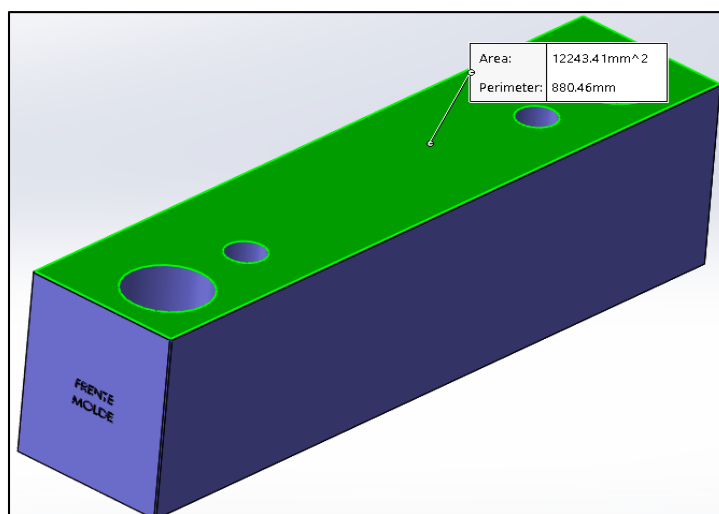


Figura 63. Área de contacto de um calço do Molde de compressão.

3.9.2.4 Dimensionamento do sistema de extração

Para o cálculo da força de extração utilizam-se as expressões (35) e (36) e na Tabela 47 apresentam-se os valores das variáveis usadas.

Tabela 47. Variáveis para o cálculo da força de extração.

Variáveis		Valores
Força de extração [N]	P	-
Contração térmica do material a moldar relativamente ao diâmetro [mm]	S_t	-
Módulo de Elasticidade do HexMC [MPa]	E	38000
Área total de contacto entre a peça e o postigo [mm ²]	A	1796
Coefficiente de expansão térmica do material HexMC [K ⁻¹]	α	$0,5 \times 10^{-6}$
Diferença de temperatura entre a injeção e a extração da peça	ΔT	(120 - 40)
Diâmetro do círculo equivalente ao perímetro da cavidade [mm]	d	126
Coefficiente de fricção entre o Ixef 1032 e o aço	μ	0,5
Espessura da peça [mm]	t	4
Coefficiente de <i>Poisson</i> do Ixef 1032	γ	0,30

Para o cálculo da variável “d”, assume-se um perímetro igual ao assinalado na Figura 64.

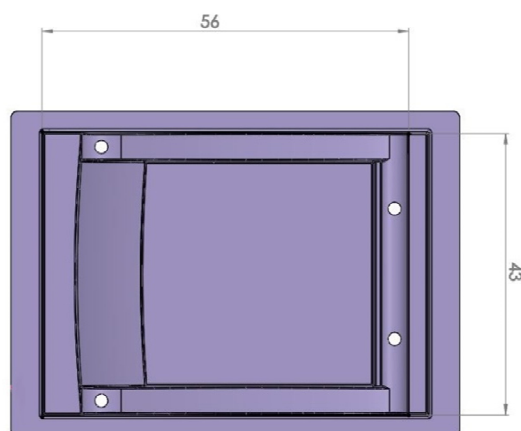


Figura 64. Dimensões para o cálculo do perímetro da cavidade

$$\text{Perímetro da cavidade} = 2 \times 2 \times (56 + 43) = 396 \text{ mm}$$

$$d = \frac{396}{\pi} = 126 \text{ mm}$$

$$S_t = 0,5 \times 10^{-06} \times (120 - 40) \times 126 = 0,00504 \text{ mm}$$

$$P = \frac{0,00504 \times 38000 \times 1796 \times 0,5}{126 \times \left(\frac{126}{2 \times 4} - \frac{126}{4 \times 4} \times 0,30 \right)} \cong 102 \text{ N}$$

Para o dimensionamento do diâmetro dos extratores, recorreu-se às equações (37) e (38) e a Tabela 48 apresenta os valores das variáveis utilizadas.

Tabela 48. Variáveis para o dimensionamento dos extratores.

Variáveis		Valores
Carga por cada extrator [N]	F	38,1
Cargas de Euler (Figura 29)	m	1
Módulo de Young do material do extrator [MPa]	E	210x10 ³
Momento de inércia da secção [mm ⁴]	I	-
Comprimento do extrator [mm]	L	86
Diâmetro da secção do extrator [mm]	d	-

$$F = \frac{103}{8} = 12,88 \text{ N}$$

$$12,88 = \frac{1 \times \pi^2 \times 210 \times 10^3 \times I}{86^2} \rightarrow I = 0,046 \text{ mm}^2$$

$$0,046 = \frac{\pi \times d^4}{64} \rightarrow d = \sqrt[4]{\frac{0,046 \times 64}{\pi}} = \pm 0,98 \text{ mm}$$

Cada extrator deverá possuir um diâmetro mínimo de aproximadamente 1 mm. Para o sistema de extração, optou-se por extratores com 2 mm de diâmetro.

Para se verificar se os extratores danificam as peças devido ao esforço de corte, recorre-se às expressões (41) e (42) e utilizou-se as variáveis apresentadas na Tabela 49.

Tabela 49. Variáveis para o cálculo do esforço de corte.

Variáveis		Valores
Área de corte na zona de extração da peça [mm ²]	A_c	-
Diâmetro do extrator [mm]	d	1,5
Espessura na zona de extração da peça [mm]	h	4
Força aplicada no extrator [N]	F_x	38,1
Tensão de rutura do material [MPa]	σ_r	300
Força de corte necessário para a rutura da peça [N]	F_c	-

$$A_c = 2 \times \pi \times 4 = 25,13 \text{ mm}^2$$

$$F_c = 25,13 \times 300 = 7539 \text{ N}$$

$$F_x(12,88 \text{ N}) < F_c(7539 \text{ N})$$

Verifica-se que os extratores não originam rutura por corte nas peças.

3.9.2.5 Escolha do cilindro pneumático e ilustração do sistema de extração

Neste capítulo procede-se ao cálculo da força equivalente exercida pelas peças e pelos componentes de extração. As variáveis a utilizar, bem como os seus valores, são apresentados na Tabela 50.

Tabela 50. Variáveis para o cálculo das forças equivalentes aplicadas nos componentes de extração.

Variáveis		Valores
Força de extração [N]	P	102
Peso da placa de extração [N]	G	40
Peso da placa suporte de extração [N]	H	30
Peso das barras [N]	U	10
Coeficiente de segurança	CS	1,5

$$P + G + H + U = 102 + 40 + 30 + 10 = 182 \text{ N}$$

$$232,5 \text{ N} \times CS \cong 275 \text{ N}$$

Com o intuito de se obter uma correta extração, opta-se por dois cilindros normalizados da FESTO com a designação AEN-25-25-A-P-A, que realizam separadamente uma força de 246 N a 6 bar de pressão (anexo I). Estes atuadores são de simples efeito, já que o retorno é efetuado por molas posicionadas no seu interior. Desta forma, garante-se que, na existência de qualquer falha, estes voltam sempre à posição de retorno.

O curso dos atuadores está limitado, à partida, pelo máximo deslocamento vertical das placas de extração. Uma vez que os atuadores selecionados possuem um curso máximo de 25 mm, e sendo este inferior a 40 mm, correspondente ao deslocamento máximo das placas extratoras, opta-se por este valor, que é suficiente para garantir uma correta extração das peças a moldar.

As barras de extração são componentes importantes neste sistema, uma vez que permitem o sincronismo entre o movimento ascendente e descendente dos atuadores e o movimento das placas extratoras. Na Figura 65 representa-se o sistema de extração, que engloba todos os seus componentes.

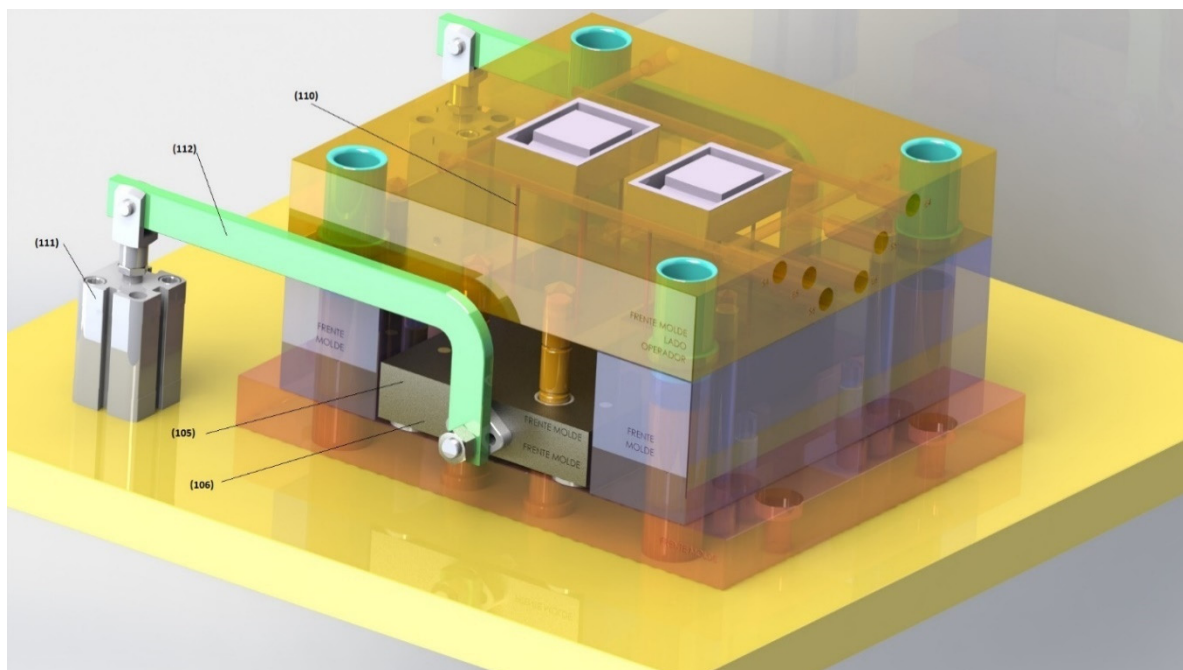


Figura 65. Ilustração do sistema de extração e parte inferior do molde de compressão. (110) – Extrator; (106) – Placa suporte de extração; (105) – Placa de extração; (112) – Barra de extração; (111) – Cilindro Pneumático.

3.9.2.6 Verificação das guias principais

Para o conjunto de placas selecionadas, as guias normalizadas recomendadas têm um diâmetro de 24 mm. Optou-se por guias com um curso útil de 60 mm. Desta forma, e como o curso de extração é de 40 mm, garante-se o alinhamento das placas superiores com as inferiores, uma vez que as guias estão sempre em contacto com os casquilhos de centragem. Divide-se a força de fecho da máquina de injeção (53936 N) pelas quatro guias presentes no molde. Desta forma:

$$F_{guia} = \frac{53936}{4} = 13484 \text{ N}$$

Recorreu-se às equações (35) e (36) e apresenta-se na Tabela 51 os valores das variáveis utilizadas.

Tabela 51. Variáveis para o dimensionamento das guias principais.

Variáveis		Valores
Carga por cada guia [N]	F	13484
Cargas de Euler (Figura 29)	m	1
Módulo de Young do material do extrator [MPa]	E	210x10 ³
Momento de inércia da secção [mm ⁴]	I	-
Comprimento útil da guia [mm]	L	60
Diâmetro da secção da guia[mm]	d	-

$$13484 = \frac{1 \times \pi^2 \times 210 \times 10^3 \times I}{60^2} \rightarrow I = 23,42 \text{ mm}^4$$

$$23,42 = \frac{\pi \times d^4}{64} \rightarrow d = \sqrt[4]{\frac{23,42 \times 64}{\pi}} = 4,67 \text{ mm}$$

O diâmetro mínimo que as guias deverão possuir para não ocorrer o fenómeno de encurvadura é 5,56 mm. As guias escolhidas possuem um diâmetro de 24 mm, o que significa que as guias suportam o esforço aplicado.

CONCLUSÕES

4.1 Conclusões

4.2 Trabalhos futuros

4 CONCLUSÕES

4.1 Conclusões

Cada vez mais se tem vindo a procurar alternativas aos materiais metálicos. Existem nichos de mercado onde a inovação e o desenvolvimento, aliadas à melhoria contínua, permitem facilitar o dia a dia das pessoas. Um destes exemplos encontra-se no vestuário e acessórios que a tripulação de cabine utiliza. Por conterem peças metálicas, estes são sujeitos a uma verificação mais apertada quando passam pelos locais de segurança dos aeroportos. Tendo em vista este problema, o objetivo deste trabalho foi o estudo e desenvolvimento de uma fivela em material não metálico, mas com aspeto e resistência mecânica próxima à das já existentes no mercado.

Para se alcançar o objetivo proposto, existiu a necessidade de se caracterizar fivelas metálicas por meio de ensaios de tração, metalográficos e de análise da composição química. Do primeiro ensaio, respetivamente, foi possível concluir que as fivelas metálicas suportavam uma força máxima, em média, de 1156 N; nos dois últimos ensaios determinou-se que a sua composição era determinada por uma liga que contém em maior percentagem Zinco e Alumínio.

A caracterização das fivelas metálicas serviu de termo de comparação para a seleção de possíveis materiais que cumprissem os requisitos estipulados. Optou-se então por três materiais com características diferentes: 1) material composto por fibras contínuas, o C(T300)/Epoxy(934), com reforço unidirecional e comportamento anisotrópico; e 2) dois materiais com matrizes diferentes, mas comportamento quase isotrópico e reforço de fibras curtas, o Ixef 1032 com reforço de fibras de vidro e o HexMC com reforço de fibras de carbono.

Finda a seleção de materiais, procedeu-se a simulações por Elementos Finitos de três tipos de fivelas, para se analisar o comportamento mecânico dos diferentes materiais. Estas permitiram confirmar a melhor aptidão dos materiais de fibras curtas para uma substituição do material

metálico. Por outro lado, não ficou claro qual dos dois materiais, o Ixef 1032 ou HexMC, seria a melhor eleição.

Desta forma, apresentaram-se duas soluções de materiais que diferem no seu processamento. O Ixef 1032 é indicado para o processo de injeção e o HexMC para o de compressão a quente. Para se obter protótipos para, possivelmente, numa fase posterior, serem testados, foi necessário projetar ferramentas auxiliares que permitissem a moldação do produto final. Além disto, projetaram-se também ferramentas que contêm postigos, colocados nas placas intermédias para permitir o processamento de vários modelos de fivelas. Assim, é unicamente necessário projetar novos postigos, mantendo-se os moldes iniciais, o que permite assim uma redução de custo e produção.

Conclui-se então que poderá ser possível obter fivelas de materiais não metálicos com o mesmo *design* e características mecânicas aproximadas às fivelas metálicas encontradas no mercado atualmente. Se este estudo for comprovado na prática, poder-se-á resolver o problema do fluxo de pessoal de bordo na passagem deste pelas zonas de segurança dos aeroportos.

4.2 Trabalhos futuros

Para complementar este trabalho sugerem-se os seguintes trabalhos futuros:

- Teste e melhoria das ferramentas auxiliares projetadas;
- Início da fase de prototipagem e aperfeiçoamento dos processos de fabrico indicados;
- Teste às amostras produzidas de forma a concluir se estes materiais são os indicados para a produção de fivelas “*alarm-free*”.
- Estudo de revestimentos que conferissem um aspecto “metálico” à fivela “*alarm-free*”.

BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

5.1 Bibliografia

5.2 Outras fontes de informação

5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

5.1 Bibliografia

- [1] D. Schmitt and V. Gollnick, *Air Transport System*, 1st Ed. Vienna: Springer Vienna, 2016.
- [2] M. Hirst, *The Air Transport System*, 1st Ed. Vienna: Springer Vienna, 2008.
- [3] P. Arguelles, M. Bischoff, J. Lumsden, D. Ranque, P. Busquin, S. Rasmussen, B. A. . Droste, P. Reutlinger, R. Evans, R. Robins, W. Kroll, H. Terho, J.-L. Lagardère, A. Wittlov, and A. Lina, "European Aeronautics: A Vision For 2020. Meeting society's needs and winning global leadership," Luxembourg, 2001.
- [4] High Level Group on Aviation Research, "Flightpath 2050. Europe's Vision for Aviation," Luxembourg, 2011.
- [5] J. Smith, *Social Movements for Global Democracy*, 1st Ed. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 2008.
- [6] J. Larsen, J. Urry, and K. Axhausen, *Mobilities, Networks, Geographies*, 1st Ed. Hampshire: Ashgate Publishing Company, 2008.
- [7] International Air Transport Association, "Annual Review 2016," Dublin, 2016.
- [8] K. M. Sweet, *Aviation and Airport Security - Terrorism and Safety Concerns*, 2nd Ed. New York: CRC Press, 2009.
- [9] Airports Council International, "Security at airports," in *ACI Policy and Recommended Practices Handbook*, 7th Ed., Quebec: ACI, 2009, pp. 110–126.
- [10] International Aviation Transport Association, "Cabin Operations Safety - Best Practices Guide 2015," Quebec, 2015.
- [11] M. Santos, F. Rebelo, R. Santos, and J. Teles, "Flight Attendant Uniform Concept Preference Study Using Kansei Ergonomics," in *The Proceedings of the Kansei Engineering and Emotion Research International Conference*, 2010.
- [12] M. F. Ashby, *Materials Selection in Mechanical Design*, 3rd Ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1993.
- [13] K. Felkins, H. P. Leigh, and A. Jankovic, "The Royal Mail Ship Titanic: Did a Metallurgical Failure Cause a Night to Remember?," *J. Miner. Met. Mater. Soc.*, vol. 50, no. 1, pp. 12–18, 1998.
- [14] D. R. H. Jones and M. F. Ashby, *Engineering Materials 2: an Introduction to Microstructures, Processing and Design*, 3rd Ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2005.
- [15] W. D. Callister and D. G. Rethwisch, *Materials Science and Engineering: An Introduction*, 8th Ed. Denver: Wiley, 2010.
- [16] L. Silva, F. Alves, and A. Marques, *Materiais de Construção*, 1º Ed. Porto: Publindústria, 2013.

