



**Jorge Miguel da
Silveira Carvalho**

**Conceção e maquinagem assistida por computador
de um molde de injeção**



**Jorge Miguel da
Silveira Carvalho**

**Conceção e maquinagem assistida por computador
de um molde de injeção**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob orientação científica do Doutor João Paulo Davim Tavares da Silva, Professor Associado com Agregação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e coorientação do Mestre António José da Fonseca Festas, Técnico Superior do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

O júri

Presidente

Prof. Doutor António Manuel Godinho Completo

Professor Auxiliar com Agregação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Arguente

Prof. Doutor Paulo Agostinho Silva de Lima

Professor Adjunto da Escola Superior de Design, Gestão e Tecnologias da Produção de Aveiro-Norte da Universidade de Aveiro

Orientador

Prof. Doutor João Paulo Davim Tavares da Silva

Professor Associado com Agregação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Agradecimentos

Ao Professor Doutor João Paulo Davim, pela confiança que depositou em mim, dando-me autonomia para desenvolver este trabalho.

Ao Meste António Festas pelas sugestões e conhecimentos transmitidos.

Aos Professores Doutores Mónica Oliveira, Rui Moreira e António Brito, assim com à Doutora Tatiana Zhiltsova pela disponibilidade em responder às várias dúvidas que lhes fui colocando.

Aos fabricantes que disponibilizaram os orçamentos.

À minha família e amigos pelo apoio, troca de opiniões e partilha de ideias.

Palavras-chave

Moldes de injeção; Termoplásticos; Ensaio mecânicos; CAD; CAE; CAM.

Resumo

A moldação por injeção é um dos mais importantes processos de transformação de termoplásticos. Pela dimensão que apresenta, é fundamental conhecer as propriedades mecânicas dos materiais obtidos através deste processo, de forma a controlar a qualidade da produção ou comparar e selecionar materiais.

A presente dissertação surge na necessidade do departamento possuir uma ferramenta para processar provetes normalizados através de moldação por injeção. Neste sentido, foi projetado um molde de injeção de duas placas e canais frios para obter provetes para realização de ensaios de tração, impacto e flexão. Numa primeira fase do projeto do molde, foi feito um dimensionamento dos sistemas de alimentação, escape de gases, controlo de temperatura e extração através de formulações empíricas presentes na literatura. Com os resultados obtidos foi projetado um modelo tridimensional do molde em Solidworks, permitindo de forma virtual estruturar todo o funcionamento do molde e avaliar problemas de interferência entre componentes mecânicos. Posteriormente, de modo a validar o projeto do molde utilizou-se o Moldflow e o Solidworks Simulation para realizar análises reológicas e estruturais. Por fim, para simular a maquinagem das placas do molde e gerar os programas de controlo numérico utilizou-se o Powermill. A tecnologia integrada CAD/CAE/CAM permite melhorar a qualidade do projeto e fabrico do molde, assim como apresentar uma validação do seu funcionamento.

Keywords

Injection molds; Thermoplastics; Mechanical tests; CAD; CAE; CAM.

Abstract

Injection molding is one of the most important manufacturing processes of objects from thermoplastics. Considering its dimension, it is fundamental to know the mechanical properties of the materials created through this process, in order to control the quality of production or to compare and select materials.

The present dissertation arises from the department's need to have a mould for processing standard specimens through injection moulding. Thus, a two plate cold runner mould was designed to obtain test specimens to perform tensile, impact and flexural tests. In a first step, a feeding, venting gas, heat exchange and ejector systems were designed through empirical formulations mentioned on the literature. With the obtained results, a three-dimensional mould assembly was designed in Solidworks software, enabling the virtual verification of the mould operation, as well as the evaluation of interference problems among components. In order to validate the mould design, were used Moldflow software which did the rheological analysis, and Solidworks Simulation for structural analysis. Finally, Powermill software was used to simulate the machining of the mould plates and generate numerical control programs. The CAD/CAE/CAM integrated technology allows the improvement of the quality of the mould's design and manufacture, as well as to validate its operation.

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Guia de leitura	3
2	Ensaio mecânicos e processo de moldação por injeção - Revisão bibliográfica	5
2.1	Ensaio de tração	5
2.1.1	Propriedades mecânicas determinadas no ensaio de tração	6
2.1.2	A norma de ensaios de tração para materiais poliméricos	8
2.2	Ensaio de impacto	9
2.2.1	A norma de ensaios de impacto para materiais poliméricos	10
2.3	Ensaio de flexão	12
2.4	Processo de moldação por injeção	13
2.4.1	A máquina de injetar	15
2.4.2	Condições de processamento	16
2.4.3	Termoplásticos para moldação por injeção	17
2.4.4	O molde	17
3	Projeto do molde	27
3.1	Seleção do material para a estrutura	28
3.2	Zona moldante	28
3.3	Sistema de centragem e guiamento	31
3.4	Sistema de alimentação	32
3.5	Sistema de controlo de temperatura	33
3.6	Sistema de extração	35
3.7	Sistema de escape de gases	36
3.8	Análise reológica	36
4	Maquinagem do molde	41
4.1	Placa de aperto da injeção	45
4.2	Placa da cavidade	46
4.3	Placa da bucha	48

4.4	Insertos	51
4.5	Calços	54
4.6	Placa dos extratores	55
4.7	Placa de aperto dos extratores	55
4.8	Placa de aperto da extração	57
5	Considerações finais	59
A	Cálculos analíticos para dimensionamento dos sistemas funcionais	65
A.1	Sistema de controlo de temperatura	65
A.2	Sistema de extração	67
A.3	Sistema de alimentação	68
B	Análise estrutural	69
C	Estimativa de custos de matérias-primas	71
D	Ferramentas de corte seleccionadas	73
E	Desenhos de definição	75
F	Desenho de conjunto	85

Lista de Figuras

1.1	Fluxograma da abordagem metodológica da dissertação.	2
2.1	Princípio de funcionamento de um ensaio de tração.	6
2.2	Curvas tensão-deformação ($\sigma - \varepsilon$) características dos materiais poliméricos.	8
2.3	Dimensões características para provetes de tração do tipo 1A.	9
2.4	Princípio de funcionamento da máquina de ensaio de impacto.	10
2.5	Provete para ensaio Charpy: (a) com entalhe e (b) sem entalhe.	10
2.6	Representação dos entalhes.	11
2.7	Princípio de funcionamento de um ensaio de flexão.	12
2.8	Provete para ensaio de flexão.	13
2.9	O ciclo de moldação.	14
2.10	Máquina de injeção de parafuso alternativo.	15
2.11	Estrutura de um molde de 2 placas.	18
2.12	Constituição do sistema de alimentação.	19
2.13	Secção transversal dos canais de alimentação.	20
2.14	Representação dos ataques: (a) lateral ou à junta, (b) bico de alfinete e (c) submarino.	21
2.15	Circuito de refrigeração em: (a) “U” de ligação com mangueira, (b) “U” de ligação com furação cruzada e (c) “Z” de ligação com furação cruzada.	23
3.1	Fluxograma para seleção do material para o molde de injeção.	28
3.2	Dimensão da zona moldante do provete de: (a) tração, (b) impacto com entalhe e (c) impacto sem entalhe ou flexão.	29
3.3	Vista explodida dos insertos.	30
3.4	Moldação do provete de: (a) tração, (b) tração com linha de soldadura, (c) impacto com entalhe e d) impacto sem entalhe ou flexão.	31
3.5	(a) Zona de ajuste do anel de centragem; (b) Montagem do guiamento principal; (c) Montagem da barra de transporte.	32
3.6	Configuração: (a) bucha de injeção, (b) secção transversal dos canais de alimentação e (c) ataque.	33
3.7	Representação do circuito de água: (a) cavidade e (b) bucha.	34
3.8	Sistema de extração.	35

3.9	Rasgo de escape de gases: (a) provete de tração e (b) provetes de impacto de flexão.	36
3.10	Fluxograma de procedimentos para realização de uma simulação no Moldflow.	37
3.11	Modelo geométrico para análise do provete de: (a) tração, (b) tração com linha de soldadura, (c) impacto com entalhe e d) impacto sem entalhe ou flexão. . .	38
3.12	Linha de soldadura obtida na reprodução computacional.	39
4.1	Fluxograma de procedimentos para criação de um programa CN no Powermill.	44
4.2	(a) Desenho e isostatismo; (b) Resultado da simulação da maquinagem da fase 10 da placa de aperto da injeção.	45
4.3	Desenho e isostatismo da fase 20 da placa de aperto da injeção.	46
4.4	(a) Desenho e isostatismo; (b) Resultado da simulação da maquinagem da fase 10 da placa da cavidade.	47
4.5	Desenho e isostatismo da fase 20 da placa da cavidade.	47
4.6	Desenho e isostatismo da fase 30 da placa da cavidade.	48
4.7	Desenho e isostatismo da fase 40 da placa da cavidade.	48
4.8	(a) Desenho e isostatismo; (b) Resultado da simulação da maquinagem da fase 10 da placa da bucha.	49
4.9	(a) Desenho e isostatismo; (b) Resultado da simulação da maquinagem da fase 20 da placa da bucha.	50
4.10	Desenho e isostatismo da fase 30 da placa da bucha.	50
4.11	Desenho e isostatismo da fase 40 da placa da bucha.	51
4.12	Desenho e isostatismo da fase 50 da placa da bucha.	51
4.13	Desenho e isostatismo da fase 10 dos insertos.	52
4.14	Desenho e isostatismo da fase 20 dos insertos.	52
4.15	(a) Desenho e isostatismo; (b) Resultado da simulação da maquinagem da fase 30 dos insertos “L”.	53
4.16	(a) Desenho e isostatismo; (b) Resultado da simulação da maquinagem da fase 30 do inserto “T”.	53
4.17	(a) Desenho e isostatismo; (b) Resultado da simulação da maquinagem da fase 40 do inserto “T”.	54
4.18	Desenho e isostatismo da fase 10 dos calços.	54
4.19	(a) Desenho e isostatismo; (b) Resultado da simulação da maquinagem da fase 10 da placa dos extratores.	55
4.20	(a) Desenho e isostatismo; (b) Resultado da simulação da maquinagem da fase 10 da placa de aperto dos extratores.	56
4.21	(a) Desenho e isostatismo; (b) Resultado da simulação da maquinagem da fase 20 da placa de aperto dos extratores.	56
4.22	(a) Desenho e isostatismo; (b) Resultado da simulação da maquinagem da fase 10 da placa de aperto da extração.	57
4.23	(a) Desenho e isostatismo; (b) Resultado da simulação da maquinagem da fase 20 da placa de aperto da extração.	58

4.24	Desenho e isostatismo da fase 30 da placa de aperto da extração.	58
B.1	Deflexão da placa da bucha no plano perpendicular ao plano da junta.	70

Lista de Tabelas

2.1	Profundidades típicas de rasgos para escape de gases para alguns plásticos mais comuns.	21
3.1	Especificações da máquina de injeção.	27
3.2	Condições de processamento utilizadas para avaliar os empenos das peças. . .	29
3.3	Resultados da análise de empenos.	30
3.4	Resultados da análise de enchimento.	39
3.5	Resultados da análise de arrefecimento.	40
4.1	Ferramentas e parâmetros de corte.	42
4.2	Sequência de fabrico da fase 10 da placa de aperto da injeção.	45
4.3	Sequência de fabrico da fase 20 da placa de aperto da injeção.	46
4.4	Sequência de fabrico da fase 10 da placa da cavidade.	46
4.5	Sequência de fabrico da fase 20 da placa da cavidade.	47
4.6	Sequência de fabrico da fase 30 da placa da cavidade.	47
4.7	Sequência de fabrico da fase 40 da placa da cavidade.	48
4.8	Sequência de fabrico da fase 10 da placa da bucha.	49
4.9	Sequência de fabrico da fase 20 da placa da bucha.	49
4.10	Sequência de fabrico da fase 30 da placa da bucha.	50
4.11	Sequência de fabrico da fase 40 da placa da bucha.	50
4.12	Sequência de fabrico da fase 50 da placa da bucha	51
4.13	Sequência de fabrico da fase 10 dos insertos	51
4.14	Sequência de fabrico da fase 20 dos insertos	52
4.15	Sequência de fabrico da fase 30 dos insertos “L”	52
4.16	Sequência de fabrico da fase 30 do inserto “T”.	53
4.17	Sequência de fabrico da fase 40 do inserto “T”.	54
4.18	Sequência de fabrico da fase 10 dos calços.	54
4.19	Sequência de fabrico da fase 10 da placa dos extratores.	55
4.20	Sequência de fabrico da fase 10 da placa de aperto dos extratores.	55
4.21	Sequência de fabrico da fase 20 da placa de aperto dos extratores.	56
4.22	Sequência de fabrico da fase 10 da placa de aperto da extração.	57
4.23	Sequência de fabrico da fase 20 da placa de aperto da extração.	57
4.24	Sequência de fabrico da fase 30 da placa de aperto da extração.	58

C.1 Custos associados a matérias-primas para o molde.	71
D.1 Referência das ferramentas de corte.	73

Simbologia, Nomenclatura, Siglas e Acrónimos

Ensaio mecânicos

L, h, b	-	Comprimento
F	-	Força
σ	-	Tensão
ε	-	Deformação
δ	-	Flecha
E	-	Módulo de Young
A	-	Superfície
m	-	Massa
g	-	Aceleração da gravidade
v	-	Velocidade
t	-	Tempo

Processo de moldação por injeção

t_c	-	Tempo de arrefecimento
θ	-	Temperatura termodinâmica
α_{eff}	-	Difusibilidade térmica
\dot{Q}	-	Fluxo energético
s, t	-	Comprimento
A	-	Superfície
m	-	Massa
h	-	Entalpia (Eq. 2.13)/ Coeficiente de transferência de calor por convecção (Eq. 2.15)
β	-	Coeficiente de condutividade térmica
σ	-	Constante de radiação do corpo negro
ε	-	Emissividade
\dot{m}	-	Caudal mássico
\dot{V}	-	Caudal volúmico
c_p	-	Calor específico
Re	-	Número de Reynolds

ν	-	Viscosidade cinemática
α	-	Coefficiente de expansão térmica
E	-	Módulo de Young
μ	-	Coefficiente de atrito
γ	-	Coefficiente de Poisson

Maquinagem

n	-	Velocidade de rotação da árvore
V_c	-	Velocidade de corte
v_f	-	Velocidade de avanço
P	-	Velocidade de avanço no eixo Z em op. fresagem
f_n	-	Avanço por rotação
f_z	-	Avanço por dente
z	-	Número de arestas de corte
a_p	-	Comprimento de corte
a_e	-	Largura de corte

Siglas e Acrónimos

CAD	-	<i>Computer Aided Design</i>
CAE	-	<i>Computer Aided Engineering</i>
CAM	-	<i>Computer Aided Manufacturing</i>
DNC	-	<i>Direct numeric control</i>
CN	-	Controlo numérico
CNC	-	Controlo numérico computadorizado
ISO	-	<i>International organization for standardization</i>
ASTM	-	<i>American society for testing and materials</i>
LP	-	Linha de partição
ABS	-	Acrilonitrilo-butadieno-estireno
POM	-	Poli(óxido de metileno)
PA	-	Poliamida
PC	-	Policarbonato
PE	-	Polietileno
PP	-	Polipropileno
PPO	-	Poli(óxido de fenileno)
PS	-	Poliestireno
PVC	-	Policloreto de vinil
UA	-	Universidade de Aveiro
P/V	-	Pressão/Velocidade
W. Nr.	-	<i>Werkstoffnummer</i>
3D	-	Três dimensões

Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo faz-se o enquadramento das temáticas abordadas e define-se os objetivos do trabalho. É apresentado ainda um guia de leitura, onde é descrita a estrutura do documento.

1.1 Enquadramento

Os termoplásticos são largamente utilizados numa gama variada de indústrias, como a automóvel, eletrónica, construção civil, equipamentos domésticos, embalagem e médico-hospitalar. Pode-se dizer que a sua aplicação é virtualmente ilimitada, sendo usados no fabrico de peças de geometria simples ou complexas e de dimensões reduzidas (micro injeção de componentes eletrónicos) ou grandes dimensões (para-choques de automóveis) [Rosato *et al.*, 2000].

A moldação por injeção é um dos mais importantes processos de transformação de termoplásticos [Osswald *et al.*, 2002].

Conhecer como esses materiais se comportam sob determinadas condições de esforços é fundamental, na indústria, como forma de controlar a qualidade da produção e na investigação, como comparação ou seleção de materiais [Santos *et al.*, 2015; Davim *et al.*, 2004]. A gama de ensaios mecânicos existente é vasta e a sua escolha é feita em função da propriedade mecânica que se pretende conhecer, do tipo de solicitação a que a peça ou componente vai estar sujeita e das especificações a que o produto fabricado deve obedecer [Davim *et al.*, 2004].

Os moldes para injeção de materiais termoplásticos são ferramentas complexas e criteriosamente dimensionadas, constituídas por vários componentes mecânicos que, quando montados, permitem o processamento desses materiais. O projeto e fabrico de moldes de injeção envolve conhecimentos relativos às variáveis de processamento, materiais plásticos, materiais utilizados no fabrico dos moldes e dimensionamento dos sistemas funcionais [Santos *et al.*, 2016].

O desenvolvimento e fabrico de moldes de injeção é uma área suportada pela tecnologia CAD/CAE/CAM para modelação, simulação e maquinagem. É uma indústria na vanguarda da tecnologia onde se pode encontrar, além destes recursos informáticos, uma enorme gama de tecnologias avançadas de fabrico tais como: equipamentos de maquinação de 5 eixos, alta

velocidade e equipamentos de eletroerosão.

1.2 Objetivos

Neste trabalho, pretende-se demonstrar a sequência de atividades que antecedem a produção de um molde de injeção de provetes para ensaios mecânicos em termoplásticos. Na figura 1.1 pode ser observado um esquema da metodologia utilizada na concretização dos objetivos.

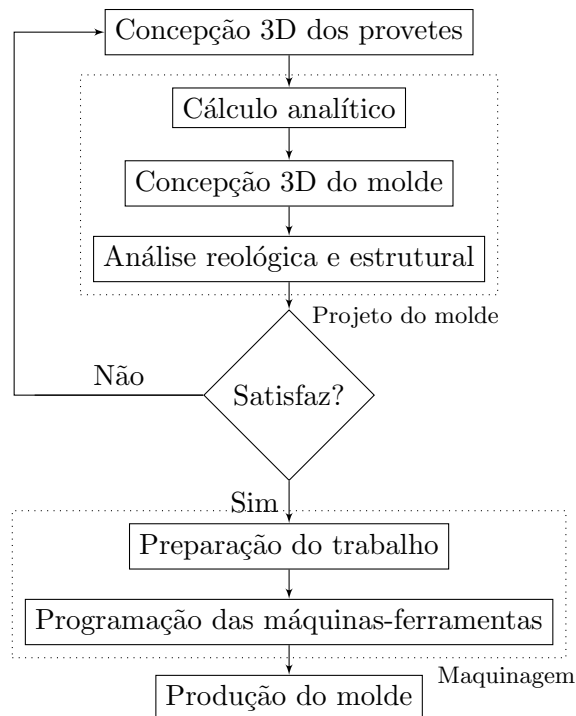


Figura 1.1: Fluxograma da abordagem metodológica da dissertação.

Na fase do projeto, desenvolve-se todo o trabalho de desenho e dimensionamento dos sistemas funcionais do molde. Recorre-se para tal a *softwares* de CAD que permitem, de uma forma virtual e em ambiente 3D, estruturar todo o funcionamento do molde. Recorre-se ainda a *softwares* CAE que permitem simular o comportamento dos plásticos no molde (*e.g.* Moldflow) e prever o comportamento do molde em várias condições de carga (*e.g.* Solidworks Simulation).

Com base nos resultados, efetuam-se alterações, caso as análises apresentem falhas ou possibilidades de melhoria, ou segue o percurso no ciclo, caso satisfaça os requisitos.

Existindo uma corroboração do projeto, o aço é submetido a um conjunto de operações, de modo a ficar com as formas do seu desenho de definição.

Os processos de alteração de forma que no contexto da indústria de moldes têm mais importância são os processos de remoção de material por arranque de aparas tais como: fresagem, torneamento, furação, *etc.*

Através dos sistemas de CAM é possível programar as trajetórias de maquinagem e simular a evolução da peça desde o bloco inicial até à peça final acabada.

Após a simulação do processo de maquinagem ter alcançado resultados satisfatórios, o programa de controlo numérico é gerado pelo pós-processamento e, em seguida, transmitido à máquina-ferramenta CNC, através do DNC, para produzir a peça em questão.

1.3 Guia de leitura

Neste item pretende-se esclarecer o leitor para a estrutura da dissertação.

No **Capítulo 1**, intitulado **Introdução**, introduz-se um conjunto de conceitos necessários para a compreensão e enquadramento das temáticas abordadas. No **Capítulo 2**, intitulado **Revisão bibliográfica - Ensaaios mecânicos e processo de moldação por injeção**, apresentam-se os ensaios, define-se a geometria dos provetes e as condições e procedimentos para a realização dos ensaios, segundo as normas ISO. A conceção de um molde, envolve a compreensão de todo o processo de injeção. Por isso, descreve-se o processo, o funcionamento da máquina injetora, condições de processamento, termoplásticos e o molde, através de livros e periódicos científicos dedicados à matéria. Dar-se-á maior destaque à apresentação do molde, nomeadamente projeto e funcionamento, referindo metodologias de dimensionamento e escolhas mais ajustadas ao projeto. Segue-se o **Capítulo 3, Projeto do molde**. Aqui faz-se o dimensionamento dos sistemas funcionais do molde baseado em regras de projeto e formulações empíricas. São ainda definidos os materiais de construção do molde e todos os acessórios normalizados e disponíveis comercialmente que o constituem. Posteriormente, o projeto do molde foi corroborado com recurso a análises de simulação numérica. O **Capítulo 4, Maquinagem** é dedicado ao fabrico do molde. Neste capítulo é feita a seleção das ferramentas, dispositivos e modo de apoio/aperto e parâmetros de corte. Calculam-se parâmetros de regulação da máquina, nomeadamente velocidade de avanço e rotação da árvore, e elabora-se a sequência de maquinagem. É ainda feita a programação CAD/CAM, referindo o fluxo de procedimentos do processo, bem como o tipo de trajetórias de maquinagem utilizadas. Por fim, no **Capítulo 5, Considerações finais**, faz-se uma apreciação geral do trabalho. Para além da **Bibliografia**, este documento inclui também alguns apêndices. O **Apêndice A** contém os **cálculos analíticos para dimensionamento dos sistemas funcionais do molde** com base nas formulações empíricas apresentadas na revisão bibliográfica. O **Apêndice B** intitula-se **Análise estrutural**, e descreve sumariamente a análise numérica realizada de forma a verificar o efeito da pressão de injeção na deflexão da placa da bucha do molde. No **Apêndice C** apresenta-se a **estimativa de custos de matérias-primas** através do pedido de cotação aos fabricantes. O **Apêndice D** contém as **ferramentas de corte usadas** para a simulação da maquinagem. O **Apêndice E**, por sua vez, apresenta os **desenhos de definição** dos componentes a maquinar e o **Apêndice F** o **desenho de conjunto** do molde.

Capítulo 2

Ensaio mecânico e processo de moldação por injeção - Revisão bibliográfica

No âmbito deste trabalho de dissertação foi projetado um molde injeção para processamento de provetes para ensaios de tração, impacto e flexão.

Nas primeiras três secções, correspondentes aos ensaios para os provetes obtidos por moldação no molde que será projetado, foi feita uma pesquisa bibliográfica para a definição das peças plásticas. Além disso, foi estruturado um texto onde se pretende apresentar os ensaios e definir as condições e procedimentos para a realização dos mesmos. Assim, este documento pode fornecer uma base para um leitor com interesse em efetuar os ensaios.

O processo de injeção depende não só do molde, como também, da combinação de mais três fatores: máquina de injeção, condições de processamento e polímero. Estes assuntos têm igual importância do ponto de vista de quem projeta moldes, assim será feita uma breve abordagem a cada um desses temas de modo a contextualizar o leitor sobre todo o processo de moldação por injeção.

2.1 Ensaio de tração

Entre os diversos tipos de ensaios existentes para avaliação das propriedades mecânicas dos materiais, o mais amplamente utilizado é o ensaio de tração. Esta aplicabilidade deve-se com o facto de ser um ensaio relativamente simples e de realização rápida, além de fornecer informações importantes e primordiais para o projeto e fabrico de peças e componentes [Garcia *et al.*, 2012]. O ensaio de tração é realizado numa máquina universal de ensaios mecânicos, e consiste na aplicação de uma carga de tração uniaxial crescente a um provete de geometria adequada, mediante o deslocamento de um travessão móvel relativamente a um travessão fixo, aos quais se encontra ligado através de um sistema de maxilas. Mede-se a variação do comprimento (ΔL) em função da carga aplicada (F), e após o tratamento adequado dos resultados obtém-se uma curva de tensão (σ) versus a deformação (ϵ) do provete. No seu

trabalho, Pinto (2012) mediu as cargas aplicadas e os correspondentes alongamentos dos provetes utilizando transdutores elétricos previamente calibrados, respetivamente designados por células de carga e extensómetros.

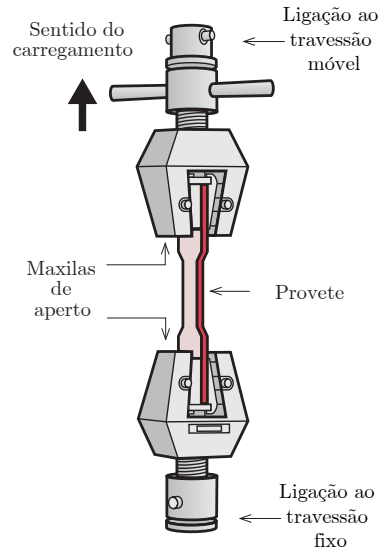


Figura 2.1: Princípio de funcionamento de um ensaio de tração (adaptado de [Lanxess, 2007]).

2.1.1 Propriedades mecânicas determinadas no ensaio de tração

O ensaio de tração permite obter muitas informações úteis para a caracterização mecânica dos materiais. Apresenta-se de seguida um conjunto de definições relativas às propriedades mecânicas determinadas num ensaio de tração, conforme constam na norma ISO 527-1 (1993). Para uma melhor compreensão das referidas definições, pode observar-se a figura 2.2, onde se encontram representadas diferentes curvas tensão-deformação ($\sigma - \varepsilon$) características dos materiais poliméricos.

Tensão (σ)

Força de tração por unidade de superfície da secção transversal inicial, suportada pelo provete em cada instante do ensaio. É expressa em megapascal (MPa) e pode ser determinada pela equação 2.1, onde F é a força, em newton (N) e A é a área da secção transversal inicial do provete, em milímetros quadrados (mm^2).

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

Deformação (ε)

Incremento de comprimento por unidade de comprimento inicial do provete. Expressa-se como uma relação adimensional, ou em percentagem (%). Pode ser determinada pelas

equações 2.2 e 2.3 , onde L_0 é o comprimento entre marcas de referência do provete antes da aplicação da força (*gauge length*) e ΔL_0 é o incremento do comprimento do provete entre as marcas de referência.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0} \quad (2.2)$$

$$\varepsilon(\%) = 100 \times \frac{\Delta L_0}{L_0} \quad (2.3)$$

Módulo de elasticidade ou módulo de *Young* (E)

Pode ser traduzido empiricamente como a rigidez do material, ou seja quanto maior for o módulo menor será a deformação plástica provocada pela tensão no material. A norma ISO 527-1 (1993) recomenda a seleção no gráfico de dois pontos, 0.05% e 0.25% da deformação, pois trata-se de uma gama de valores coincidentes com a zona elástica das curvas tensão-deformação. Deste modo, o módulo de elasticidade é obtido através da equação

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (2.4)$$

onde

σ_1 - Tensão, em MPa, correspondente ao valor de deformação $\varepsilon_1=0,05\%$

σ_2 - Tensão, em MPa, correspondente ao valor de deformação $\varepsilon_2=0,25\%$

Ponto de cedência (ε_y, σ_y)

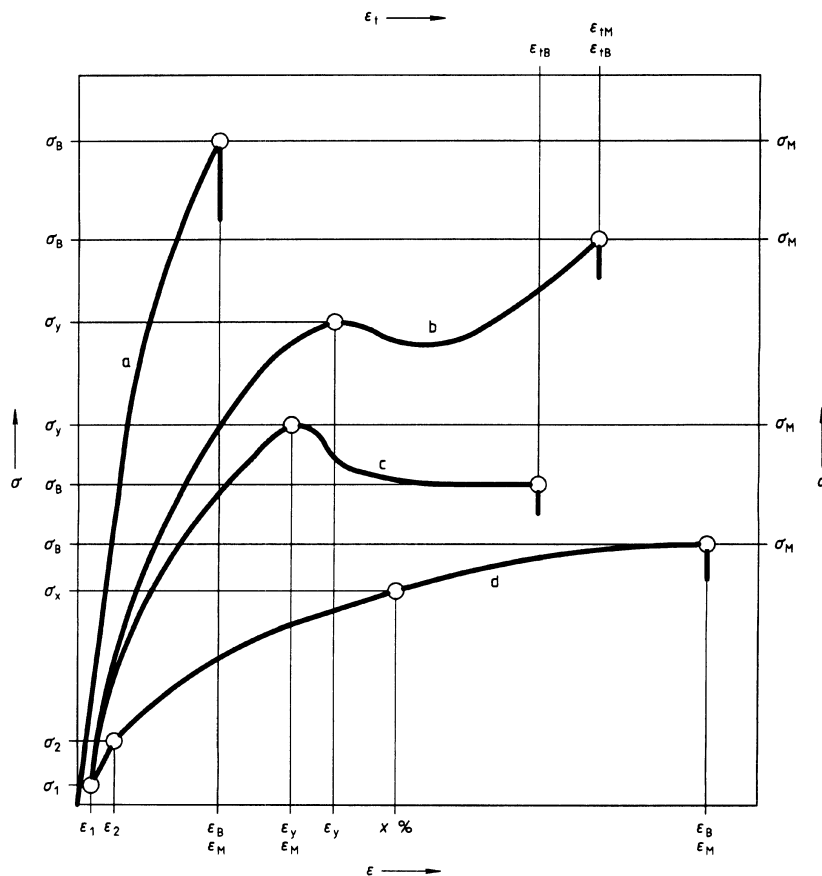
Primeiro ponto da curva tensão-deformação ($\sigma - \varepsilon$) no qual se verifica um aumento da deformação sem ocorrer aumento de tensão.

Ponto de rotura (ε_B, σ_B)

Momento em que o material sofre a fratura completa, podendo ou não coincidir com a tensão máxima.

Ponto máximo (ε_M, σ_M)

Valor máximo da curva tensão-deformação ($\sigma - \varepsilon$) registado durante o ensaio de tração, podendo ou não ocorrer a fratura do material.



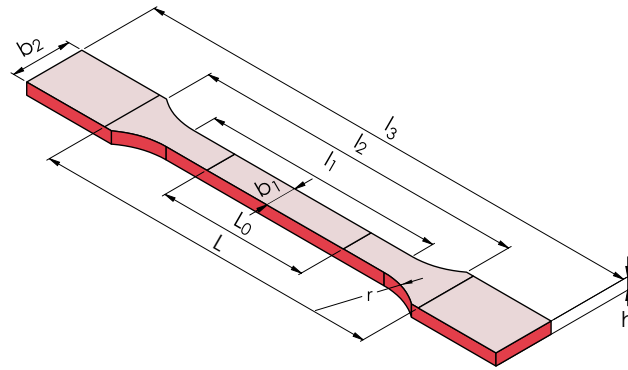
- Curva a Polímero com comportamento frágil
- Curva b e c Polímero com comportamento dúctil, com ponto de cedência
- Curva d Polímero com comportamento dúctil, sem ponto de cedência

Figura 2.2: Curvas tensão-deformação ($\sigma - \epsilon$) características dos materiais poliméricos [ISO 527-1, 1993].

