Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Mecânica
Ano 2016

Tiago Fernando Teles Almeida

Definição de metodologias projetuais conducentes à aquisição de valências internas no que concerne o fabrico de moldes

Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Mecânica
Ano 2016

Tiago Fernando Teles Almeida

Definição de metodologias projetuais conducentes à aquisição de valências internas no que concerne o fabrico de moldes

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica da Doutora Mónica Sandra Abrantes de Oliveira Correia, Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Dedico este trabalho aos meus pais, ao meu irmão e à minha namorada Sofia por todo o apoio e compreensão prestados.

o júri

presidente	Prof. Doutor João Paulo Davim Tavares da Silva Professor Associado C/ Agregação do Departamento de Engenharia Mecânica - Universidade de Aveiro
Arguente	Doutora Tatiana Vladimirovna Zhiltsova Gestora de Ciência e Tecnologia, UATEC – Plataformas Tecnológicas da Universidade de Aveiro – Unidade Para a Transferência de Tecnologia da Universidade de Aveiro
Orientador	Prof. Doutora Mónica Sandra Abrantes de Oliveira Correia Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica - Universidade de Aveiro

agradecimentos

Quero aqui deixar o meu agradecimento a todas as pessoas que direta ou indiretamente tornaram este trabalho possível, tornando-se o final de um ciclo que permitiu o meu desenvolvimento a nível académico e pessoal.

Agradeço à Professora Doutora Mónica Sandra Abrantes de Oliveira Correia, orientadora da presente tese, por toda a paciência, apoio, disponibilidade e motivação.

Agradeço à Empresa Yazaki Saltano Produtos Elétricos de Ovar pela disponibilidade para a realização da tese em ambiente empresarial.

Agradeço ao Engenheiro Daniel Fonseca por toda a orientação e disponibilidade desde o início do curso.

Agradeço à empresa Yazaki Saltano de Ovar pela oportunidade de fazer esta tese em ambiente industrial.

Agradeço ao Engenheiro João Fragoso por toda a ajuda, disponibilidade e aconselhamento durante o tempo passado na Yazaki Saltano de Ovar.

Agradeço a todos os colegas com quem trabalhei na empresa por se mostrarem sempre recetivos e prontos para ajudar no que fosse preciso.

Agradeço à ISICOM, em particular ao Engenheiro Pedro Oliveira por toda a disponibilidade demonstrada.

Por fim quero deixar um agradecimento especial à minha namorada e aos meus pais por todo o apoio, ajuda e motivação.

“Live as if you were to die tomorrow. Learn as if you were to live forever.”

Mahatma Gandhi

palavras-chave

Canais Conformais, Maquinação, Moldes de Injeção, Projeto de Moldes, Refrigeração de Moldes.

resumo

Apesar da crise mundial que se tem feito sentir nos últimos anos, a Indústria dos Moldes Portuguesa é uma das que tem vindo a crescer, apresentando um nível de competitividade cada vez mais elevado. Neste contexto, a experiência de perceber como tudo acontece e funciona na prática torna-se uma mais-valia, uma vez que a filosofia de melhoria contínua é necessária para o contínuo desenvolvimento das empresas, de maneira a permitir a sua evolução.

O trabalho realiza-se em parceria com a Yazaki Saltano de Ovar (YSE) – empresa líder a nível global no que diz respeito à produção de cabelagens para automóveis. De maneira a satisfazer as suas necessidades de produção, atualmente, a YSE procura produzir a totalidade dos conectores necessários às suas necessidades de produção.