- [17] P. K. Mallick, *Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design*, 3rd Ed. New York: CRC Press, 2007.
- [18] M. F. de S. F. Moura, A. M. B. de. Moraes, and A. G. de. Magalhaes, *Materiais Compósitos : Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico*, 1º Ed. Porto: Publindústria, 2009.
- [19] R. M. Jones, *Mechanics of Composite Materials*, 2nd Ed. Philadelphia: Taylor & Francis, 1999.
- [20] J. M. Berthelot, *Composite Materials - Mechanical Behavior and Structural Analysis*, 1st Ed. New York: Springer, 1999.
- [21] G. H. Staab, *Laminar composites*, 1st Ed. Woburn: Butterworth-Heinemann, 1999.
- [22] P. Camanho, "Failure Criteria for Fibre-Reinforced Polymer Composites," *Secção de Mecânica Aplicada, Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto*, pp. 1–13, 2002.
- [23] H. J. Bohm, *Mechanics of Microstructured Materials*, 1st Ed. Vienna: Springer, 2004.
- [24] R. M. Christensen and F. M. Waals, "Effective Stiffness of Randomly Oriented Fibre Composites," *J. Compos. Mater.*, vol. 6, no. 3, pp. 518–535, 1972.
- [25] M. Verità, D. Bednarowski, Ł. Malinowski, P. Laskoś, and G. Kmita, "Modeling of Short Fibers Composites Strenght with Use of Failure Indicators," in *The 10 th International Conference on Flow Processes in Composite Materials*, 2010.
- [26] R. L. McCullough, "Micro-Models for Composite Materials - Continuous Fiber Composites," in *Delaware Composites Design Encyclopedia: Micromechanical Materials Model*, 1st Ed., Pennsylvania: Technomic Publishing Company, 1990, pp. 49–89.
- [27] A. International, *ASM Handbook : Volume 21 - Composites*, 1st Ed. New York: ASM, 2001.
- [28] P. Brookbank and L. Savage, "Stiffening of Sustainable Cellulose Fibres for Use in the Light-Weighting of Sheet Moulding Compounds," in *16th European Conference on Composite Materials*, 2014.
- [29] P. Feraboli, F. Gasco, B. Wade, S. Maier, R. Kwan, A. Masini, L. Deoto, and M. Reggiani, "Lamborghini 'Forged Composite' Technology," in *26th Annual Technical Conference of the American Society for Composites and the 2nd Joint US-Canada Conference on Composites*, 2011.
- [30] B. Jones and C. Golf, "Investigating The Mechanical Properties of Compression Molded Carbon Fiber Reinforced Sheet Molding Compound," 2011. [Online]. Available: <http://digitalcommons.calpoly.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1019&context=matesp>. [Accessed: 28-Jun-2016].
- [31] F. C. Campbell, *Structural Composite Materials*, 1st Ed. Ohio: ASM International, 2010.
- [32] G. Nicoletto, E. Riva, and A. Stocchi, "Mechanical Characterization of Advanced Random Discontinuous Carbon/Epoxy Composites," *Mater. Today Proc.*, vol. 3, no. 4, pp. 1079–1084, 2016.
- [33] P. Debout, H. Chanal, and E. Duc, "Tool path smoothing of a redundant machine: Application to Automated Fiber Placement," *CAD Comput. Aided Des.*, vol. 43, no. 2, pp.

- 122–132, 2011.
- [34] D. D. L. Chung, *Composite Materials - Science and Applications*, 2nd Ed. London: Springer, 2010.
- [35] D. V. Rosato, D. V. Rosato, and M. G. Rosato, *Injection Molding Handbook*, 3rd Ed. Boston: Springer, 2000.
- [36] S. da Cruz, *Moldes de Injeção: Termoplásticos, Termofixos, Zamak, Alumínio, Sopro*, 2nd Ed. Brazil: Hemus SA, 2002.
- [37] J. Harada, *Moldes para Injeção de Termoplásticos : Projetos e Princípios Básicos*, 1st Ed. Brazil: Artliber, 2004.
- [38] P. Jones, *The Mould Design Guide*, 1st Ed. Ohio: Smithers Rapra Press, 2008.
- [39] R. Campilho, *Método de Elementos Finitos - Ferramentas para Análise Estrutural*, 1st Ed. Porto: Publindustria, 2012.
- [40] R. D. Cook, *Finite Element Modeling for Stress Analysis*, 1st Ed. New York: Wiley, 1995.
- [41] A. International, *ASM Handbook: Volume 9 - Metallurgy and Microstructures*, 1st Ed. New York: ASM, 2004.
- [42] A. J. Garratt-Reed and D. C. Bell, *Energy-Dispersive X-ray Analysis in the Electron Microscope*, 1st Ed. Oxford: BIOS Scientific, 2003.
- [43] “HexMC[®] User Guide.”

5.2 Outras fontes de informação

- [43] *Ixef[®] PARA Design Guide* – SOLVAY, URL:www.solvay.com/en/binaries/Ixef-PARA-Design-Guide_EN-227535.pdf 2016/11/17
- [44] *Ixef[®] PARA Processing Guide* – SOLVAY, URL:www.solvay.com/en/binaries/Ixef-PARA-Processing-Guide_EN-227536.pdf 2016/11/17
- [45] *Design and Production of Injection Molding Tools Ixef[®] PARA* – SOLVAY, URL:www.solvay.com/en/binaries/Ixef-PARA-Designing-Production-Injection-Molding-Tools_EN-227831.pdf 2017/11/17
- [46] *Quick Guide to Injection Molding Ixef[®] PARA* – SOLVAY, URL:www.solvay.com/en/binaries/Ixef-PARA-Quick-Molding-Guide_EN-227538.pdf 2017/11/17
- [47] Technical Data Sheet Ixef[®] PARA Polyarylamide – SOLVAY, URL:catalog.ides.com/datasheet.aspx?l=42041&FMT=PDF&E=2133 2017/11/17
- [48] HexMC^{®-i} Moulding Concept Provisional Datasheet – Hexcel, URL:www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/HexMCi_C_2000_M77.pdf 2017/11/17
- [49] *HexMC[®] User Guide* – Hexcel, URL:www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/HexMC_UserGuide.pdf 2017/11/11

ANEXOS

6.1 Anexo I

6.2 Anexo II

6 ANEXOS

6.1 Anexo I

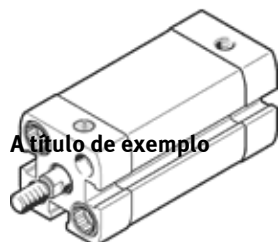
Cilindro pneumático

cilindro compacto AEN-25- -

Código da peça: 536417

FESTO

Conforme ISO 21287, para detecção de posição, com haste com rosca interna ou externa,



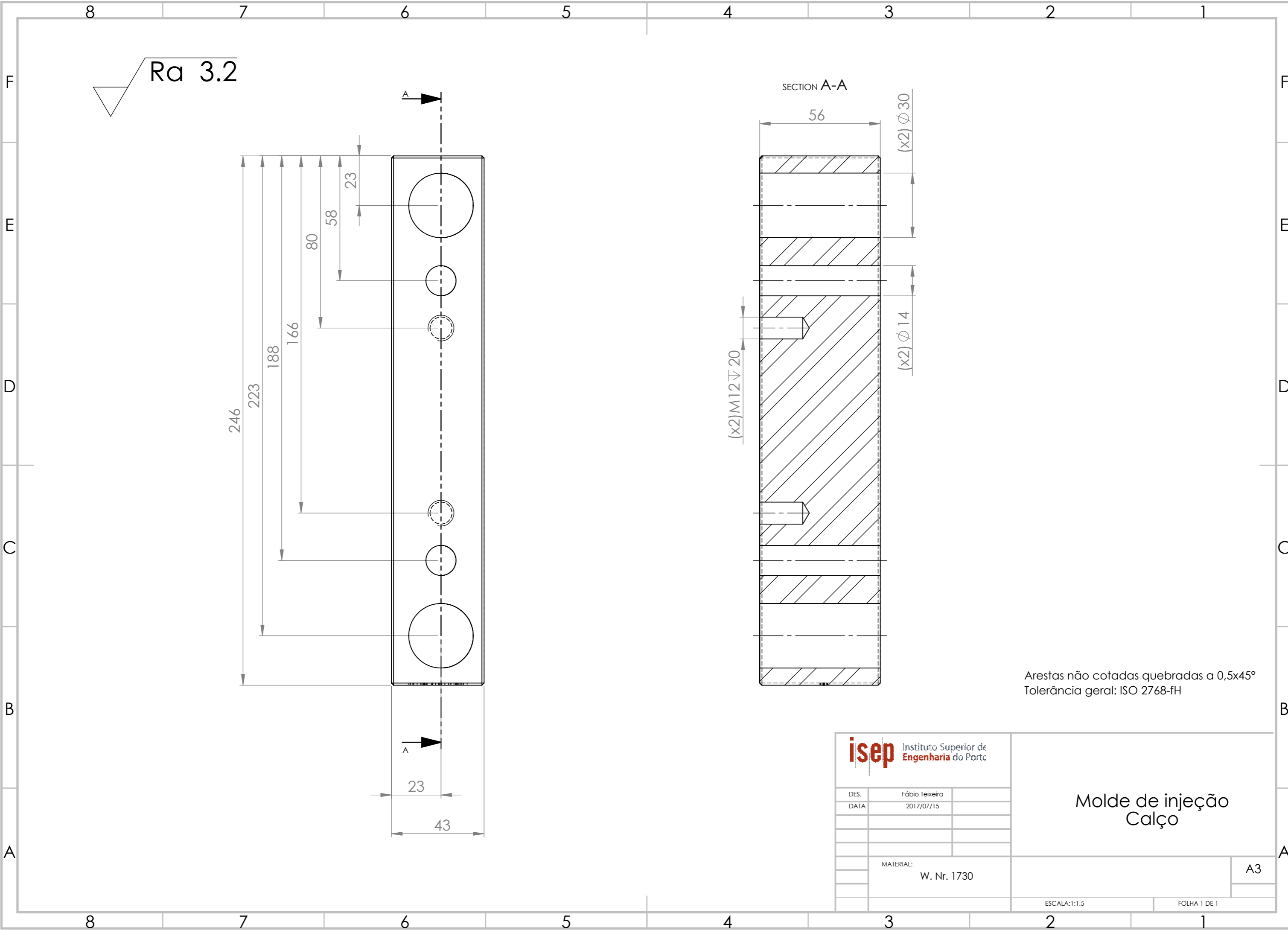
Ficha técnica

Especificações técnicas gerais – os valores individuais dependem da sua configuração.

Característica	Valores
Curso	1 ... 25 mm
Diâmetro do êmbolo	25 mm
Com base na norma padrão	ISO 21287
Amortecimento	P: Anéis/placas de amortecimento elástico nas posições finais de curso
Posição de instalação	Nos dois lados
Princípio construtivo	Êmbolo Haste Tubo perfilado
Detecção de posição	Para sensor de proximidade
Variantes	maior capacidade de operação Haste prolongada com rosca externa rosca especial na haste Haste prolongada Com proteção antigiro Vedações resistentes a temperaturas de até 120°C plaqueta de identificação marcada com laser No retorno Haste do êmbolo unilateral
Pressão de trabalho	1 ... 10 bar
Modo de operação	de simples ação no avanço no retorno
Meio operacional	Ar comprimido conforme ISO 8573-1:2010 [7:4:4]
Observação sobre meio operacional e do piloto	Permite operação com lubrificação (necessária para operações subsequentes)
Classe de resistência à corrosão KBK	2
Temperatura ambiente	-20 ... 120 °C
Força teórica a 6 bar, retorno	196 N
Força teórica a 6 bar, avanço	246 N
Massa móvel com curso de 0 mm	50 g
Peso adicional por 10 mm de curso	23 g
Peso básico para curso de 0 mm	156 g
Fator de massa adicional por 10 mm de curso	6 g
Tipo de fixação	Opcional: com furo passante com rosca interna com acessórios
Conexão pneumática	M5
Observações sobre material	Conforme RoHS
Informação sobre material, tampão	Alumínio anodizado
Informação sobre material, haste	Aço alta liga
Informação sobre material, camisa do cilindro	Liga de alumínio anodizado liso

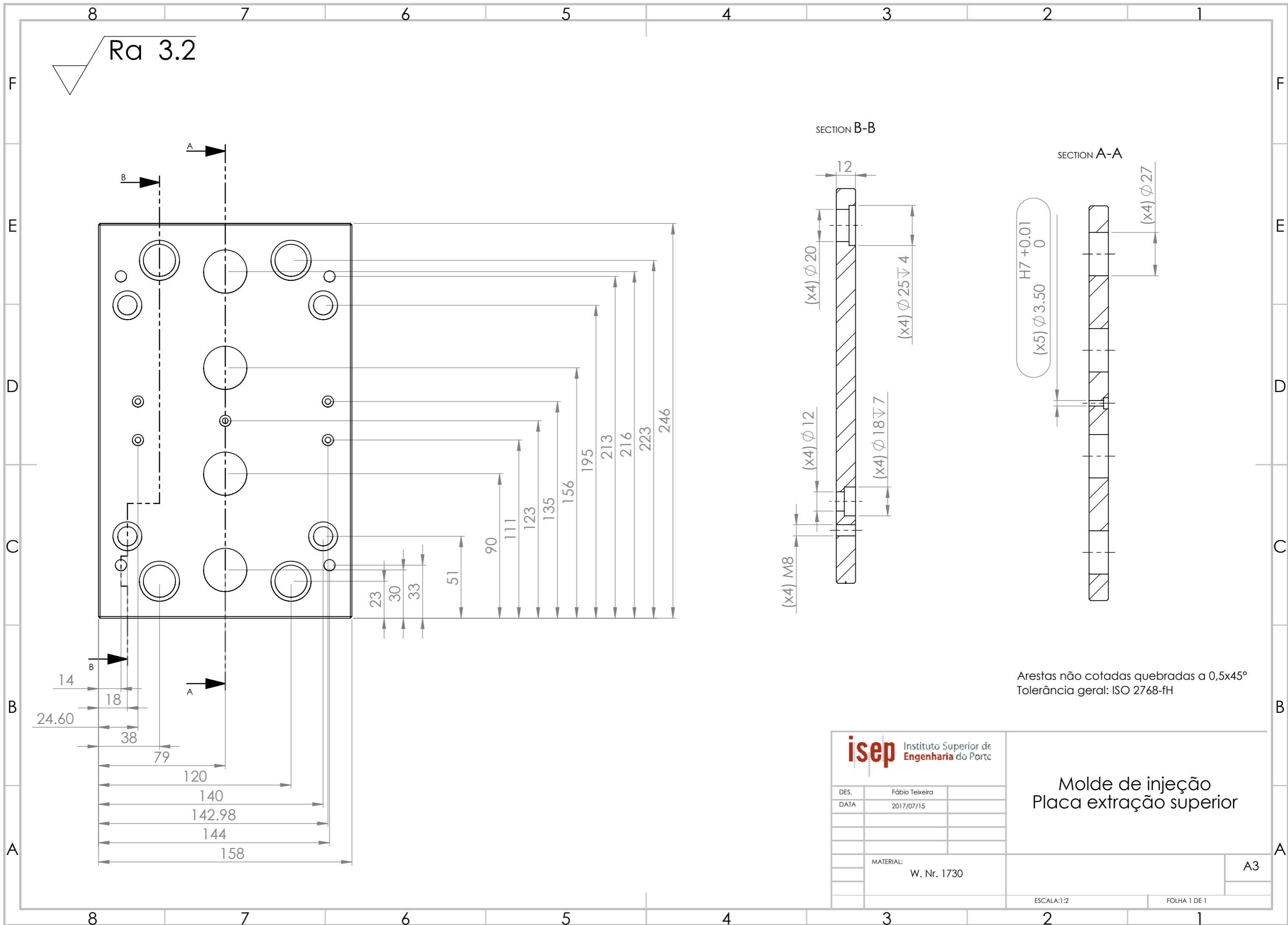
6.2 Anexo II

Desenhos



Arestas não cotadas quebradas a $0,5 \times 45^\circ$
 Tolerância geral: ISO 2768-fH

isep Instituto Superior de Engenharia do Porto		Molde de injeção Calço	
DES.	Fábio Teixeira		
DATA	2017/07/15	MATERIAL: W. Nr. 1730	
		ESCALA: 1:1.5	
		FOLHA 1 DE 1	
		A3	