2.1.2 A norma de ensaios de tração para materiais poliméricos

As condições e procedimentos de realização de um ensaio de tração em plásticos injetados encontram-se especificadas na norma ISO 527-1 (1993). Recomenda-se o ensaio de pelo menos cinco provetes para cada condição. A velocidade de aplicação da força deve ser constante, tipicamente 5 mm/min para materiais com comportamento frágil e 50 mm/min para materiais com comportamento dúctil. Para a medição do módulo de elasticidade, a velocidade de teste selecionada deve ser de 1 mm/min, para todos os tipos de comportamento [ISO 10350-1, 2007].

A geometria e dimensões dos provetes estão indicados na norma ISO 527-2 (1993). A figura 2.2 mostra as dimensões e características de um provete moldado através de injeção.



l_3	comprimento total do provete	$\geq 150^1$
l_1	comprimento do troço de seção constante de menor área transversal do provete, designado por zona calibrada	80 ± 2
r	raio de entre a zona calibrada e zona de aperto	$20 \geq r \geq 25$
l_2	distância entre zonas de aperto	$104 \geq l_2 \geq 113^2$
b_2	largura do provete na zona de aperto	20.0 ± 0.2
b_1	largura do provete na zona de calibrada	10.0 ± 0.2
h	espessura	4.0 ± 0.2
L_0	comprimento entre marcas de referência antes da aplicação da força	50.0 ± 0.5
L	distância entre as maxilas de aperto	115 ± 1

¹Em alguns materiais, o comprimento total pode precisar de ser aumentado (*e.g.* $l_3 = 200$ mm) para evitar quebras ou deslizamentos nas zonas de aperto das maxilas.

²Resulta das dimensões l_1 , r , b_1 e b_2 , mas dentro da tolerância indicada.

Figura 2.3: Dimensões características para provetes de tração do tipo 1A [ISO 527-2, 1993].

2.2 Ensaio de impacto

O comportamento dúctil-frágil dos materiais pode ser mais amplamente caracterizado por ensaios de impacto. A carga é aplicada ao provete na forma de esforços por choque (dinâmicos), e o impacto é obtido por meio da queda de um martelo ou pêndulo, de uma altura determinada [Garcia *et al.*, 2012]. Os ensaios mais conhecidos são denominados Charpy e Izod, dependendo do modo de fixação do provete na máquina (horizontal ou vertical) [ISO 179-1, 2010; ISO 180, 2000]. Na figura 2.4 é apresentada a máquina pendular e respetiva fixação do provete para um ensaio do tipo Charpy. O pêndulo é elevado a uma certa posição onde adquire uma energia inicial. Ao ser libertado encontra no seu percurso o provete, provocando-lhe a fratura. A sua trajetória continua até certa altura, que corresponde à posição final, onde o pêndulo apresenta uma energia final. Desprezando as perdas por atrito, a diferença entre a energia inicial e a final corresponde à energia absorvida pelo material no processo de fratura [Davim *et al.*, 2004]. Davim *et al.* (2004) quantifica a energia absorvida, E_c , através da equação 2.5, onde m é a massa do martelo, g é a aceleração da gravidade, h é a altura inicial e h' a altura final.

$$E_c = m \times g \times (h - h') \quad (2.5)$$

A massa do martelo, a altura inicial e a aceleração da gravidade são conhecidas. A única variável desconhecida é a altura final, que é obtida pelo ensaio.

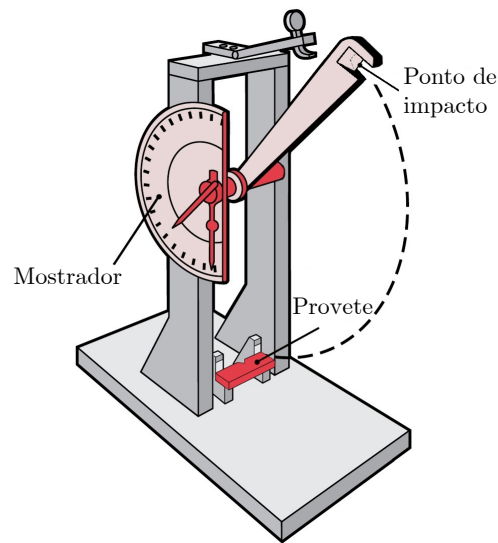


Figura 2.4: Princípio de funcionamento da máquina de ensaio de impacto (adaptado de [Lanxess, 2007]).

2.2.1 A norma de ensaios de impacto para materiais poliméricos

Neste trabalho apenas será estudado o teste de impacto do tipo Charpy. A norma que especifica as condições para a realização deste ensaio não instrumentado é a ISO 179-1 (2010). O ensaio permite a utilização de provetes com ou sem entalhe. A configuração dos provetes com entalhe está apresentada na figura 2.5(a) e sem entalhe na figura 2.5(b). Também está identificada a direção do impacto (1). Os provetes devem apresentar espessura (h) de 4 ± 0.2 mm, largura (b) de 10 ± 0.2 mm e comprimento (l) de 80 ± 2 mm. O provete da figura 2.5(a) deve possuir um entalhe em “V” centrado no comprimento, formando um ângulo de 45° e profundidade ($b - b_N$) de 2 mm.

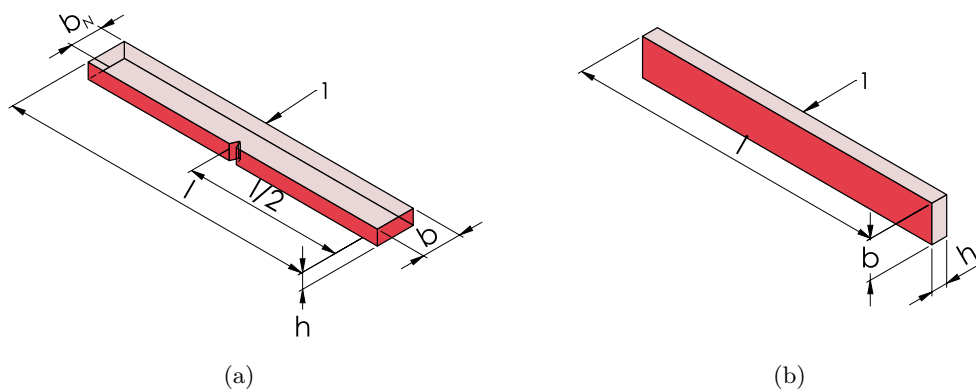


Figura 2.5: Provete para ensaio Charpy: (a) com entalhe e (b) sem entalhe [ISO 179-1, 2010].

No que diz respeito à geometria do entalhe, a norma ISO 179-1 (2010) prevê a possibilidade

de três tipos diferentes, em que a diferença reside no raio na extremidade do entalhe (r_N), conforme se pode observar na figura 2.6.

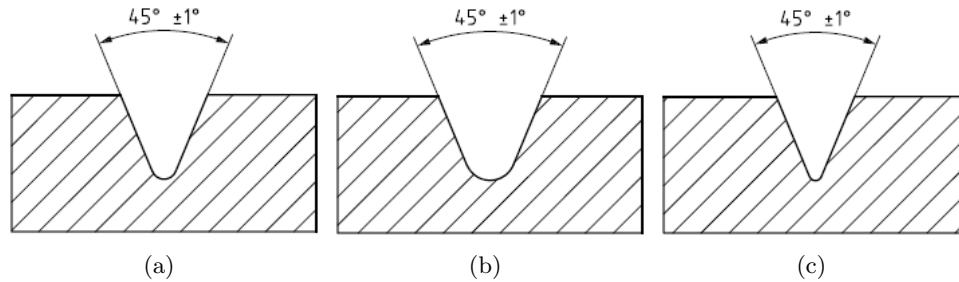


Figura 2.6: Representação dos entalhes: (a) Tipo A com $r_N = (0.25 \pm 0.05)$ mm , (b) Tipo B com $r_N = (1.00 \pm 0.05)$ mm e (c) Tipo C com $r_N = (0.10 \pm 0.05)$ mm [ISO 179-1, 2010].

O resultado do teste não instrumentado é simplesmente a resistência ao impacto do provete, a_c , expressa em quilojoule por metro quadrado. É calculada através equação 2.6, onde E_c é a energia absorvida no impacto e h é espessura do provete. Em provetes com entalhe, w é a largura do provete até ao fundo do entalhe (b_N), para provetes sem entalhe, w é simplesmente a largura do provete (b).

$$a_c = \frac{E_c}{h \cdot w} \times 10^3 \quad (2.6)$$

Esta limitação é o principal incentivo para se instrumentar as máquinas Charpy. O ensaio Charpy instrumentado representa uma ferramenta de grande potencial destinada à caracterização mecânica dos materiais pela possibilidade de fornecer um conjunto de informação mais vasto do que o obtido pelo ensaio Charpy convencional [Davim *et al.*, 2004].

A norma ISO 179-2 (2010) define critérios para instrumentação, para calibração do sistema de medida e classificação da curva quanto ao comportamento mecânico dos materiais ensaiados.

A forma de instrumentação mais comum é a aplicação de extensômetros elétricos (*strain gages*) ou sensores piezoelétricos ao martelo pendular para a medição de força durante o impacto. A instrumentação adicional, aplicada à máquina de ensaio Charpy, permite a monitorização da resposta força-tempo da deformação e fratura do provete [ISO 179-2, 2010].

O deslocamento do ponto de impacto com o tempo é obtido pela dupla integração da curva força-tempo, de acordo com o seguinte procedimento

$$s(t) = v_0 t - \frac{1}{m} \int_0^t \int_0^{t_1} F(t) dt dt_1 \quad , \quad (2.7)$$

onde $s(t)$ é a deflexão, em metros, do provete no tempo t após o impacto;

t é o tempo após o impacto, em segundos, no qual a deflexão é calculada;

v_0 é a velocidade do martelo no momento do impacto, em metros por segundo;

m é a massa do pêndulo, em quilogramas;

$F(t)$ é a força, em newton, medida no tempo t após o impacto.

O conhecimento da variação destas grandezas permite caracterizar o tipo de fratura e distinguir situações de baixa e alta deformação plástica.

A energia global absorvida no processo de fratura (E_c), em joule, é obtida determinando a área sob a curva força-deslocamento, ou seja, integrando de acordo com a equação

$$E_c = \int_0^{s_B} F(s) ds , \quad (2.8)$$

onde s_B representa o ponto onde acontece a quebra, s a deflexão, em metros e F a força, em newton.

Por sua vez, a resistência ao impacto é calculada através equação 2.6. Este valor deve ser muito próximo do valor obtido através do ensaio não instrumentado. Assim, comprova-se a eficácia e a qualidade da instrumentação implementada.

2.3 Ensaio de flexão

O ensaio de flexão surgiu com o objetivo de ser utilizado essencialmente em materiais frágeis para determinar parâmetros como a tensão, flecha de rotura e módulo de elasticidade à flexão (E). O ensaio é descrito da literatura técnica (*e.g.* [Davim *et al.*, 2004]) e consiste na aplicação de uma força F no centro de um provete específico, apoiado em dois pontos. A figura 2.8 ilustra em esquema o ensaio de flexão.

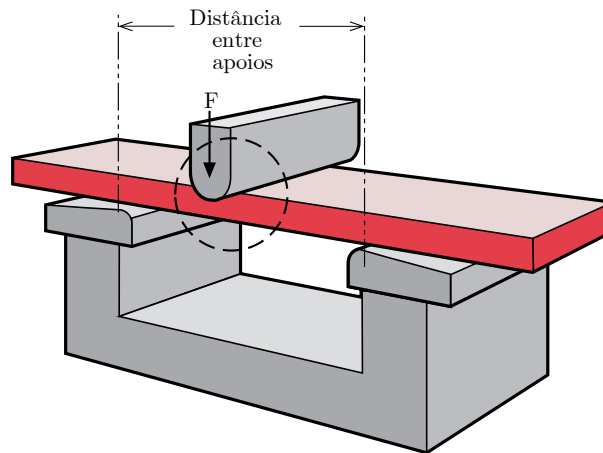


Figura 2.7: Princípio de funcionamento de um ensaio de flexão (adaptado de [Lanxess, 2007]).

O valor da carga aplicada versus o deslocamento do ponto central, ou flecha (δ), consiste na resposta do ensaio. A partir do conhecimento destas grandezas é possível traçar um curva tensão - deformação em que a tensão é dada pela expressão:

$$\sigma = \frac{3 F L}{2 b h^2} \quad (2.9)$$

onde F é a força aplicada, medida em newton, L , a distância entre apoios, em mm e b e h as dimensões da secção do provete, largura e espessura respetivamente [ISO 178, 2001]. Outra propriedade possível de obter no ensaio é o módulo de elasticidade à flexão (E) através da seguinte expressão:

$$E = \frac{F L^3}{4 \delta b h^3} \quad (2.10)$$

em que δ é a flecha medida para para a força (F) aplicada [Davim *et al.*, 2004]. A norma ISO 178 (2001), aponta outra forma para este cálculo. Seleccionam-se dois pontos do gráfico tensão-deformação, coincidentes com valores de deformação de 0.05% e 0.25%, e o valor é obtido através da inclinação da reta secante.

Os materiais dúcteis, quando sujeitos a este teste, podem sofrer grandes deformações, ocorrendo a dobragem do provete, não fornecendo assim resultados quantitativos qualificados para o ensaio de flexão. Nesses casos esse ensaio tem apenas carácter qualitativo sobre a ductilidade dos materiais, e é chamado de ensaio de dobragem [Garcia *et al.*, 2012].

A norma ISO 178 (2001) especifica a geometria e dimensões dos provetes. Estes são de secção retangular com comprimento (l) de 80 ± 2 mm, largura (b) de 10 ± 0.2 mm e espessura (h) de 4 ± 0.2 mm.

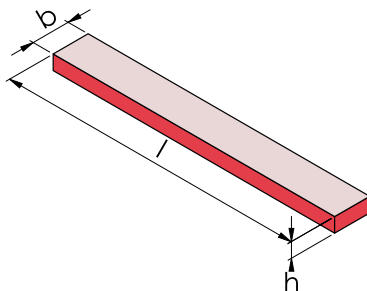


Figura 2.8: Provette para ensaio de flexão.

2.4 Processo de moldação por injeção

A moldação por injeção pode ser definida como o processo a partir do qual um material polimérico, originalmente no estado sólido e em formato granular, é aquecido a fim de amolecer (ou plasticizar) e forçado, sob pressão, a entrar para um molde. No molde, o material fundido preenche a cavidade, que replica a geometria final da peça a processar, arrefece e recupera a sua rigidez. O processo termina com a abertura do molde e extração da moldação, por meio de pinos extratores. Esta sequência de operações foi descrita por Brito *et al.* (2003), e é chamada de ciclo de moldação.

Na figura 2.9 pode visualizar-se o carácter cíclico do processo de injeção e as diversas fases que o compõem. As fases deste ciclo são explicitadas de seguida.

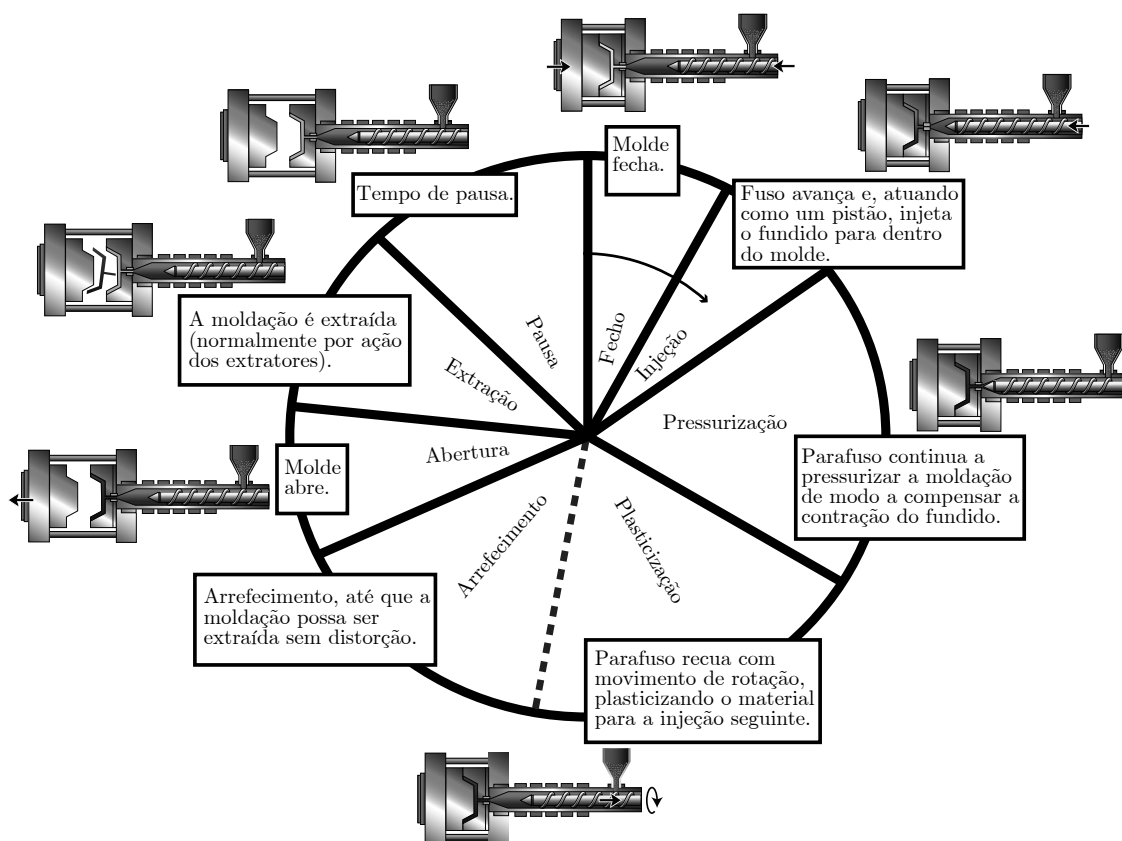


Figura 2.9: O ciclo de moldação [Brito *et al.*, 2003].

Fecho do molde: Esta fase corresponde ao início do ciclo e a sua duração é curta. A única função que exerce é o deslocamento da placa móvel até à placa fixa.

Capela (2010) indica que o fecho do molde é feito em duas fases, uma com velocidade de fecho rápida (fora das guias do molde) e outra, lenta (no contacto das guias com os casquilhos). Esta desaceleração permite um encosto suave das duas partes do molde para evitar danificar as superfícies moldantes. Esta fase termina quando a unidade de fecho da injetora aplica uma força para manter o molde fechado.

Injeção: A fase de injeção é garantida pelo avanço linear do fuso, funcionando como um pistão, força o material fundido (previamente depositado à sua frente) a entrar no molde. No interior do molde, o material flui pelos canais de alimentação até chegar às cavidades, onde toma a forma dos objetos a produzir [Brito *et al.*, 2003].

Esta será a segunda fase do ciclo de moldação quando a máquina está em ciclo de trabalho, mas no início de operação da máquina é necessário efetuar em primeiro lugar a plasticização do material.

Pressurização: Nesta fase é aplicada a pressão de compactação que corresponde a valores entre 50 e 70% da pressão de injeção [Hassan *et al.*, 2010]. Moldflow (2018), indica que são comuns pressões de compactação entre 20 a 100 % da pressão de injeção. No entanto, a pressurização não deve ser excessiva pois pode induzir tensões residuais às peças [Fischer, 2003]. Nesta fase existe um fluxo adicional de material com o objetivo de compensar a

contração da peça plástica e evitar defeitos como as faltas de enchimento e chupados [Rosato *et al.*, 2000].

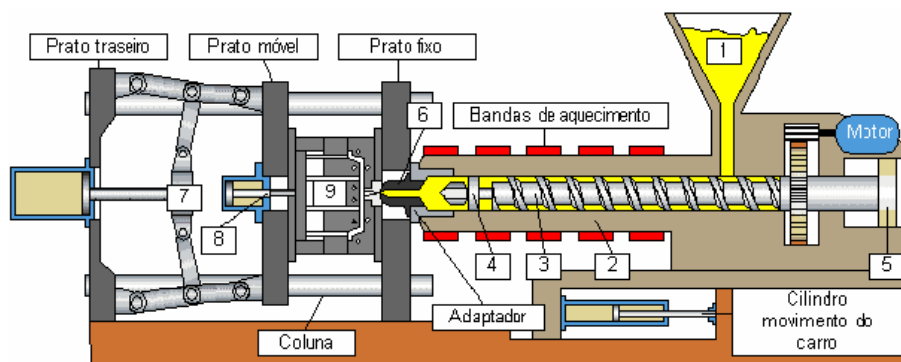
Arrefecimento: Durante a fase de refrigeração, o fuso recua num movimento de rotação plasticizando o material vindo da tremonha e deslocando-o para a sua frente. A moldação continua a arrefecer no molde através da circulação forçada de um fluido refrigerante, normalmente água, pelas placas moldantes [Brito *et al.*, 2003]. O tempo de arrefecimento depende principalmente da eficiência do sistema de refrigeração, da geometria e espessura da peça [Li-ang *et al.*, 1996]. Este tempo é definido pelo tempo que a peça demora a atingir a temperatura ótima de extração.

Abertura e extração: Esta fase compreende a abertura do molde e o avanço dos extratores para retirar as peças que normalmente ficam em contacto com a placa da bucha quando o molde se abre [Pontes *et al.*, 2005]. O produto final normalmente cai por gravidade ou é retirado por um robot [Brito *et al.*, 2003].

Tempo de pausa: É o período de tempo que decorre entre o fim da extração e o início do novo ciclo. É altamente desejável que seja nulo, o que acontece quando o processo é automático. No entanto, este valor altera-se quando a remoção da peça é feita de modo manual ou quando o molde necessita de algum tipo de operação adicional antes do início do novo ciclo [Brito *et al.*, 2003].

2.4.1 A máquina de injetar

Na figura 2.10, pode-se observar a constituição de uma máquina de injeção.



Legenda: 1 - Tremonha; 2 - Cilindro de plasticização; 3 - Fuso; 4 - Válvula anti-retorno; 5 - Cilindro de injeção; 6 - Bico de injeção; 7 - Sistema de fecho; 8 - Sistema de extração; 9 - Molde.

Figura 2.10: Máquina de injeção de parafuso alternativo [cit. por Oliveira, 2018].

É constituída por quatro unidades principais: unidade de potência, unidade de injeção, unidade de fecho e unidade de comando. [Brito *et al.*, 2003]

A **unidade de potência** baseia-se num sistema hidráulico, cuja bomba é acionada por um motor elétrico, que fornece a energia adequada aos diversos atuadores da máquina. Denominam-se por atuadores todos os motores e cilindros hidráulicos que proporcionam o movimento dos vários componentes da máquina. [Brito *et al.*, 2003; Harada, 2012]

A **unidade de injeção** tem o intuito de plasticizar e homogeneizar os materiais a moldar, desenvolver a pressão suficiente para assegurar o enchimento da zona moldante a velocidade controlada e pressurizar a moldação de modo a corrigir a contração do material. Na maioria dos casos esta unidade é baseada num parafuso sem-fim (fuso) que garante os processos de plasticização e homogeneização.

Brito *et al.* (2003) descreve três zonas funcionais do fuso: a zona de alimentação, onde o material plástico é admitido e inicia o processo de aquecimento, passando de partículas sólidas para uma massa fundida; a zona de compressão, onde se dá a plasticização do material através da compressão do material, devido à redução da secção livre em conjunto com o aumento temperatura do cilindro devido às bandas de aquecimento; e a zona de medição, onde deverá ser garantida a homogeneização final do material fundido. O fuso tem um movimento de rotação, para misturar (homogeneizar) e transportar o material dentro do cilindro e um movimento axial para introduzir o material no molde. A válvula de não retorno está localizada na extremidade do fuso e permite o fluxo do material durante a fase de plasticização entre a zona de medição do fuso e a zona do bico de injeção e impede o retorno do material para as espigas do fuso durante a fase de injeção. O bico de injeção é um componente que estabelece o canal de ligação do material entre o fuso e o molde. As suas dimensões devem ser adequadas ao diâmetro e raio de curvatura da bucha de injeção do molde. Por isso, é um dispositivo intermutável. [Brito *et al.*, 2003; Fernandes *et al.*, 2013]

A **unidade de fecho** permite a fixação e a movimentação do molde, devendo ser capaz de o manter fechado durante as fases de injeção e de compactação. É constituída pelos pratos fixos e pratos móveis: o prato fixo, encontra-se junto ao fuso, onde é fixa a parte de injeção do molde; o prato móvel, onde é fixa a parte da extração do molde. Esta unidade também integra os dispositivos necessários à extração das moldações [Brito *et al.*, 2003].

A **unidade de comando** estabelece a interface entre o operador e a máquina, em tempo real. É composta pelos dispositivos necessários para assegurar a monitorização e controlo das diversas variáveis do processo [Brito *et al.*, 2003].

Para além da máquina, o processo de moldação por injeção implica a existência de um molde que define a geometria do produto final. Trata-se de uma ferramenta constituída por, pelo menos, duas partes que são mantidas fechadas durante os períodos de injeção e subsequente arrefecimento, abrindo depois para se fazer a extração da respetiva moldação. Este será o alvo principal desta dissertação, por isso será feito um maior enquadramento teórico relativamente a este tema.

2.4.2 Condições de processamento

O processo de moldação por injeção envolve um grande número de variáveis operatórias. Saber controlar estas variáveis constitui um dos passos fundamentais no sentido de garantir a produção de peças de qualidade [Capela, 2010].

As variáveis operatórias são aquelas sobre as quais o operador pode atuar diretamente, ajustando os sistemas de controlo da máquina injeção ou dispositivos auxiliares. Como exemplo, pode-se considerar a temperatura do molde, perfil de temperaturas no cilindro, veloci-

dades de injeção, pressão de injeção e de compactação, tempo de arrefecimento, *etc* [Brito *et al.*, 2003].

2.4.3 Termoplásticos para moldação por injeção

Os termoplásticos são materiais leves, resistentes, versáteis, duráveis e de processamento relativamente fácil e rápido. São uma presença constante no nosso dia-a-dia, o que os tornam muito importantes nos grandes mercados consumidores. Para mercados de embalagens, construção civil, automóvel e material elétrico e eletrônico, os termoplásticos vieram dinamizar e aumentar níveis de produção [Capela, 2010].

Uma forma de classificar os materiais termoplásticos é pela sua estrutura, como sendo amorfos ou cristalinos. Nos amorfos, as cadeias moleculares estão presentes aleatoriamente sem qualquer tipo de organização estruturada. Os semicristalinos, apresentam regiões amorfas onde não existe nenhuma organização estrutural e regiões onde há uma ordenação das cadeias poliméricas de modo a formarem estruturas regulares denominadas por cristais [Capela, 2010].

Os termoplásticos podem, também, ser divididos em dois grandes grupos: termoplásticos de grande consumo e termoplásticos de utilização em engenharia. Os termoplásticos de grande consumo representam aproximadamente 90% da produção mundial. É o caso do PE, PP, PS, devido ao seu custo relativamente baixo. As propriedades mecânicas destes materiais podem ser otimizadas (por exemplo, com adição de cargas ou fibras), tornando-os mais competitivos com outros materiais plásticos. Os termoplásticos de utilização em engenharia, correspondem a cerca de 10 % do consumo e incluem um conjunto alargado de materiais com bom desempenho mecânico, térmico e excelente aspeto superficial. A utilização destes materiais constitui uma boa alternativa à utilização de materiais metálicos, sendo os mais importantes desta categoria o ABS, PC, PMMA(acrílico), PA, *etc* [Brito *et al.*, 2003; Capela, 2010].

2.4.4 O molde

Uma vez que o âmbito deste estudo é precisamente o projeto de um molde, será feita uma explicação mais profunda acerca deste tema, nomeadamente ao nível dos sistemas funcionais que integram um molde. Osswald *et al.* (2002), descreve um molde de injeção como um conjunto de sistemas funcionais que realizam adequadamente as seguintes funções: permitir que um espaço em que a peça vai ser materializada, definido pela cavidade e pela bucha (zona moldante), seja preenchido com plástico fundido; atuar como permutador de calor, de modo a facilitar o arrefecimento do fundido; promover a extração das peças. Além disso, o molde deve ser estruturalmente resistente para suportar as pressões de injeção e forças de fecho, capaz de produzir peças de qualidade, num tempo de ciclo o mais curto possível e simultaneamente assegurar a reprodutibilidade dimensional das mesmas, de ciclo para ciclo.

A estrutura de um molde é um conjunto de placas e calços, cujo número depende do tipo de molde. Embora não exista uma montagem de molde padrão, a montagem mostrada na figura 2.11 fornece uma representação de uma construção comum. Para Osswald *et al.*

(2002), um molde de duas placas, é basicamente constituído por duas partes: a fixa (ou lado da injeção) e a móvel (ou lado da extração). A parte fixa do molde é constituída pela placa de aperto da injeção (1) e pela placa da cavidade (2). A parte móvel é constituída pela placa da bucha (3), placa de reforço da bucha (4), calços (5), placa dos extratores (6), placa de aperto dos extratores (7) e placa de aperto da extração (8).

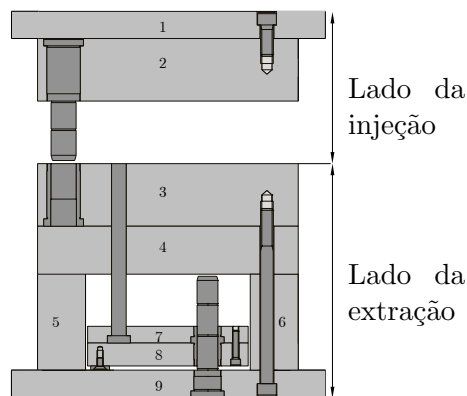


Figura 2.11: Estrutura de um molde de 2 placas (adaptado de [Polimold, 2018]).

Nesta perspetiva, um molde é uma estrutura onde são montados e maquinados os sistemas funcionais. De acordo com Brito *et al.* (2003), os sistemas funcionais que integram o molde são:

- i) A **zona moldante** é o espaço definido pela conjugação da cavidade e da bucha, responsável pela forma das peças a produzir;
- ii) O **sistema de centragem e guiamento** permite a montagem do molde na máquina e o correto ajuste entre as diferentes partes do molde;
- iii) O **sistema de alimentação** permite a passagem do polímero fundido desde o bico da máquina de injeção até cada zona moldante;
- iv) O **sistema de escape de gases** permite a extração do ar presente nas zonas moldantes, possibilitando o seu total enchimento com o polímero fundido;
- v) O **sistema de controlo de temperatura** permite controlar a temperatura do molde e arrefecer as placas do molde, através da passagem de um fluido no seu interior e assim acelerar a solidificação das peças moldadas;
- vi) O **sistema de extração** permite a remoção da peça plástica da bucha.

Cada um destes sistemas funcionais serão abordados em detalhe nas secções seguintes.

Sistema de centragem e guiamento

O primeiro aspeto a considerar no início do processo de moldação por injeção é o de encontrar a forma mais correta de fixar e centrar com rapidez e precisão o molde na unidade de fecho da máquina de injeção. O acoplamento das duas metades do molde aos pratos da máquina é efetuado com sistemas de aperto como por exemplo, grampos ou garras hidráulicas. De forma a garantir que o molde esteja centrado com o bico de injeção da máquina recorre-se aos anéis de centragem. O anel de centragem é fixado à placa de aperto de injeção e a centragem do molde é promovida pelo ajustamento do mesmo no furo do prato da máquina de injeção [Brito *et al.*, 2003].