A dissertação apresentada consiste em duas partes distintas e complementares. Na primeira parte, são expostas diversas soluções para a otimização das estratégias de arrefecimento dos moldes existentes na empresa. Esta tem por base o estudo exemplificativo de um molde existente na empresa (7183-3440), no qual se estudará a influência da aplicação de novas filosofias, estratégias e tecnologias de refrigeração, tendo por base o estado da arte atual e, desse modo, proceder ao estudo do impacto do uso de canais conformais no tempo de ciclo sem prejudicar a qualidade final da peça, postulando as implicações na produção anual desta peça. Por outro lado, a segunda parte do trabalho consiste no levantamento dos métodos e dos processos utilizados no setor da maquinação (SM) com o intuito de os conhecer e propor metodologias de trabalho alternativas e layouts de produção conducentes, de modo a não só atingir uma maior capacidade de produção de postiços, mas também adquirir as valências necessárias à diversificação da produção deste setor que tem como objetivo último a produção de ferramentas moldantes.

keywords

Conformal Cooling, Machining, Mould Design, Injection Molds, Refrigeration.

abstract

Despite of the global crisis that has been felt in the last years, the Portuguese Molds' Industry is one of the industries that has been growing, presenting a level of competitiveness increasingly high. In this context, the experience of understanding how everything happens and works in practice becomes an asset, once the philosophy of continuous improvement is necessary for the continuous development of enterprises, so that they can evolve.

The work is carried out in partnership with Yazaki Saltano de Ovar (YSE) – global leader enterprise in the production of car's wiring harnesses. In order to satisfy their production's necessities, nowadays, YSE aims to produce all terminals and connectors that are required for their production's necessities.

The presented thesis consists in two diferent and complementary parts. In the first part, several solutions for the optimization of cooling strategies of the company's existing molds are exposed. This is based in an exemplary study of a mold that exists in the company (7183-3440), in wich it will be examined the influence of the application of new philosophies, strategies and refrigeration technologies, considering the current state of art and, thus, proceed to the study of the impact of the use conformal channels in the time cycle without affecting the final quality of the pieces, postulating the implications in the annual production of this piece.

On the other hand, the second part of the work consists in the analysis of the methods and processes used in the Tooling Center (SM) in order to know them and to propose alternative working methods and leading production layouts, so that it can achieve not only a greater capacity of cores' production, but also to acquire the necessary requisites to the production's diversification in this sector which has as the ultimate goal the production of mold tools.

Conteúdo

Conteúdo ..... **i**
Lista de Figuras ..... **iii**
Lista de Tabelas ..... **vi**
Lista de Equações ..... **vii**
Lista de Abreviaturas e Símbolos ..... **viii**
1. Introdução **1**
1.1 Motivação 1
1.2 A Corporação Yazaki Saltano 2
1.2.1 A YSE 4
1.2.2 A divisão de Moldes da YSE 6
1.2.3 Enquadramento do SM 7
1.3 Desafios da dissertação 8
1.4 Objetivos da dissertação 10
1.5 Guia de leitura 11
2. Revisão Bibliográfica **13**
2.1 Breve Introdução Histórica da Indústria Portuguesa de Moldes 13
2.2 Situação Atual e Competitividade da Indústria Portuguesa de Moldes & Plásticos 16
2.3 A injeção de polímeros 20
2.4 O processo de injeção 22
2.5 Moldes para injeção de polímeros 25
2.5.1 Constituição do molde 26
2.6 Sistemas de controlo de Temperatura 27
2.6.1 Projeto de sistemas de controlo de temperatura 29
2.6.2 O arrefecimento convencional 34
2.6.3 Sistemas de arrefecimento maquinado com aplicação de tubos de cobre 37
2.6.4 Sistemas de arrefecimento de circuito em cascata (bubbler) 38
2.6.5 Sistemas de arrefecimento de circuito em lâmina (baffles) 38
2.6.6 Sistemas de arrefecimento com canais conformais 40
2.6.7 Arrefecimento pulsado (pulse cooling) 42
2.6.8 Uso de ligas de cobre 43
2.7 CAE 45