Ra 3.2

SECTION B-B

SECTION A-A

Arestas não cotadas quebradas a 0,5x45°
Tolerância geral: ISO 2768-FH

isep Instituto Superior de Engenharia do Porto

DES.	Fábio Teixeira
DATA	2017/07/15

Molde de injeção
Placa extração superior

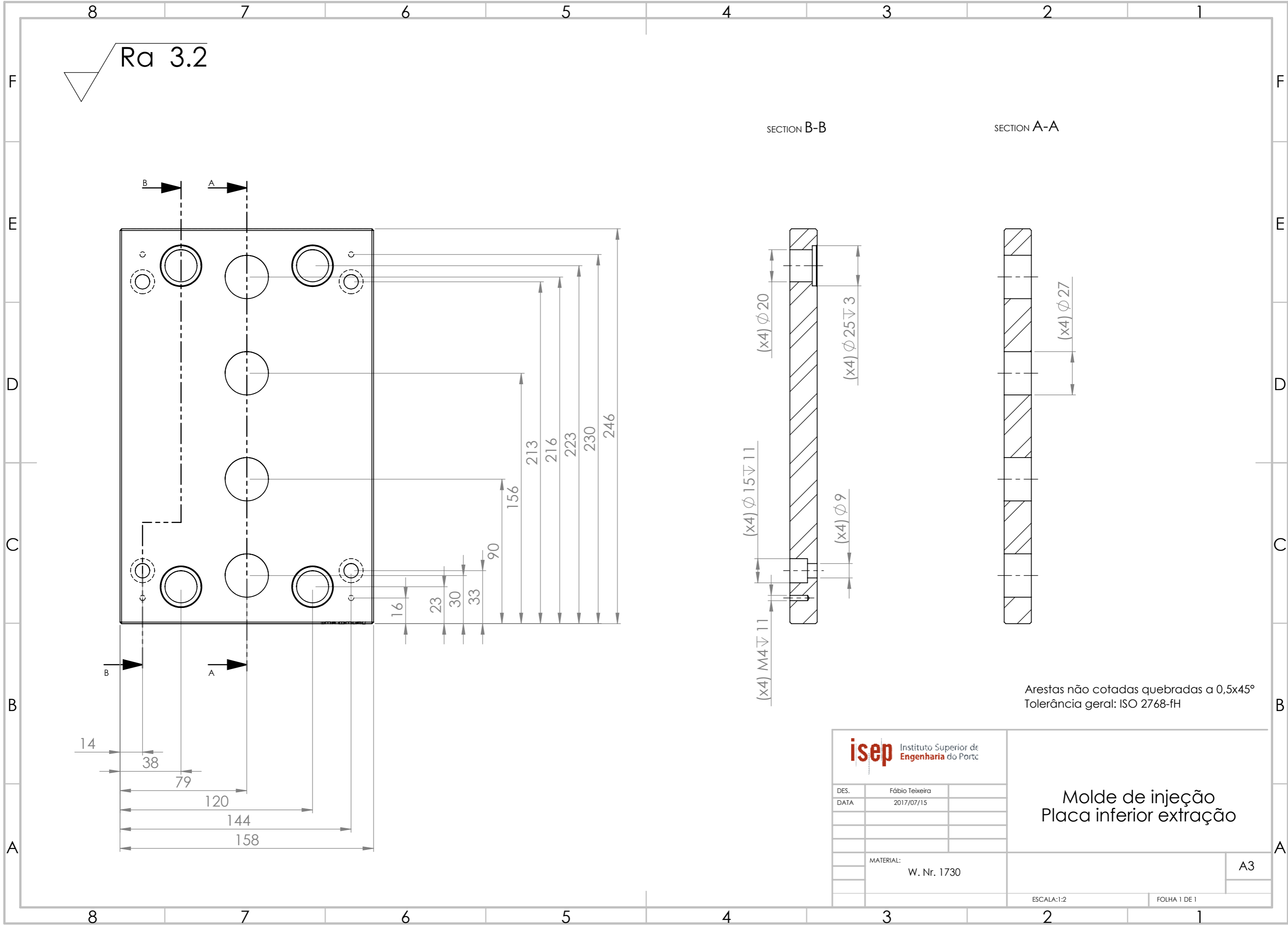
MATERIAL:
W. Nr. 1730

A3

ESCALA: 1:2

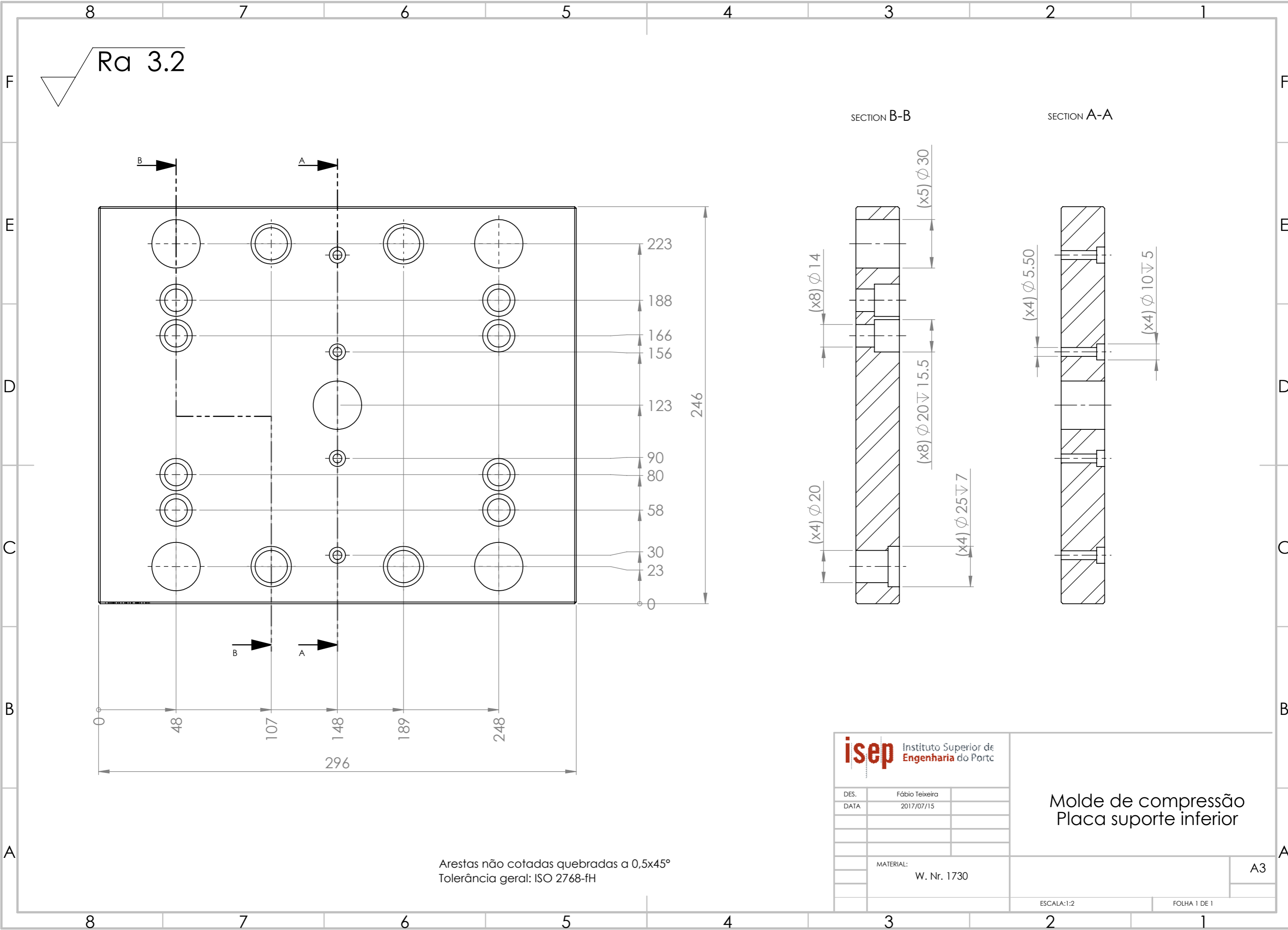
FOLHA 1 DE 1

Ra 3.2



Arestas não cotadas quebradas a 0,5x45°
Tolerância geral: ISO 2768-fH

Instituto Superior de Engenharia do Porto		<h3>Molde de injeção</h3> <h3>Placa inferior extração</h3>
DES.	Fábio Teixeira	
DATA	2017/07/15	<div style="text-align: right;">A3</div>
MATERIAL:	W. Nr. 1730	ESCALA: 1:2



Ra 3.2

SECTION B-B

SECTION A-A

Arestas não cotadas quebradas a 0,5x45°
Tolerância geral: ISO 2768-fH

isep Instituto Superior de Engenharia do Porto	
DES.	Fábio Teixeira
DATA	2017/07/15
MATERIAL: W. Nr. 1730	

Molde de compressão
Placa suporte inferior

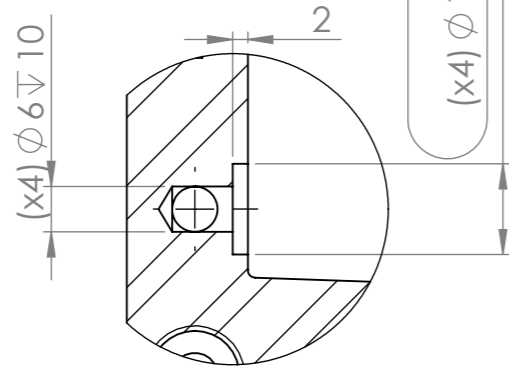
ESCALA:1:2

FOLHA 1 DE 1

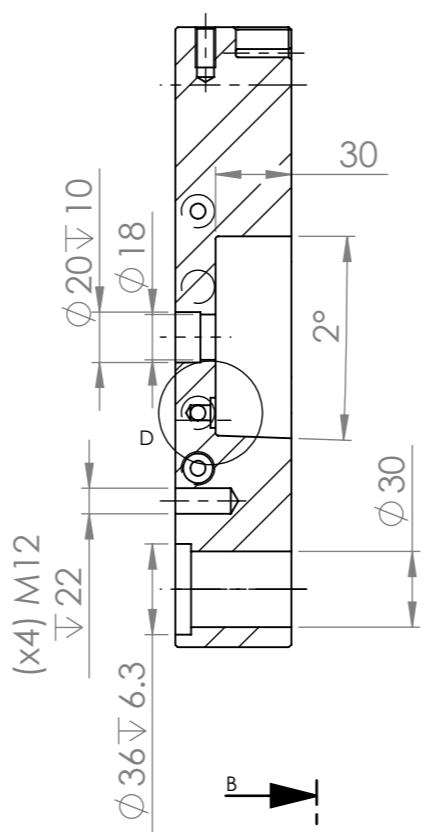
A3

Ra 3.2

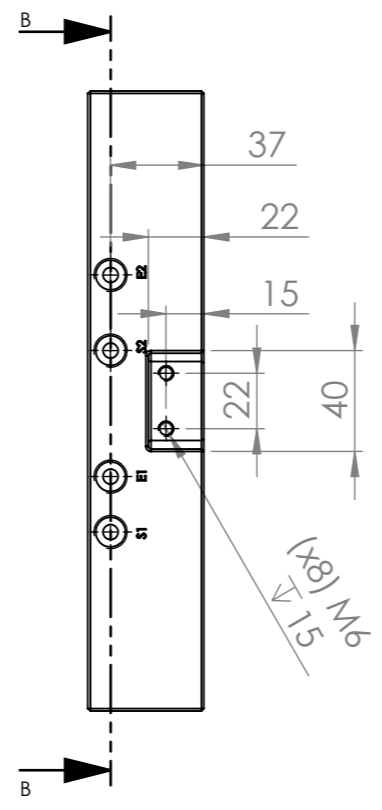
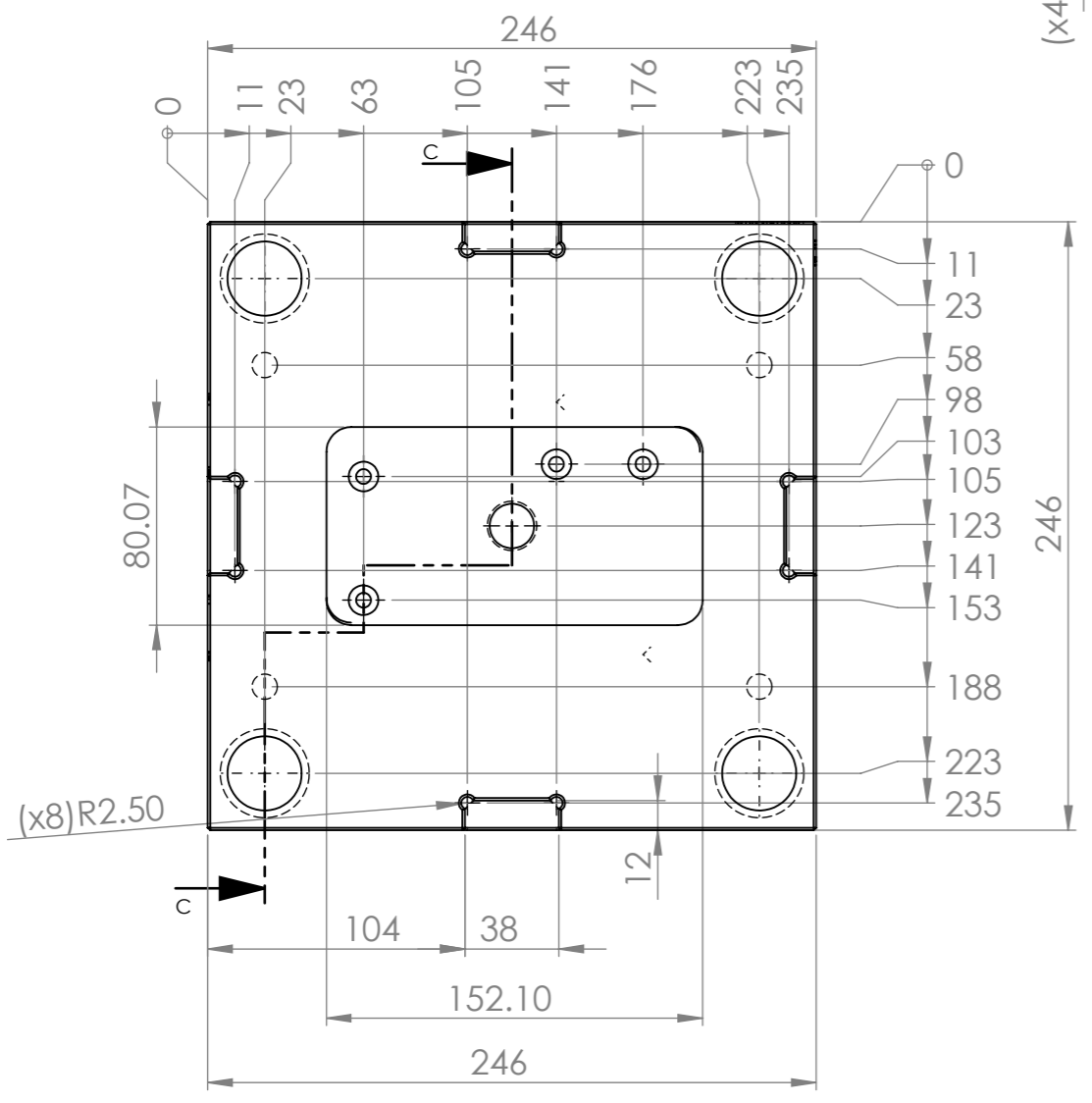
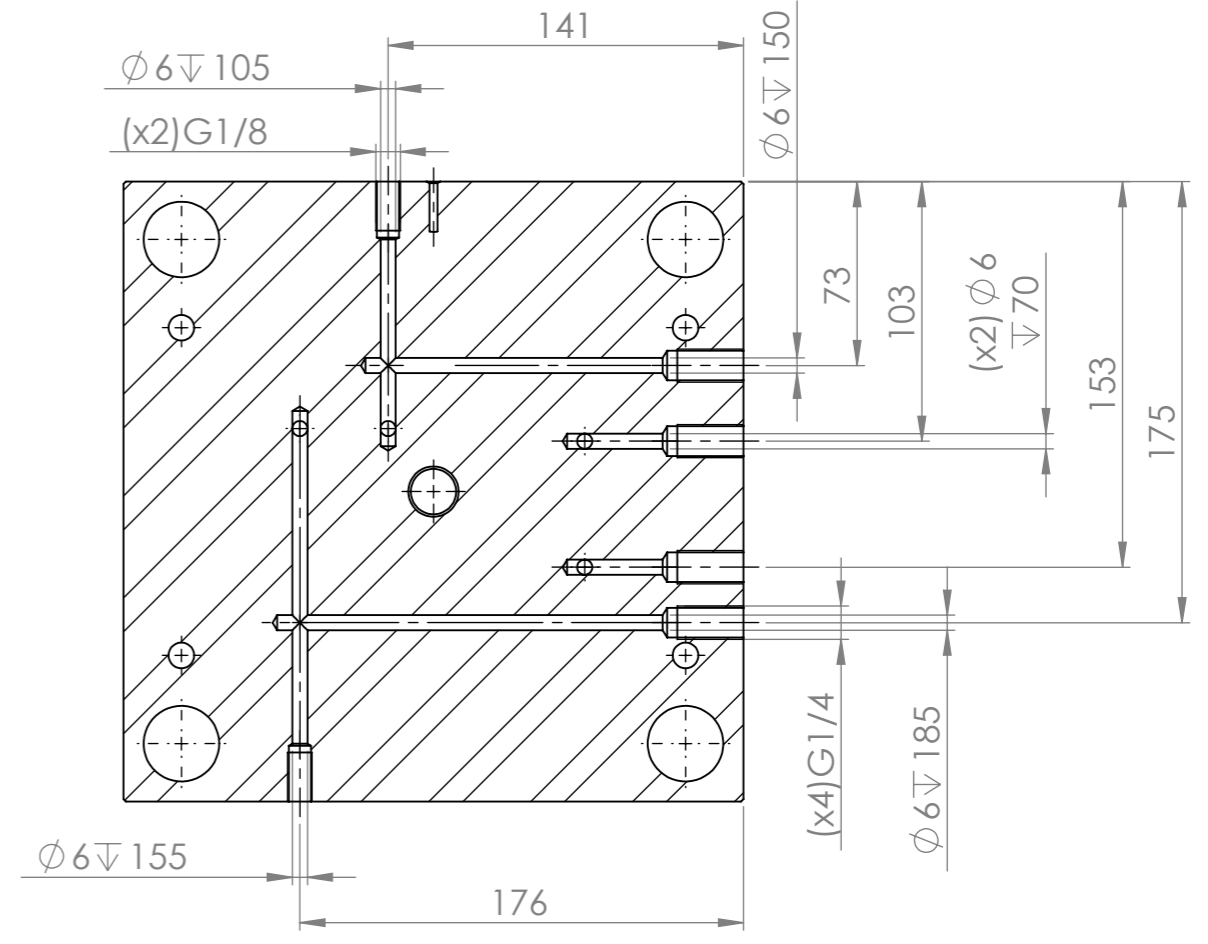
DETAIL D
SCALE 1:1