Durante o ciclo de moldação os pratos abrem e fecham permitindo assim fazer remoção das peças do molde. Para garantir esta funcionalidade, existe a necessidade de se recorrer a um sistema de guiamento que permita um correto e rigoroso alinhamento das metades do molde, assim como um fecho preciso e ajustado [Menges *et al.*, 2001]. O sistema de guiamento pode ser dividido em dois grupos, o guiamento principal que tem como função guiar as duas metades do molde no seu fecho e o guiamento das placas de extração que permite o ajuste dos elementos móveis da extração. Este sistema é constituído essencialmente pelas guias e pelos casquilhos [Brito *et al.*, 2003].

Sistema de alimentação

O sistema de alimentação é constituído por uma série de canais, geralmente maquinados numa ou mais placas do molde, pelo qual o fundido é transportado desde o bico de injeção até cada zona moldante. Conforme descrito na literatura, a figura 2.12 mostra as diversas partes constituintes de um sistema de alimentação típico [Harada, 2012;Menges *et al.*, 2001].

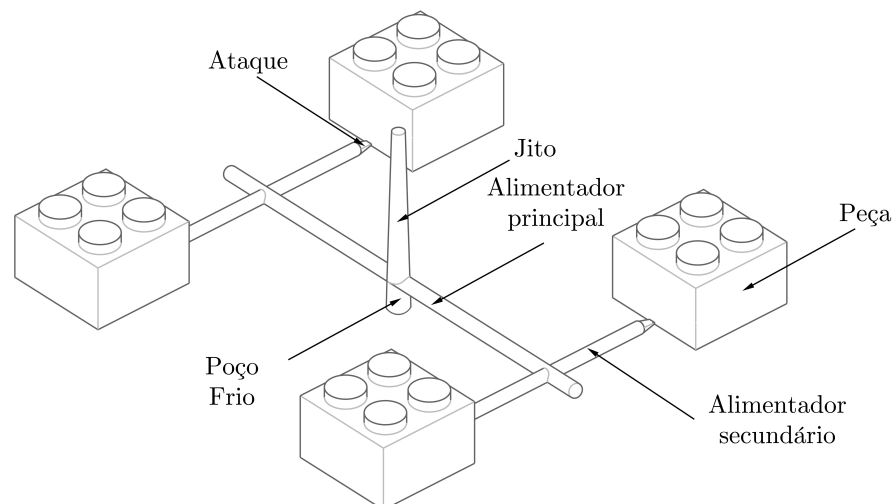


Figura 2.12: Constituição do sistema de alimentação.

O sistema de alimentação inicia-se pelo jito, sendo este responsável pela ligação entre o

bico da injetora e o canal principal. Para Rosato (2000), o jito apresenta morfologia tronco-cônica divergente, com um ângulo de abertura ($> 1^\circ$ e $< 4^\circ$). Esta conicidade é necessária para facilitar a sua extração. Além disso, o diâmetro inicial do jito deverá ser maior 1 mm que o diâmetro do bico da injetora.

Os canais de alimentação ligam o jito aos ataques das impressões. Estes canais podem apresentar variadas geometrias, conforme ilustrado na figura 2.13 [Rosato *et al.*, 2000]. O canal circular é o mais eficiente, a única desvantagem é a necessidade da maquinagem em ambos os lados do molde. De acordo com Rosato (2000), o canal trapezoidal modificado é a melhor aproximação ao canal circular e tem a vantagem de ser maquinado em apenas um lado do molde.

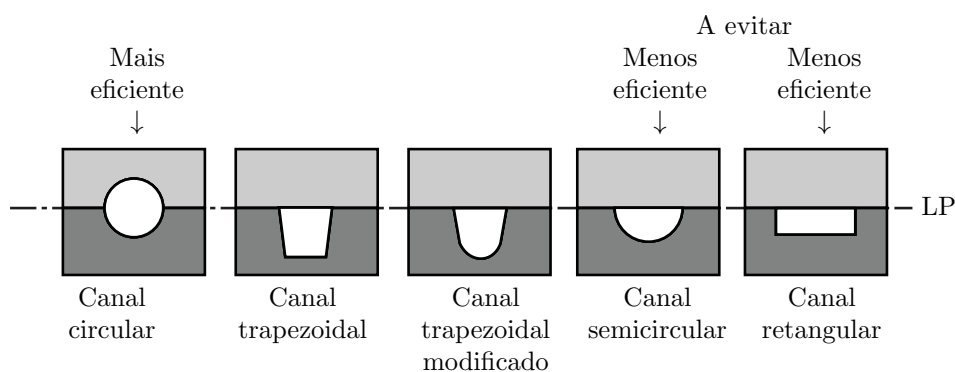


Figura 2.13: Secção transversal dos canais de alimentação [Shoemaker, 2006].

Os canais devem ter sempre o menor comprimento possível e proporcionar uma alimentação equilibrada. Em moldes com mais que uma cavidade destinados a produção de peças distintas durante o mesmo ciclo de injeção, o tempo de enchimento de cada cavidade é diferente, originando problemas de compactação. Este problema pode ser resolvido através da variação do diâmetro do alimentador, introduzindo diferenças intencionais de resistência ao fluxo. Nesta situação, Rosato (2000) indica que devem ser usados programas para validar o enchimento (*e.g.* Mouldflow, Moldex3D). No caso de moldações com impressões iguais, uma forma de proporcionar o enchimento simultâneo é fazer com que o fluido percorra sempre a mesma distância desde o jito até cada uma das impressões.

Os canais podem ser de dois tipos diferentes, frios ou quentes. Os canais frios são extraídos do molde juntamente com a peça e posteriormente cortados, ou no caso de ataques de desgitagem automática, separados da peça no acionamento do sistema de extração [Brito *et al.*, 2003]. Este sistema implica o desperdício do material dos canais de alimentação.

Os canais quentes mantêm o polímero acima da sua temperatura de fusão, assim o material permanece no sistema após a remoção da peça e é injetado na cavidade no ciclo seguinte [Osswald *et al.*, 2002].

No sistema de alimentação têm bastante interesse o tipo e a localização dos ataques, que são as entradas do material fundido na zona moldante. A posição de ataque ótima ajuda a reduzir o tempo de enchimento, obter uma distribuição equilibrada da temperatura na

peça e criar um padrão de enchimento equilibrado, permitindo que as extremidades do molde encham ao mesmo tempo [Hassan *et al.*, 2010].

A geometria do ataque pode ter diferentes formas e dimensões. Na figura 2.14 mostram-se alguns tipos de ataques mais comuns.

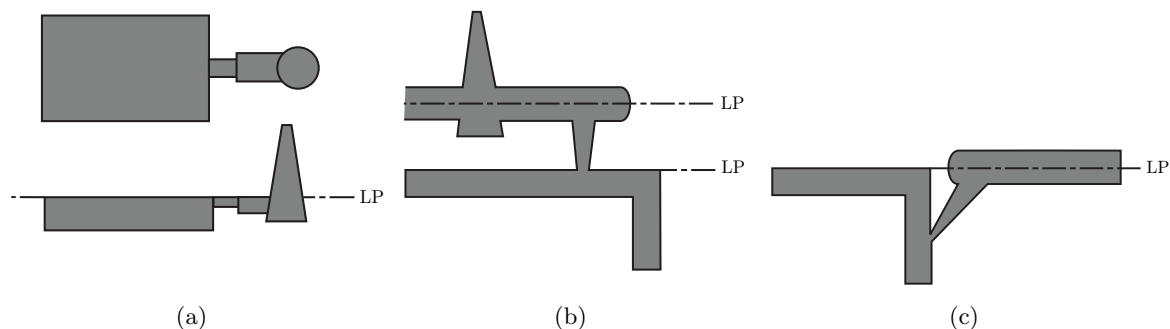


Figura 2.14: Representação dos ataques: (a) lateral ou à junta, (b) bico de alfinete e (c) submarino [Shoemaker, 2006].

O ataque lateral apresenta secção rectangular, o que dá origem a maior facilidade de maquinagem, logo, maior rigor dimensional e menor custo [Brito *et al.*, 2003]. Tem a desvantagem de deixar uma marca muito visível na peça. O ataque bico de alfinete é característico de moldes de três placas, em que o molde tem duas aberturas obrigatórias, uma à linha de junta da peça e outra em linha com os canais de alimentação. Este ataque permite a desgitação automática, sendo em primeiro lugar feita a abertura do molde em linha com os canais de alimentação de forma a separar o sistema de alimentação da peça. Posteriormente é feita a abertura do molde em linha com a junta da peça para se poder fazer a sua extração [Menges *et al.*, 2001]. O ataque submarino é uma variante do ataque lateral e é usado em desgitação automática, sem necessidade de recuso a um molde de três placas [Osswald *et al.*, 2002].

Sistema de escape de gases

O sistema de escape de gases permite a saída do ar presente nas zonas moldantes quando o material plástico é injetado na cavidade. Na maioria dos casos, o ar pode escapar pelo plano de partição do molde. Contudo, devido à elevada precisão de ajustamento entre as duas, ou mais, partes do molde, o escape de gases por este plano não é eficiente. Assim, devem ser maquinados pequenos rasgos, estendendo-se desde a cavidade até o exterior do molde, para facilitar a sua saída [Harada, 2012]. As saídas dos gases devem ser preferencialmente na direção de fluxo do material plástico, em áreas onde termina o enchimento e zonas onde se verifica a ligação de duas ou mais frentes de fluxo de plástico. A sua profundidade deve permitir a saída do ar mas ser suficientemente pequena para que o fundido não possa sair e, dessa forma, criar rebarba. Na tabela 2.1 apresentam-se as profundidades típicas para alguns dos plásticos mais comuns.

Tabela 2.1: Profundidades típicas de rasgos para escape de gases para alguns plásticos mais comuns [Brito *et al.*, 2003].

Material	ABS	POM	PMMA	PA	PC	PE	PP	PPO	PS	PVC
Profundidade	0,051	0,013	0,039	0,013	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025
[mm] ¹	0,076	0,038	0,076	0,025	0,076	0,051	0,051	0,051	0,076	0,076

¹Mínima e máxima

Contudo, em alguns casos, a geometria da peça cria dificuldades na implementação de espapes, assim é necessário encontrar soluções alternativas em zonas onde não é possível aplicar estes rasgos. As soluções para o escape podem ser através extratores. Estes componentes são utilizados no sistema mecânico de extração das peças plásticas, mas também podem ser utilizados para o escoamento de gases, devido a folga existente entre o extrator e o furo.

Sistema de controlo de temperatura

O processo de moldação por injeção consiste em forçar um material previamente aquecido (fundido) a entrar, sob pressão, num molde. Após a fase de injeção e pressurização, a moldação é arrefecida até uma temperatura que permita que ganhe a rigidez suficiente para que possa ser extraída. Tipicamente, o tempo de refrigeração é cerca de 50%, ou mais, da duração total do ciclo de injeção [Brito *et al.*, 2003]. Dadas as suas implicações na produtividade do processo, assim como na qualidade do produto, é muito importante controlar o tempo de arrefecimento. Sendo um fator crítico, Liang *et al.* (1996) desenvolveu uma equação para estimar esse tempo.

$$t_c = \frac{s^2}{\alpha_{eff} \pi^2} \ln \left[\frac{2\sqrt{2}}{\pi} \left(\frac{\theta_{inj} - \theta_{mol}}{\theta_{ext} - \theta_{mol}} \right) \right] \quad (2.11)$$

De acordo com a equação 2.11 concluí-se que o tempo de arrefecimento é influenciado pela espessura da peça (s) [mm], difusibilidade térmica do polímero (α_{eff}) [$m^2 \cdot s^{-1}$], temperatura de injeção (θ_{inj}), extração (θ_{ext}) e do molde (θ_{mol}) [K].

O arrefecimento do material injetado é realizado por transferência de calor para a superfície moldante, que se encontra a uma temperatura inferior. Para facilitar, acelerar e controlar este processo são maquinados furos nas placas da bucha e cavidade para a passagem de um fluido refrigerante, que usualmente é água [Brito *et al.*, 2003].

Estes furos são unidos entre si, formando circuitos, acompanhando tanto quanto possível a forma da peça para permitir uma boa e uniforme dissipação de calor, por forma a minimizar empenos e ter tempos ciclo de moldação reduzidos. Na figura 2.15 ilustram-se alguns circuitos utilizados para o controlo de temperatura de um molde. Para configurar os circuitos das figuras 2.15(b) e 2.15(c) é necessário recorrer-se a tampões de fecho, de forma a criar os desvios de percursos.

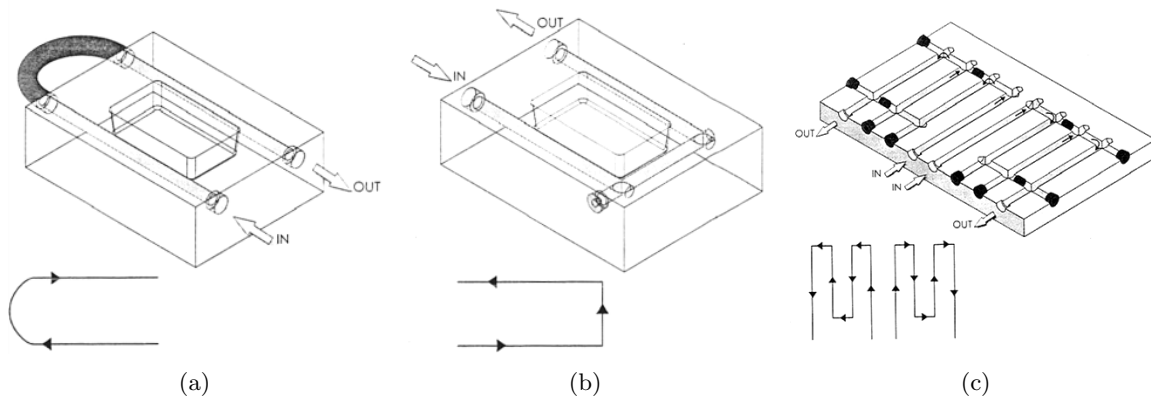


Figura 2.15: Circuito de refrigeração em: (a) “U” de ligação com mangueira, (b) “U” de ligação com furação cruzada e (c) “Z” de ligação com furação cruzada [Brito *et al.*, 2003].

Para dimensionar o sistema de controlo de temperatura, importa calcular a quantidade de calor que será necessária retirar¹ pelo fluido de refrigeração. Este valor é calculado recorrendo a um balanço térmico de todas as trocas de calor que ocorrem no molde.

$$\sum \dot{Q}_i = \dot{Q}_{TM} + \dot{Q}_{PI} + \dot{Q}_{Amb} = 0, \quad (2.12)$$

em que \dot{Q}_{TM} representa o fluxo de calor retirado pelo fluido do sistema de controlo de temperatura, \dot{Q}_{PI} o fluxo de calor fornecido pelo fundido e \dot{Q}_{Amb} o fluxo de calor transferido para o ambiente.

O fluxo de calor fornecido pelo fundido ao molde é dado pela expressão:

$$\dot{Q}_{PI} = \frac{m \times (h_{inj} - h_{ext})}{t_c}, \quad (2.13)$$

onde m representa a massa de moldação, h_{inj} e h_{ext} a entalpia específica do material à temperatura de injeção e extração, e t_c o tempo de arrefecimento.

A transferência de calor para o ambiente dá-se pelos modos habituais, condução, convecção e radiação, e pode ser quantificada usando as formulas clássicas de transferência de calor.

O fluxo de calor transferido por condução, representa todo o calor que se irá dissipar pelas placas de fixação do molde para os pratos da máquina e é expresso por:

$$\dot{Q}_{cond} = A_{fix} \times \beta \times (\theta_{amb} - \theta_{mol}), \quad (2.14)$$

onde A_{fix} [m²] representa a área de contacto do molde com os pratos da máquina e β [W/m²K] o fator de proporcionalidade (análogo à condutividade térmica do aço das placas do molde). Está variável (β) toma valores de 100 para aços ao carbono e de baixa liga e 80 para aços de alta liga [Menges *et al.*, 2001].

¹Na grande maioria dos casos o fluido que circula no interior dos canais do molde, retira calor deste pelo que assegura o arrefecimento do molde. No entanto, existem situações em que o molde trabalha a temperaturas elevadas nas quais o fluido aquece o molde. Em ambos os casos procede-se ao arrefecimento da moldação, razão pela qual se designa genericamente o fluido com de “arrefecimento” independentemente do sentido das suas trocas de calor com o molde.

O fluxo de calor transferido por convecção, equivale ao calor que é dissipado pelas paredes do molde expostas ao ar, e é dado pela seguinte equação:

$$\dot{Q}_{conv} = A_{lat} \times h \times (\theta_{amb} - \theta_{mol}), \quad (2.15)$$

onde A_{lat} [m²] representa a área das paredes expostas ao ar e h o coeficiente de transferência de calor por convecção livre do ar (8 [W/m²·K]) [Menges *et al.*, 2001].

O último modo de transferência de calor, a radiação, cujo fluxo de calor é obtido pela expressão:

$$\dot{Q}_{rad} = A_{lat} \times \varepsilon \times \sigma \times \left[\left(\frac{\theta_{amb}}{100} \right)^4 - \left(\frac{\theta_{mol}}{100} \right)^4 \right] \quad (2.16)$$

onde A_{lat} representa a áreas das paredes expostas ao ar, ε a emissividade (0.25 para o aço) e σ a constante de radiação do corpo negro (5.77 [W/m²·K⁴]) [Menges *et al.*, 2001].

Conhecido o valor do calor transportado pelo fundido (sempre positivo) e das trocas de calor com o ambiente (geralmente negativo, exceto quando a temperatura do molde é inferior à ambiente), a quantidade de calor que se terá de retirar/ceder com as linhas de água (\dot{Q}_{TM}) é calculada pelo balanço térmico ao molde através da equação 2.12. Note-se que se $\dot{Q}_{TM} > 0$, o sistema de controlo de temperatura funciona como um sistema de aquecimento para evitar a redução da temperatura do molde. Neste caso aconselha-se a colocação de placas isolantes entre o molde e os pratos da maquina para diminuir as perdas de calor [Brito *et al.*, 2003;Menges *et al.*, 2001]. O caudal mássico de fluido estima-se pela equação 2.17, fixando a variação da temperatura do fluido entre a entrada e a saída das linhas de água ($\Delta\theta$) [Brito *et al.*, 2003].

$$\dot{m} = \frac{|\dot{Q}_{TM}|}{c_p \times \Delta\theta} \quad (2.17)$$

onde c_p é o calor específico do fluido (4.186 [kJ/kg·K] para a água). Com este resultado pode determinar-se o diâmetro para as linhas de água (equação 2.18), garantindo sempre que o caudal é turbulento para maximizar a transferência de calor [Menges *et al.*, 2001]. Isto acontece para números de Reynolds superiores a 3500 [Rosato *et al.*, 2000].

$$d = \frac{4 \times \dot{V}}{\pi \times Re \times \nu}, \quad (2.18)$$

em que \dot{V} representa o caudal volúmico do fluido no interior do circuito, Re o número de Reynolds e ν a viscosidade cinemática do fluido.

Sistema de extração

No intervalo entre a abertura e fecho do molde a peça é extraída. O ideal seria que a seguir à abertura do molde a peça pudesse cair por gravidade. Contudo, devido à contração e consequente adesão e às contra-saídas, a peça tende a ficar no molde, geralmente, na bucha, e soluções específicas são necessárias para a extrair. O acionamento do sistema de extração é

realizado em geral pela máquina de injeção mas, podem existir casos em que este é realizado por um sistema exterior à máquina, tal como, sistemas mecânicos atuados por hidráulicos ou pneumáticos [Menges *et al.*, 2001]. São vários os métodos para a extração de peças no processo de moldagem por injeção. O mais simples e mais comum é a partir de extratores. Este método é usado na extração de peças que não apresentem contra-saídas nem saídas negativas e a extração faz-se simplesmente com o avanço dos extratores que empurram a peça [Hopkinson *et al.*, 1999].

O sistema de extração deve operar de forma balanceada e sem danificar as moldações. Assim, a previsão da força de extração em moldes de injeção é importante para o projeto e dimensionamento do sistema de extração [Pontes *et al.*, 2005].

O valor da força necessária para vencer a força de adesão da peça à bucha pode ser estimado através da expressão empírica, desenvolvida por Glanvill *et al.* (1965).

$$F_e = \frac{\alpha(\theta_m - \theta_{ext}) \times D \times E \times A \times \mu}{D \left[\frac{D}{2t} - \left(D \times \frac{\gamma}{4t} \right) \right]} \quad (2.19)$$

em que:

- α - coeficiente de expansão térmica do polímero;
- θ_m - temperatura de fusão do polímero;
- θ_{ext} - temperatura de extração;
- D - diâmetro da bucha ou diâmetro de uma circunferência com perímetro igual ao perímetro da área projetada transversalmente à direção de extração;
- E - módulo de Young do polímero à θ_{ext} ;
- A - área de contacto entre a bucha e a peça na direção da extração, isto é, a área total das superfícies que se encontram paralelas à direção de extração;
- μ - coeficiente de atrito entre o polímero e a bucha;
- t - espessura da peça;
- γ - coeficiente de Poisson do polímero.

Interessa ainda calcular a área mínima necessária de extratores para promover a extração da peça. É obtida através do cálculo da pressão de contacto dos extratores (equação 2.20) que deverá ser inferior à tensão limite de elasticidade do polímero à temperatura de extração.

$$P = \frac{S \times F_e}{A} \quad (2.20)$$

onde, S representa um fator de segurança, F_e a força de extração e A a área mínima total dos pinos de extração [Oliveira, 2018]. O fator de segurança é adicionado ao cálculo, uma vez que a força de extração deve ser sempre superior ao mínimo necessário. É tolerável a utilização de forças de extração 3 a 4 vezes superiores ao mínimo necessário.

Capítulo 3

Projeto do molde

Neste capítulo é realizado todo o trabalho de desenho e dimensionamento dos sistemas funcionais do molde de injeção para ensaios mecânicos em termoplásticos. Na moldação por injeção são muitos os fatores que influenciam as propriedades mecânicas das amostras moldadas. A definição exata de cada um desses parâmetros é essencial para existir uma uniformidade dos valores numéricos das propriedades medidas. Assim, a norma ASTM D3641 (2002) define detalhes de projeto do molde e condições de processamento a utilizar. O dimensionamento dos sistemas funcionais foi baseado nas regras de projeto da norma e formulações empíricas apresentadas na revisão bibliográfica.

No projeto do molde foram consideradas as características da máquina de injeção presente no Departamento de Engenharia Mecânica da UA, nomeadamente a distância entre colunas, a abertura do molde, a força de fecho e a capacidade de injeção. Algumas características da máquina estão listadas na tabela 3.1.

Tabela 3.1: Especificações da máquina de injeção.

Inautom Euro Inj Série D65		
Sistema de injeção	Diâmetro do fuso	32
	Relação L/D	20
	Volume de injeção [cm ³]	128
	Peso de injeção [g]	115
	Pressão [bar]	1777
	Curso do fuso [mm]	1600
Sistema de fecho	Força de fecho max. [ton]	65
	Max. curso abertura [mm]	270
	Altura do molde [mm]	100-360
	Abertura max.[mm]	630
	Espaço entre colunas [mm]	320×320
	Diâmetro de colunas [mm]	55
	Max. força do extrator [ton]	2.74
	Max. curso do extrator [mm]	80

Posteriormente, o projeto do molde foi corroborado com recurso a análises de simulação numérica pelo método dos elementos finitos. Efetuou-se a análise reológica para analisar o processo de enchimento, arrefecimento e empeno e a análise estrutural (Apêndice B) para

verificar o efeito da pressão de injeção na deflexão da placa da cavidade. Deste modo e antes de uma tomada de decisão poderá testar-se e avaliar um conjunto cenários possíveis, de modo a aproximar-se à solução ideal, ainda na fase de projeto.

Após a execução da modelação (3D final) e validação do projeto do molde (através da simulação numérica) realizou-se a listagem final de todos os componentes mecânicos do molde: acessórios, placas, postigos, *etc.*. Em seguida procede-se ao pedido de orçamentos dos componentes *standard* e material para a maquinagem (Apêndice C). No apêndice F mostra-se um desenho de conjunto do molde onde são indicados os vários componentes, bem como interação e as dimensões dos mesmos. Este desenho tem duas plantas (extração e injeção) e dois cortes (longitudinal e transversal), uma legenda e uma lista de materiais.

3.1 Seleção do material para a estrutura

A especificidade de cada molde exige também a especificação do material que melhor se adequa a cada aplicação e que, simultaneamente, determinem custos de produção mais baixos. É, por este motivo, essencial compreender as propriedades, características, aplicabilidade e maquinabilidade de cada material [Ramada aços, 2018].

Brito *et al.* (2003) elaborou um fluxograma de forma a auxiliar a seleção do material mais apto a cada projeto. Na figura 3.1 reproduz-se do fluxograma o processo que definiu o aço para todas as placas do molde.

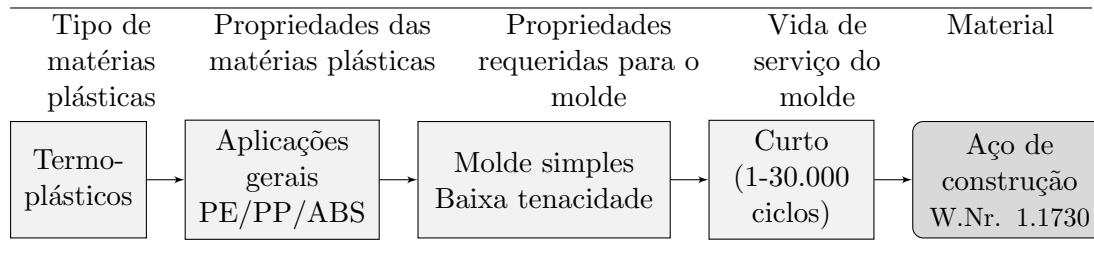


Figura 3.1: Fluxograma para seleção do material para o molde de injeção.

O aço W.Nr. 1.1730 é um aço não ligado com uma composição de 0,45 % de carbono. Tem um grande campo de aplicações, nomeadamente em estruturas de moldes protótipo ou de pequenas séries e na indústria metalomecânica.

3.2 Zona moldante

A definição das peças plásticas foi feita com base nas normas ISO 527-1 (1993) relativa aos provetes para ensaios tração, na norma ISO 179-1 (2010) relativa aos provetes para ensaios de impacto e na norma ISO 178 (2001) relativa aos provetes para ensaios de flexão.

A variação dimensional das peças injetadas em relação às dimensões da zona moldante depende essencialmente da contração e do empeno. Uma vez que todos os materiais poliméricos contraem em maior ou menor grau, as impressões do molde têm de apresentar

3. Projeto do molde

dimensões superiores às que se quer obter nas peças. Assim, as zonas moldantes terão a dimensão máxima das cotas dos provetes. Com isto, o material pode contrair em toda a amplitude da tolerância, permitindo moldar vários materiais. Na figura 3.2 apresenta-se as dimensões das zonas moldantes, todas elas têm profundidade (h) de 4.20 mm.

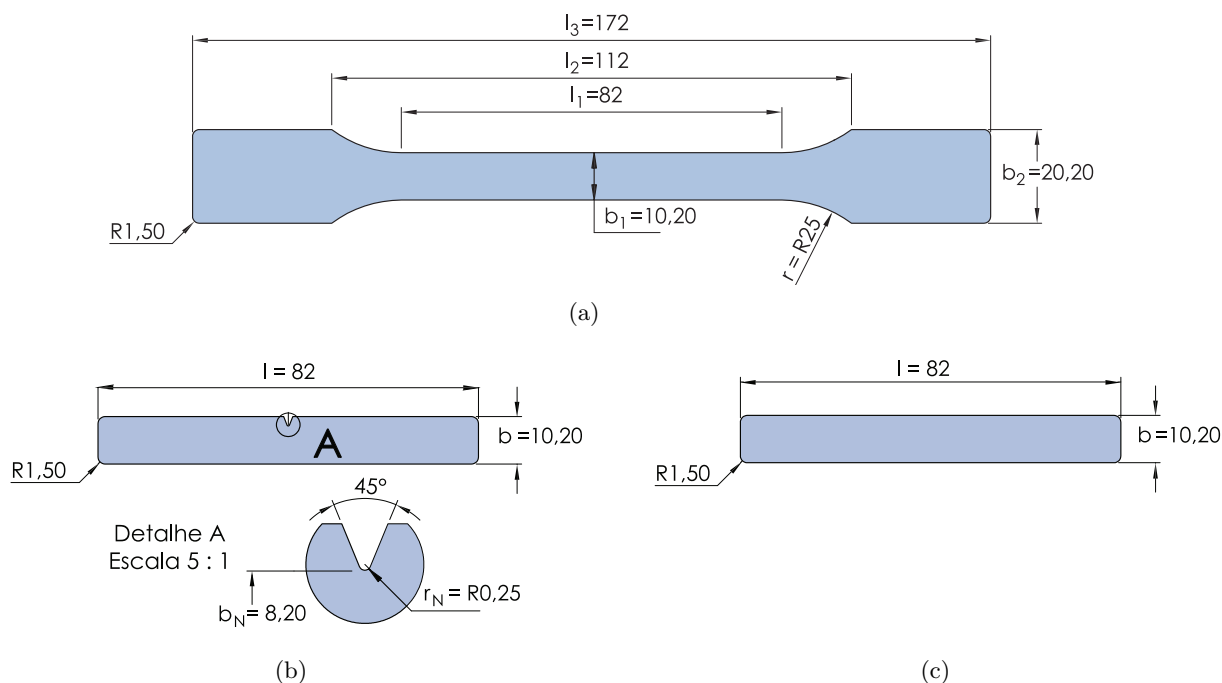


Figura 3.2: Dimensão da zona moldante do provete de: (a) tração, (b) impacto com entalhe e (c) impacto sem entalhe ou flexão.

De forma a avaliar a contração de vários materiais, utilizou-se o Moldflow. A seleção dos materiais seguiu os seguintes critérios: terem grande utilização industrial e apresentarem estruturas correspondentes a uma gama abrangente de cristalinidade. Segundo Brito *et al.* (2003) sabe-se que para além da natureza do material, a contração está relacionada com as condições de processamento utilizadas, nomeadamente pressão e tempo de compactação e temperatura do molde, injeção e extração. No entanto, a otimização de condições de processamento não será objeto de estudo. Desta forma, nas simulações foram utilizados materiais genéricos e condições de processamento definidas por defeito pelo software para os materiais analisados. As condições utilizadas no processamento dos materiais são apresentadas da tabela???. A pressão de compactação utilizada foi 80% da pressão máxima de injeção, durante 10 segundos.

Tabela 3.2: Condições de processamento utilizadas para avaliar os empenos das peças.

Condições	Materiais				
	ABS	PS	PC	PMMA	PP
Temp. injeção [°C]	230	225	300	235	220
Temp. molde [°C]	50	45	95	55	50
Temp. extração [°C]	88	83	130	82	124

Tabela 3.3: Resultados da análise de empenos.