SECTION C-C



SECTION B-B

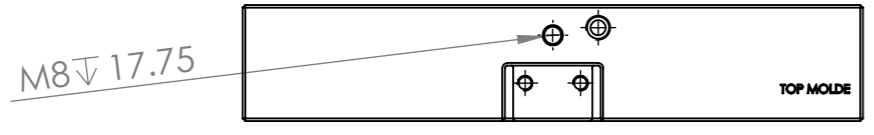


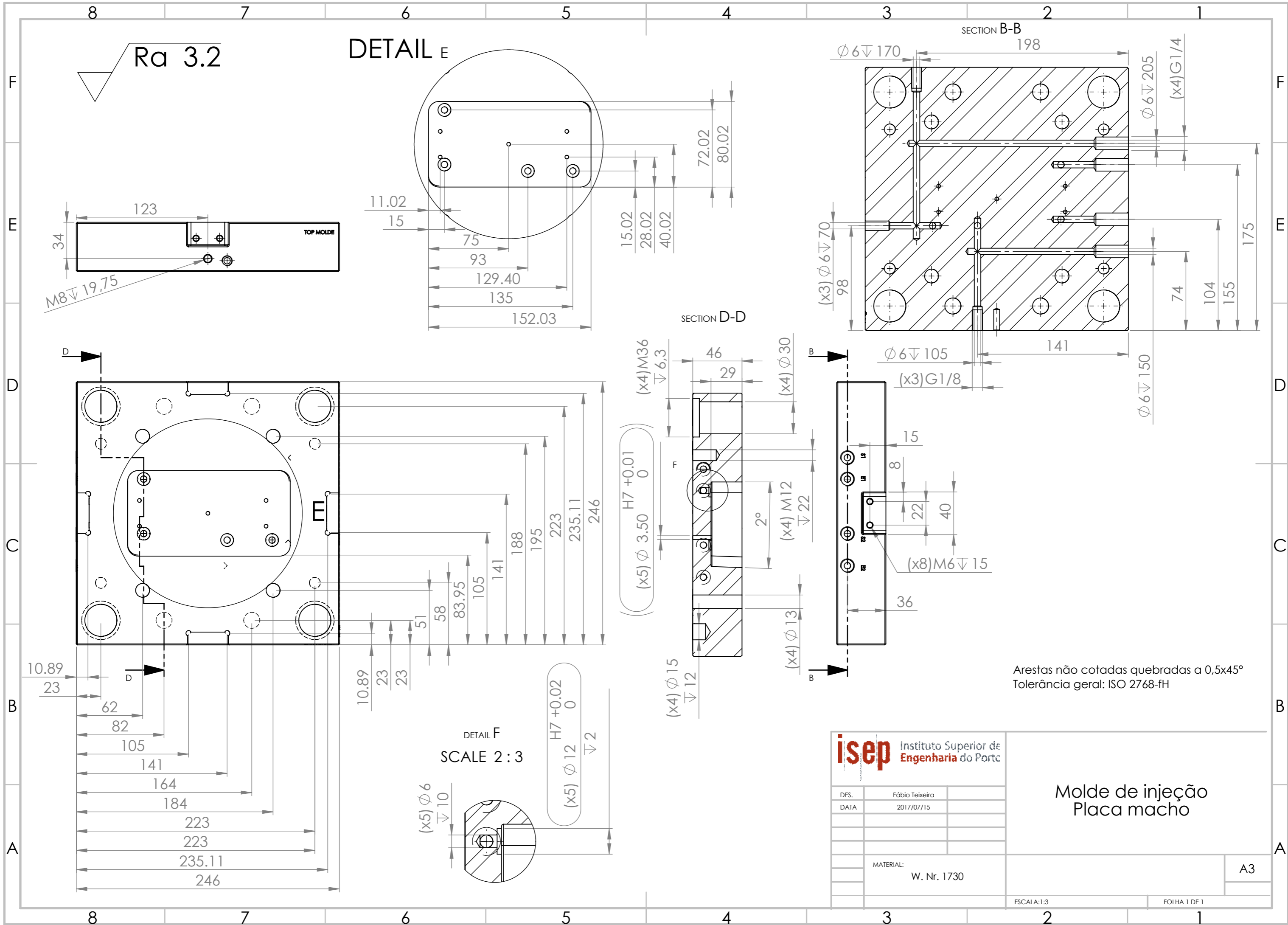
Arestas não cotadas quebradas a 0,5x45°
Tolerância geral: ISO 2768-fH

isep Instituto Superior de Engenharia do Porto

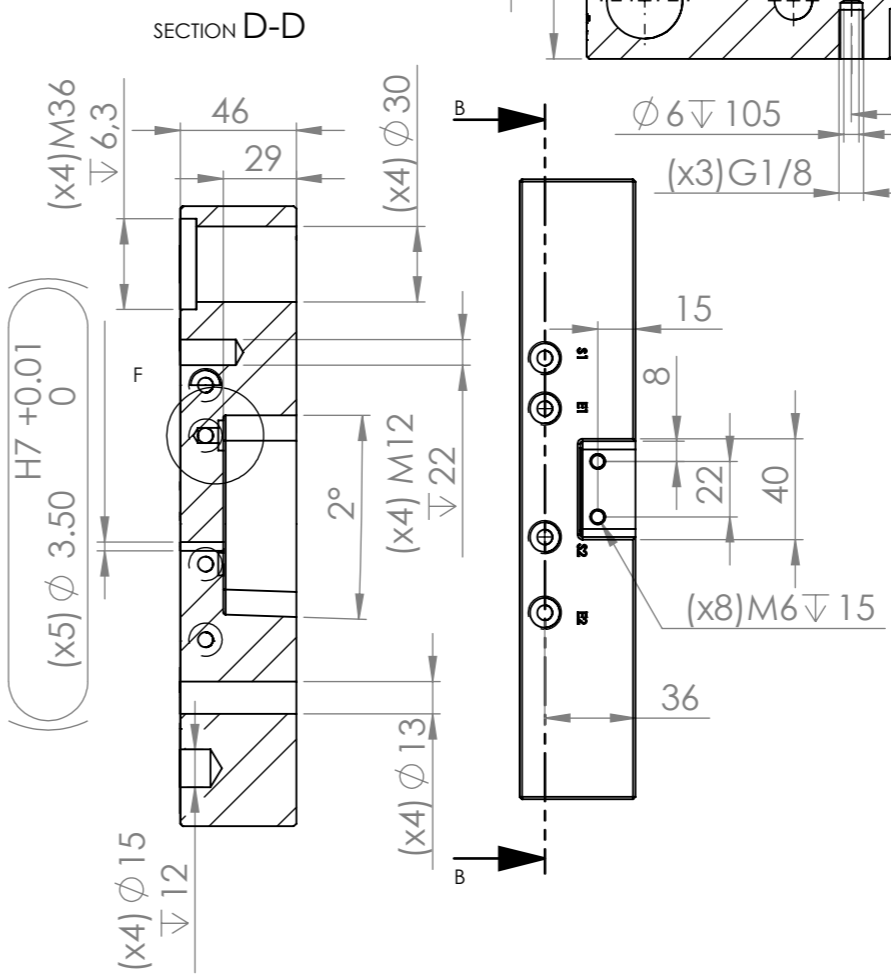
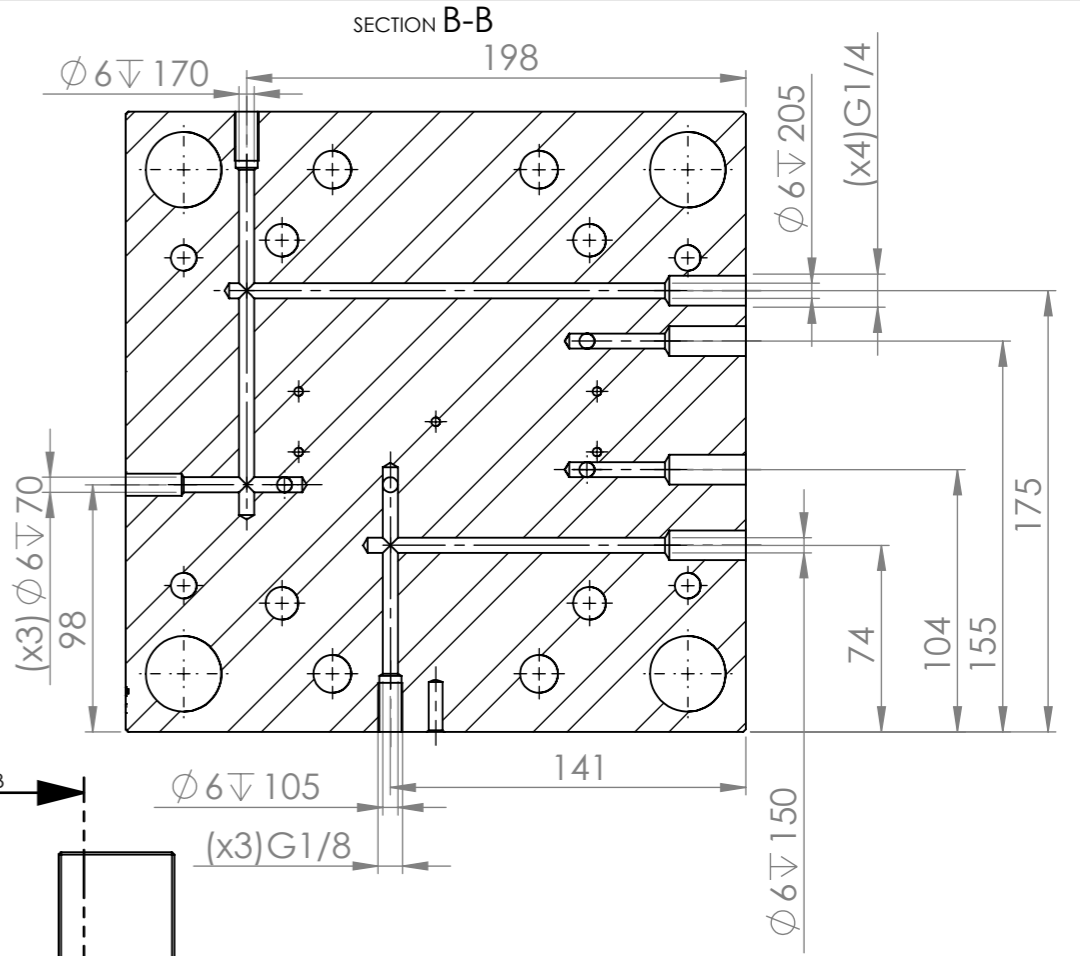
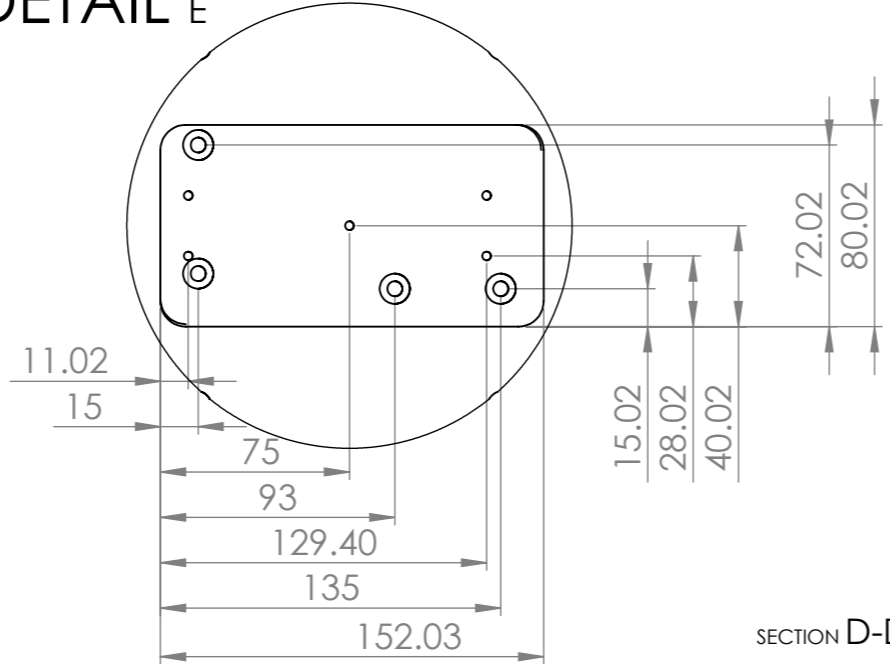
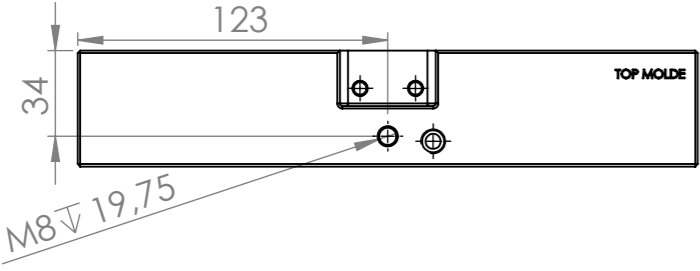
DES.	Fábio Teixeira
DATA	2017/07/15
MATERIAL: W. Nr. 1730	

Molde de compressão
Placa cavidade

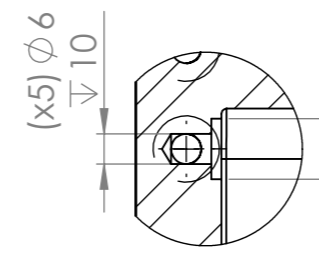
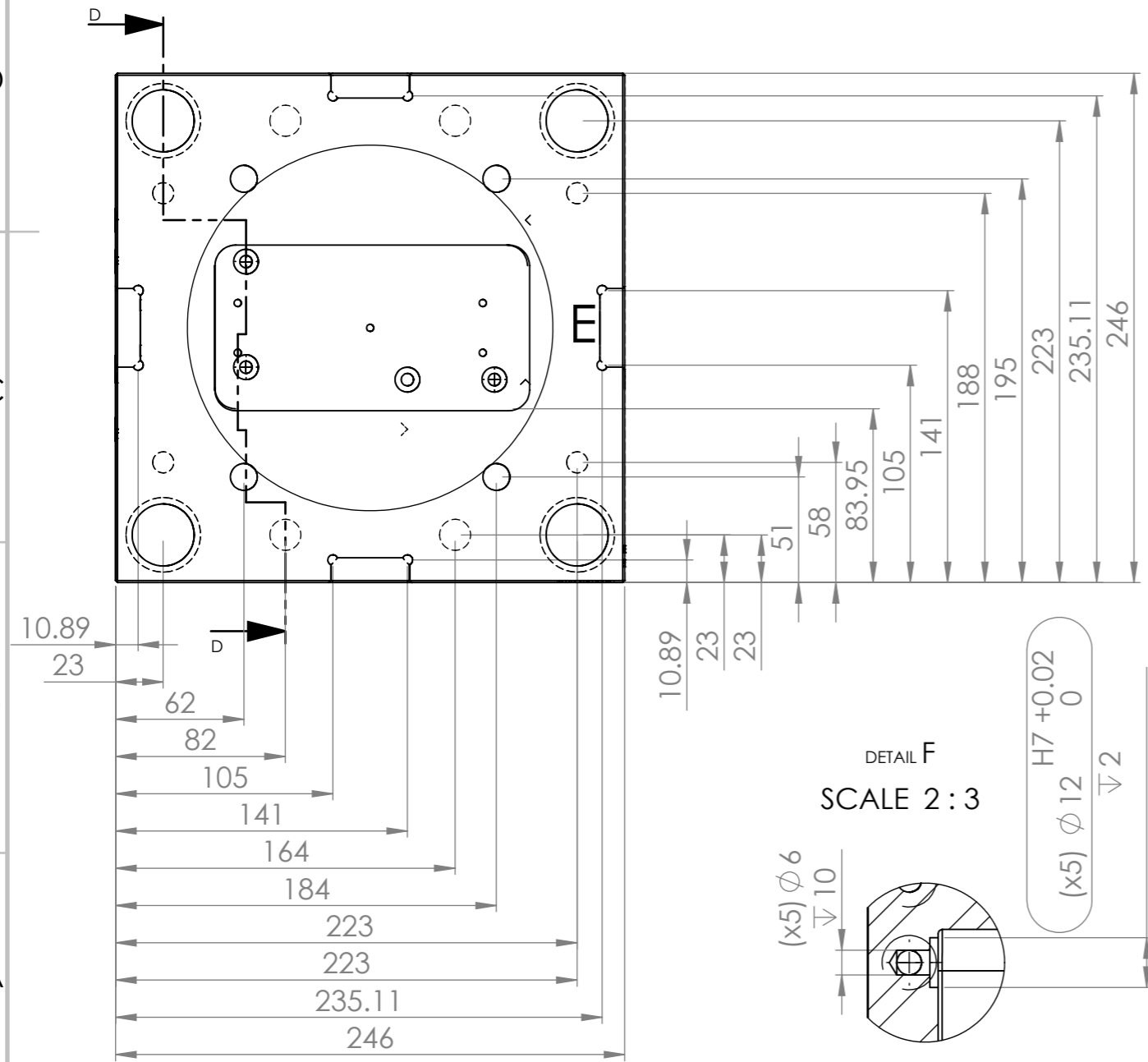




Ra 3.2

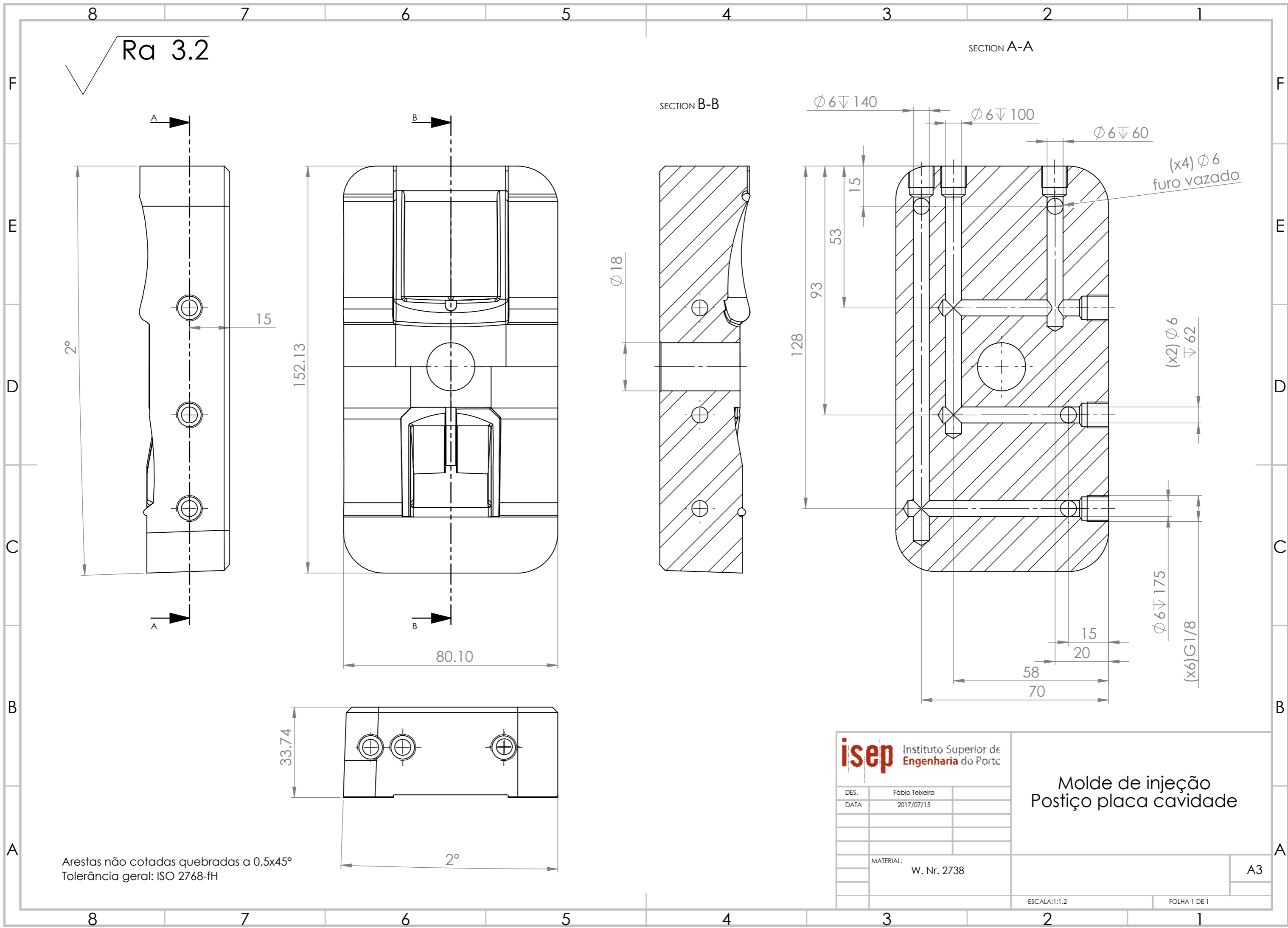


Arestas não cotadas quebradas a 0,5x45°
Tolerância geral: ISO 2768-fH



isep Instituto Superior de Engenharia do Porto	
DES.	Fábrio Teixeira
DATA	2017/07/15
MATERIAL: W. Nr. 1730	

Molde de injeção Placa macho	
A3	
ESCALA: 1:3	FOLHA 1 DE 1



Ra 3.2

SECTION A-A

SECTION B-B

(x4) Ø 6 furo vazado

(x2) Ø 6
▽ 62

Ø 6 ▽ 175
(x6) G1/8

Arestas não cotadas quebradas a 0,5x45°
Tolerância geral: ISO 2768-FH

isep Instituto Superior de Engenharia do Porto

DES. Fábio Teixeira
DATA 2017/07/15

Molde de injeção
Postiço placa cavidade

MATERIAL: W. Nr. 2738

A3

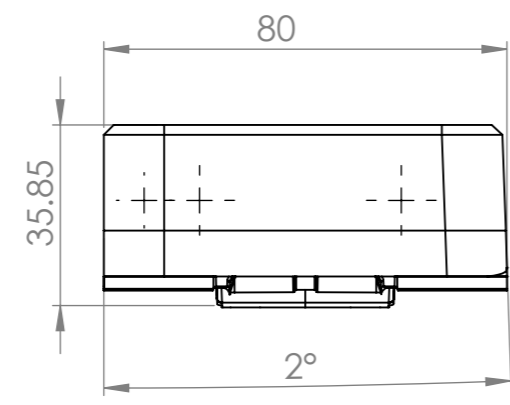
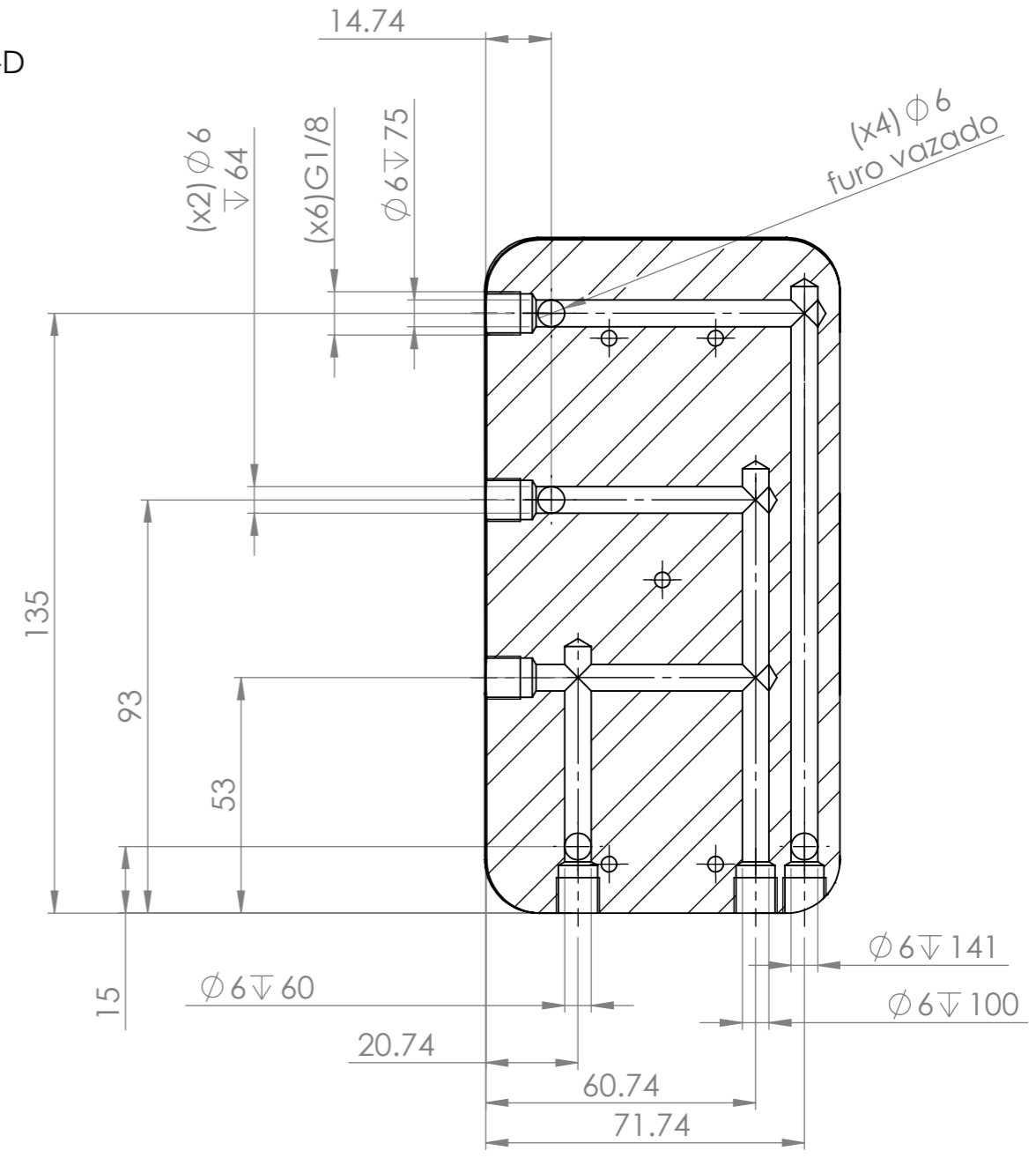
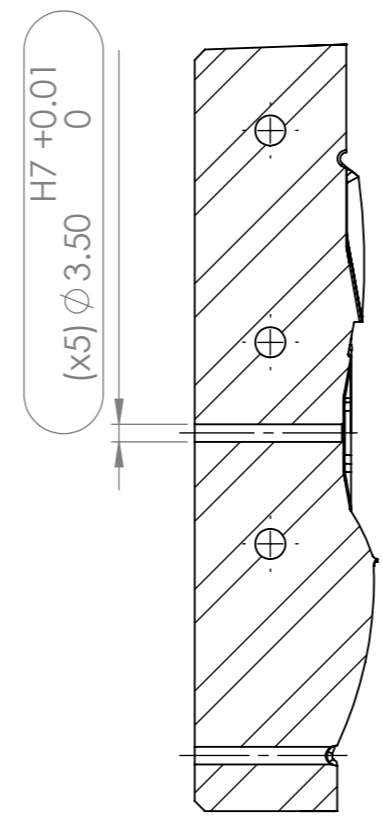
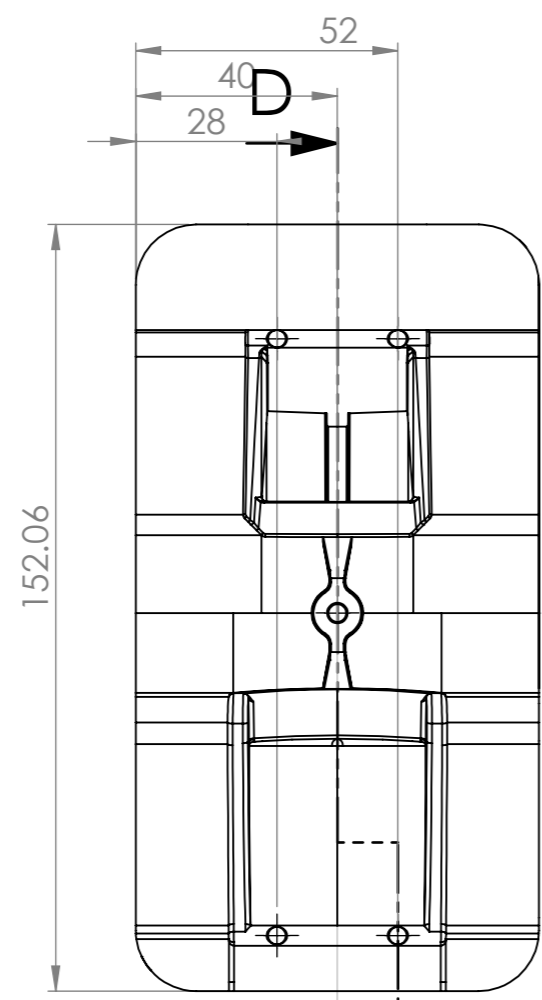
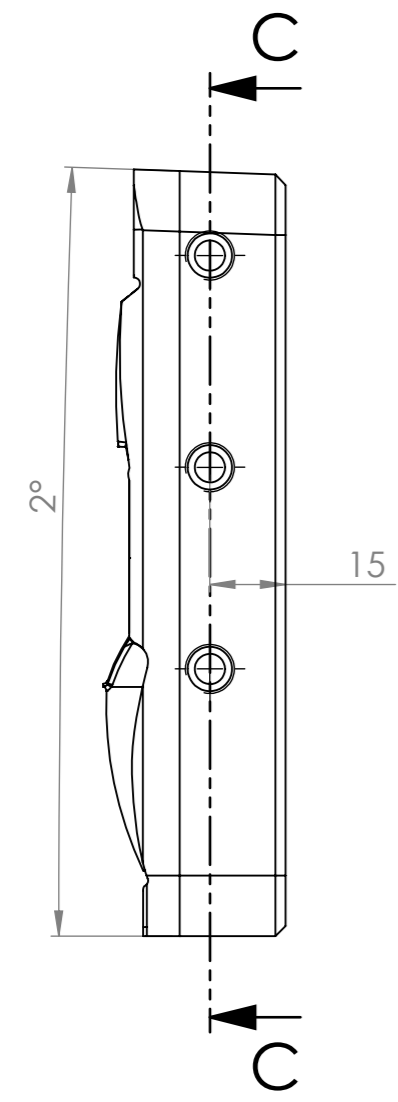
ESCALA: 1:1.2

FOLHA 1 DE 1

Ra 3.2

SECTION C-C

SECTION D-D



Arestas não cotadas quebradas a 0,5x45°
Tolerância geral: ISO 2768-fH

isep Instituto Superior de Engenharia do Porto	
DES.	Fábio Teixeira
DATA	2017/07/15
MATERIAL:	
W. Nr. 2738	

Molde de injeção
Postiço placa macho

ESCALA: 1:1.5

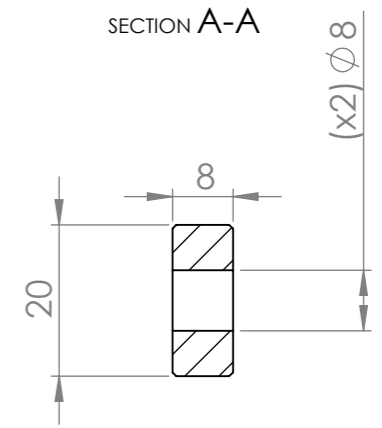
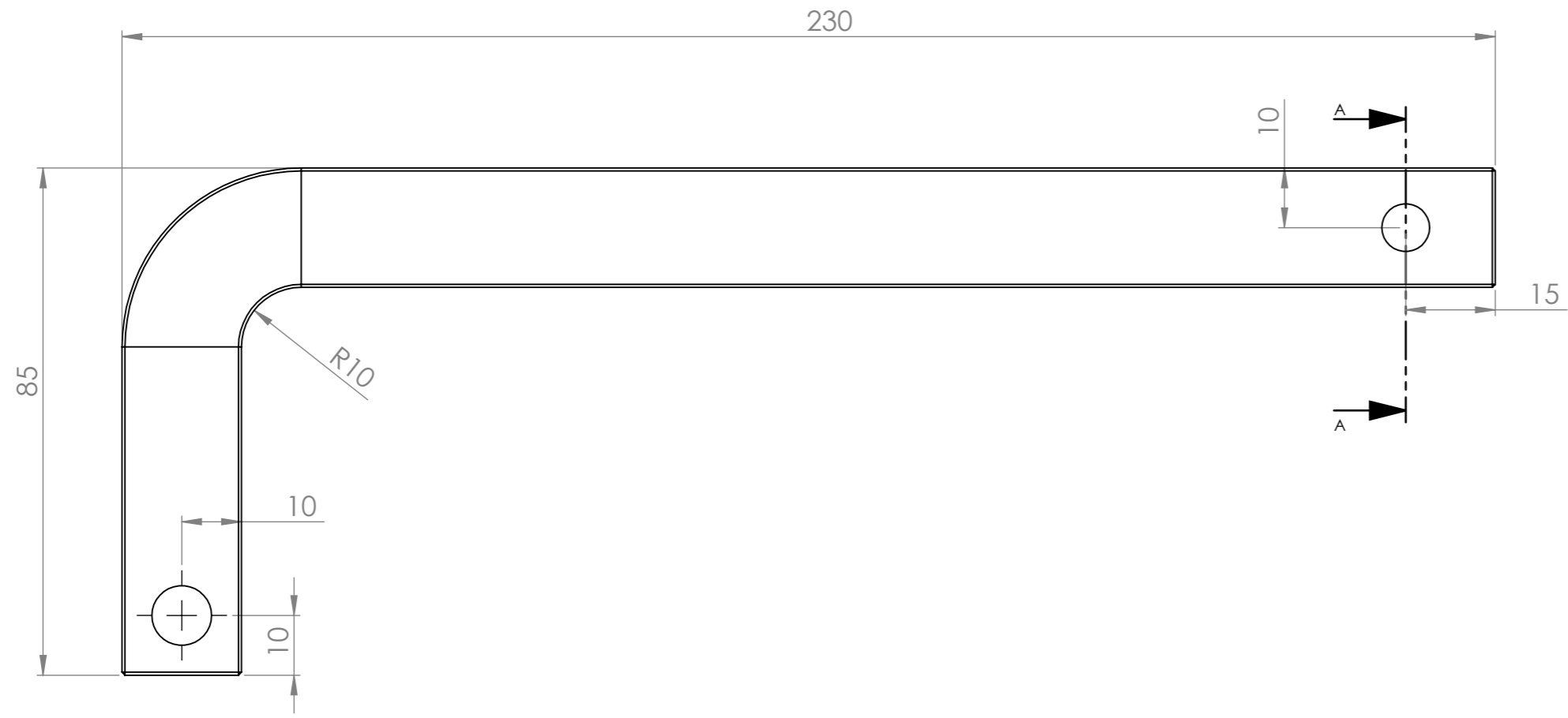
FOLHA 1 DE 1

A3

8 7 6 5 4 3 2 1


F
E
D
C
B
A

Ra 3.2

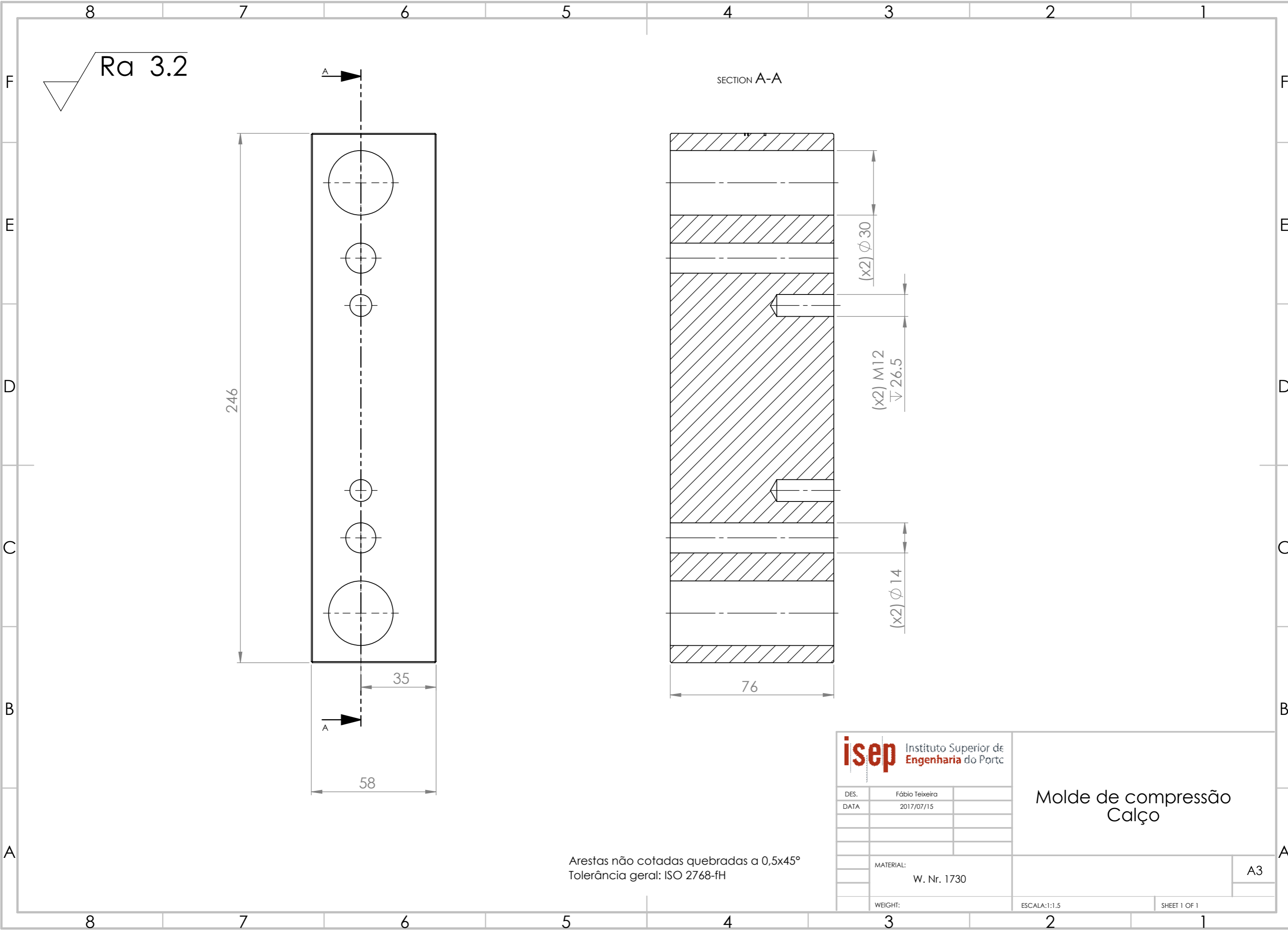


F
E
D
C
B
A

Arestas não cotadas quebradas a 0,5x45°
Tolerância geral: ISO 2768-fH

 Instituto Superior de Engenharia do Porto		<h3>Molde de compressão</h3> <h3>Barra de extração</h3>
DES.	Fábio Teixeira	
DATA	2017/07/15	
MATERIAL:		A3
W. Nr. 1730		
ESCALA: 1:1		FOLHA 1 DE 1