Contração máxima (mm)		Contração após extração (mm)				
		Termoplástico				
		ABS	PS	PC	PMMA	PP
Provete Tração	l_1 [4]	0.60	0.46	0.66	0.56	1.51
	b_1 [0.4]	0.09	0.06	0.10	0.10	0.27
	b_2 [0.4]	0.18	0.12	0.20	0.18	0.53
	h [0.4]	0.04	0.02	0.04	0.04	0.11
Provete Impacto com entalhe	l [4]	0.67	0.51	0.77	0.61	1.54
	b [0.4]	0.10	0.07	0.12	0.10	0.28
	h [0.4]	0.04	0.03	0.04	0.04	0.10
	b_N [0.4]	0.08	0.04	0.09	0.08	0.22
Provete Flexão/ Impacto sem entalhe	l [4]	0.67	0.48	0.77	0.61	1.55
	b [0.4]	0.10	0.07	0.12	0.10	0.28
	h [0.4]	0.04	0.03	0.04	0.04	0.10

Verifica-se que apenas a cota b_2 do provete de tração moldado em PP tem contração superior ao permitido. Todos os restantes provetes cumprem com as especificações das normas.

As três zonas moldantes foram dispostas de modo a obter canais de alimentação curtos e um molde mais compacto. Tem apenas uma zona moldante para cada tipo de provete, pois devido a especificidade das peças moldadas, estas não exigem que a cadência de produção seja alta.

A placa da bucha contém três insertos que podem ser rotacionados para permitir o bloqueio e direcionamento do fluxo de material polimérico. Com este sistema é possível obter quatro modos de injeção. Na figura 3.4 mostra-se uma ilustração destes modos. A ordem de operações para alterar o modo é: remoção dos parafusos; rotação do(s) inserto(s); e colocação, novamente, dos parafusos. Os 270 mm de abertura máxima da máquina de injeção são suficientes para o operador executar a tarefa, não havendo a necessidade de retirar o molde da máquina.

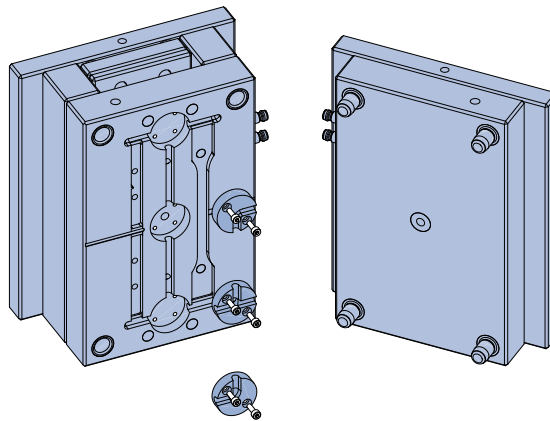


Figura 3.3: Vista explodida dos insertos.

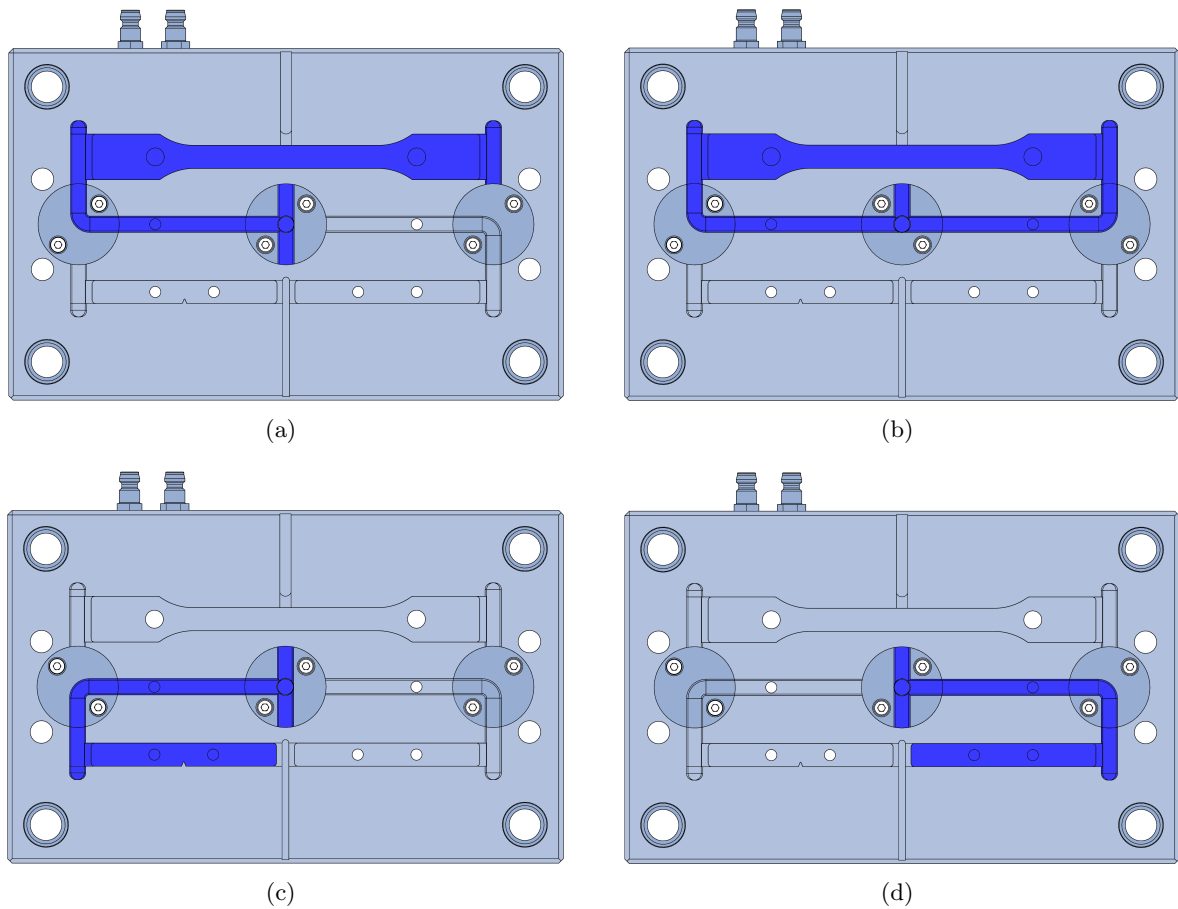


Figura 3.4: Moldação do provete de: (a) tração, (b) tração com linha de soldadura, (c) impacto com entalhe e d) impacto sem entalhe ou flexão.

Desta forma, pretende-se que o molde processe mais do que um termoplástico em diferentes modos de injeção. Porém, no projeto de um molde deve ser especificado à partida a moldação e o tipo de material que se quer injetar. De modo a dimensionar os sistemas funcionais do molde definiu-se ABS como matéria plástica e o provete de tração bi-injetado para o modo de injeção. Esta definição deveu-se ao facto do ABS ser um dos materiais possíveis de processar e o modo de injeção do provete bi-injetado o que transporta maior massa de moldação.

3.3 Sistema de centragem e guiamento

A precisão do centramento entre o bico de injeção da máquina e a bucha de injeção do molde é fundamental para existir uma boa selagem bico/bucha e evitar interrupções do processo de injeção. Para garantir o centramento, os moldes são equipados com anéis de centragem. O anel de centragem é fixado à placa de aperto de injeção e a centragem do molde é promovido pelo ajustamento de deslizamento do mesmo no furo do prato da máquina de injeção, conforme a figura 3.5(a). Este componente está disponível comercialmente por

diversos fabricantes de acessórios normalizados. Neste projeto foi selecionado um anel de centragem com diâmetro exterior igual ao do furo do prato da injetora.

O guiamento principal tem como função guiar as duas metades do molde no seu fecho. Este guiamento é feito por 4 guias e casquilhos, montadas do lado da injeção e extração, respetivamente. Estes elementos foram escolhidos em função do tamanho do molde. Para placas com dimensões de 256×156 mm, estes devem ter 20 mm de diâmetro das zonas que ficam alojadas nas placas. Não foram incluídas guias e casquilhos nas placas de extração por ser um molde pequeno e o guiamento da extração não ser muito crítico.

Para o transporte do molde, foi adicionada uma barra de transporte com olhal. A barra também permite manter fechadas a duas partes do molde no seu movimento fora da máquina. O olhal foi selecionado tendo em conta o peso do molde. Trata-se de uma olhal com rosca M8 que permite suportar massas até 140 kg, suficiente para a massa do molde. Além disso, teve-se em atenção o facto deste ficar localizado no local que permite a movimentação equilibrada do molde.

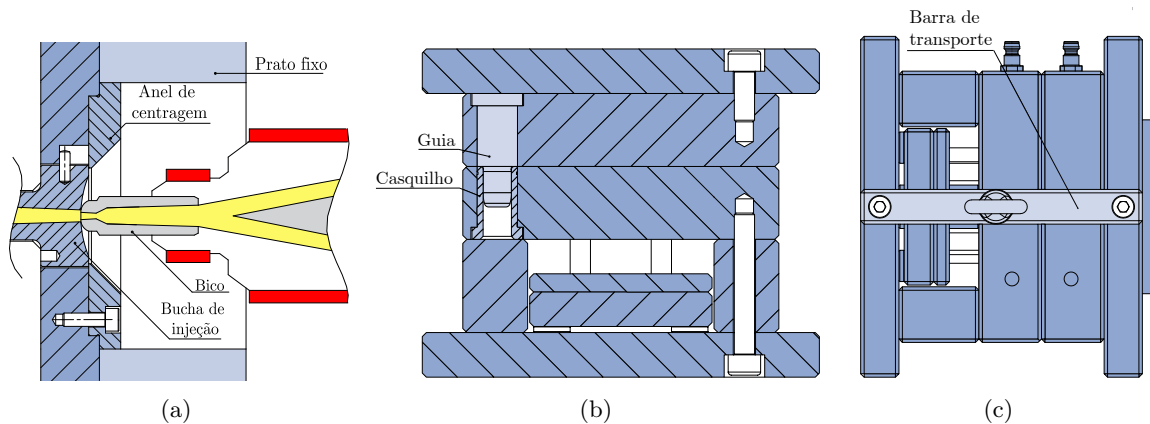


Figura 3.5: (a) Zona de ajuste do anel de centragem; (b) Montagem do guiamento principal; (c) Montagem da barra de transporte.

3.4 Sistema de alimentação

O sistema de alimentação é constituído por uma série de canais, maquinados na placa da bucha, pelo qual o fundido é transportado desde o bico de injeção até cada zona moldante.

O sistema de alimentação inicia-se pelo jito, sendo este responsável pela ligação entre o bico da injetora e o canal principal. A configuração do jito é definida pela bucha de injeção. A norma ASTM D3641 (2002) define que o jito deve ter no mínimo 4 mm de diâmetro no lado do bico de injeção. Posto isto, foi procurada uma solução comercial que atendia a essa exigência. Na figura 3.6(a) é apresentada a montagem da bucha de injeção utilizada. A bucha tem um acoplamento em raio com o bico da injetora e uma forma cónica com ângulo de abertura de 1.5° , necessário para facilitar a extração. Interessa referir que as dimensões do bico devem ser adequadas ao diâmetro e raio de curvatura da bucha de injeção do molde. Este também é um dispositivo intermutável e deve ter um diâmetro de 3.5 mm e um raio nunca

maior que 40 mm, de forma a garantir o encosto e uma boa selagem do conjunto bico/bucha.

No final da bucha existe um poço frio com profundidade de 4 mm, de forma a captar o material mais frio da frente de fluxo. Este contém um ângulo negativo para garantir que a moldação fique sempre do lado da extração na abertura do molde.

Os canais de alimentação ligam o jito aos ataques das impressões. A secção transversal dos canais de alimentação é trapezoidal modificada. Este canal é a melhor aproximação ao canal circular, tendo a vantagem de ser maquinado em apenas um dos lados do molde. Desta forma, é bastante utilizado, pois tem a melhor relação custo/benefício. O diâmetro do canal de alimentação é obtido recorrendo a regras empíricas presentes na literatura. É função da massa, espessura e material polimérico da moldação [Menges *et al.*, 2001]. O ábaco consultado pode ser consultado no Apêndice A. Para uma massa de moldação de 11 g, correspondente ao provete de tração, obtém-se um diâmetro de 6 mm. Foram adicionados ângulos de 10° de forma a configurar a secção trapezoidal modificada. O formato e dimensões são apresentadas na figura 3.6(b).

A entrada do polímero fundido nas zonas moldantes é feita através de ataques. A norma ASTM D3641 (2002) especifica a localização e configuração do ataque. O ataque está localizado nas extremidades dos provetes e são do tipo lateral ou à junta. Os canais de ataque das moldações têm espessura igual a $2/3$ da espessura do provete, largura igual à largura do provete na zona de ataque e comprimento de 3 mm. Na figura 3.6(c) pode ver-se uma ilustração do ataque.

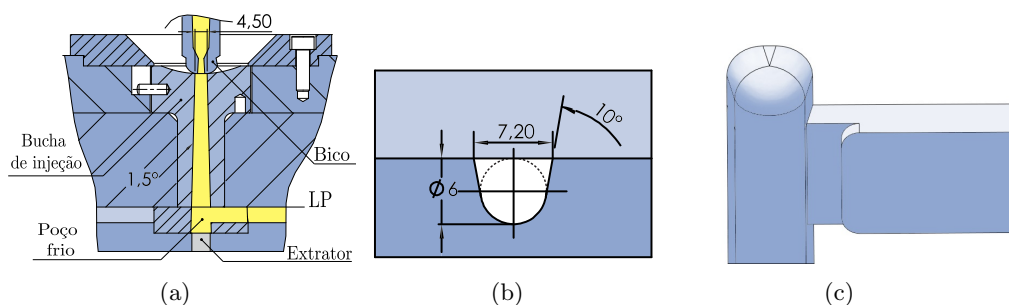


Figura 3.6: Configuração: (a) bucha de injeção, (b) secção transversal dos canais de alimentação e (c) ataque.

3.5 Sistema de controlo de temperatura

O sistema de controlo de temperatura é constituído por dois circuitos de canais de água independentes, simétricos em relação ao plano da junta. A arquitetura das linhas de água depende principalmente da peça a moldar, isto porque, deve acompanhar o melhor possível a forma da peça. No entanto, a disposição das linhas de água foi limitada por aspetos construtivos, pois não se pode fazer furações muito próximas de outros furos como, por exemplo, furos para extratores, parafusos, insertos, guias, casquilhos, *etc.* Isto levou a que o projeto do sistema de controlo de temperatura fosse uma solução de compromisso entre o ideal e o que é possível de realizar no espaço disponível.

A distância de afastamento dos furos das linhas de água para outro qualquer furo da placa foi de 3 mm para furações até 150 mm e de 5 mm para furações superiores a 150 mm, tal como recomenda Brito *et al.* (2003). A variação dos valores de afastamento deve-se ao facto da broca tender a desviar-se do seu percurso quando mais comprida for a furação.

Na figura 3.7 pode-se verificar o sistema de refrigeração implantado.

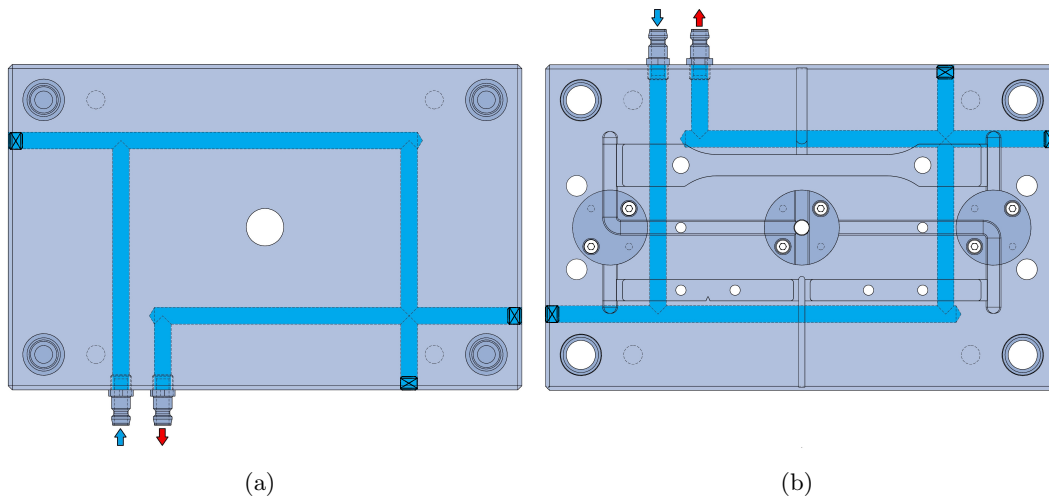


Figura 3.7: Representação do circuito de água: (a) cavidade e (b) bucha.

Nos cálculos efetuados, através dos modelos apresentados na revisão bibliográfica (secção 2.4.4), o sistema de controlo de temperatura atua como sistema de aquecimento para manter o molde à temperatura desejada. Como as maiores perdas para o ambiente são por condução (na ordem dos 80%) devem ser utilizadas placas isolantes para reduzir estas perdas. Com esta estratégia, o sistema de controlo de temperatura comporta-se como um sistema de arrefecimento, necessitando extrair cerca de 108 W. Independentemente deste baixo valor, levando a questionar a utilidade do sistema, note-se que são as linhas de água que garantem a temperatura de operação do molde.

Os furos das linhas de água são de 8 mm de diâmetro, conforme os cálculos efetuados presentes no Apêndice A e afastados 17 mm do plano da junta. As entradas e saídas das águas estão do mesmo lado para facilitar ao operador o controlo das mesmas. Estas foram colocadas no lado oposto ao operador, ou seja na parte posterior da máquina, a fim de não restringir os movimentos do operador. De forma a conectar as linhas de água às mangueiras que, por sua vez, são ligadas ao termoregulador e regulador de caudal, é usado um sistema de ligação rápida. Este sistema é constituído pelo bocal de ligação rápida (peça que é roscada ao molde) e pelo conetor (peça onde liga à mangueira). Foram usados tampões roscados para fechar os furos não utilizados como entradas e saídas de água e criar os desvios de percursos da água.

3.6 Sistema de extração

As peças, após solidificarem, são empurradas para o exterior da cavidade do molde através de extratores.

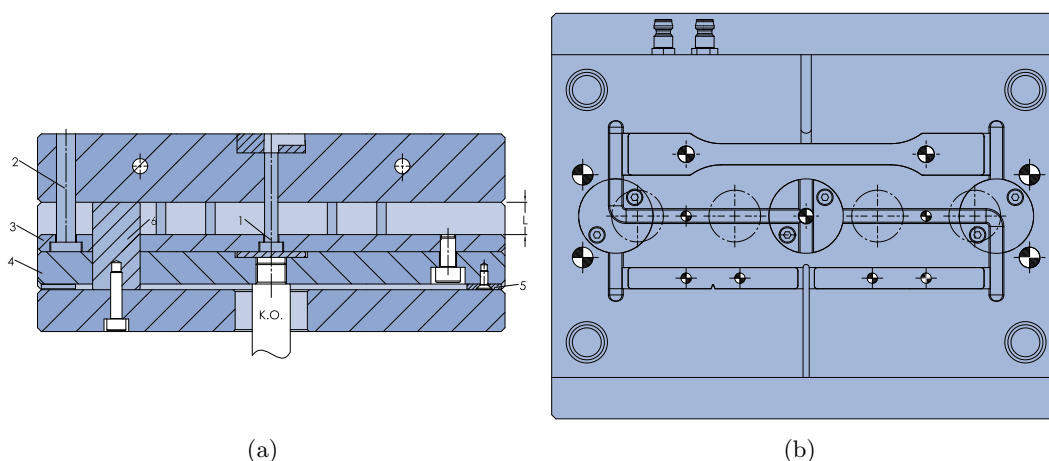


Figura 3.8: Sistema de extração.

Na figura 3.8 representa-se o sistema de extração do molde que é constituído por:

1. Extratores - a norma ASTM D3641 (2002) especifica que estes devem estar colocados fora da zona calibrada dos provetes para ensaios de tração e fora das zona central de 20 mm de comprimento dos provetes para ensaios de impacto e flexão. Pontes *et al.* (2005) indica que os extratores devem atuar de forma balanceada e sem danificar as moldações. Foram colocados dois em cada provete, dispostos simetricamente, de forma a existir um balanço das forças de extração. De acordo com os modelos apresentados na revisão bibliográfica (secção 2.4.4) calculou-se o diâmetro dos extratores necessário para garantir a extração sem que haja distorções ou rotura das peças moldadas. Estes cálculos podem ser consultados no Apêndice A. Assim, o diâmetro dos extratores será de 5 mm para extração dos provetes de flexão e impacto e de 8 mm para extração do provete de tração. Foram adicionados dois extratores de 5 mm de diâmetro para facilitar a extração do sistema de alimentação e um extrator de 7 mm para extrair o poço frio, que contém ângulo negativo. Os extratores são componentes normalizados e selecionados da HASCO.
2. Pernos de retorno - são quatro e promovem o recuo das chapas dos extratores, assegurando que os extratores estejam na posição correta antes do início de um novo ciclo. Estes pernos são iguais aos extratores cilíndricos, foram selecionados também da HASCO com 10 mm de diâmetro e 80 mm de comprimento, o qual foi reduzido a 62 mm para que o pino não ultrapasse a superfície da placa da bucha do molde.
3. Placa dos extratores - posiciona e aloja as cabeças dos extratores;

4. Placa de aperto dos extratores - aparafusada à placa dos extratores, esta fixa os extratores e promove o seu acionamento através do K.O. da máquina;
5. Botões de encosto - fazem a separação da placa dos extratores da placa de aperto da extração para evitar o choque entre as mesmas;
6. Suportes - têm a mesma altura dos calços e foram colocados no espaço disponível entre os extratores. De acordo com Osswald *et al.* (2002) este elementos têm a finalidade de reforçar e diminuir a flexão da placa da bucha devido às pressões desenvolvidas nas fases de injeção e compactação.

Os calços permitem definir o extensão do movimento do sistema de extração (L). Neste projeto será de 15 mm, suficiente para permitir a queda das peças moldadas.

Os furos para passagem dos extratores são mandrilados para garantir a tolerância necessária ao deslize guiado dos extratores. Para o caso foi considerado H7.

3.7 Sistema de escape de gases

O sistema de escape de gases permite a saída do ar presente nas zonas moldantes quando o material plástico é injetado na cavidade. Para determinar pontos de retenção de ar, foi usado um *software* de previsão de enchimento. Estes estão localizados em zonas onde termina o enchimento e onde se verifica a ligação das duas frentes de fluxo de plástico, no caso no provete de tração para estudos de linha de soldadura.

Devem ser maquinados pequenos rasgos na linha da junta, conforme a figura 3.9 para facilitar a sua saída. Foi selecionada uma profundidade de rasto de 0.051 mm, por esta se encontrar dentro da gama de profundidades típicas dos rasgos para alguns dos plásticos que se podem injetar (ABS, PMMA, PC, PS).

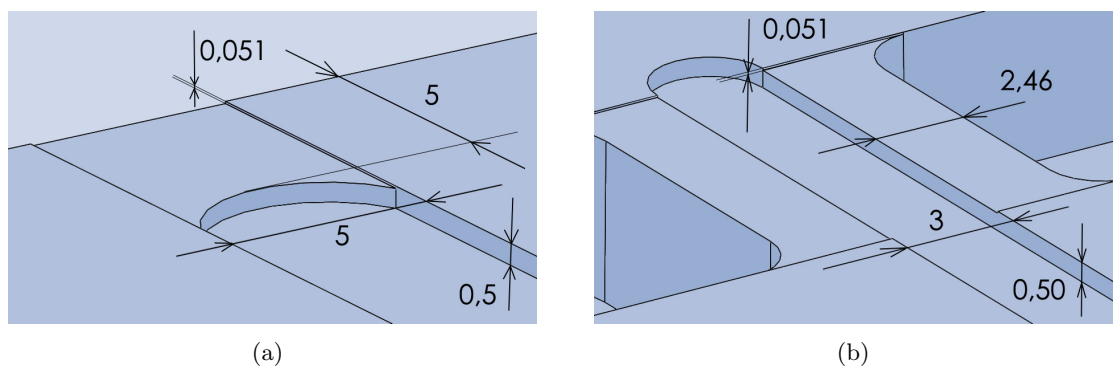


Figura 3.9: Rasgo de escape de gases: (a) provete de tração e (b) provetes de impacto de flexão.

3.8 Análise reológica

Os procedimentos de trabalho para realizar uma simulação no Moldflow podem ser divididos em três estágios: (i) pré-processamento, (ii) análise e (iii) pós-processamento. Estes

estágios são descrito de forma sucinta no fluxograma da figura 3.10.

Pré-processamento

Esta fase inicia-se com a importação da geometria da peça por meio de uma interface neutra (*e.g.* IGES). Seguidamente, procede-se à geração da malha de elementos finitos. Esta é uma etapa crucial pois qualidade da simulação depende, em grande medida, da escolha do tipo de elementos finitos e da malha a utilizar. Prossegue-se com a seleção do material a injetar e finalmente as condições do processo, nomeadamente temperatura do molde, temperatura do material fundido, *etc.* Define-se também nesta fase, as características da máquina de injeção e propriedades do material do molde.

Análise

Engloba os quatro módulos principais, que podem ser utilizados individualmente ou de modo sequencial: enchimento, compactação, arrefecimento e empeno. Estes, são responsáveis pela simulação de todo o processo de injeção, desde que o plástico começa a ser injetado até à extração do componente. Na perspetiva do utilizador, a fase de análise do Moldflow é muitas vezes impercetível, constituindo aquilo que se costuma usualmente designar por “caixa-negra”. No entanto, é neste momento que se desenrolam as tarefas mais importantes de todo o processo de simulação numérica pelo método dos elementos finitos, correspondendo a fase em que todos os cálculos são efetuados [Teixeira-Dias *et al.*, 2010].

Pós-processamento

Resume-se à visualização dos resultados sob a forma de gráficos e distribuições coloridas de isovalores. Deste modo, é possível retirar conclusões sobre todo o processo, avaliando de forma quantitativa e qualitativa variáveis como temperaturas, pressões, velocidades, tempos, *etc.*

Figura 3.10: Fluxograma de procedimentos para realização de uma simulação no Moldflow.

Para o estudo do processo de injeção dos provetes, optou-se por simular os modelos utilizando a malha *Dual Domain*, que define uma superfície de elementos finitos bidimensionais triangulares (3 nós) que cobrem todo o modelo. É adequada ao problema uma vez que a geometria das peças é simples e apresenta uma espessura constante de 4.2 mm. A malha a utilizar na análise necessita de satisfazer certos requisitos de forma a garantir que as simulações sejam fiáveis, ou seja, além de não poder ter quaisquer erros é fundamental que as percentagens de correspondência entre os elementos da malha sejam superiores a 85% [Oliveira, 2018]. Outro requisito diz respeito à razão de aspeto máxima existente entre os elementos, não devendo ser superior a 8, uma vez que poderá influenciar os resultados ou ter efeitos no tempo de execução do programa.

Seguidamente há que selecionar a posição dos ataques na peça e gerar o sistema de alimentação. Neste projeto já tinha sido definido o sistema de alimentação e a localização de

ataque, mas é possível no início do projeto de um molde obter através do *software* o local de injeção ótimo e a partir daí conceber o sistema de alimentação. O sistema de alimentação foi modelado no Solidworks, de onde foi feito um levantamento das dimensões e das geometrias para a sua modelação no Moldflow. O sistema de controlo de temperatura também foi definido no Solidworks, *a priori* da simulação, pois devido à convivência deste sistema com os outros sistemas funcionais ficou mais fácil prever os problemas de interferência. Posteriormente procedeu-se à sua implementação no software Moldflow. Na figura 3.11 pode observar-se os modelos geométricos utilizados para simular o processo de moldação por injeção, construídos na fase de pré-processamento. O sistema de alimentação está representado a verde enquanto que as linhas de água do sistema de controlo de temperatura encontram-se representadas a azul. Estão discretizados em elementos finitos unidimensionais do tipo barra (2 nós).

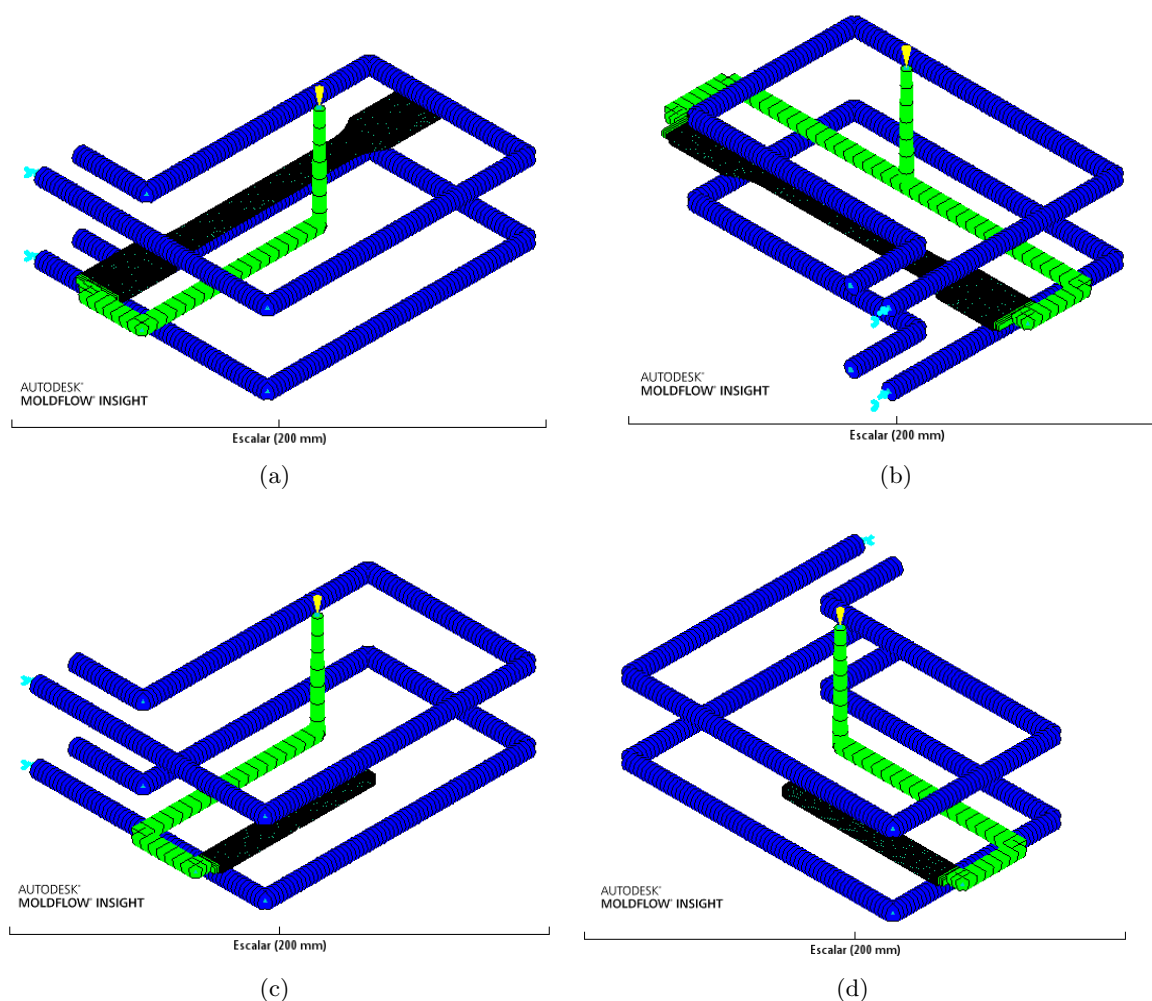


Figura 3.11: Modelo geométrico para análise do provete de: (a) tração, (b) tração com linha de soldadura, (c) impacto com entalhe e d) impacto sem entalhe ou flexão.

De modo a validar o enchimento foi feita uma análise com um ABS genérico, onde se definiu 230°C para a temperatura de injeção e 50°C para a temperatura do molde.

Na Tabela 3.5 são apresentados alguns dos resultados relativos à análise de enchimento

dos provetes.