8 7 6 5 4 3 2 1



Ra 3.2

SECTION A-A

246

35

58

76

(x2) ϕ 30

(x2) M12
 ∇ 26.5

(x2) ϕ 14

isep Instituto Superior de Engenharia do Porto

DES. Fábio Teixeira
DATA 2017/07/15

Molde de compressão Calço

MATERIAL: W. Nr. 1730

A3

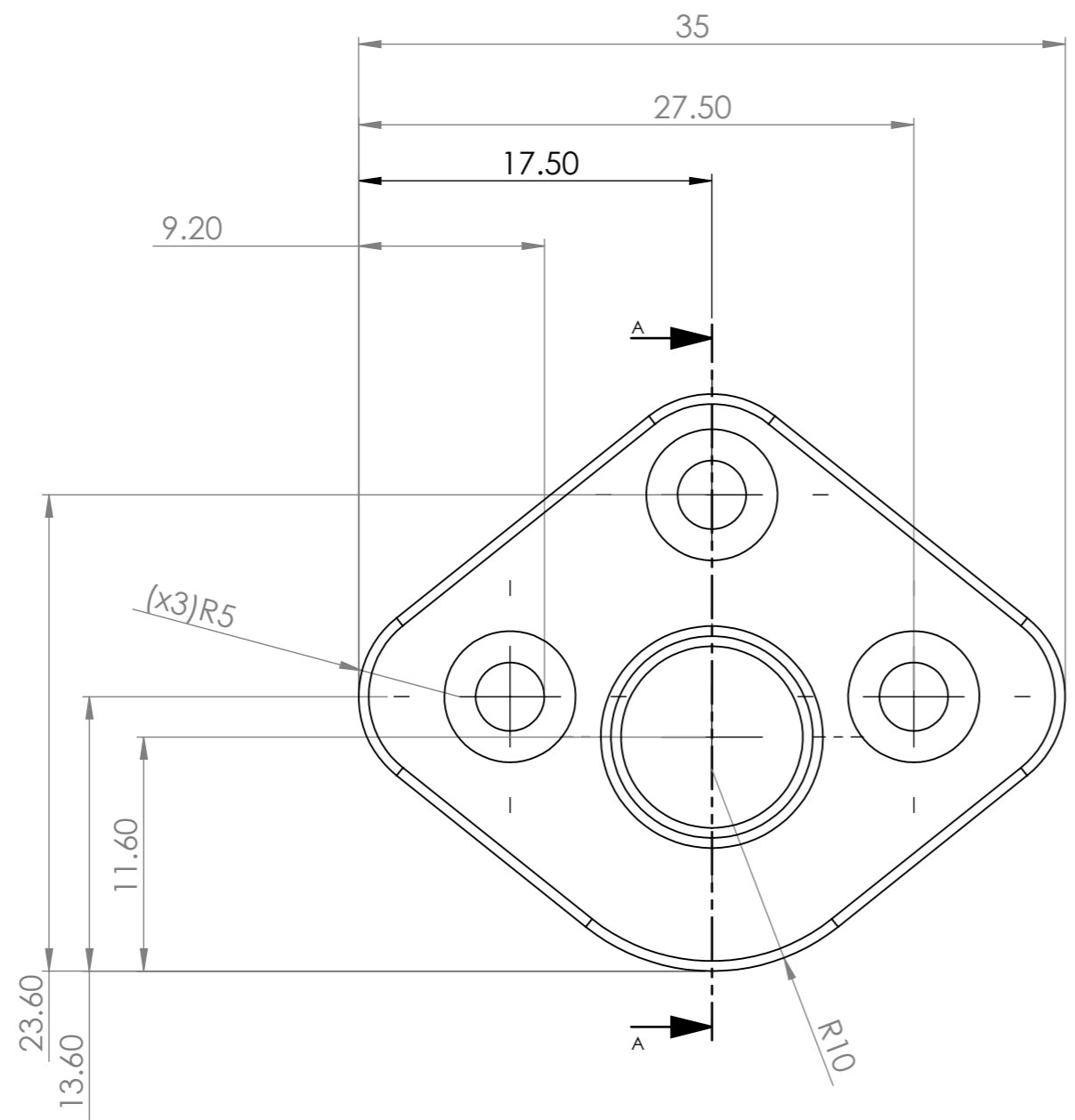
WEIGHT:

ESCALA:1:1.5

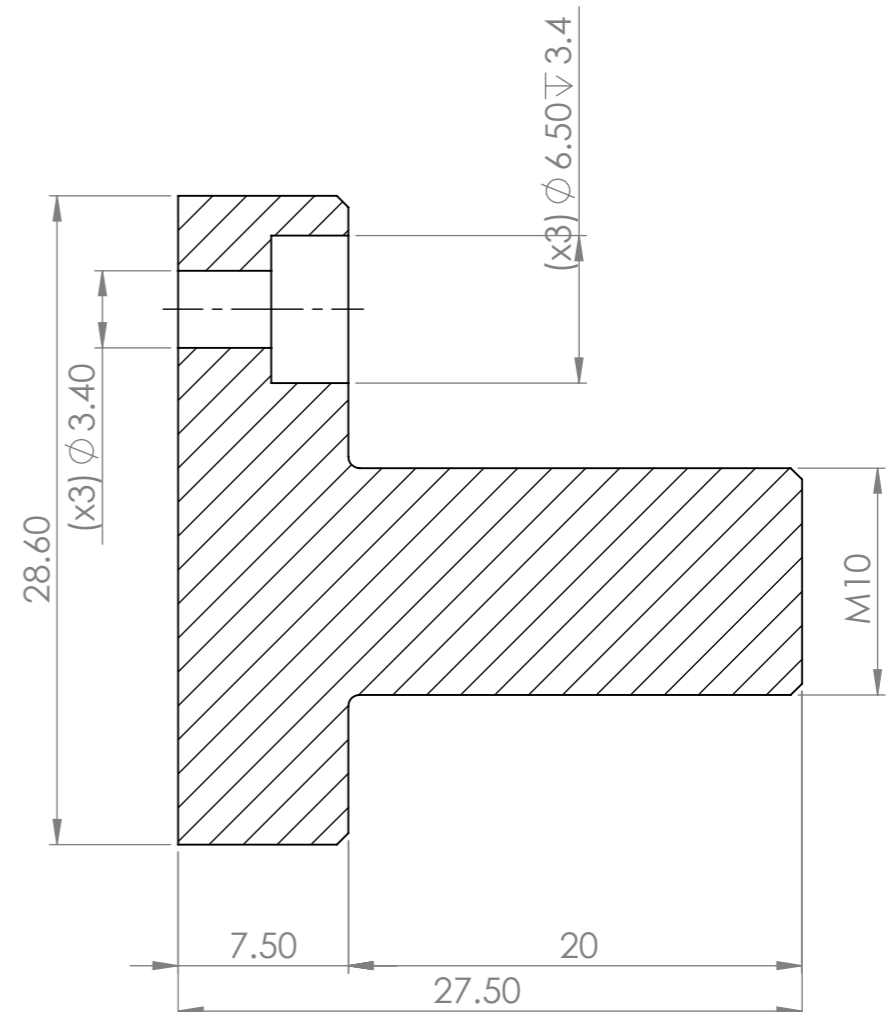
SHEET 1 OF 1

Arestas não cotadas quebradas a 0,5x45°
Tolerância geral: ISO 2768-FH

Ra 3.2

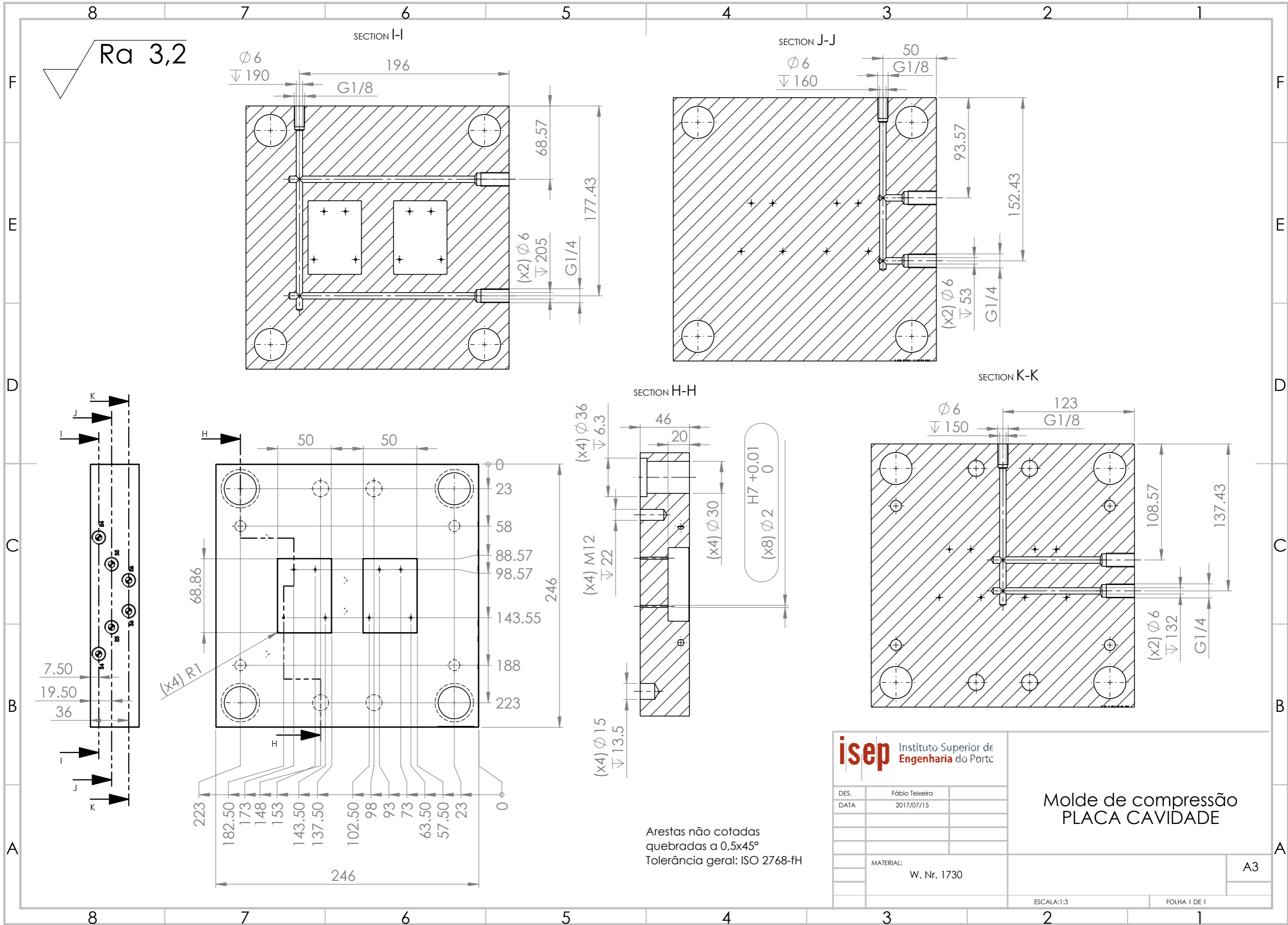


SECTION A-A



Arestas não cotadas quebradas a 0,5x45°
Tolerância geral: ISO 2768-fH

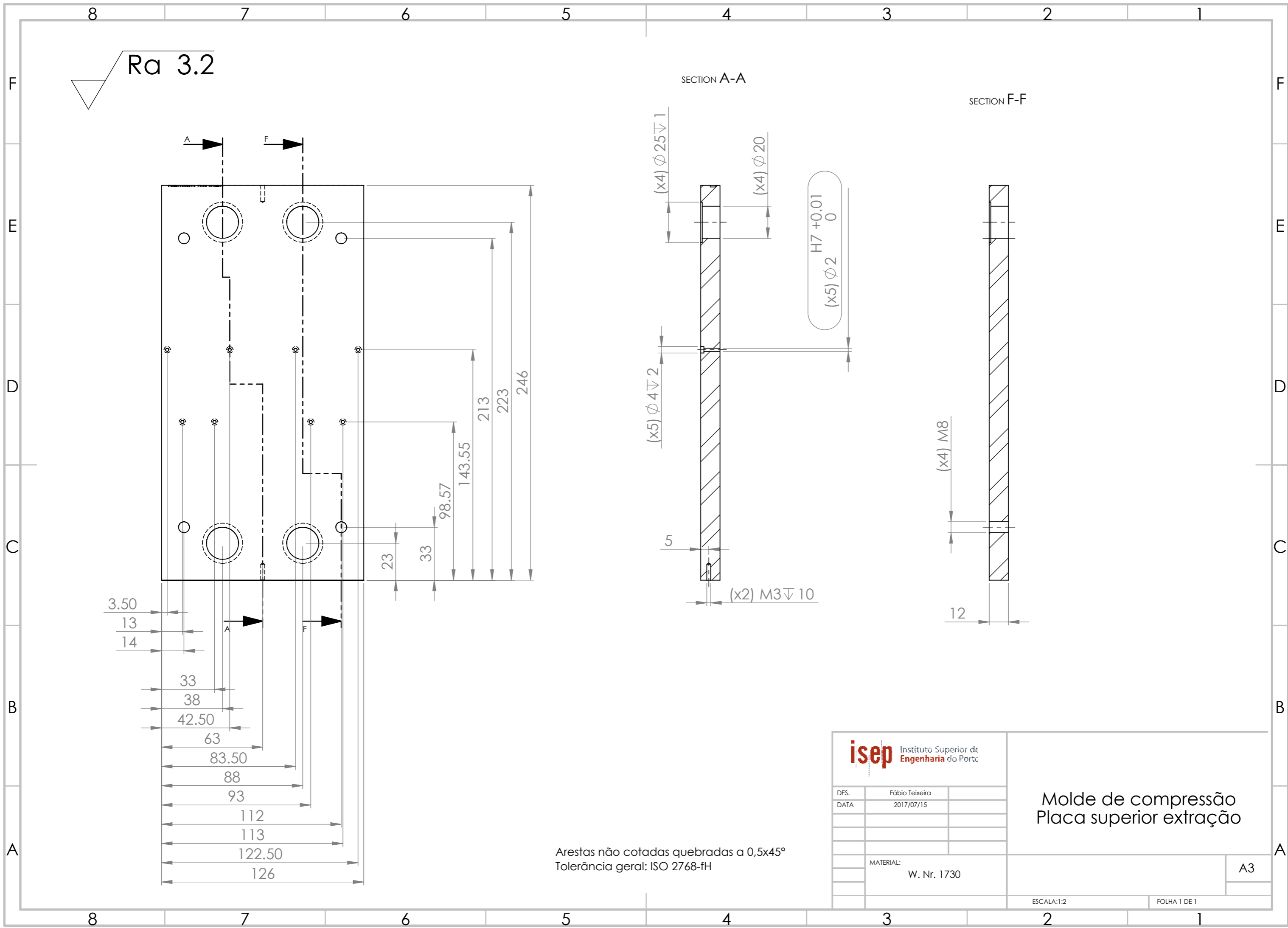
Instituto Superior de Engenharia do Porto		Molde de compressão Componente roscado de fixação
DES.	Fábio Teixeira	
DATA	2017/07/15	A3
MATERIAL:		
W. Nr. 1730		ESCALA:3:1
		FOLHA 1 DE 1



isep Instituto Superior de Engenharia do Porto	
DES.	Fábio Teixeira
DATA	2017/07/15
MATERIAL: W. Nr. 1730	

Molde de compressão
 PLACA CAVIDADE

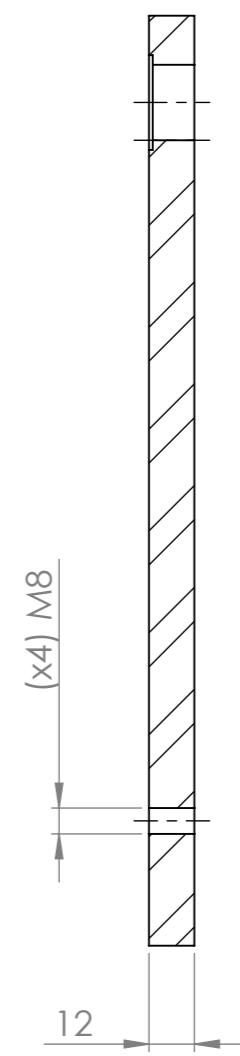
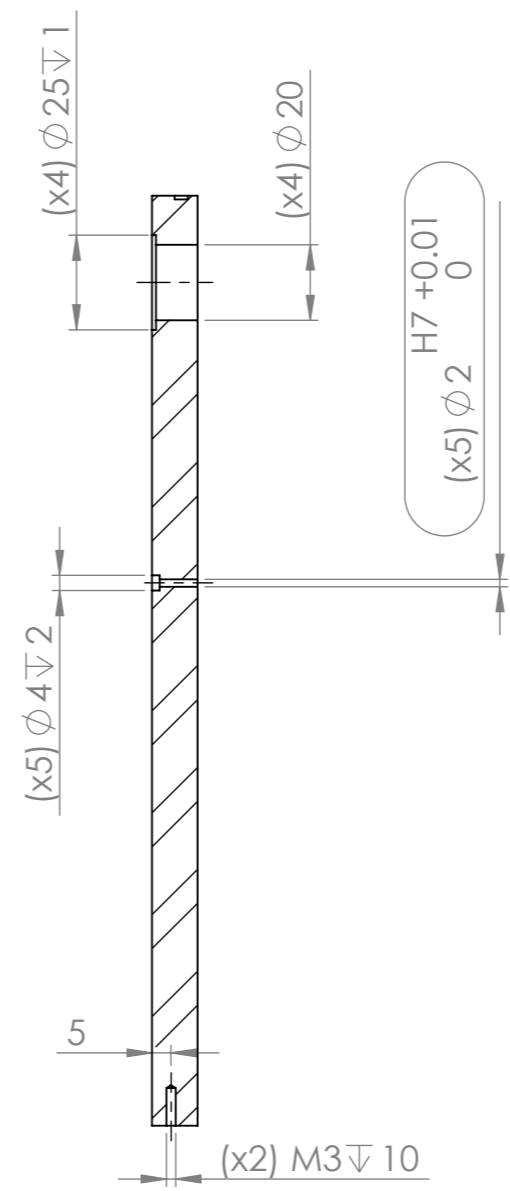
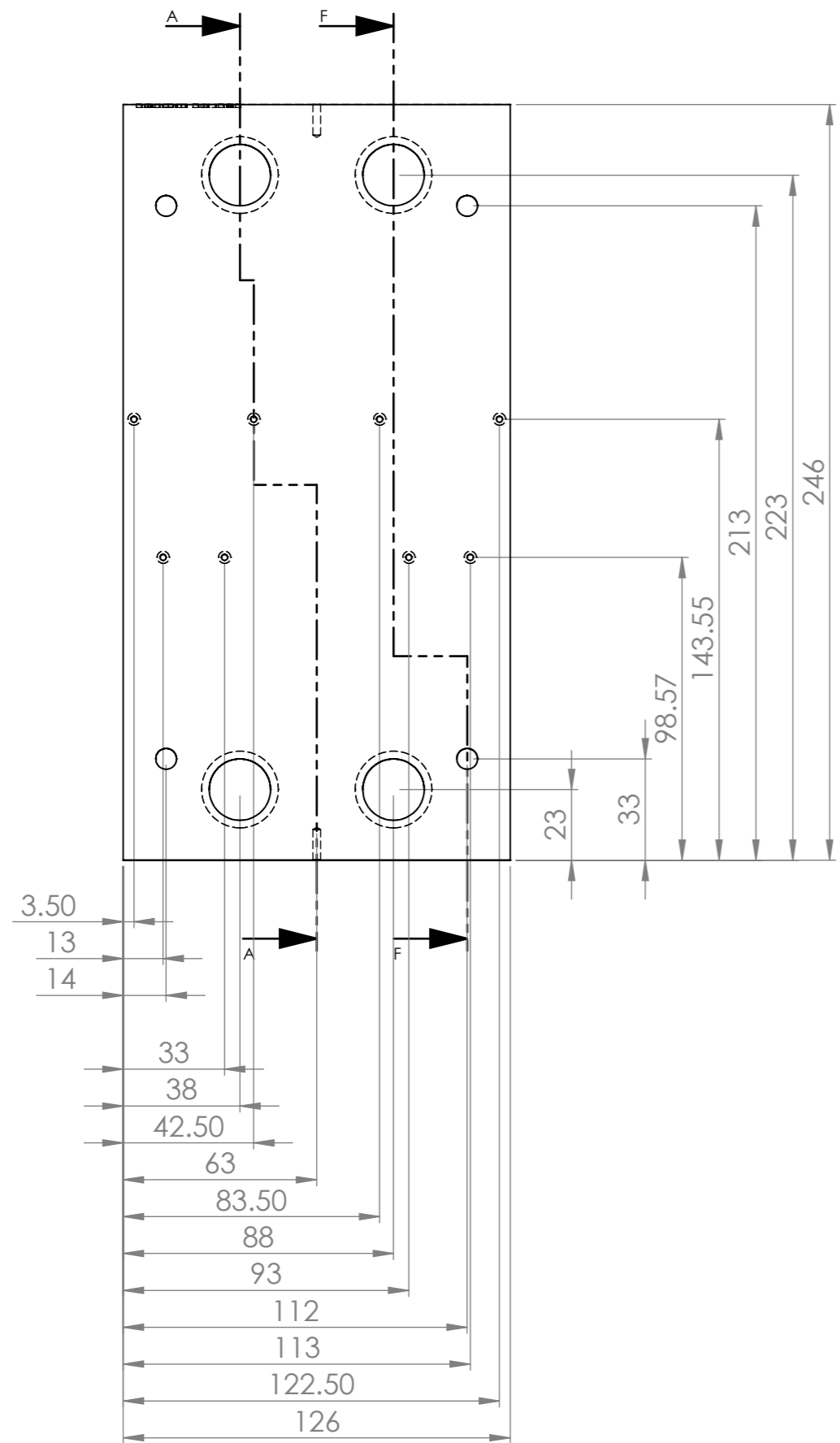
A3



Ra 3.2

SECTION A-A

SECTION F-F



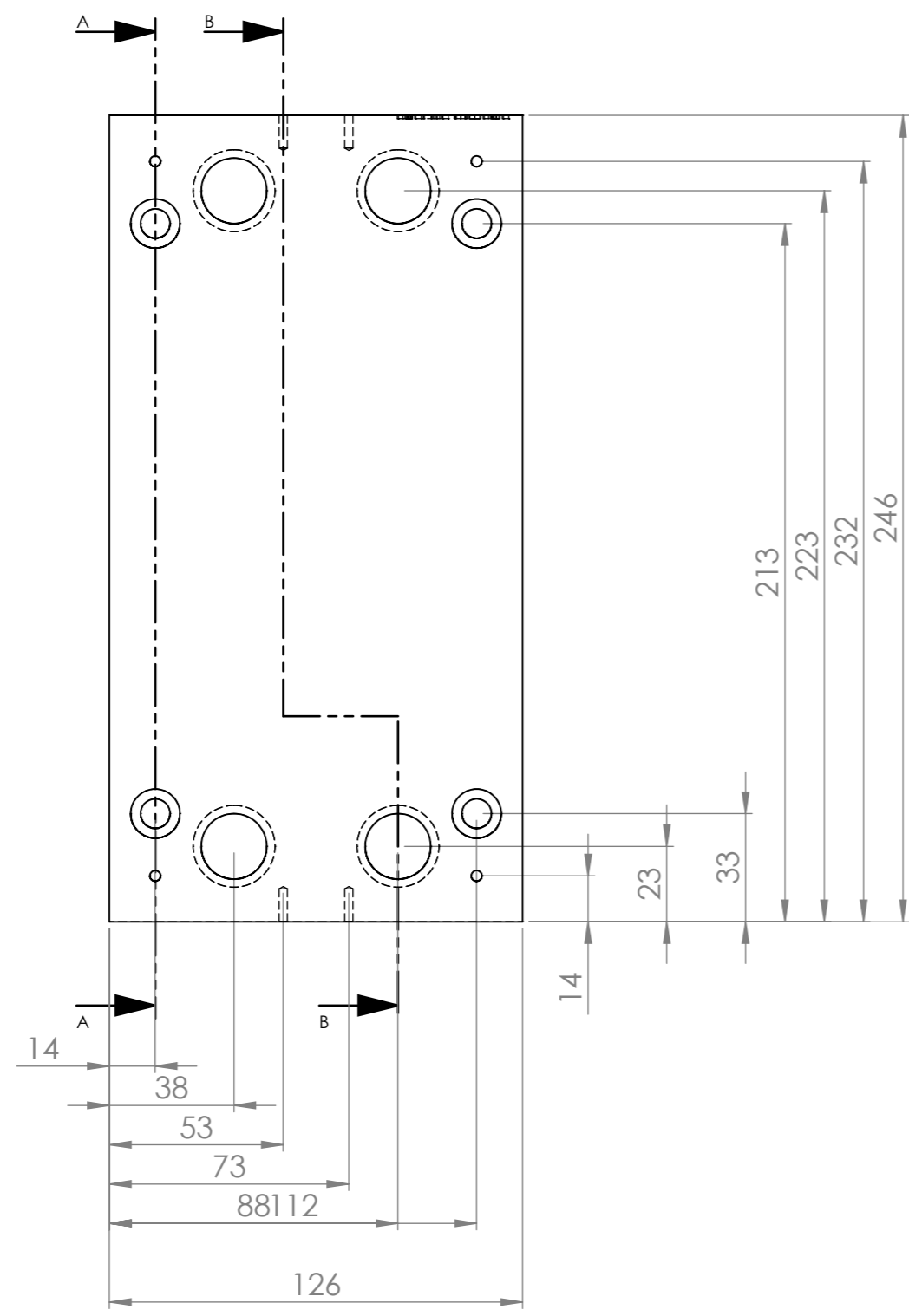
Arestas não cotadas quebradas a 0,5x45°
Tolerância geral: ISO 2768-fH

Instituto Superior de Engenharia do Porto		<p>Molde de compressão Placa superior extração</p>
DES.	Fábio Teixeira	
DATA	2017/07/15	<p>A3</p>
MATERIAL:	W. Nr. 1730	
<p>ESCALA: 1:2</p>		<p>FOLHA 1 DE 1</p>

8 7 6 5 4 3 2 1

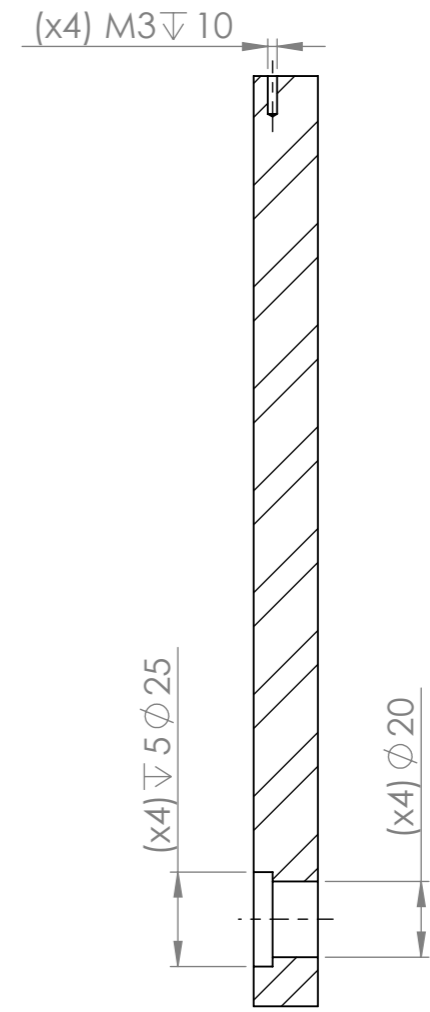
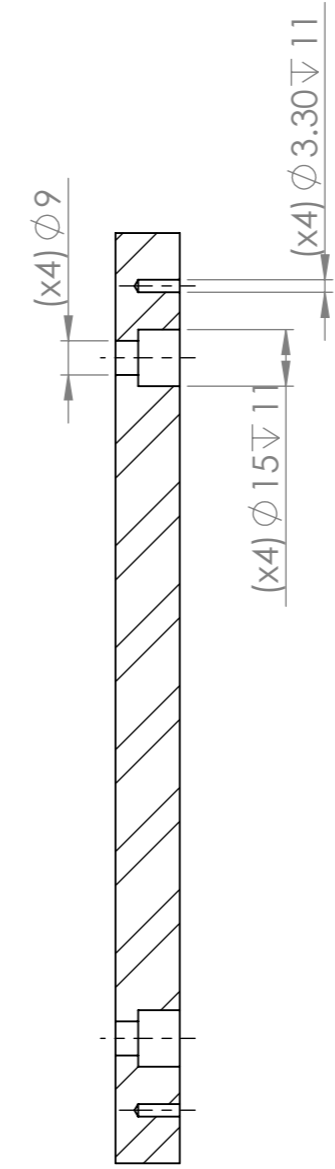
F
E
D
C
B
A

Ra 3.2



SECTION A-A

SECTION B-B

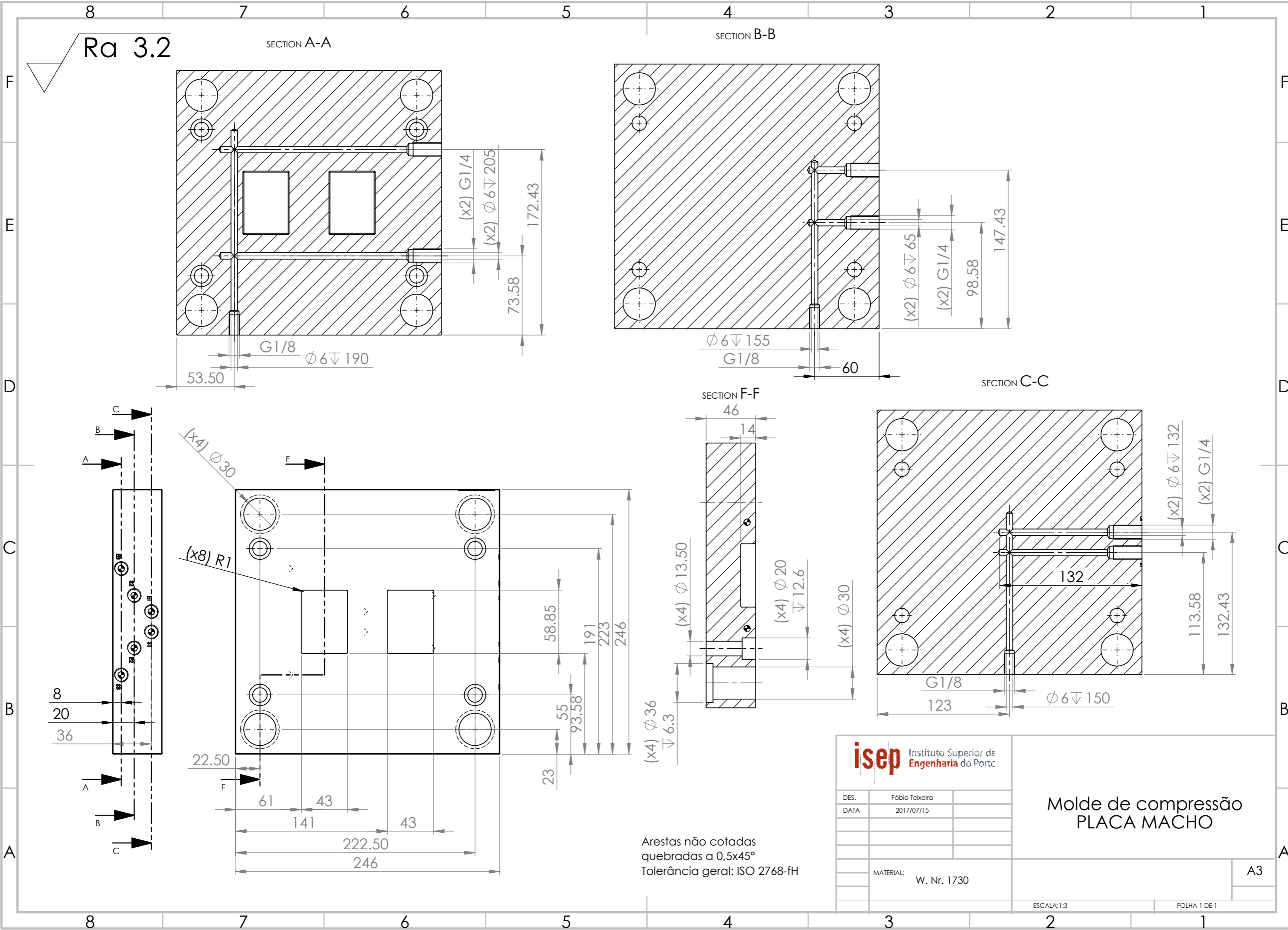


F
E
D
C
B
A

Arestas não cotadas quebradas a 0,5x45°
Tolerância geral: ISO 2768-fH

isep Instituto Superior de Engenharia do Porto		Molde de compressão Placa inferior extração
DES.	Fábio Teixeira	
DATA	2017/07/15	
MATERIAL:	W. Nr. 1730	A3
ESCALA: 1:2		FOLHA 1 DE 1

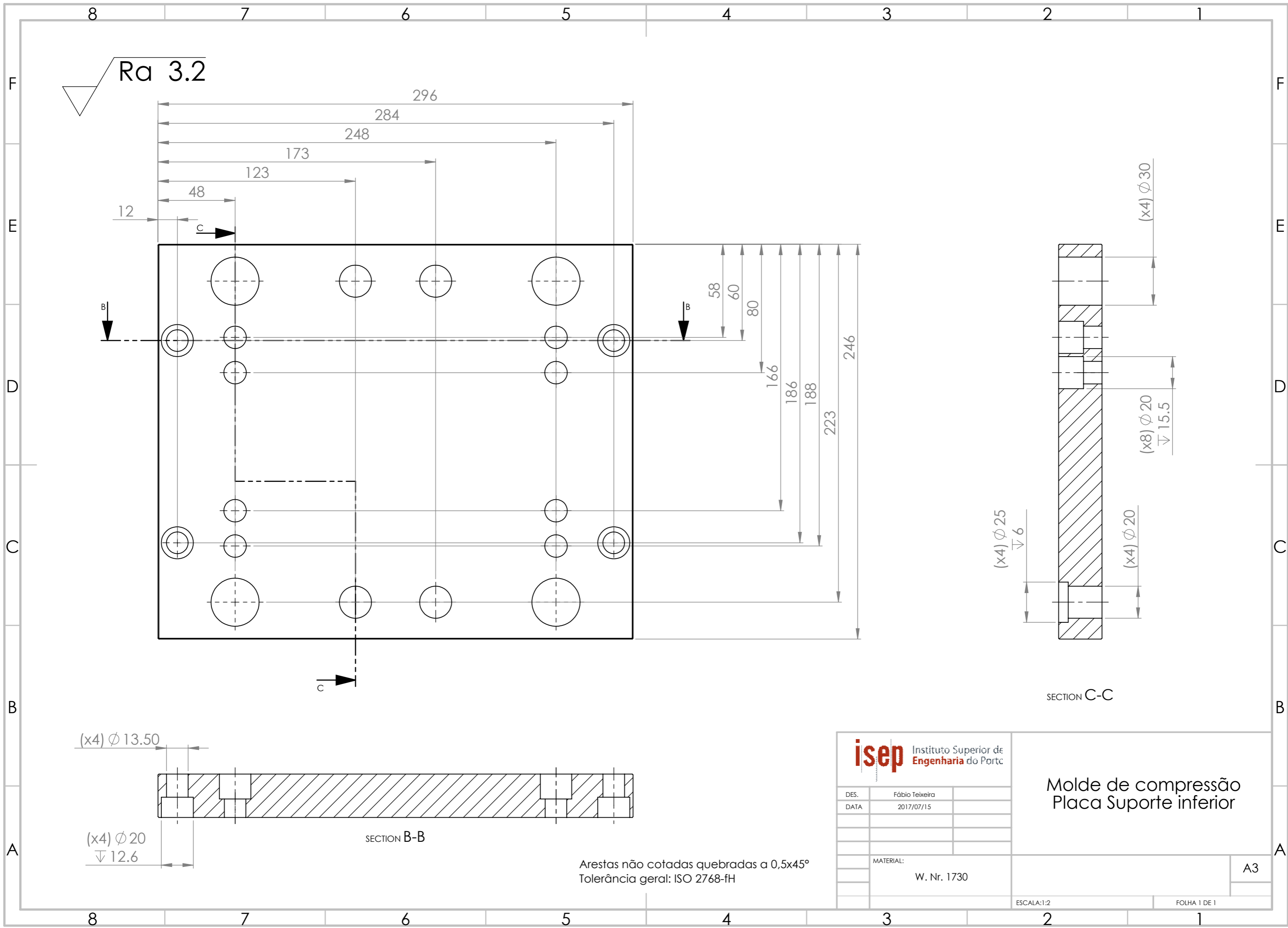
8 7 6 5 4 3 2 1



Arestas não cotadas
 quebradas a 0,5x45°
 Tolerância geral: ISO 2768-fH

isep Instituto Superior de Engenharia do Porto	
DES.	Fábio Teixeira
DATA	2017/07/15
MATERIAL: W. Nr. 1730	