Tabela 3.4: Resultados da análise de enchimento.

Resultado	Provete			
	Tração	Tração c\ linha de soldadura	Impacto	Flexão ou impacto s\ entalhe
Tempo de enchimento [s]	2.348	1.557	1.828	1.827
Pressão max. injeção [MPa]	42.22	31.24	30.57	30.50
Força max. fecho [ton.]	8.767	8.425	3.441	3.434
Linhas de soldadura	Não	Sim	Não	Não
Prisões de ar	Sim	Sim	Sim	Sim

A partir da análise de enchimento foi possível retirar as algumas conclusões. A pressão aumenta progressivamente até atingir o seu pico na comutação P/V, diminuindo cerca de 20 % na fase de compactação. Este estudo permite obter a previsão da pressão máxima de injeção, variável operatória a introduzir na máquina quando se proceder à injeção dos provetes. A força de fecho aumenta progressivamente desde o início até ao fim da injeção. Tanto a pressão com a força de fecho requerida está dentro dos parâmetros da máquina de injeção. As prisões de ar verificam-se nos finais dos enchimentos, permitindo obter a localização dos rasgos para escape de gases no molde. De forma a validar o pressuposto de que o provete de tração bi-injetado formaria uma linha de união de fluxo no centro foi feita uma observação às linhas de soldadura. A partir da figura 3.12 verifica-se a formação da linha de soldadura, após a solidificação. As linhas de união de fluxo são consideradas um defeito de moldação devido ao seu impacto visual, além disso têm consequências a nível estrutural, pois estas são normalmente responsáveis pela redução da resistência mecânica da peça nessa zona. Na moldação por injeção, existem diversos processos que podem originar a formação de linhas de soldadura, nomeadamente geometria complexa da peça, a necessidade do fluxo de material polimérico contornar obstáculos ou, talvez o mais comum, injeção do material em vários pontos. Desta forma, verifica-se que a possibilidade de moldar provetes com linha de soldadura neste molde tem grande interesse para posteriores estudos sobre a redução da resistência devido à existência deste defeito.

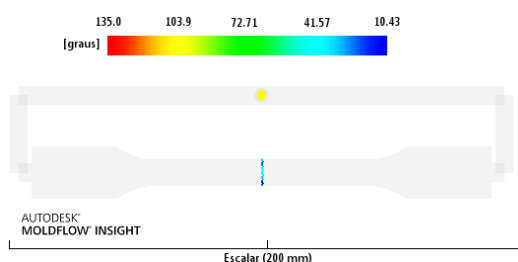


Figura 3.12: Linha de soldadura obtida na reprodução computacional.

Para verificar a eficiência do sistema de controlo de temperatura foi feita uma análise de arrefecimento, onde se definiu água com fluido operante a uma temperatura de 40°C, 10°C menor de que a da superfície do molde [Moldflow, 2017]. O número de Reynolds selecionado foi de 10000, pois trata-se do limite em que os ganhos de transferência de calor superam os gastos de energia do bombeamento [Shoemaker, 2006]. Na tabela 3.5 são apresentados alguns dos resultados relativos à análise de arrefecimento dos provetes.

Tabela 3.5: Resultados da análise de arrefecimento.

Resultado	Provete			
	Tração	Tração c\ linha de soldadura	Impacto	Flexão ou impacto s\ entalhe
Temperatura do fluido à saída do circuito [°C]	40.04	40.16	40.03	40.02
Tempo até atingir a extração [s]	31.59	31.25	28.52	28.08

O sistema de controlo de temperatura permite diminuir o tempo de ciclo e controlar a temperatura do molde. Verifica-se um aumento da temperatura do fluido nas linhas de água, devido à remoção de carga térmica do molde. O tempo até a peça atingir a temperatura de extração representa o tempo medido desde o início do enchimento para que 100 % da peça atinja a temperatura de extração, definida com 88°C para o ABS. Este tempo é praticamente uniforme em todos os locais da peça. Comparou-se o tempo de arrefecimento da peça e do sistema de alimentação e verificou-se que tempo da solidificação do sistema de alimentação é inferior ao tempo de solidificação da peça. Caso contrário causava o aumento do tempo de ciclo e devia-se ponderar a modificação do sistema de alimentação ou a alteração do sistema de arrefecimento para assegurar uma extração de calor mais eficiente do sistema de alimentação.

Capítulo 4

Maquinagem do molde

Esta fase inicia-se com a preparação do trabalho, que consiste na seleção dos brutos de maquinagem, dispositivos de apoio/aperto, ferramentas, bem como das máquinas-ferramentas. Incluí também a seleção dos parâmetros de corte e a sequência de operações. As chapas serão fornecidas maquinadas, com arestas quebradas e dimensões do desenho. Os insertos utilizam um semiproduto (varão) como peça de partida. Uma vez que as peças têm a dimensão nominal de $\phi 36 \times 10$ mm e o bruto apenas é fornecido em medidas *standard*, optou-se pelo uso de varão de 40 mm de diâmetro, de forma a minimizar o volume de material a retirar durante a maquinagem. O comprimento a usar é 25 mm, pois são usados 10 mm de material suplementar para posicionamento e 5 mm para o sangramento da peça.

Para realização das operações de fresagem, furação e roscagem selecionou-se o centro de maquinagem do Departamento de Engenharia Mecânica da UA. Este é da marca MIKRON, modelo VCE 500, com um controlador FANUC. O equipamento possui três eixos, com capacidade de deslocamento de 500 mm no eixo X, 400 mm no eixo Y e 400 mm no eixo Z. No que diz respeito às operações de torneamento e facejamento dos insertos, optou-se pelo torno convencional.

A fixação das placas à mesa do centro de maquinagem é feita através de uma prensa mecânica com abertura máxima de 200 mm. No caso dos insertos, por se tratarem de peças cilíndricas, a fixação é feita com uma bucha de 3 grampos, tanto na fixação ao torno como à mesa do centro de maquinagem.

Para uma determinada operação de maquinagem é necessário obter os parâmetros de corte ótimos de trabalho, normalmente fornecidos pelo fabricante da ferramenta e, com base nestes, calcular parâmetros de regulação da máquina. Os parâmetros de regulação da máquina são os seguintes [Sandvik Coromant, 2018]:

- Velocidade de rotação da árvore, expressa em rpm. Pode ser obtida através da equação

$$n = \frac{V_c \times 1000}{D \times \pi}, \quad (4.1)$$

em que V_c é a velocidade de corte [m/min] e D o diâmetro da ferramenta [mm].

- Velocidade de avanço, expressa em mm/min. Para operações de furação e roscagem

obtém-se através de

$$v_f = f_n \times n, \quad (4.2)$$

sendo f_n [mm/rot] o avanço por rotação. Em operações de fresagem especifica-se a velocidade de avanço da ferramenta no plano XY (v_f) e a velocidade de avanço da ferramenta no eixo Z (P). Estes parâmetros calculam-se pelas seguintes expressões:

$$v_f = f_z \times n \times z \quad (4.3)$$

$$P = 0.5 \times v_f \quad (4.4)$$

em que f_z [mm/dente] é avanço por dente e z o número de dentes ou arestas de corte da ferramenta.

Relativamente às ferramentas, estas deverão ser escolhidas com base no tipo material a maquinar, no comprimento de corte (que dependerá da altura das paredes da peça a obter ou profundidade dos furos), no raio de canto existente na peça e na precisão e acabamento pretendido nos furos. A partir da análise do desenho de definição das peças, é possível prever o número de operações e ferramentas necessárias de forma a gerar a geometria pretendida. Assim, vão ser necessárias ferramentas de desbaste, para abertura de rasgos e cavidades, brocas helicoidais para fazer furos, machos para fazer furos roscados e mandris para acabamento dos furos que exijam melhor acabamento e precisão. Desta forma, chegou-se à lista de ferramenta da tabela 4.1. A velocidade de corte e o avanço adotados foram obtidos nos catálogos dos fabricantes das ferramentas selecionadas (Apêndice D), considerando o aço de construção de médio carbono o material que se pretende cortar. Devido à rotação da árvore estar limitada a 6000 rpm, houve necessidade de ajustar alguns dos parâmetros de corte.

Tabela 4.1: Ferramentas e parâmetros de corte [Hepyc;Meusburger;Sandvik].

Ferramenta	V_c [$\frac{m}{min}$]	f_z [$\frac{mm}{dente}$]	z	n [rpm]	v_f [$\frac{mm}{min}$]	P [$\frac{mm}{min}$]
Fresa de topo direito ϕ 2	37.5 (145) ¹	0.007	3	5968 (23077) ¹	125 (485) ¹	62 (242) ¹
Fresa de topo direito ϕ 3	56 (145) ¹	0.013	3	5942 (15385) ¹	232 (600) ¹	116 (300) ¹
Fresa de topo direito ϕ 8	145	0.040	3	5769	692	346
Fresa de topo direito ϕ 12	145	0.060	3	3846	692	346
Fresa de topo esférico ϕ 6	113 (245) ¹	0.080	2	5995 (12998) ¹	959 (2080) ¹	479 (1040) ¹
Fresa de chanfrar a 45° ϕ 6	113 (120) ¹	0.05	4	5995 (6366) ¹	1199 (1273) ¹	599 (636) ¹

4. Maquinagem do molde

Ferramenta	$V_c \left[\frac{\text{m}}{\text{min}} \right]$	$f_n \left[\frac{\text{mm}}{\text{rot}} \right]$	n [rpm]	$v_f \left[\frac{\text{mm}}{\text{min}} \right]$
Broca de ponto ϕ 2.5	10	0.016	1273	20
Broca ϕ 3.3	20	0.063	1929	122
Broca ϕ 4	20	0.070	1592	111
Broca ϕ 4.2	20	0.070	1516	106
Broca ϕ 4.8	20	0.070	1326	93
Broca ϕ 6	20	0.10	1061	106
Broca ϕ 6.8	20	0.10	936	94
Broca ϕ 7.8	20	0.10	816	82
Broca ϕ 8	20	0.10	796	78
Broca ϕ 8 longa	14	0.15	557	84
Broca ϕ 8.5	20	0.125	749	94
Broca ϕ 9	20	0.125	707	88
Broca ϕ 9.8	20	0.125	650	81
Broca ϕ 11	20	0.15	579	87
Mandril ϕ 5H7	12	0.10	764	76
Mandril ϕ 7H7	12	0.13	546	71
Mandril ϕ 8H7	12	0.13	477	62
Mandril ϕ 10H7	12	0.15	382	57
Mandril ϕ 20H7	12	0.25	191	48
Macho de roscar M4	15.5	0.7	1233	863
Macho de roscar M5	15.5	0.8	987	789
Macho de roscar M8	15.5	1.25	617	771
Macho de roscar M10	17.4	1.5	554	831
Macho de roscar M10 \times 1	17.4	1	554	554
Macho de roscar M16	21.2	2	422	844

¹Valores teóricos.

Para simular a maquinagem e gerar os programas de controlo numérico, utilizou-se o *software* Powermill. Este programa, foi escolhido por ter interface simples, gráfica e intuitiva e uma vasta biblioteca de operações e estratégias de maquinagem. De um modo sucinto, pode definir-se os seguintes procedimentos a efetuar no *software* para a criação de um programa CN.

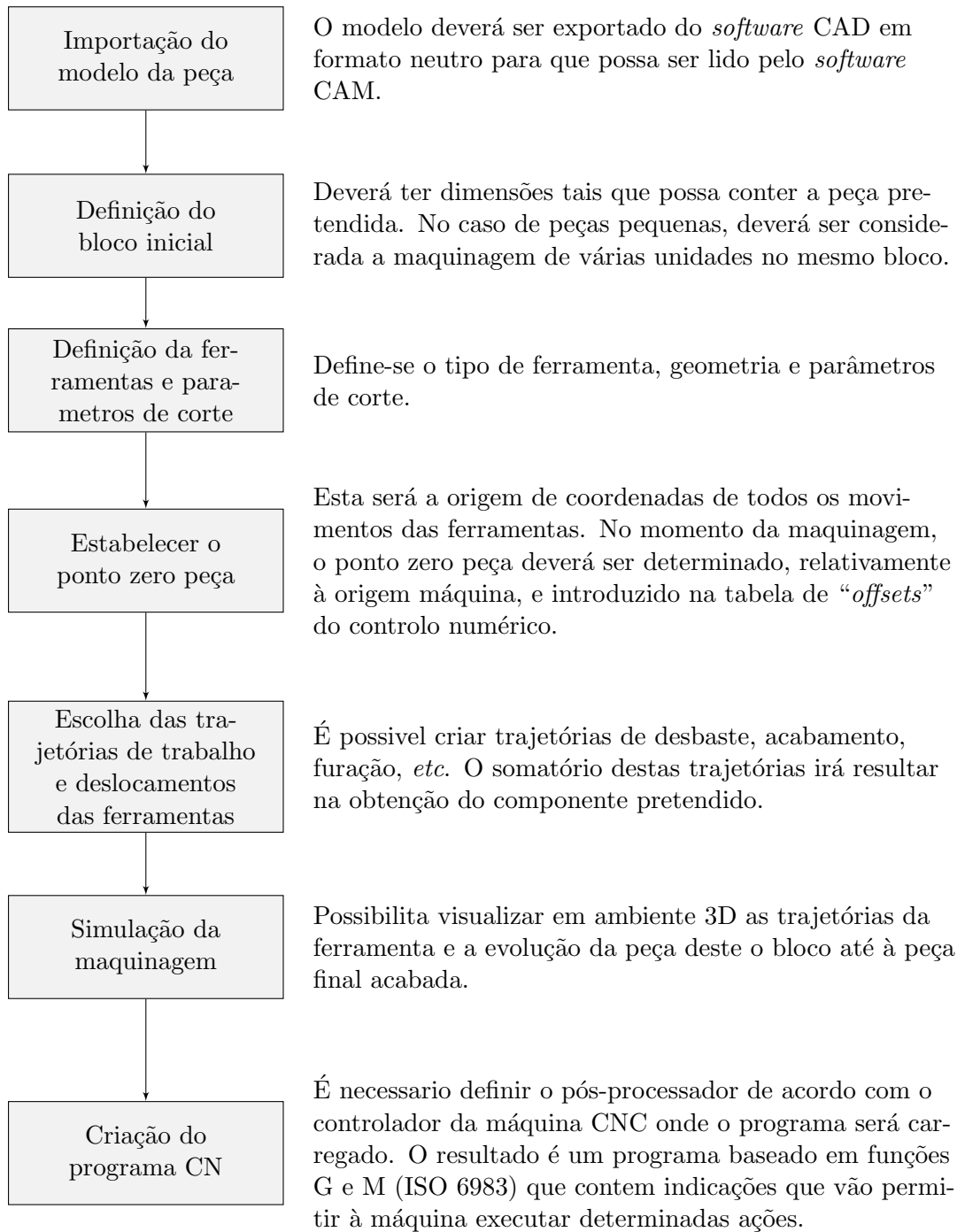


Figura 4.1: Fluxograma de procedimentos para criação de um programa CN no Powermill.

Nas secções seguintes estabelece-se a sequência de fabrico das placas do molde, especificando as diferentes fases. Note-se que uma fase correspondente a um conjunto de operações realizadas sobre a peça no mesmo sistema de apoio e aperto e na mesma máquina-ferramenta [Completo *et al.*, 2009]. Também se indica o tipo de trajetórias de maquinagem utilizadas e o tempo estimado pelo *software* para a execução de cada fase, correspondendo apenas ao tempo dos percursos sem contabilizar a troca da ferramenta.

4.1 Placa de aperto da injeção

Na maquinagem da operação 1 da fase 10 foi utilizada a estratégia “*model area clearance*”, com uma profundidade de corte (a_p) de 2 mm e largura de corte (a_e) 5 mm. Para efetuar as furações usou-se a operação “*drilling*” e os furos roscados a operação “*tapping*”. A fase 20 é programada manualmente no controlador da máquina, com a sequência de operações presentes na tabela 4.3.

Tabela 4.2: Sequência de fabrico da fase 10 da placa de aperto da injeção.

Fase 10			
Operação	Ref.	Descrição	Ferramenta
1	A	Fresagem de caixas para anel de centragem e bucha de injeção	Fresa de topo direito ϕ 12
2	B	Fresagem de caixa para pino	Fresa de topo direito ϕ 3
3	CD	Furação de ponto	Broca de ponto
4	C	Furação	Broca ϕ 4.2
5	C	Roscagem	Macho de roscar M5
6	D	Furação	Broca ϕ 11
7	E	Fresagem de caixas para alojamento dos parafusos	Fresa de topo direito ϕ 8

Tempo dos percursos (mm:ss) 07:05

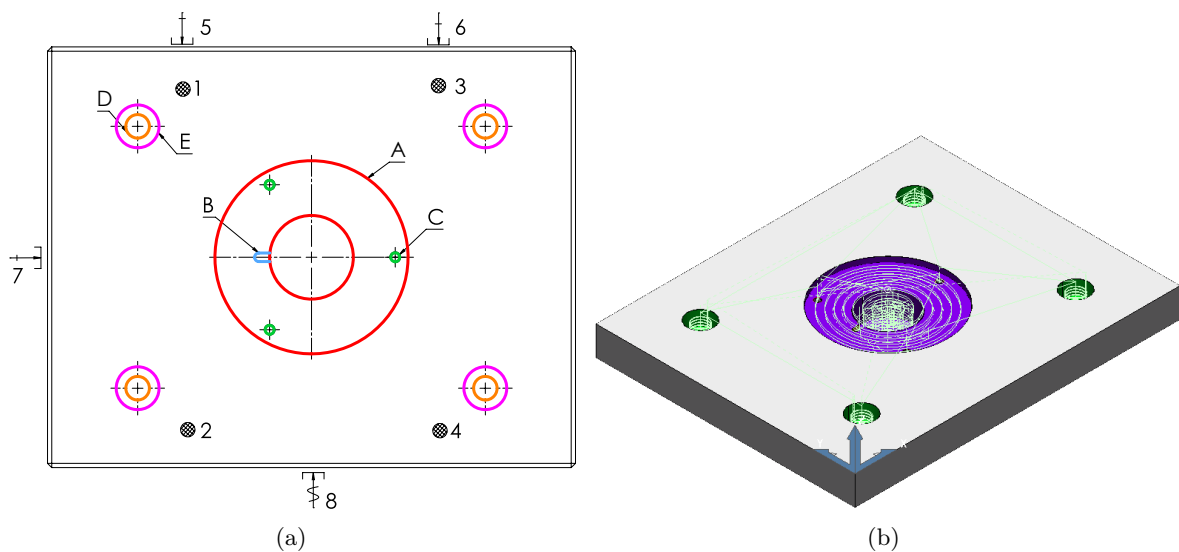


Figura 4.2: (a) Desenho e isostatismo; (b) Resultado da simulação da maquinagem da fase 10 da placa de aperto da injeção.

Tabela 4.3: Sequência de fabrico da fase 20 da placa de aperto da injeção.

Fase 20			
Operação	Ref.	Descrição	Ferramenta
1	A	Furação de ponto	Broca de ponto
2	A	Furação	Broca ϕ 6.8
3	A	Roscagem	Macho de roscar M8

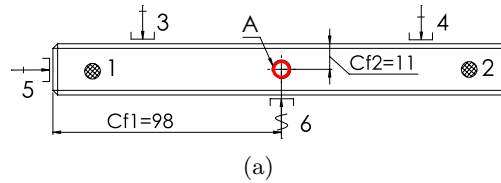


Figura 4.3: Desenho e isostatismo da fase 20 da placa de aperto da injeção.

4.2 Placa da cavidade

No desbaste das caixas para alojar as guias foi utilizada a estratégia “*model area clearance*”, com uma profundidade de corte (a_p) de 2 mm, largura de corte (a_e) 5 mm e sobre-espessura para acabamento de 0,2 mm. O acabamento dos furos foi efetuada com um mandril através da operação “*ream*”.

Na maquinagem da caixa para alojar a bucha de injeção foi utilizada a estratégia “*model area clearance*” para o desbaste e a estratégia “*chamfer milling*” para realizar o chanfro de $3 \times 45^\circ$.

A maquinagem das linhas de água é realizada através da programação manual no painel de controlo do centro de maquinagem CNC.

Tabela 4.4: Sequência de fabrico da fase 10 da placa da cavidade.

Fase 10			
Operação	Ref.	Descrição	Ferramenta
1	A	Furação de ponto	Broca de ponto
2	A	Furação	Broca ϕ 8.5
3	A	Roscagem	Macho M10
4	BC	Fresagem das caixas para alojamento das guias	Fresa de topo direito ϕ 12
5	D	Fresagem da caixa para alojamento da bucha de injeção	Fresa de topo direito ϕ 12
6	B	Mandrilagem	Mandril ϕ 20H7
7	E	Chanframento	Fresa de chanfrar a 45°

Tempo dos percursos (mm:ss) 54:35

4. Maquinagem do molde

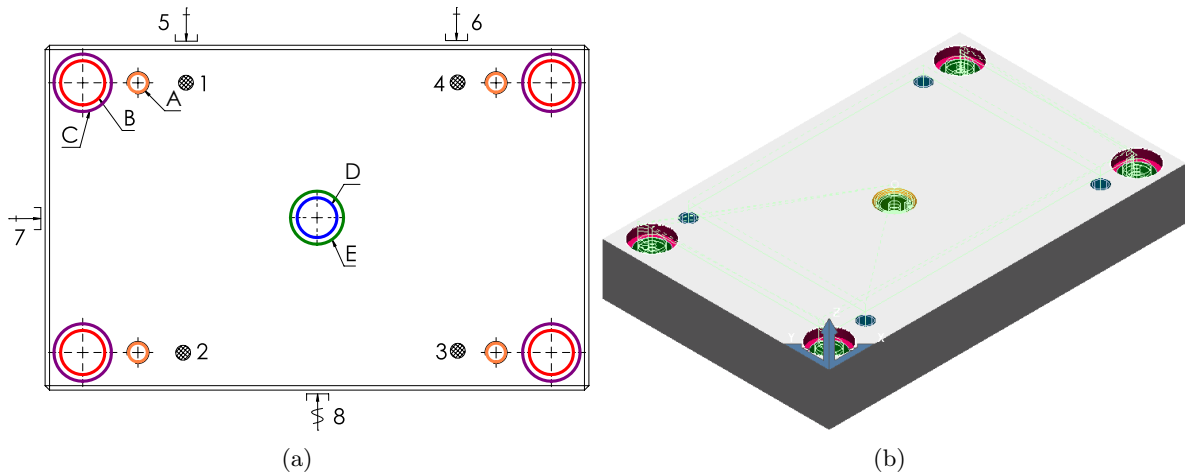


Figura 4.4: (a) Desenho e isostatismo; (b) Resultado da simulação da maquinagem da fase 10 da placa da cavidade.

Tabela 4.5: Sequência de fabrico da fase 20 da placa da cavidade.

Fase 20			
Operação	Ref.	Descrição	Ferramenta
1	ABC	Furação de ponto	Broca de ponto
2	ABC	Furação profunda	Broca ϕ 8 longa
3	ABC	Furação de pré-furo para roscagem	Broca ϕ 9
4	ABC	Roscagem	Macho M10 \times 1

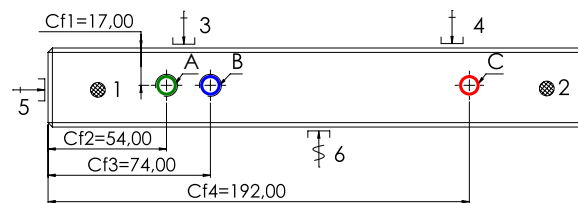


Figura 4.5: Desenho e isostatismo da fase 20 da placa da cavidade.

Tabela 4.6: Sequência de fabrico da fase 30 da placa da cavidade.

Fase 30			
Operação	Ref.	Descrição	Ferramenta
1	A	Furação de ponto	Broca de ponto
2	A	Furação profunda	Broca ϕ 8 longa
3	A	Furação de pré-furo para roscagem	Broca ϕ 9
4	A	Roscagem	Macho M10 \times 1

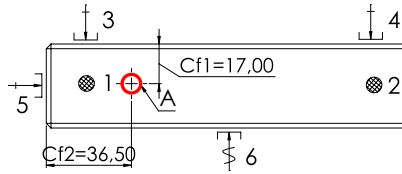


Figura 4.6: Desenho e isostatismo da fase 30 da placa da cavidade.

Tabela 4.7: Sequência de fabrico da fase 40 da placa da cavidade.

Fase 20			
Operação	Ref.	Descrição	Ferramenta
1	A	Furação de ponto	Broca de ponto
2	A	Furação profunda	Broca ϕ 8 longa
3	A	Furação de pré-furo para roscagem	Broca ϕ 9
4	A	Roscagem	Macho M10 \times 1

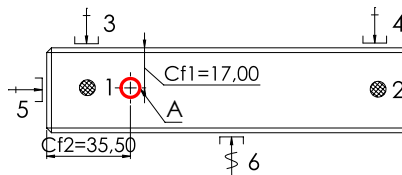


Figura 4.7: Desenho e isostatismo da fase 40 da placa da cavidade.

4.3 Placa da bucha

No desbaste das cavidades foi utilizada a estratégia “*model area clearance*”. Esta estratégia é apropriada para a maquinagem de cavidades e caixas e é gerado um conjunto de percursos que descrevem a forma das superfícies definidos do centro para o exterior, segundo planos com cota Z constante.

Para maquinagem dos canais de alimentação foi utilizada a estratégia de “*constant Z finishing*” com um passe vertical (a_p) de 0.2 mm para criar a superfície de 10° . Outra opção passava pela maquinagem com uma fresa personalizada de geometria igual à da secção do canal de alimentação.

Nas furações para os extratores e casquilhos, por se tratarem de furos com tolerância H7 utilizou-se a seguinte sequência de operações: furação de ponto, furação e mandrilagem do furo.

4. Maquinagem do molde

Tabela 4.8: Sequência de fabrico da fase 10 da placa da bucha.

Fase 10			
Operação	Ref.	Descrição	Ferramenta
1	A	Fresagem das cavidades	Fresa de topo direito ϕ 3
2	B	Fresagem das caixa dos inserts	Fresa de topo direito ϕ 12
3	C	Fresagem do sistema de alimentação	Fresa de topo esférico ϕ 6
4	D	Furação de ponto dos furos para aperto dos inserts	Broca de ponto
5	D	Furação	Broca ϕ 3.3
6	D	Roscagem	Macho de roscar M4
7	E	Fresagem dos rasgos para escape de gases	Fresa de topo direito ϕ 2

Tempo dos percursos (hh:mm:ss) 1:45:44

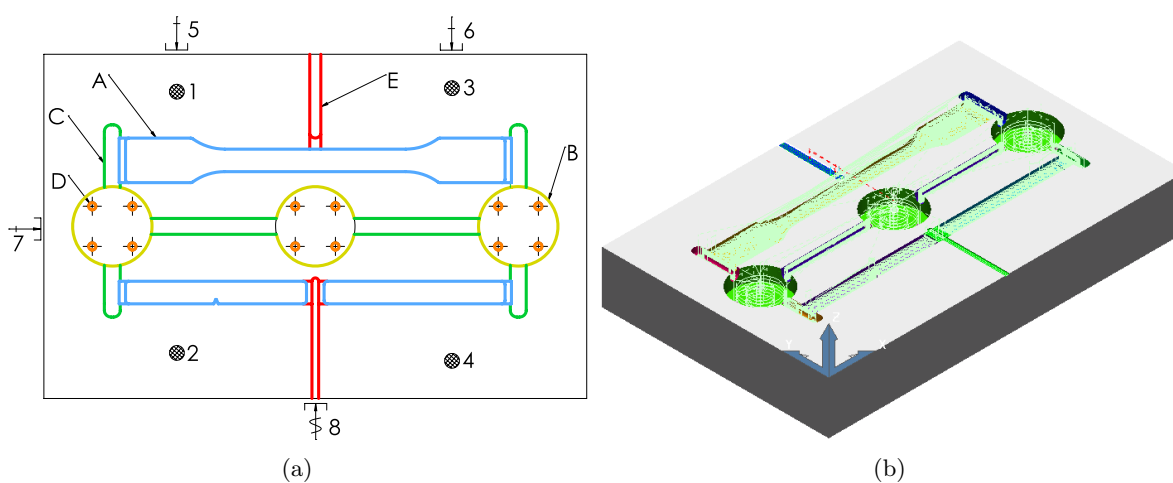


Figura 4.8: (a) Desenho e isostatismo; (b) Resultado da simulação da maquinagem da fase 10 da placa da bucha.

Tabela 4.9: Sequência de fabrico da fase 20 da placa da bucha.

Fase 20			
Operação	Ref.	Descrição	Ferramenta
1	ABCDE	Furação de ponto	Broca de ponto
2	A	Furação dos furos para extratores	Broca ϕ 4.8
3	B	Furação dos furos para extrator	Broca ϕ 6.8
4	C	Furação dos furos para extratores	Broca ϕ 7.8
5	D	Furação dos furos para aperto das placas	Broca ϕ 8.5
6	E	Furação dos furos para pinos de retorno	Broca ϕ 9.8
7	FG	Fresagem de caixas para alojamento dos casquilhos	Fresa de topo direito ϕ 12
8	A	Mandrilagem	Mandril ϕ 5H7
9	B	Mandrilagem	Mandril ϕ 7H7
10	C	Mandrilagem	Mandril ϕ 8H7
11	F	Mandrilagem	Mandril ϕ 20H7
12	D	Roscagem	Macho de roscar M8

Tempo dos percursos (mm:ss) 44:30

4. Maquinagem do molde

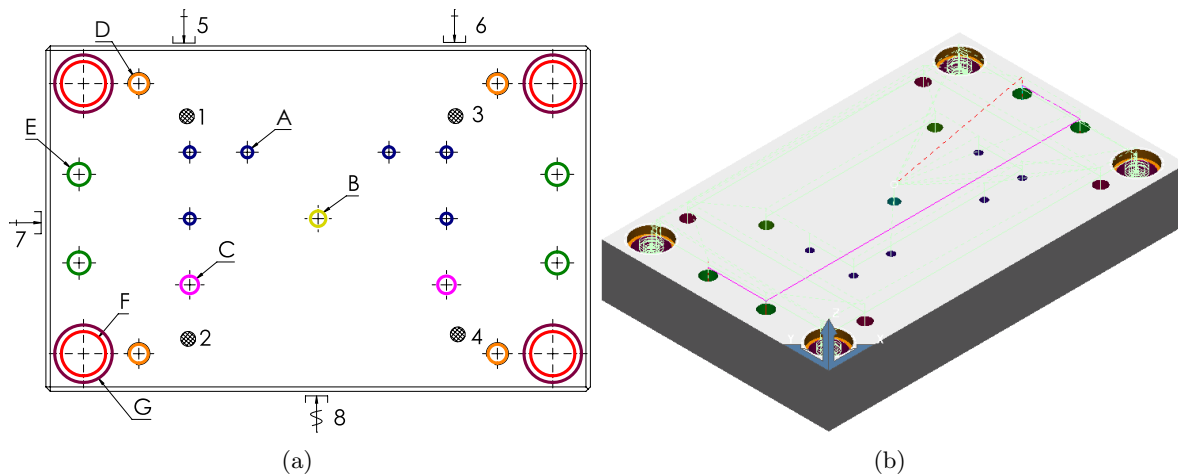


Figura 4.9: (a) Desenho e isostatismo; (b) Resultado da simulação da maquinagem da fase 20 da placa da bucha.

Tabela 4.10: Sequência de fabrico da fase 30 da placa da bucha.