**Molde de compressão
 PLACA MACHO**
 ESCALA:1:3
 FOLHA 1 DE 1
 A3



Ra 3.2

296

284

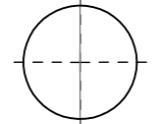
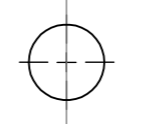
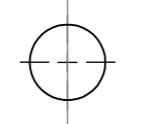
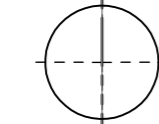
248

173

123

48

12



B

B

58

60

80

246

166

186

188

223

(x4) Ø 30

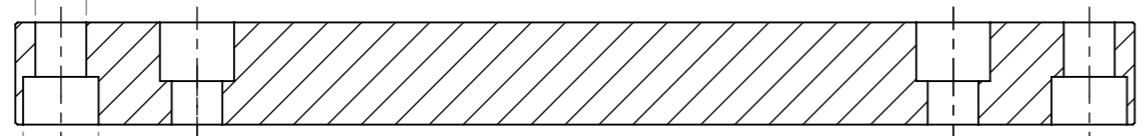
(x8) Ø 20
15.5

(x4) Ø 25
6

(x4) Ø 20

SECTION C-C

(x4) Ø 13.50



(x4) Ø 20
12.6

SECTION B-B

Arestas não cotadas quebradas a 0,5x45°
Tolerância geral: ISO 2768-fH

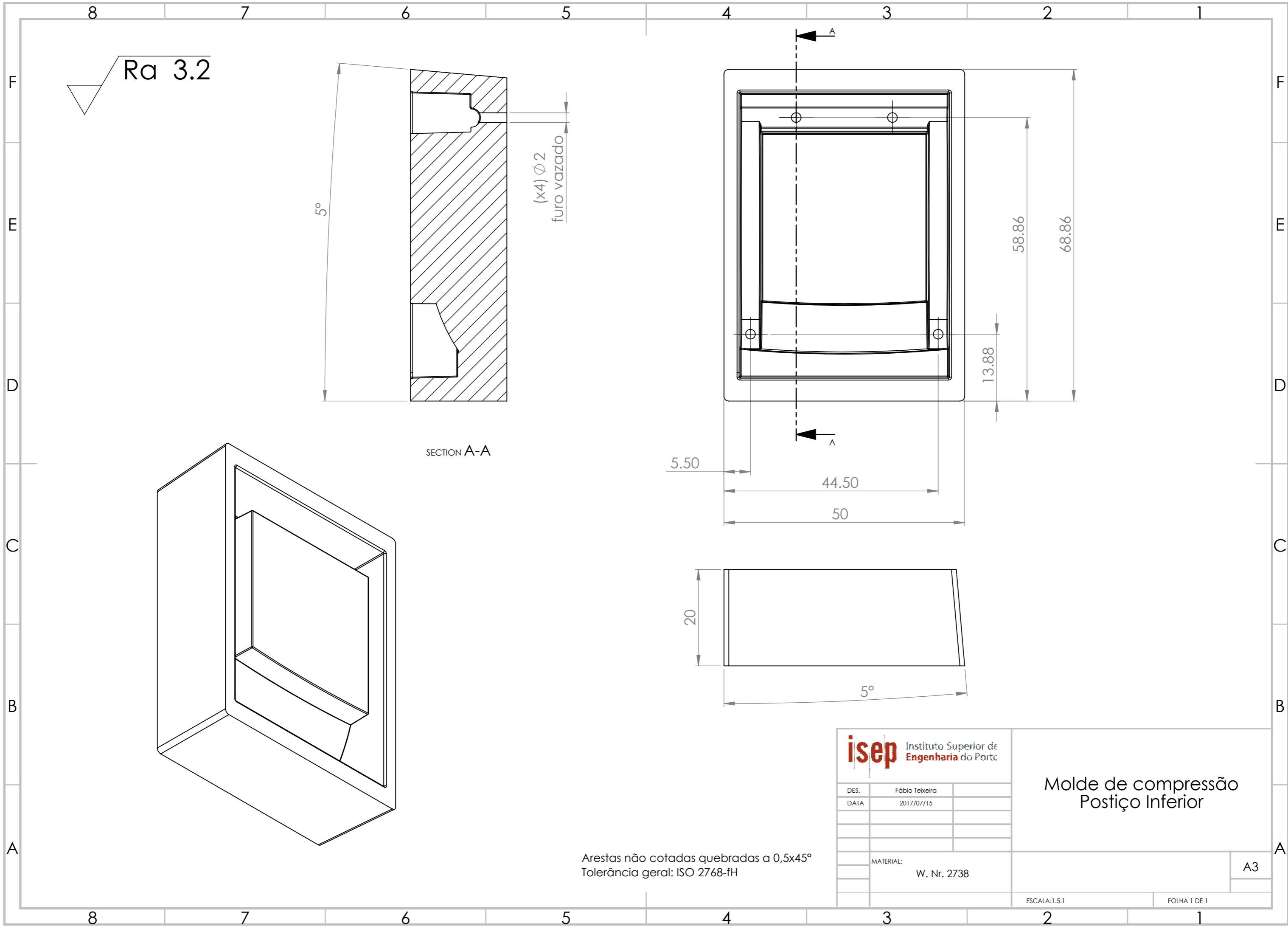
isep Instituto Superior de Engenharia do Porto	
DES.	Fábio Teixeira
DATA	2017/07/15
MATERIAL:	
W. Nr. 1730	

Molde de compressão
Placa Suporte inferior

A3

ESCALA: 1:2

FOLHA 1 DE 1



Ra 3.2

5°

(x4) $\phi 2$
furo vazado

SECTION A-A

5.50

44.50

50

13.88

58.86

68.86

20

5°

isep Instituto Superior de
Engenharia do Porto

DES. Fábio Teixeira
DATA 2017/07/15

MATERIAL:
W. Nr. 2738

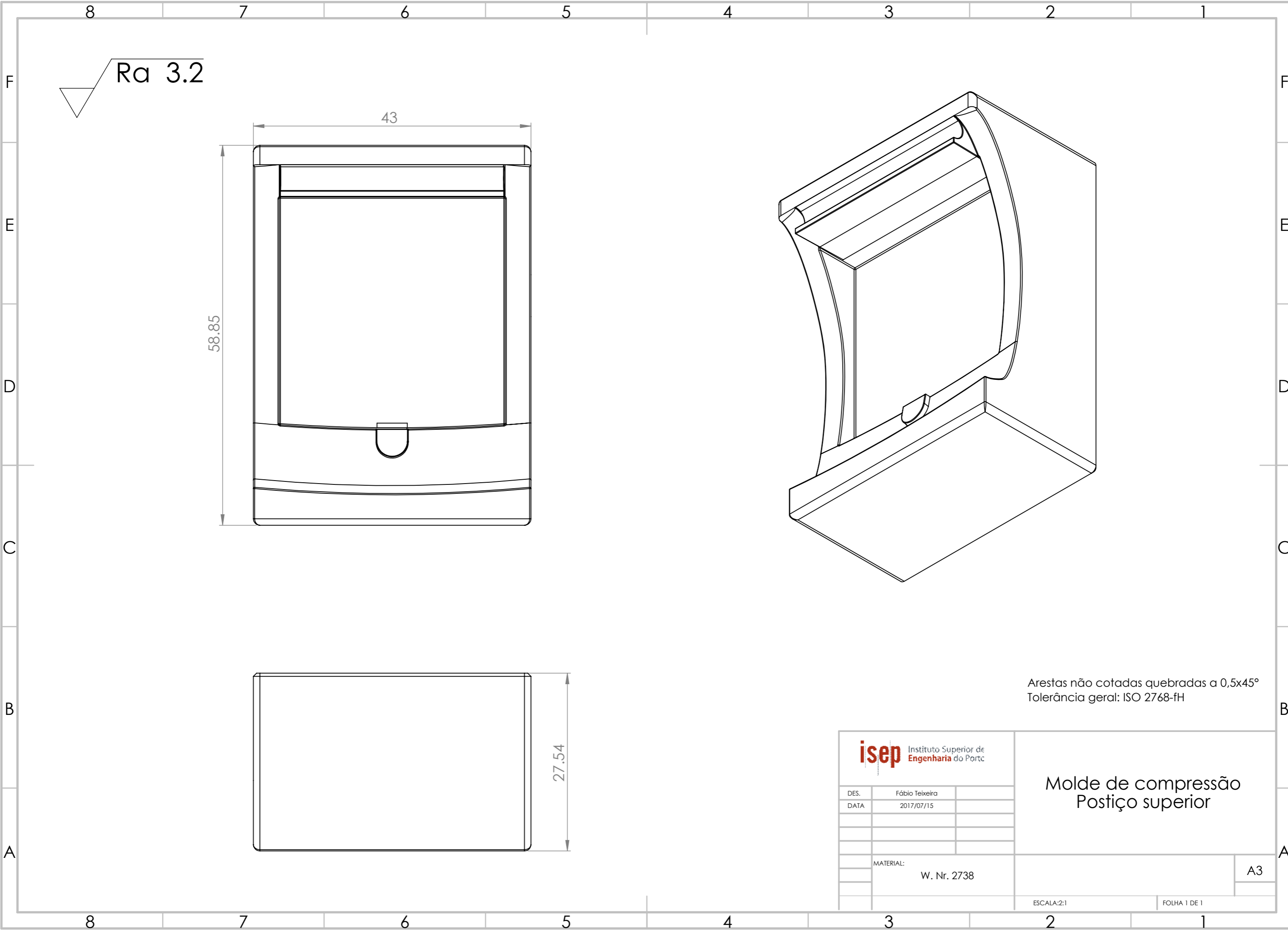
Molde de compressão
Postiço Inferior

Arestas não cotadas quebradas a 0,5x45°
Tolerância geral: ISO 2768-fH

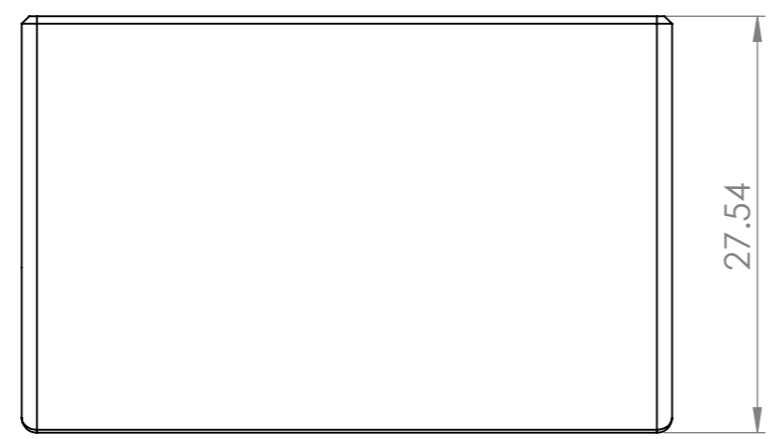
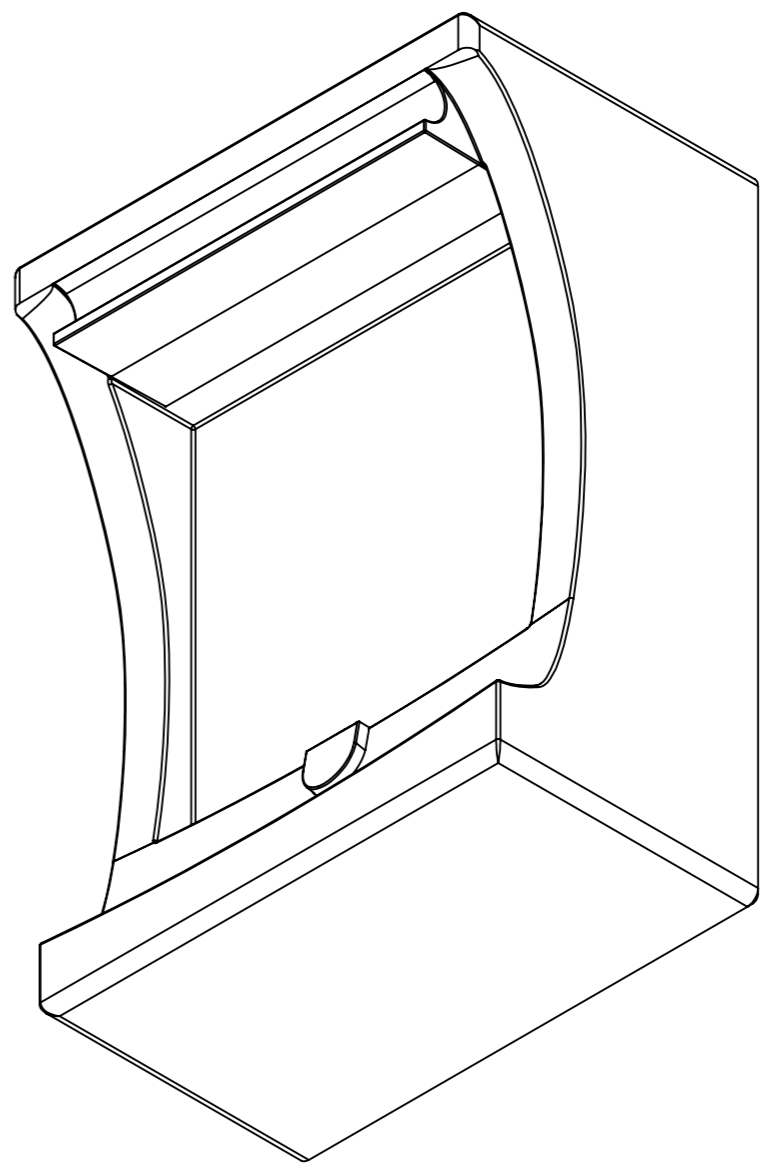
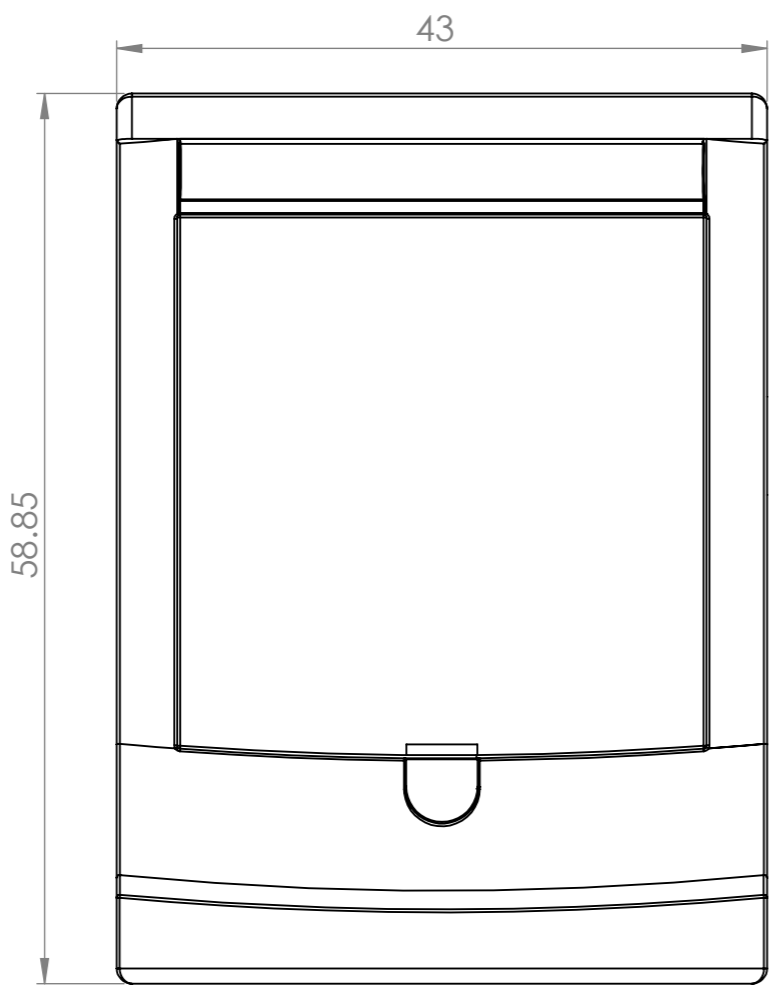
A3

ESCALA: 1.5:1

FOLHA 1 DE 1



$Ra\ 3.2$



Arestas não cotadas quebradas a 0,5x45°
Tolerância geral: ISO 2768-fH

isep Instituto Superior de Engenharia do Porto	
DES.	Fábio Teixeira
DATA	2017/07/15
MATERIAL:	W. Nr. 2738

Molde de compressão
Postiço superior

ESCALA:2:1

FOLHA 1 DE 1

A3