Fase 30			
Operação	Ref.	Descrição	Ferramenta
1	ABC	Furação de ponto	Broca de ponto
2	ABC	Furação profunda	Broca ϕ 8 longa
3	ABC	Furação de pré-furo para roscagem	Broca ϕ 9
4	ABC	Roscagem	Macho M10 \times 1

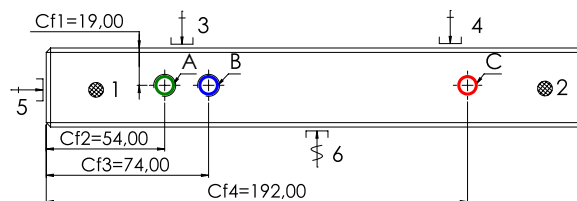


Figura 4.10: Desenho e isostatismo da fase 30 da placa da bucha.

Tabela 4.11: Sequência de fabrico da fase 40 da placa da bucha.

Fase 40			
Operação	Ref.	Descrição	Ferramenta
1	A	Furação de ponto	Broca de ponto
2	A	Furação profunda	Broca ϕ 8 longa
3	A	Furação de pré-furo para roscagem	Broca ϕ 9
4	A	Roscagem	Macho M10 \times 1

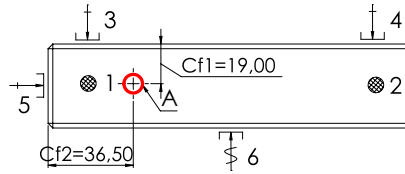


Figura 4.11: Desenho e isostatismo da fase 40 da placa da bucha.

Tabela 4.12: Sequência de fabrico da fase 50 da placa da bucha

Fase 50			
Operação	Ref.	Descrição	Ferramenta
1	A	Furação de ponto	Broca de ponto
2	A	Furação profunda	Broca ϕ 8 longa
3	A	Furação de pré-furo para roscagem	Broca ϕ 9
4	A	Roscagem	Macho M10 \times 1

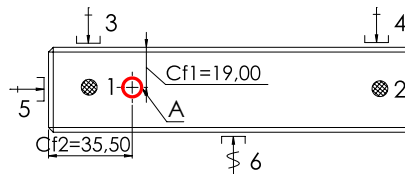


Figura 4.12: Desenho e isostatismo da fase 50 da placa da bucha.

4.4 Insertos

À semelhança da maquinagem dos canais de alimentação da placa da bucha, utilizou-se a mesma estratégia para maquinagem dos canais nos insertos. Foi necessária uma fase adicional no inserto “T” para maquinagem do poço frio. Esta superfície contém um ângulo de 1.5° , assim utilizou-se a estratégia “*constant z finishing*” com um passe vertical (a_p) de 0.2 mm. A caixa para alojar a cabeça dos parafusos é obtida com uma fresa de topo direito através do corte em mergulho (*plunging*).

Tabela 4.13: Sequência de fabrico da fase 10 dos insertos

Fase 10			
Operação	Ref.	Descrição	Ferramenta
1	A	Facejamento	Ferramenta de carbonetos
2	B	Torneamento	Ferramenta de carbonetos
3	C	Sangramento	Sangrador com pastilha de carbonetos

4. Maquinagem do molde

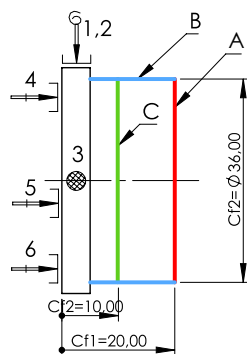


Figura 4.13: Desenho e isostatismo da fase 10 dos insertos.

Tabela 4.14: Sequência de fabrico da fase 20 dos insertos

Fase 20			
Operação	Ref.	Descrição	Ferramenta
1	A	Facejamento da face sangrada	Ferramenta de carbonetos

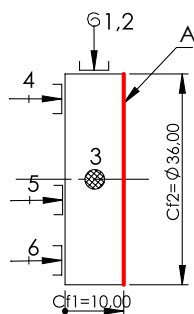


Figura 4.14: Desenho e isostatismo da fase 20 dos insertos.

Tabela 4.15: Sequência de fabrico da fase 30 dos insertos “L”

Fase 30			
Operação	Ref.	Descrição	Ferramenta
1	A	Fresagem do sistema de alimentação	Fresa de topo esférico ϕ 6
2	B	Furação de ponto dos furos para aperto dos insertos	Broca de ponto
3	B	Furação	Broca ϕ 4
4	C	Fresagem de caixas para alojar parafusos	Fresa de topo direito ϕ 8

Tempo dos percursos (mm:ss) 07:00

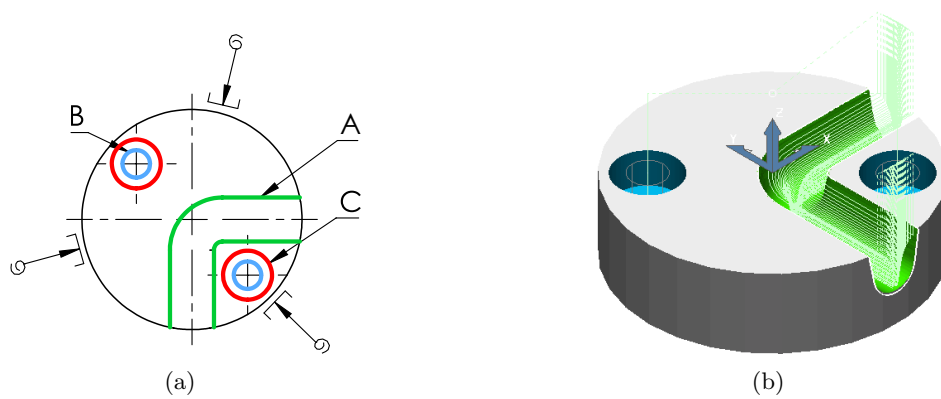


Figura 4.15: (a) Desenho e isostatismo; (b) Resultado da simulação da maquinagem da fase 30 dos inserts “L”.

Tabela 4.16: Sequência de fabrico da fase 30 do inserto “T”.

Fase 30			
Operação	Ref.	Descrição	Ferramenta
1	A	Fresagem do sistema de alimentação	Fresa de topo esférico ϕ 6
2	B	Furação de ponto dos furos para aperto dos inserts	Broca de ponto
3	B	Furação	Broca ϕ 4
4	C	Fresagem de caixas para alojar parafusos	Fresa de topo direito ϕ 8

Tempo dos percursos (mm:ss) 10:40

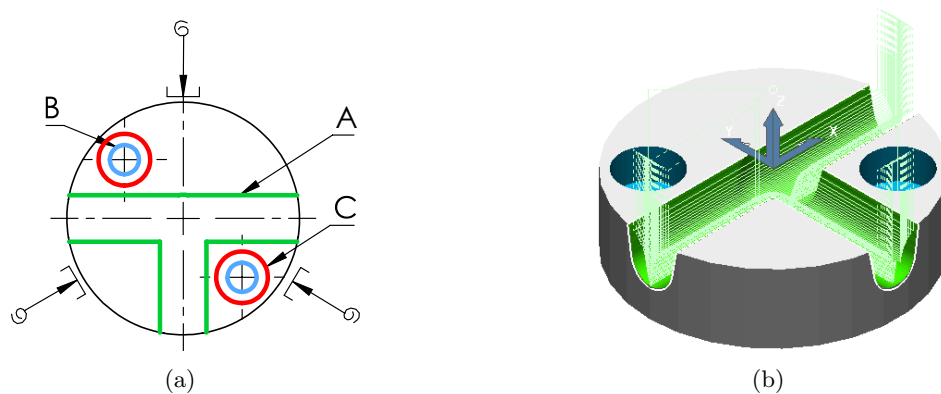


Figura 4.16: (a) Desenho e isostatismo; (b) Resultado da simulação da maquinagem da fase 30 do inserto “T”.

Tabela 4.17: Sequência de fabrico da fase 40 do inserto “T”.

Fase 40			
Operação	Ref.	Descrição	Ferramenta
1	A	Fresagem do sistema de alimentação	Fresa de topo esférico ϕ 6

Tempo dos percursos (mm:ss) 05:55

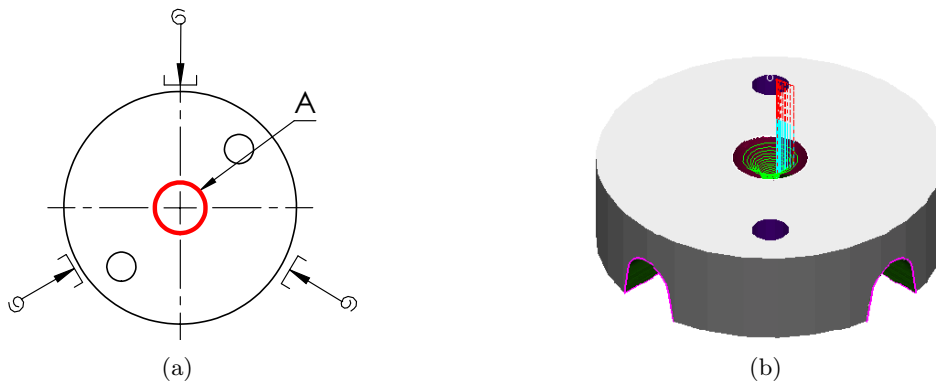


Figura 4.17: (a) Desenho e isostatismo; (b) Resultado da simulação da maquinagem da fase 40 do inserto “T”.

4.5 Calços

Tabela 4.18: Sequência de fabrico da fase 10 dos calços.

Fase 10			
Operação	Ref.	Descrição	Ferramenta
1	A	Furação de ponto	Broca de ponto
2	A	Furação	Broca ϕ 11

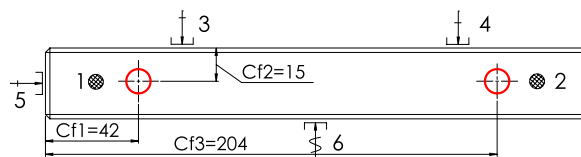


Figura 4.18: Desenho e isostatismo da fase 10 dos calços.

4.6 Placa dos extratores

Tabela 4.19: Sequência de fabrico da fase 10 da placa dos extratores.

Fase 20			
Operação	Ref.	Descrição	Ferramenta
1	ABCDE	Furação de ponto	Broca de ponto
2	A	Furação dos furos para extratores	Broca ϕ 6
3	B	Furação dos furos para extrator	Broca ϕ 8
4	C	Furação dos furos para extratores	Broca ϕ 9
5	D	Furação dos furos para aperto das placas	Broca ϕ 6.8
6	D	Roscagem	Macho M8
6	E	Furação dos furos para pinos de retorno	Broca ϕ 11
7	F	Fresagem de caixas para alojamento das cabeças dos extratores	Fresa de topo direito ϕ 8
8	G	Fresagem de caixas para passagem dos suportes	Fresa de topo direito ϕ 8

Tempo dos percursos (mm:ss) 13:46

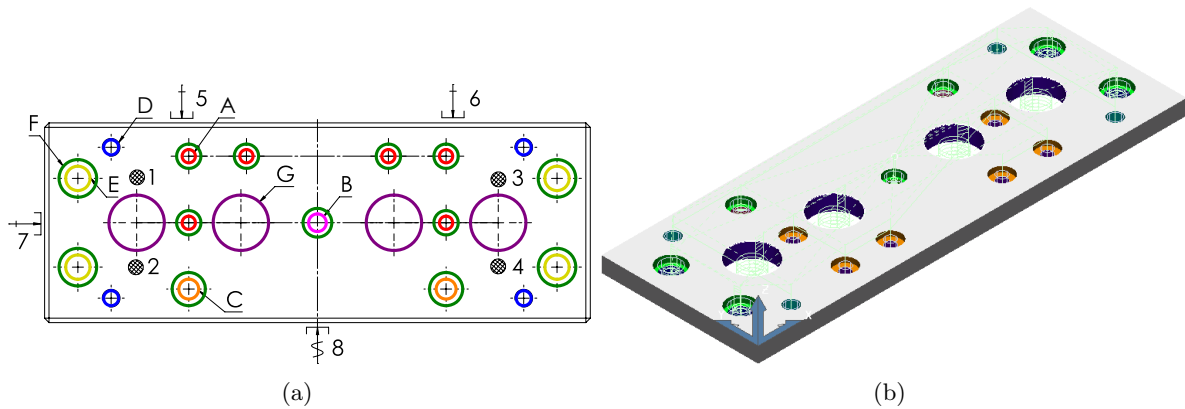


Figura 4.19: (a) Desenho e isostatismo; (b) Resultado da simulação da maquinagem da fase 10 da placa dos extratores.

4.7 Placa de aperto dos extratores

Tabela 4.20: Sequência de fabrico da fase 10 da placa de aperto dos extratores.

Fase 20			
Operação	Ref.	Descrição	Ferramenta
1	A	Fresagem de caixa para alojamento do disco KO	Fresa de topo direito ϕ 8

Tempo dos percursos (mm:ss) 00:35

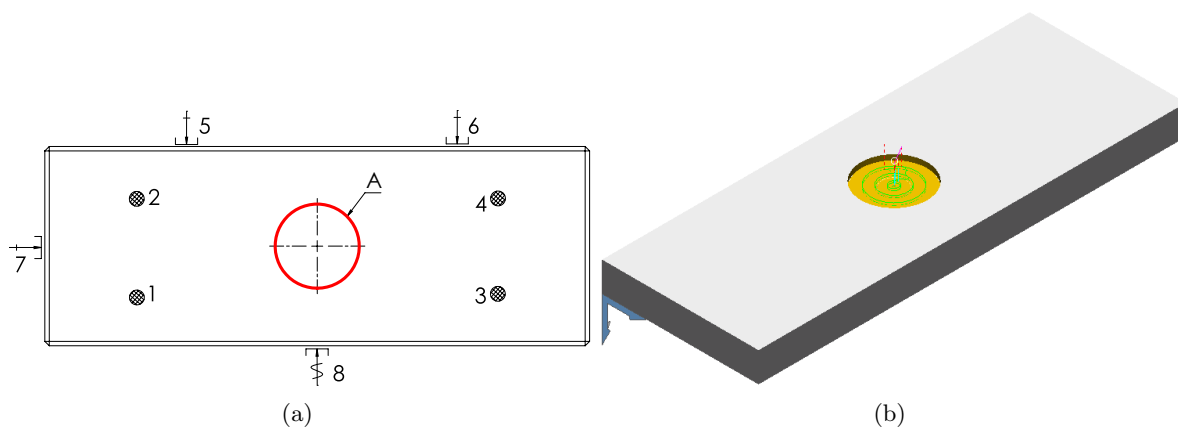


Figura 4.20: (a) Desenho e isostatismo; (b) Resultado da simulação da maquinagem da fase 10 da placa de aperto dos extratores.

Tabela 4.21: Sequência de fabrico da fase 20 da placa de aperto dos extratores.

Fase 20			
Operação	Ref.	Descrição	Ferramenta
1	AB	Furação de ponto	Broca de ponto
2	B	Furação	Broca ϕ 3.3
3	A	Furação	Broca ϕ 9
4	C	Fresagem para de caixa para alojar parafuso de aperto das placas	Fresa de topo direito ϕ 12
5	D	Fresagem de caixas para passagem dos suportes	Fresa de topo direito ϕ 12
6	E	Fresagem de pré-furo para roscagem	Fresa de topo direito ϕ 12
7	B	Roscagem de furo para aperto dos botões de encosto	Macho de rosca M4
8	E	Roscagem de furo para aperto do KO	Macho de rosca M16

Tempo dos percursos (mm:ss) 11:35

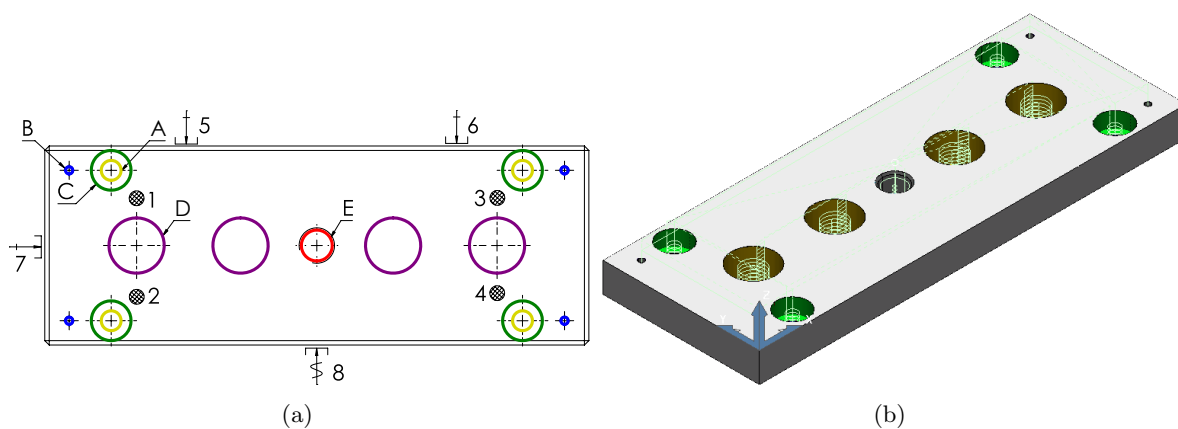


Figura 4.21: (a) Desenho e isostatismo; (b) Resultado da simulação da maquinagem da fase 20 da placa de aperto dos extratores.

4.8 Placa de aperto da extração

Tabela 4.22: Sequência de fabrico da fase 10 da placa de aperto da extração.

Fase 10			
Operação	Ref.	Descrição	Ferramenta
1	AB	Furação de ponto	Broca de ponto
2	B	Furação dos furos para aperto dos suportes	Broca ϕ 6.8
3	A	Furação dos furos para aperto das placas	Broca ϕ 11
4	CD	Fresagem de caixas para alojamento dos parafusos	Fresa de topo direito ϕ 12
5	E	Fresagem de caixas para passagem do KO	Fresa de topo direito ϕ 12
6	F	Chanframento	Fresa de chanfrar a 45°

Tempo dos percursos (mm:ss) 27:26

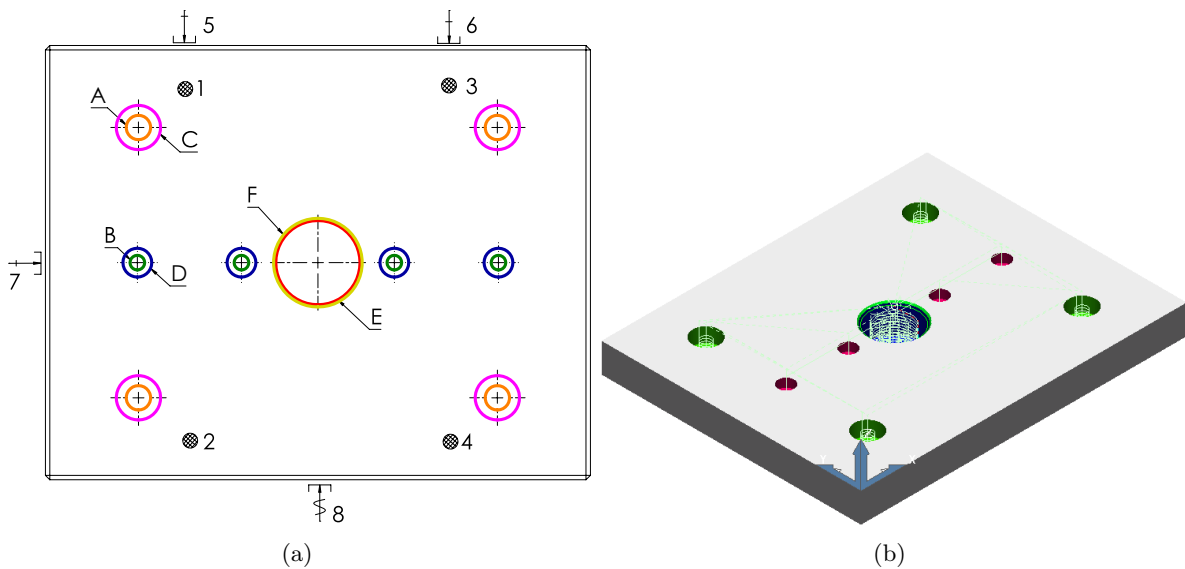


Figura 4.22: (a) Desenho e isostatismo; (b) Resultado da simulação da maquinagem da fase 10 da placa de aperto da extração.

Tabela 4.23: Sequência de fabrico da fase 20 da placa de aperto da extração.

Fase 20			
Operação	Ref.	Descrição	Ferramenta
1	A	Chanframento	Fresa de chanfrar a 45°

Tempo dos percursos (mm:ss) 00:09

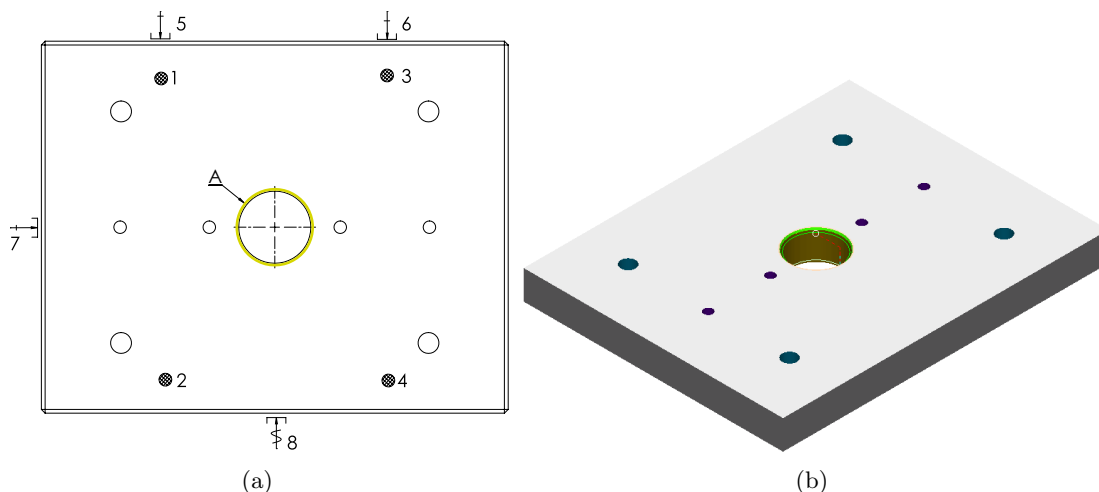


Figura 4.23: (a) Desenho e isostatismo; (b) Resultado da simulação da maquinagem da fase 20 da placa de aperto da extração.

Tabela 4.24: Sequência de fabrico da fase 30 da placa de aperto da extração.

Fase 20			
Operação	Ref.	Descrição	Ferramenta
1	A	Furação de ponto	Broca de ponto
2	A	Furação	Broca ϕ 6.8
3	A	Roscagem	Mocho de roscar M8

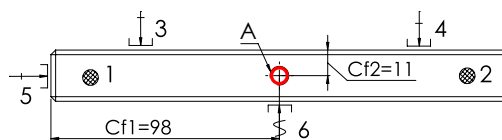


Figura 4.24: Desenho e isostatismo da fase 30 da placa de aperto da extração.

Capítulo 5

Considerações finais

O trabalho descrito neste documento pretende demonstrar a sequência de atividades que antecedem a produção de um molde de injeção de provetes para ensaios mecânicos em termoplásticos. A metodologia utilizada passou pelo cálculo analítico, concepção 3D, estudos reológicos, análise estrutural e programação de máquinas-ferramentas, recorrendo à tecnologia integrada CAD/CAE/CAM. Deste modo, foi possível melhorar a qualidade do projeto e fabrico do molde, assim como apresentar uma validação do seu funcionamento. Neste capítulo faz-se algumas considerações gerais acerca do trabalho realizado.

A geometria da peça, a produtividade desejada e o grau de investimento disponível são os principais aspetos que definem a estrutura do molde. Assim, visto tratarem-se de peças de geometria simples e de um molde para utilização em meio académico, a escolha incidiu num molde em aço de construção de duas placas e canais frios. É a estrutura mais simples, barata e mais fácil de operar.

Verifica-se a importância da execução da modelação 3D do molde para verificação de possíveis interferências entre circuitos de água, extratores, parafusos. Destaca-se a sua importância na disposição das linhas de água, pois não se pode fazer furações muito próximas de outros furos. Assim, foi mais fácil encontrar uma solução de compromisso entre o ideal e o que é possível realizar no espaço disponível.

A análise reológica é uma ferramenta de grande potencial no auxílio ao projeto do molde. Esta permite validar ou corrigir as considerações sobre a localização e tipo de ataque, escape de gases e canais de refrigeração. Além disso, permite verificar os defeitos e empenos, assim com obter um conjunto de valores indicativos para a seleção da máquina e condições de processamento.

A análise estrutural serviu, assim com a análise reológica, para validar o projeto do molde. Obtiveram-se deflexões máximas no plano perpendicular ao plano da junta no ordem de 0.0045 mm quando são admissível deflexões de 0.02 mm, de forma a que a moldação não crie rebarba.

Na maquinagem de superfícies complexas, o recurso a softwares CAM é indispensável, não só permitem mais flexibilidade na programação das trajetórias de maquinagem, como possibilita visualizar em ambiente 3D as trajetórias da ferramenta e a evolução da peça desde

o bloco até à peça final.

Um molde é uma ferramenta que envolve grandes custos. A seleção dos componentes foi criteriosa e fator económico foi sempre tido em conta. Todos os componentes que constituem o molde são normalizados e estão comercialmente disponíveis. Foram selecionados produtos de elevada qualidade dos principais fabricantes que abastecem a indústria de moldes (HASCO, Meusburger). Assim, obteve-se um orçamento para as matérias-primas do molde de aproximadamente 600 €.

Uma vez que está concluído todo projeto do molde, uma proposta de trabalhos futuros seria adquirir financiamento e fazer a produção do molde.

Bibliografia

- [ASTM D3641, 2002] ASTM D3641, *Standard Practice for Injection Molding Test Specimens of Thermoplastic Molding and Extrusion Materials*. West Conshohocken, PA : ASTM International, 2002.
- [Brito *et al.*, 2003] BRITO, A. [*et al.*] - *Manual do projetista para moldes de injeção de plástico*. 1.^a ed. Marinha Grande : CENTIMFE, 2003. ISBN 9729887217.
- [Completo *et al.*, 2009] COMPLETO, A.; FESTAS, A.; DAVIM, J. - *Tecnologia de fabrico*. 1.^a ed. Porto : Publindústria - Edições técnicas, 2009. 279 p. ISBN 978-972-8953-31-7
- [Capela, 2010] CAPELA, C. - *Processamentos de plásticos e materiais compósitos: comportamento mecânico de componente em serviço*. [Em linha]. Leiria : Instituto politécnico de Leiria, 2010. Relatório de candidatura a título de especialista. Disponível em WWW:<URL:<http://hdl.handle.net/10400.8/2690>>.
- [Davim *et al.*, 2004] DAVIM, J.; MAGALHÃES, A. - *Ensaios Mecânicos e Tecnológicos*. 2.^a ed. Porto : Publindústria, 2004. 385 p. ISBN 9729872651.
- [Fernandes *et al.*, 2013] FERNANDES, C. [*et al.*] - Modeling of plasticating injection molding - experimental assessment. *International Polymer Processing* [Em linha]. 29:5 (2013) 558-569. [Consult. 1 jun. 2018]. Disponível em WWW:<URL:https://www.researchgate.net/publication/267981379_Modeling_of_Plasticating_Injection_Molding_-_Experimental_Assessment>. ISSN 0930-777X.
- [Fischer, 2003] FISCHER, J. - *Handbook of Molded Part Shrinkage and Warpage*. 1.^a ed. New York : Plastics Design Library, 2003. 263 p. ISBN 9781884207723.
- [Garcia *et al.*, 2012] GARCIA, A.; SPIM, J.; SANTOS, C. - *Ensaios dos materiais*. 2.^a ed. Rio de Janeiro : LTC, 2012. ISBN 9788521620679.
- [Glanvill *et al.*, 1965] GLANVILL, A.; DENTON, E. - *Injection-mould design fundamentals*. 1.^a ed. New York : Industrial Press, 1965.
- [Harada, 2012] HARADA, J. - *Moldes para Injeção de Termoplásticos: Projeto e Princípios Básicos*. 1.^a ed. São Paulo : Artliber, 2004. 308 p. ISBN 8588098180.

-
- [Hassan *et al.*, 2010] HASSAN, H. [*et al.*] - 3D study of cooling system effect on the heat transfer during polymer injection molding. *International Journal of Thermal Sciences* [Em linha]. 49:1 (2010) 161-169. [Consult. 18 fev. 2018]. Disponível em WWW:<URL:<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1290072909001537?via%3Dihub>>. ISSN 12900729.
- [Hopkinson *et al.*, 1999] HOPKINSON, N.; DICKENS, P. - Study of ejection forces in the AIM™ process. *Materials & Design* [Em linha]. 20:2-3 (1999) 99-105. [Consult. 5 mar. 2018]. Disponível em WWW:<URL:<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306999000151?via%3Dihub>>. ISSN 0261-3069.
- [ISO 178, 2001] ISO 178 - *Plastics – Determination of flexural properties*. [S.l.] : ISO, 2001.
- [ISO 179-1, 2010] ISO 179-1 - *Plastics – Determination of Charpy Impact Properties – Part 1: Non-Instrumented Impact Test*. [S.l.] : ISO, 2010.
- [ISO 179-2, 2010] ISO 179-2 - *Plastics – Determination of Charpy Impact Properties – Part 2: Instrumented Impact Test*. [S.l.] : ISO, 1997.
- [ISO 180, 2000] ISO 180 - *Plastics – Determination of Izod impact strength*, [S.l.] : ISO, 2000.
- [ISO 527-1, 1993] ISO 527-1 - *Plastics – Determination of tensile properties – Part 1: General principles*. [S.l.] : ISO, 1993.
- [ISO 527-2, 1993] ISO 527-2 - *Plastics – Determination of tensile properties – Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics*. [S.l.] : ISO, 1993.
- [ISO 10350-1, 2007] ISO 10350-1 - *Plastics – Acquisition and presentation of comparable single-point data – Part 1: Moulding materials*. [S.l.] : ISO, 2007.
- [Lanxess, 2007] LANXESS - *Engineering Plastics - Material Selection*. [Em linha]. Pittsburgh, USA : [s.n.]. [Consult. 1 jun. 2018]. Disponível em WWW:<URL:https://techcenter.lanxess.com/scp/americas/en/docguard/Material_Selection_Guide.pdf?docId=77017>.
- [Liang *et al.*, 1996] LIANG, J. Z.; NESS, J. N. - The calculation of cooling time in injection moulding. *Journal of Materials Processing Technology*. [Em linha]. 57:1-2 (1996) 62-64. [Consult. 10 fev. 2018]. Disponível em WWW:<URL:<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0924013695020446>>. ISSN 09240136.
- [Menges *et al.*, 2001] MENGES, G.; MICHAELI, W.; MOHREN, P. - *How to Make Injection Molds*. 3.^a ed. Munich : Hanser Publishers, 2001. 632 p. ISBN 978-3-446-21256-5.
- [Moldflow, 2018] MOLDFLOW - *Packing profiles* [Em linha]. [s.l.] : AutodeskHelp, 2018 [Consult. 18 abr. 2018]. Disponível em WWW:<URL:<https://knowledge.autodesk.com/support/moldflow-insight/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2019/ENU/MoldflowInsight-Setup/files/GUID-927CDD74-5892-4FA5-85D3-E0354F8A5654-htm.html>>.
-

- [Moldflow, 2017] MOLDFLOW - *Coolant inlet temperature* [Em linha]. [s.l.] : AutodeskHelp, 2017 [Consult. 15 abr. 2018]. Disponível em WWW:<URL:<https://knowledge.autodesk.com/support/moldflow-insight/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2017/ENU/MoldflowInsight/files/GUID-COD19027-A6C6-467D-98A8-C1483747B3AD-htm.html>>.
- [Oliveira, 2018] OLIVEIRA, M. - Material de apoio ao estudo. *UC de Projeto e fabrico de molde e ferramentas*. Aveiro, 2018.
- [Osswald *et al.*, 2002] OSSWALD, T. A.; TURNG, L.-S.; GRAMANN, P. J. - *Injection Molding Handbook*. 1.^a ed. New York : Hanser Publishers, 2002. 748 p. ISBN 1-56990-318-2.
- [Pinto, 2012] PINTO, R. - *Injeção e Caracterização do Comportamento Mecânico de Polímeros Termoplásticos*. [Em linha]. Coimbra : Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, 2012. 84 p. Dissertação de mestrado. Disponível em WWW:<URL:http://files.isec.pt/DOCUMENTOS/SERVICOS/BIBLIO/Teses/Tese_Mest_Ricardo-Pinto.pdf>.
- [Polimold, 2018] POLIMOLD - *Catálogo de porta molde de 2 placas*. [Em linha]. [Consult. 7 fev. 2018]. Disponível em WWW:<URL:<https://www.polimold.com.br/pt/produtos/injecao-plastica/porta-molde/2-placas>>.
- [Pontes *et al.*, 2005] PONTES, A. J. [*et al.*] - Ejection force of tubular injection moldings. Part II: A prediction model. *Polymer Engineering & Science* [Em linha]. 45:3 (2005) 325-332. [Consult. 3 fev. 2018]. Disponível em WWW:<URL:<http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/12568>>. ISSN 0032-3888.
- [Ramada aços, 2018] RAMADA AÇOS - *Aços para moldes de injeção de plástico* [Em linha] [Consult. 8 mar. 2018]. Disponível em WWW:<URL:<http://www.ramada.pt/pt/produtos/acos/acos-para-moldes.html>>.
- [Rosato *et al.*, 2000] ROSATO, D. V. [*et al.*] - *Injection Molding Handbook*. 3.^a ed. Massachusetts : Kluwer Academic Publishers, 2000. 1460 p. ISBN 0-7923-8619-1.
- [Sandvik Coromant, 2018] SANDVIK COROMANT - *Machining formulas and definitions* [Em linha]. [Consult. 20 mar. 2018]. Disponível em WWW:<URL:<https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/machining-formulas-definitions/Pages/default.aspx>>.
- [Santos *et al.*, 2015] SANTOS, A.; ANUNCIACÃO, L.; CAPELA, C. - Caracterização mecânica de compostos de matriz polimerica com fibras curtas. *O molde* [Em linha]. 107 (2015) 40-50. [Consult. 8 mai. 2018]. Disponível em WWW:<URL:https://issuu.com/cefamol/docs/revistamold_107>.
- [Santos *et al.*, 2016] SANTOS, A.; ANUNCIACÃO, L.; CAPELA, C. - Moldes de injeção em material polimérico obtidos por impressão 3D e por maquinaria CNC. *O molde* [Em

- linha]. 110 (2016) 29-33. [Consult. 8 mai. 2018]. Disponível em WWW:<URL:https://issuu.com/cefamol/docs/revistamold_110-prova_14_vers__ofin>.
- [Shoemaker, 2006] SHOEMAKER, J. - *Moldflow design guide: a resource for plastics engineers*. 1.^a ed. Massachusetts : Hanser Verlag, 2006. 346 p. ISBN 978-3-446-40640-7
- [Teixeira-Dias *et al.*, 2010] TEIXEIRA-DIAS, F. [*et al.*] - *Método dos Elementos Finitos - Técnicas de Simulação Numérica em Engenharia*. 1.^a ed. Lisboa : ETER - Edições técnicas e Profissionais, 2010. 457 p. ISBN 978-972-8480-25-7

Apêndice A

Cálculos analíticos para dimensionamento dos sistemas funcionais

A.1 Sistema de controlo de temperatura

Tempo de arrefecimento

t_c (s)	32.40
s (m)	0.0042
α_{eff} (m ² /s)	80×10^{-9}
θ_{inj} (K)	230+273
θ_{ext} (K)	88+273
θ_{mol} (K)	50+273

$$t_c = \frac{s^2}{\alpha_{eff} \pi^2} \ln \left[\frac{2\sqrt{2}}{\pi} \left(\frac{\theta_{inj} - \theta_{mol}}{\theta_{ext} - \theta_{mol}} \right) \right]$$

Calor fornecido pelo fundido

\dot{Q}_{PI} (W)	162.79
m (kg)	0.0227
\bar{c}_p (J/kg · K)	1635.6 [Moldflow]

$$\dot{Q}_{PI} = \frac{m \times (h_{inj} - h_{ext})}{t_c}$$

$$h_{inj} - h_{ext} = \bar{c}_p \times (\theta_{inj} - \theta_{ext})$$

Calor perdido por condução

\dot{Q}_{cond} (W)	-23.09
A_{fix} (m ²)	0.0924
β (W/m ² · K)	100
θ_{amb}	20+273

$$\dot{Q}_{cond} = 0.1^1 \times A_{fix} \times \beta \times (\theta_{amb} - \theta_{mol})$$

¹Uso de placas isolantes

Calor perdido por convecção

\dot{Q}_{conv} (W)	-31.260	
A_{lat} (m ²)	0.1302	$\dot{Q}_{conv} = A_{lat} \times h \times (\theta_{amb} - \theta_{mol})$
h (W/m ² ·K)	8	

Calor perdido por radiação

\dot{Q}_{rad} (W)	-5.643	
A_{lat} (m ²)	0.1302	$\dot{Q}_{rad} = A_{lat} \times \varepsilon \times \sigma \times \left[\left(\frac{\theta_{amb}}{100} \right)^4 - \left(\frac{\theta_{mol}}{100} \right)^4 \right]$
ε	0.25	
σ (W/m ² ·K ⁴)	5.77	

Calor retirado pelo fluido de refrigeração

\dot{Q}_{TM} (W)	-108.01	$\dot{Q}_{TM} = -\dot{Q}_{PI} - \dot{Q}_{Amb}$
\dot{Q}_{PI} (W)	162.79	
\dot{Q}_{Amb} (W)	-54.78	$\dot{Q}_{Amb} = \dot{Q}_{cond} + \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad}$

Caudal de água necessário para o circuito

\dot{m} (kg/s)	0.065	
Q_{TM} (W)	-108.01	$\dot{m} = \frac{ \dot{Q}_{TM} }{c_p \times \Delta\theta}$
$c_{p@50C}$ (J/kg·°C)	4186	
$\Delta\theta$ (°C)	0.4	

Diâmetro das linhas de água

d (m)	8.19×10^{-3}	
\dot{V} (m ³ /s)	6.45×10^{-5}	$d = \frac{4 \times \dot{V}}{\pi \times Re \times \nu}$
Re	10000	
ν (m ² /s)	1.003×10^{-6}	

A.2 Sistema de extração

Força de extração

α (1/°C)	9.7×10^{-5}
θ_m (°C)	230
θ_{ext} (°C)	88
E (MPa)	2340
μ	0.27
ν	0.40

Provete tração

F_e (N)	1205,670
D (mm)	122,921
A (mm ²)	1621,914

$$F_e = \frac{\alpha(\theta_m - \theta_{ext}) \times D \times E \times A \times \mu}{D \left[\frac{D}{2t} - \left(D \times \frac{\gamma}{4t} \right) \right]}$$

Provetes impacto/flexão

F_e (N)	274,971
D (mm)	58,702
A (mm ²)	774,564

Área de extratores necessária para extração

Provete tração

A (mm ²)	120,57
F_e (mm)	1205,670
P (MPa)	40
S	3

$$P = \frac{S \times F_e}{A}$$

Provetes impacto/flexão

A (mm ²)	27,50
F_e (N)	274,971
P (MPa)	40
S	3

Diâmetro dos extratores

Considerando a colocação de 2 extratores por provete obtém-se:

Provete tração

d (mm)	7,587
A (mm ²)	120,57

$$d = \sqrt{\frac{2A}{\pi}}$$

Provetes impacto/flexão

d (mm)	5,124
A (mm ²)	27,50

A.3 Sistema de alimentação

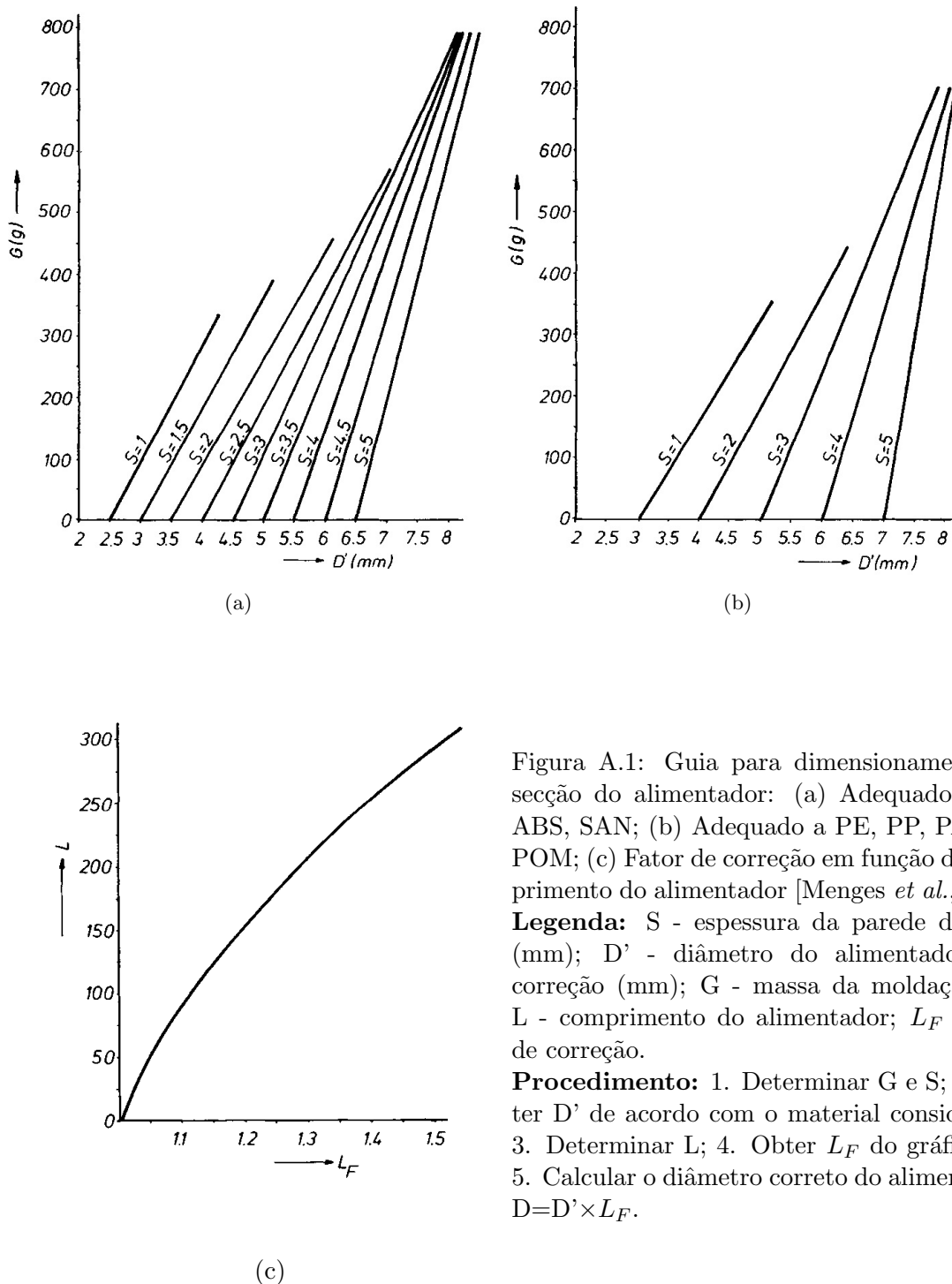


Figura A.1: Guia para dimensionamento da secção do alimentador: (a) Adequado a PS, ABS, SAN; (b) Adequado a PE, PP, PA, PC, POM; (c) Fator de correção em função do comprimento do alimentador [Menges *et al.*, 2001].

Legenda: S - espessura da parede da peça (mm); D' - diâmetro do alimentador sem correção (mm); G - massa da moldação (g); L - comprimento do alimentador; L_F - fator de correção.

Procedimento: 1. Determinar G e S; 2. Obter D' de acordo com o material considerado; 3. Determinar L; 4. Obter L_F do gráfico (c); 5. Calcular o diâmetro correto do alimentador: $D=D' \times L_F$.

Apêndice B

Análise estrutural

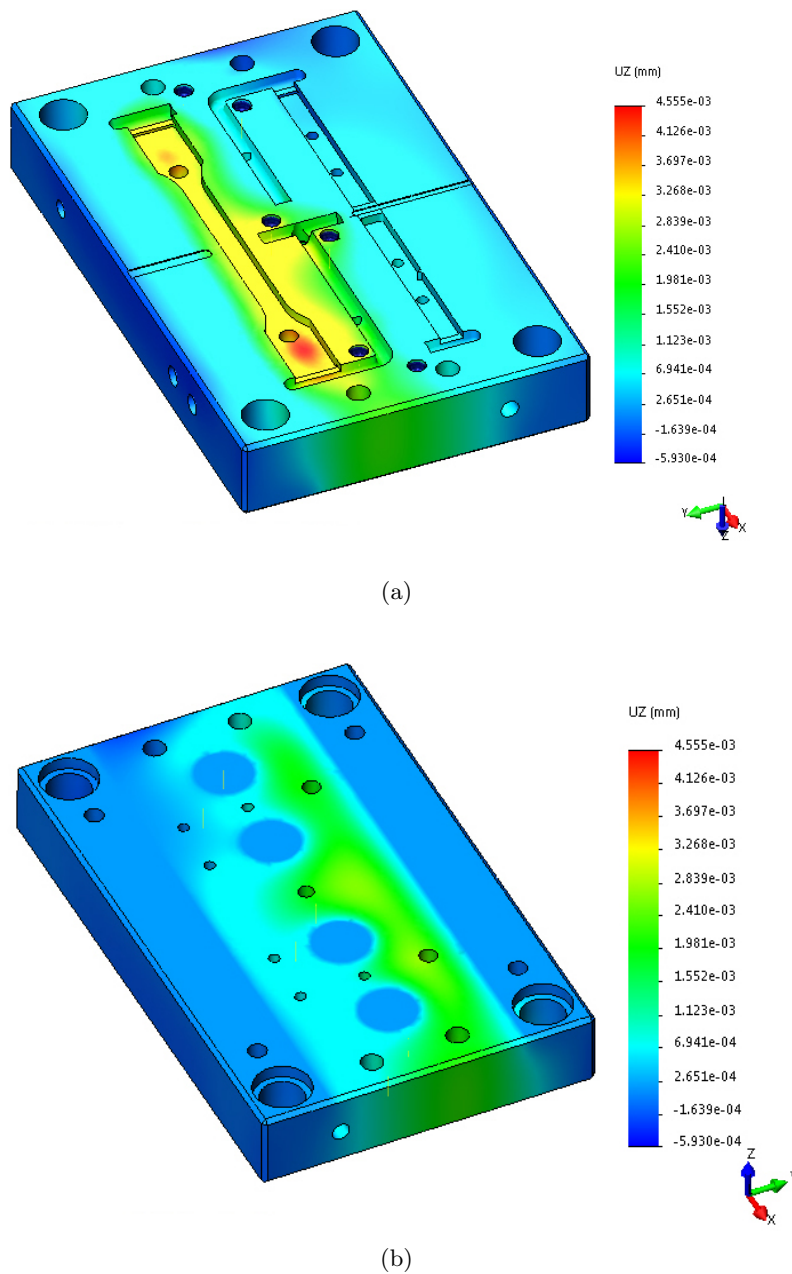


Figura B.1: Foi efetuada uma análise linear estática no Solidworks Simulation, um pacote de análise estrutural através do método dos elementos finitos totalmente integrado no Solidworks. O modo de injeção selecionado foi o do provete de tração, pois é o que apresenta maiores pressões na zona moldante. De forma a verificar o efeito da pressão de injeção na deflexão da placa da bucha, reproduziu-se no Solidworks Simulation, o perfil de pressões do estudo de enchimento realizado no Moldflow. Nas figuras (a) e (b) mostra-se a deflexão da placa no plano perpendicular ao plano da junta.

Apêndice C

Estimativa de custos de matérias-primas

Tabela C.1: Custos associados a matérias-primas para o molde.

Descrição	Qtd.	Referência fornecedor	material/fabricante	Custo unitário [€]	Custo [€]
Placa	2	P1/196×246×22/1.1730		46,20	92,20
	2	P1/156×246×36/1.1730		58,76	117,52
	2	P/032×246×46/1.1730	HASCO	31,63	63,26
	1	P/090×246×9/1.1730		31,35	31,35
	1	P/090×246×17/1.1730		37,64	37,64
Guia	4	Z03/36×14×20		7,09	28,36
Casquilho	4	Z11/36×14		19,33	41,32
Anel de centragem	1	K1000/100×12	HASCO	27,11	27,11
Bucha de injeção	1	Z51/18×36×4.5×40		41,80	41,80
Botão de encosto	4	Z55/18×3		1,76	7,04
Suporte	4	Z57/25×46		8,64	34,56
Extrator cilíndrico	4	Z40/10×80	HASCO	5,75	23,00
	6	Z40/5×63		2,98	17,88
	2	Z40/8×63		3,69	7,38
	1	Z40/7×100		4,44	4,44
Plug	4	E2000/9/10		0,70	2,8
Olhal	1	E1270/8	Meusbürger	1,40	1,40
Tampão de canal	6	E2080/8/10		0,40	2,40
Paraf. cab. cilíndrica	4	M10×70		0,50	2,00
	4	M10×25		0,23	0,92
	4	M8×16		0,10	0,40
	4	M6×25	ISO 4762/12.9	0,07	0,28
	3	M5×16		0,05	0,15
	6	M4×12		0,03	0,18
Paraf. cab. cônica	4	M4×10	ISO 4762/12.9	0,08	0,32

Custo total de matérias primas 585,71 €

Apêndice D

Ferramentas de corte selecionadas

Tabela D.1: Referência das ferramentas de corte.

Ferramenta	Referência	Material/ Fabricante
Fresa de topo direito ϕ 2	1P330-0200-XA 1620	Metal duro/ Sandvik
Fresa de topo direito ϕ 3	1P330-0300-XA 1620	
Fresa de topo direito ϕ 8	1P330-0800-XA 1620	
Fresa de topo direito ϕ 12	1P260-1200-XA 1620	
Fresa de topo esférico ϕ 6	1B230-0600-XA 1630	
Fresa de chanfrar a $45^\circ \phi$ 6	WZF 15234/ 6	Metal duro/ Meusburger
Broca de ponto ϕ 2.5	WZB 31514/ 2,50	Aço rápido/ Meusburger
Broca ϕ 3.3	WZB 30213/ 3,3	
Broca ϕ 4	WZB 30213/ 4	
Broca ϕ 4.2	WZB 30213/ 4,2	
Broca ϕ 4.8	WZB 30213/ 4,8	
Broca ϕ 6	WZB 30213/ 6	
Broca ϕ 6.8	WZB 30213/ 6,8	
Broca ϕ 7.8	WZB 30213/ 7,8	
Broca ϕ 8	WZB 30213/ 8	
Broca ϕ 8 longa	WZB 30217/ 8	
Broca ϕ 8.5	WZB 30213/ 8,5	
Broca ϕ 9	WZB 30213/ 9	
Broca ϕ 9.8	WZB 30213/ 9,8	
Broca ϕ 11	WZB 30213/ 11	
Mandril ϕ 5H7	41040000500	Aço rápido/ Hepyc
Mandril ϕ 7H7	41040000700	
Mandril ϕ 8H7	41040000800	
Mandril ϕ 10H7	41040001000	
Mandril ϕ 20H7	41040002000	
Macho de roscar M4	E207M4	Aço rápido/ Sandvik
Macho de roscar M5	E207M5	
Macho de roscar M8	E207M8	
Macho de roscar M10	E207M10	
Macho de roscar M10 \times 1	T300-XM100AB-M10X100C150	
Macho de roscar M16	T300-XM103AA-M16 C150	

Apêndice E

Desenhos de definição

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

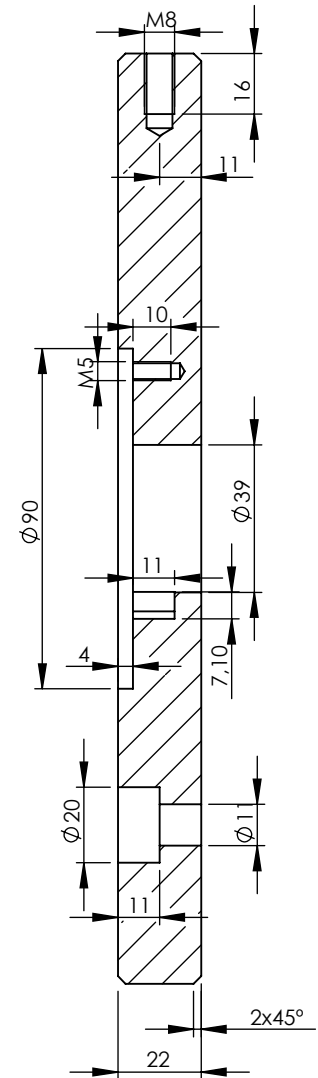
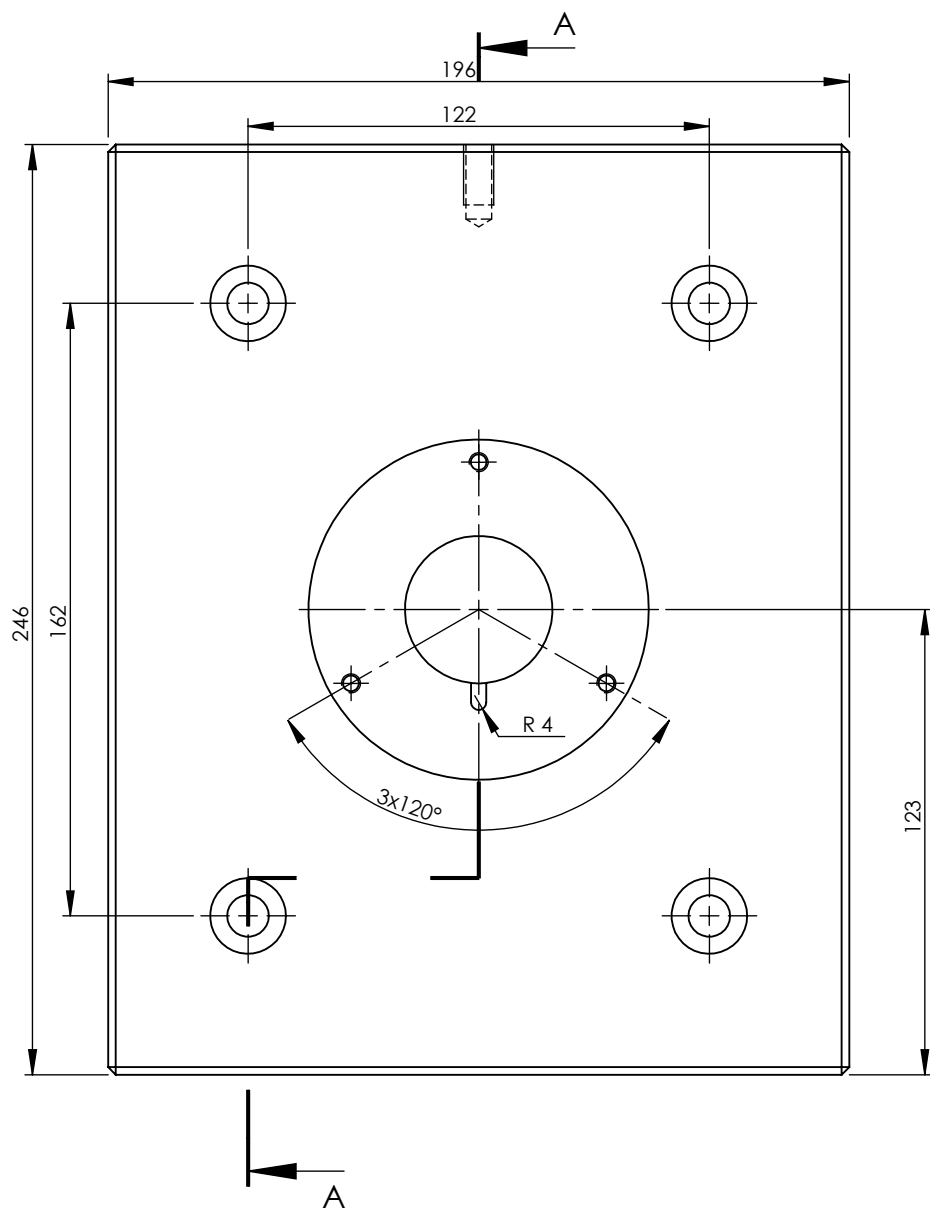
C

B

B

A

A



A-A

	NOME	DATA
PROJETOU	JCarvalho	2018
DESENHOU	JCarvalho	2018
VERIFICOU		
HOMOLOGOU		
MATERIAL:	1.1730	

Universidade de Aveiro
Departamento de engenharia mecânica

76

Placa de aperto da injeção		ESCALA: 1:2
	A4	

TOLERÂNCIAS GERAIS: ISO 2768-mk

4

3

2

1

4 3 2 1

F

F

E

E

D

D

C

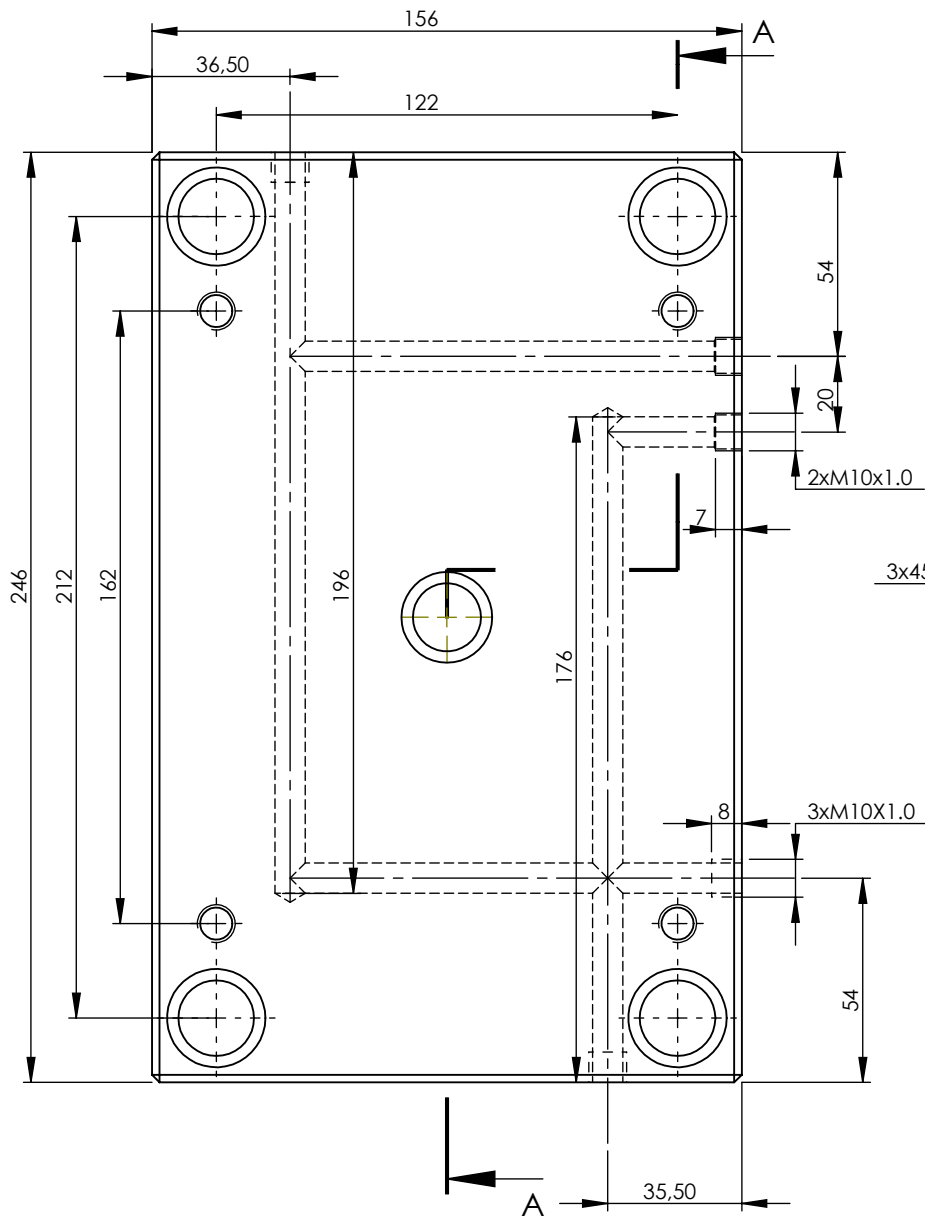
C

B

B

A

A

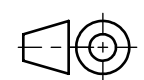


A-A

	NOME	DATA
PROJETOU	JCarvalho	2018
DESENHOU	JCarvalho	2018
VERIFICOU		
HOMOLOGOU		
MATERIAL:	1.1730	
77		

Universidade de Aveiro
Departamento de engenharia mecânica

Placa da cavidade



A4

ESCALA:
1:2

TOLERÂNCIAS
GERAIS:
ISO 2768-mk

4 3 2 1

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

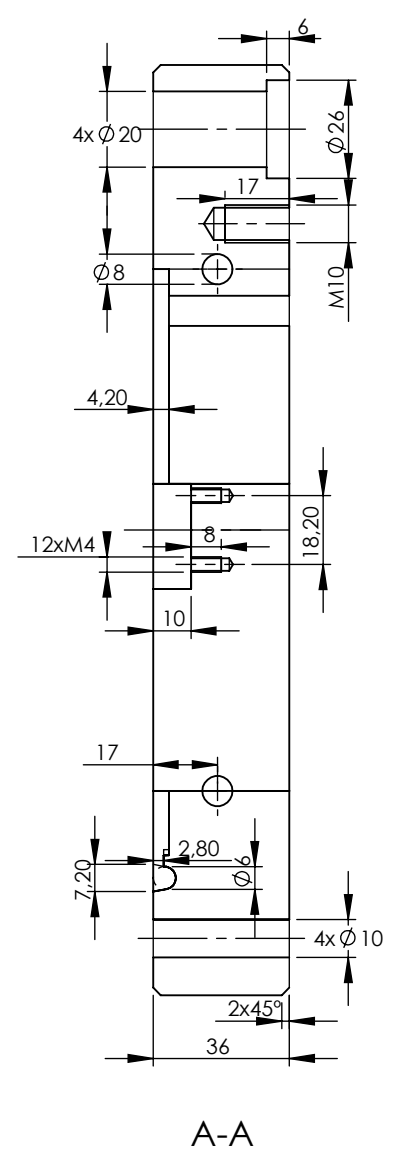
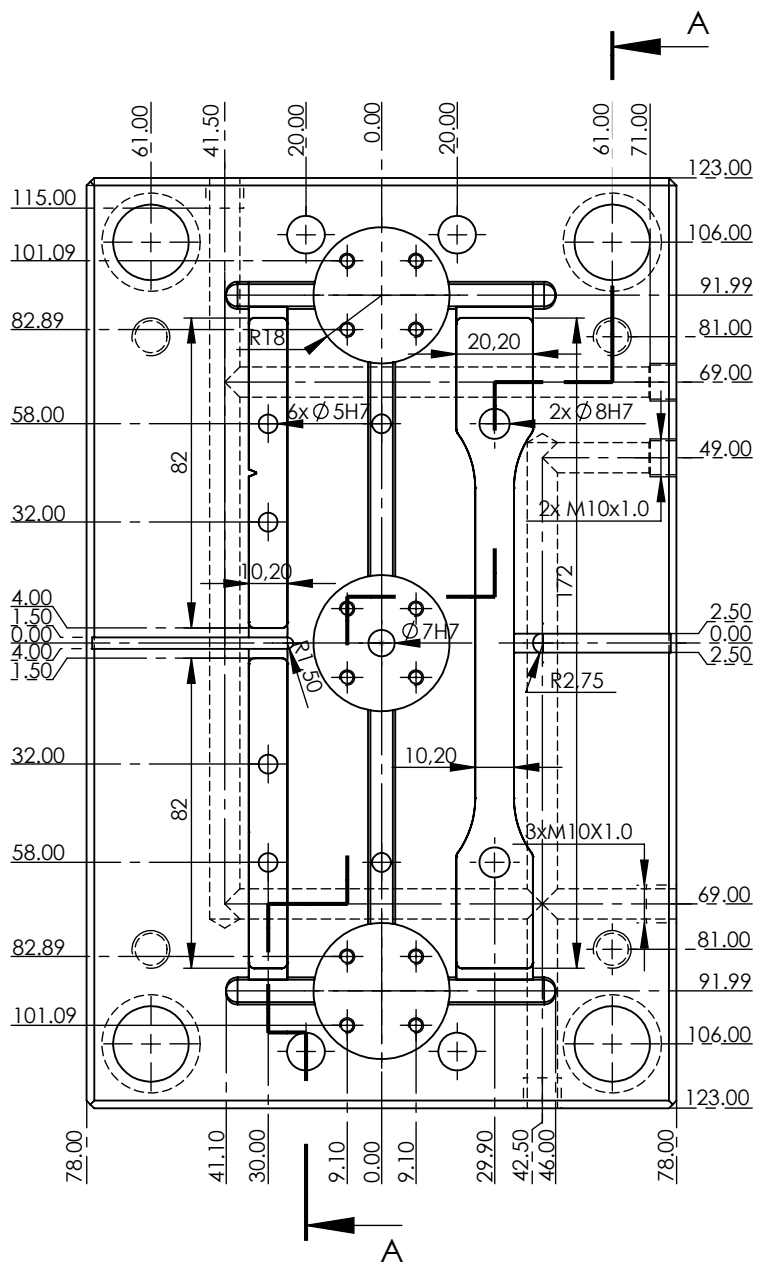
C

B

B

A

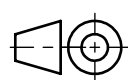
A



	NOME	DATA
PROJETOU	JCarvalho	2018
DESENHOU	JCarvalho	2018
VERIFICOU		
HOMOLOGOU		
MATERIAL:	1.1730	
	78	

Universidade de Aveiro
Departamento de engenharia mecânica

Placa da bucha



A4

ESCALA:
1:2

TOLERÂNCIAS
GERAIS:
ISO 2768-mk

4

3

2

1

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

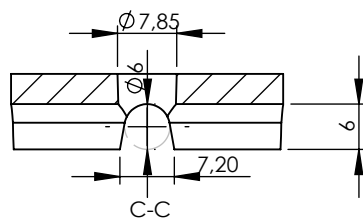
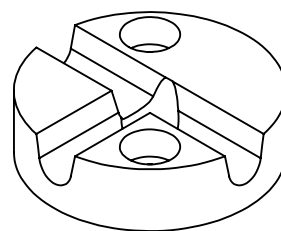
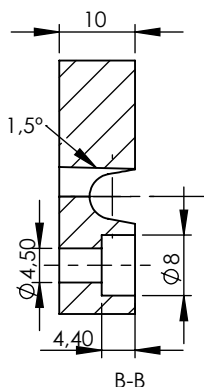
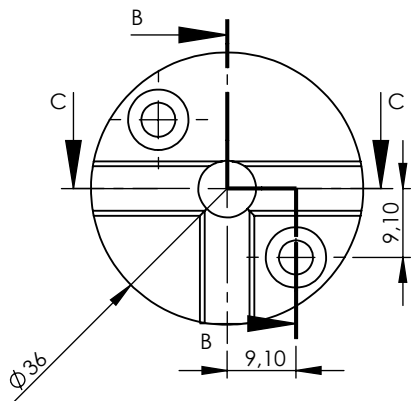
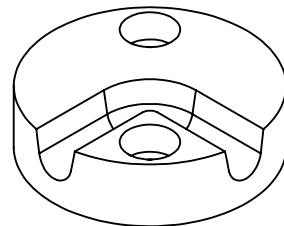
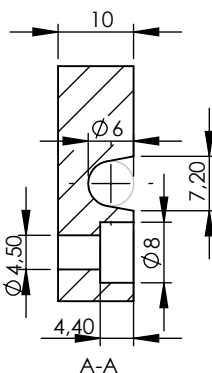
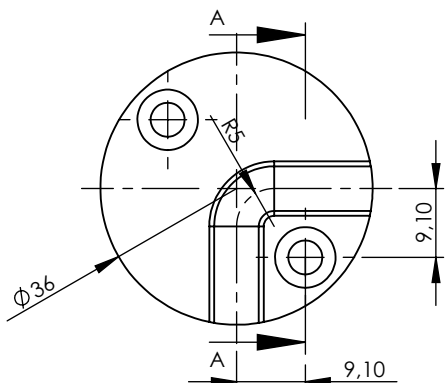
C

B

B

A

A



	NOME	DATA
PROJETOU	JCarvalho	2018
DESENHOU	JCarvalho	2018
VERIFICOU		
HOMOLOGOU		
MATERIAL:	1.1730	
79		

Universidade de Aveiro
Departamento de engenharia mecânica

Insertos		ESCALA: 1:1	TOLERÂNCIAS GERAIS: ISO 2768-mk
A4			

4

3

2

1

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

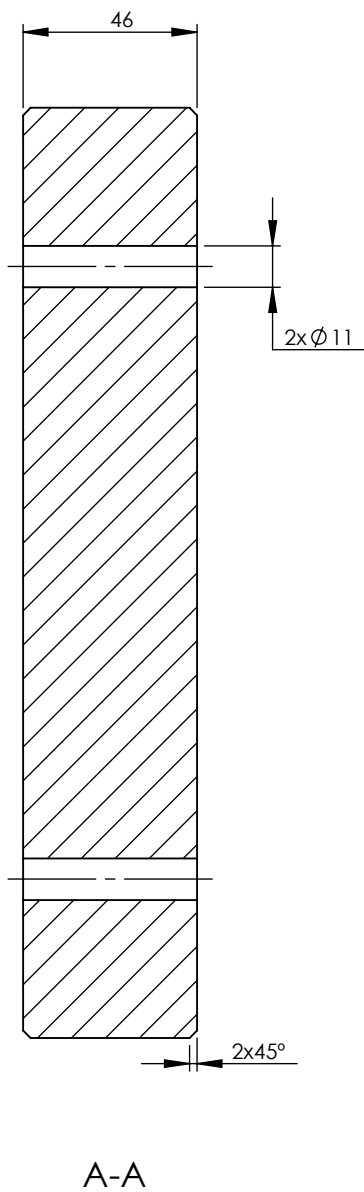
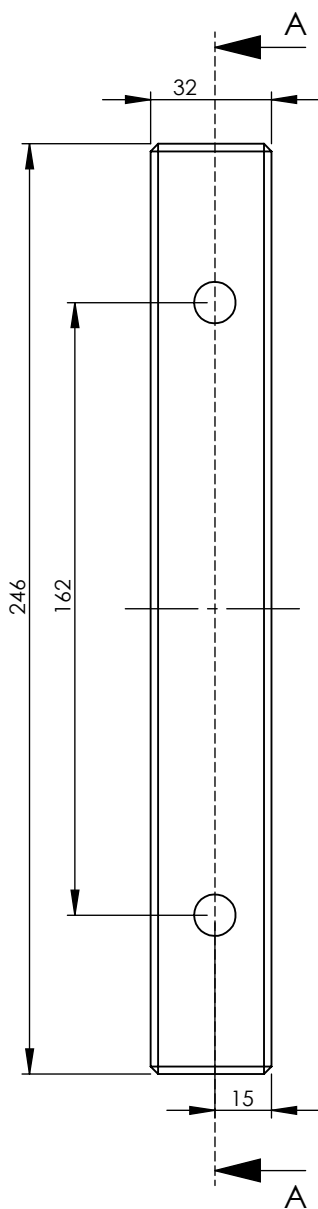
C

B

B

A

A



	NOME	DATA
PROJETOU	JCarvalho	2018
DESENHOU	JCarvalho	2018
VERIFICOU		
HOMOLOGOU		
MATERIAL:	1.1730	
80		

Universidade de Aveiro
Departamento de engenharia mecânica

Calço

	A4	ESCALA: 1:2	TOLERÂNCIAS GERAIS: ISO 2768-mk
--	----	----------------	---------------------------------------

4

3

2

1

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

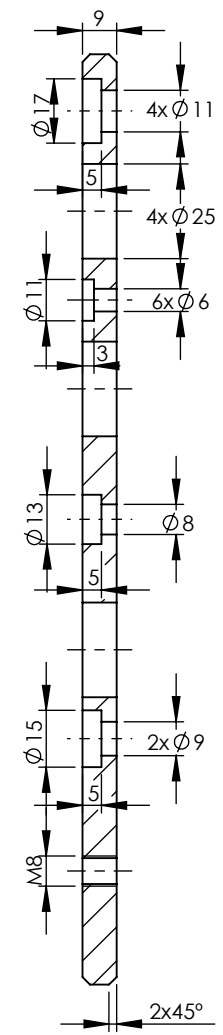
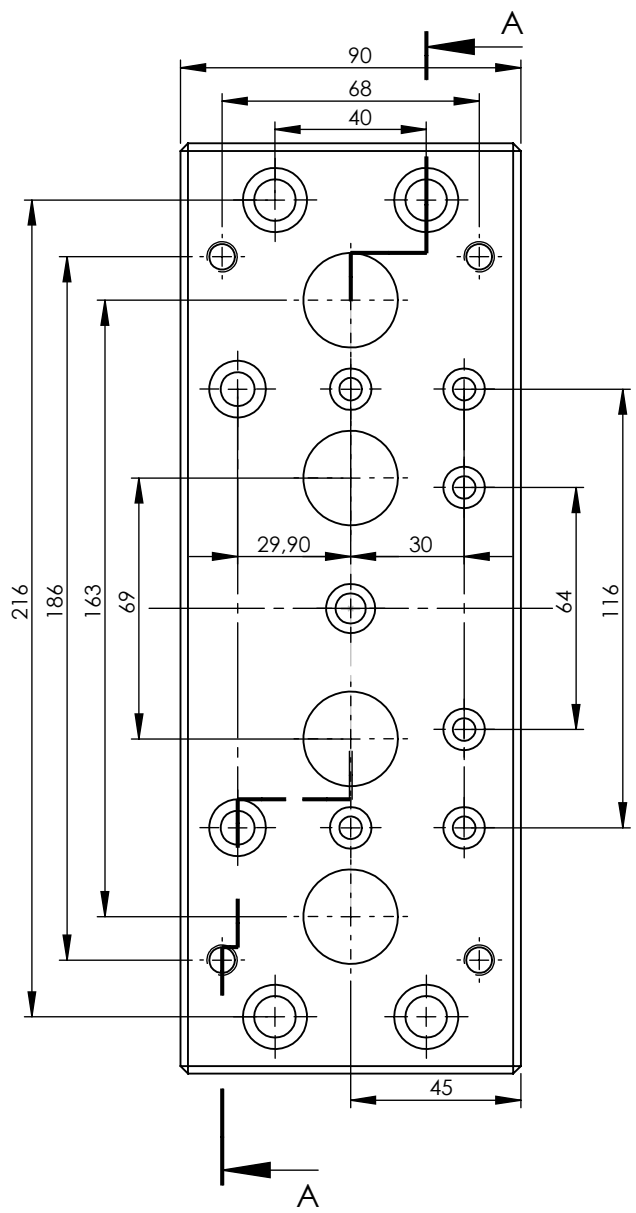
C

B

B

A

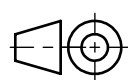
A



	NOME	DATA
PROJETOU	JCarvalho	2018
DESENHOU	JCarvalho	2018
VERIFICOU		
HOMOLOGOU		
MATERIAL:	1.1730	
81		

Universidade de Aveiro
Departamento de engenharia mecânica

Placa dos extratores



A4

ESCALA:
1:2

TOLERÂNCIAS
GERAIS:
ISO 2768-mk

4

3

2

1

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

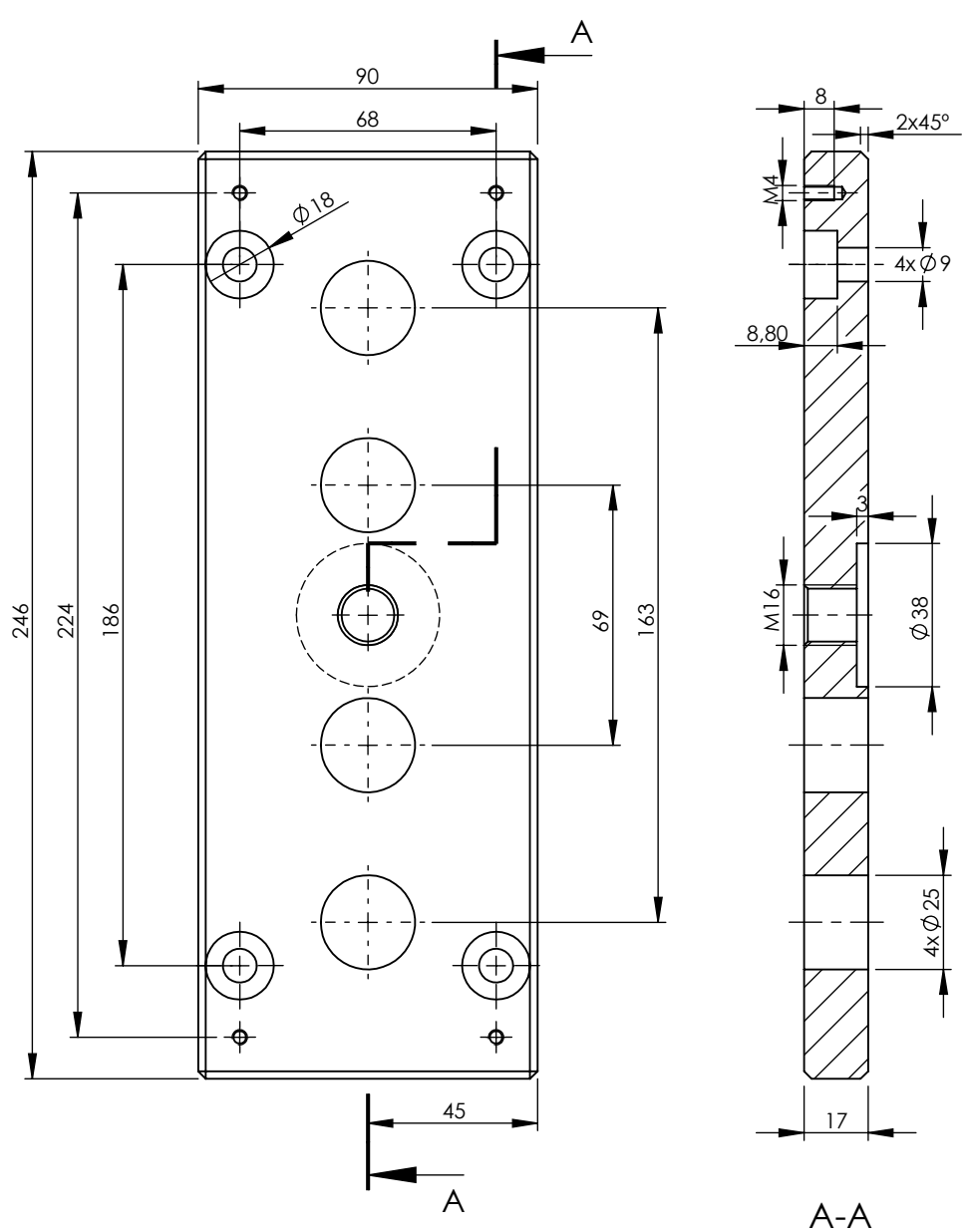
C

B

B

A

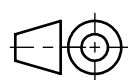
A



	NOME	DATA
PROJETOU	JCarvalho	2018
DESENHOU	JCarvalho	2018
VERIFICOU		
HOMOLOGOU		
MATERIAL:	1.1730	
82		

Universidade de Aveiro
Departamento de engenharia mecânica

Placa de aperto dos extratores



A4

ESCALA:
1:2

TOLERÂNCIAS
GERAIS:
ISO 2768-mk

4

3

2

1

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

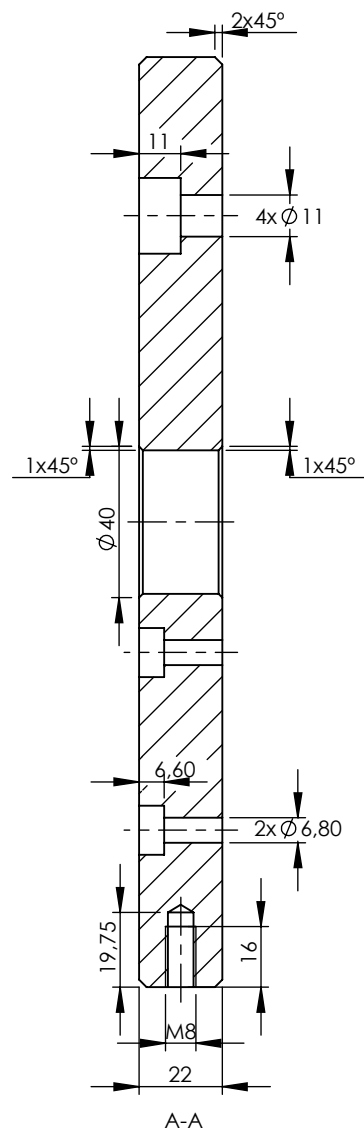
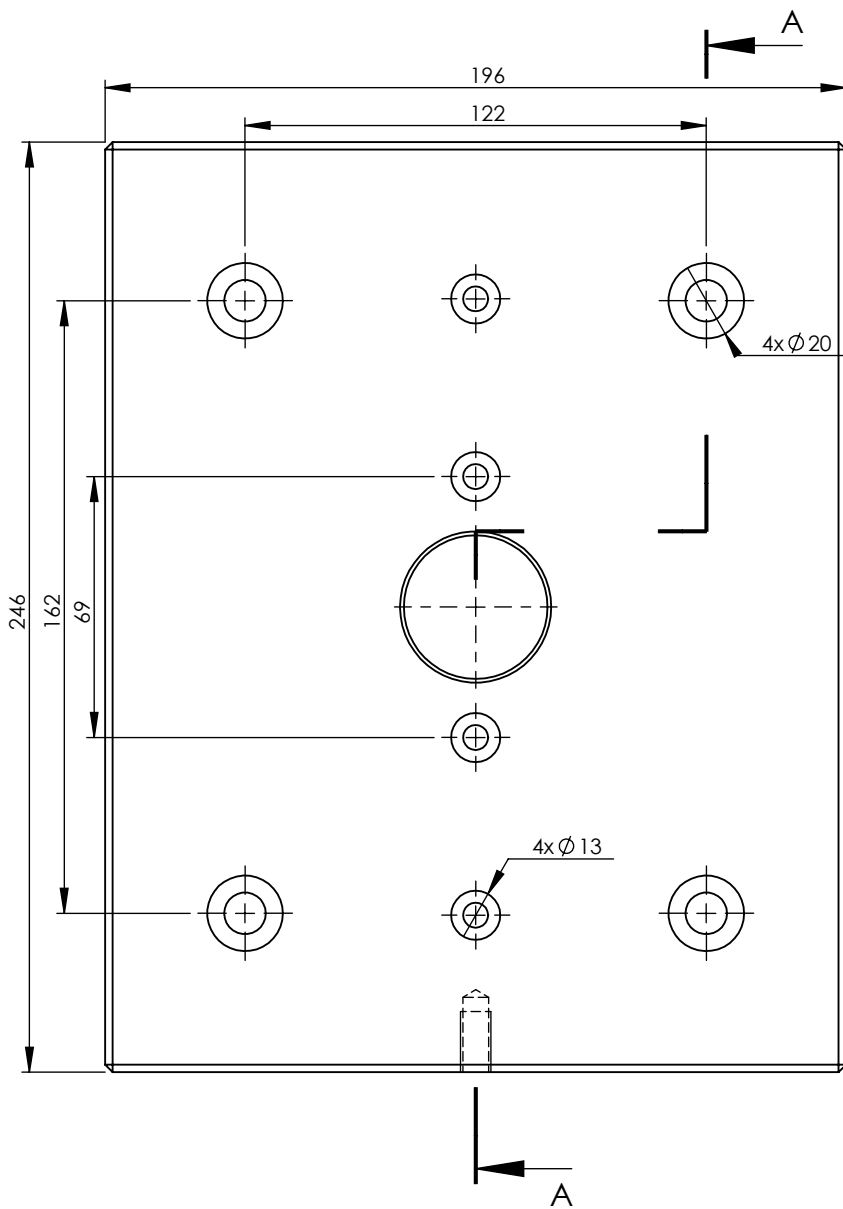
C

B

B

A

A



	NOME	DATA
PROJETOU	JCarvalho	2018
DESENHOU	JCarvalho	2018
VERIFICOU		
HOMOLOGOU		
MATERIAL:	1.1730	
83		

Universidade de Aveiro
Departamento de engenharia mecânica

Placa de aperto da extração

	A4	ESCALA: 1:2
		TOLERÂNCIAS GERAIS: ISO 2768-mk

4

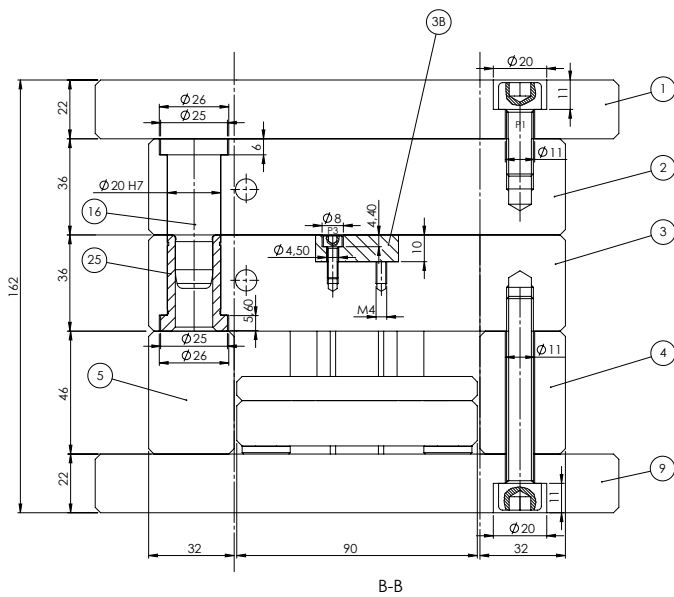
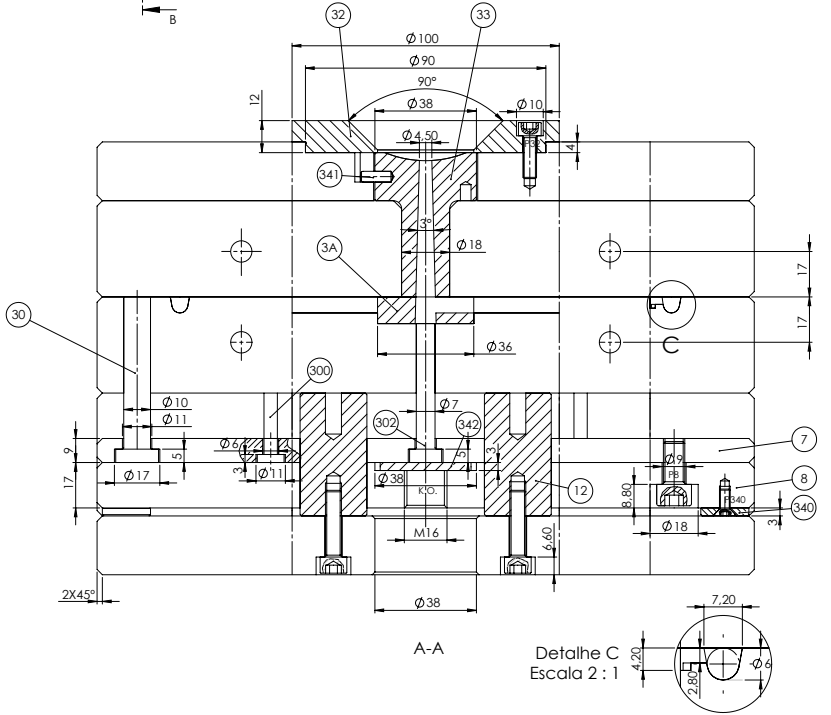
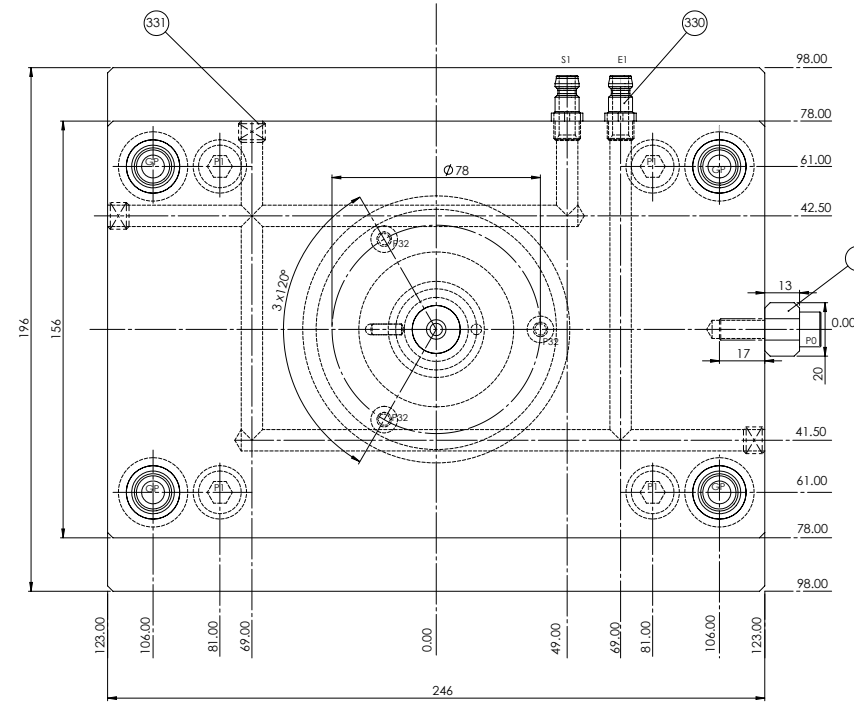
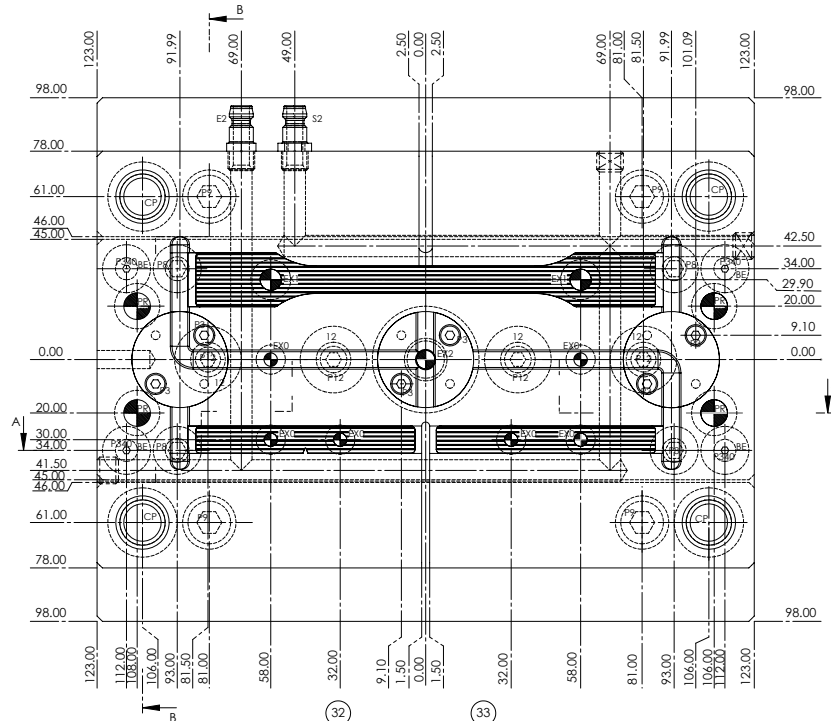
3

2

1

Apêndice F

Desenho de conjunto



Nº	Designação	Quant	Dimensões/ Referência	Materia/Fabricante
0	Barra de transporte	1	162.0x20.0x13.0	1.1730
1	Placa aberta injeção	1	P1/196x246x22/1.1730	HASCO
2	Placa da cavidade	1	P1/156x246x36/1.1730	HASCO
3	Placa da bucha	1	P1/156x246x36/1.1730	HASCO
3A	Inserto "I"	1	Ø36x10	1.1730
3B	Inserto "L"	2	Ø36x10	1.1730
5/6	Calço	2	P/Ø32x246x44/1.1730	HASCO
7	Placa dos extratores	1	P/Ø90x246x9/1.1730	HASCO
8	Placa aberta extratores	1	P/Ø90x246x17/1.1730	HASCO
9	Placa aberta extracção	1	P1/196x246x22/1.1730	HASCO
12	suporte	4	Z57/25	HASCO
16	Guia principal	4	Z03/36x14x20	HASCO
25	Casquilho principal	4	Z11/36x14	HASCO
30	Ferris de retardo	4	Z40/10x80	HASCO
32	Anel de centrifugem	1	1.1020/100x12	HASCO
33	Bucha de injeção	1	Z51/18x36x4.5x40	HASCO
300	Extrator cilíndrico	6	Z40/5x63	HASCO
301	Extrator cilíndrico	2	Z40/8x63	HASCO
302	Extrator cilíndrico	1	Z40/7x100	HASCO
330	Plug	4	E2000/9/10	Mausburger
331	Tampão de rosca	6	E2080/8/10	Mausburger
340	Botão de encaixe	4	Z55/18	HASCO
341	Pino	1	Ø4x10	1.1730
342	Disco K.O.	1	Ø34x3	1.1730
P0	Paraf. cab. cilíndrica	2	M8x30	ISO 4762/12.9
P1	Paraf. cab. cilíndrica	4	M10x25	ISO 4762/12.9
P3	Paraf. cab. cilíndrica	6	M4x12	ISO 4762/12.9
P8	Paraf. cab. cilíndrica	4	M8x16	ISO 4762/12.9
P9	Paraf. cab. cilíndrica	4	M10x70	ISO 4762/12.9
P12	Paraf. cab. cilíndrica	4	M6x25	ISO 4762/12.9
P32	Paraf. cab. cilíndrica	3	M5x16	ISO 4762/12.9
P340	Paraf. cab. cónica	4	M4x10	ISO 4762/12.9

UNIVERSIDADE DE AVEIRO
 Departamento de engenharia mecânica
 Universidade de Aveiro
 Departamento de engenharia mecânica
 Molde de injeção
 ESCALA: 1:1
 TOLERÂNCIAS GRAB. ISO 2768-Ms