3. Caso-de-estudo 47
3.1 Identificação da peça 47
3.2 Molde existente 49
4. Estudos realizados 53
4.1 Projeto do sistema de arrefecimento – estudo analítico 53
4.2 Análise simulação numérica realizada em parceria entre a universidade e a YSE 55
4.3 Simulação com a mesma arquitetura do sistema de refrigeração 56
4.4 Simulação com canais conformais 57
5. Apresentação e análise dos resultados dos estudos numéricos em Autodesk Moldflow Insight® 58
5.1 Simulação com a mesma arquitetura - eliminação de alguns canais de refrigeração 58
5.2 Simulação com sistema de refrigeração conformal 73
6. Requisitos para a produção de moldes 89
6.1 Gabinete de estudo e projeto 90
6.2 Maquinação 92
7. Descrição das valências do SM 95
8. Proposta de alteração para o SM da YSE 98
8.1 Estudo da produção do SM 98
8.2 Propostas de aumento de volume de produção do SM 102
8.2.1 Propostas para o setor 103
8.2.2 Impacto na produção 107
8.3 Análise de resultados 109
9. Evolução necessária para produção de moldes na YSE 113
10. Conclusão 115
10.1 Trabalhos futuros 116
Referências 117

Lista de Figuras

Figura 1 Planta da YSE (imagem gentilmente cedida pela YSE) 4
Figura 2 Departamentos da YSE (imagem gentilmente cedida pela YSE) 5
Figura 3 Número de trabalhadores por Divisão (imagem gentilmente cedida pela YSE) 6
Figura 4 *Layout* do SM da YSE 8
Figura 5 Balança comercial do setor dos moldes (Miguel, Gomes e Portuguesa, 2015) 17
Figura 6 Evolução do Mercado de Exportação (Miguel, Gomes e Portuguesa, 2015) 18
Figura 7 Principais Mercados em 2015 (Miguel, Gomes e Portuguesa, 2015) 19
Figura 8 Principais Clientes do Setor em 2014 (Miguel, Gomes e Portuguesa, 2015) 20
Figura 9 Esquema de uma máquina de injeção (Aulas de Tecnologia de Polímeros, DEM, UA) 22
Figura 10 Fases do Ciclo de Moldação (Cruz, 2004) 23
Figura 11 Proporção das Fases do Ciclo de Moldação (BIOMERICS, 2015) 28
Figura 12 Balanço Térmico de um Molde (Slides das aulas de Projeto e Fabrico de Moldes e Ferramentas, DEM, UA) 31
Figura 13 Configurações de canais em "U" (conexão: por furos, por placas e por mangueira)(*Manual Do Projetista de Moldes*, 2007) 35
Figura 14 Circuitos com furação em "Z" (simétrica espelhada e simétrica) (*Manual Do Projetista de Moldes*, 2007) 35
Figura 15 Arrefecimento de cavidades circulares (*Manual Do Projetista de Moldes*, 2007) 36
Figura 16 Circuito de água inclinado (*Manual Do Projetista de Moldes*, 2007) 37
Figura 17 Circuito de refrigeração em cascata (*Manual Do Projetista de Moldes*, 2007) 38
Figura 18 Circuitos de refrigeração em lâmina (*Manual Do Projetista de Moldes*, 2007) 39
Figura 19 Circuitos de arrefecimento com canais conformais (*Concept Laser*, 2016) 41
Figura 20 Postiço em liga de Cobre-Berílio (AmpcoMetal) 44
Figura 21 Apresentação da peça em estudo 48
Figura 22 Imagens do exterior do molde (modelação em 3D) 49
Figura 23 Sistema de alimentação do molde 50
Figura 24 Sistema de arrefecimento do molde 51
Figura 25 Sistema extração lado fixo 52
Figura 26 Sistema de extração lado móvel 52

Figura 27 Blocos moldantes e postiços 52
Figura 28 Número de Reynolds do processo atual 56
Figura 29 Tempo de Enchimento 60
Figura 30 Pressão de Comutação V/P 61
Figura 31 Força de fecho 61
Figura 32 Contração Volumétrica: Corte 1 62
Figura 33 Contração volumétrica: Corte 2 63
Figura 34 Contração volumétrica: Corte 3 63
Figura 35 Contração volumétrica: Corte 4 64
Figura 36 Taxa de corte máxima 65
Figura 37 Temperatura do fluido refrigerante 66
Figura 38 Número de Reynolds do circuito 67
Figura 39 Pressão do circuito 68
Figura 40 Tempo até atingir a temperatura de extração 1 69
Figura 41 Tempo até atingir a temperatura de extração 2 69
Figura 42 Tempo até atingir a temperatura de extração 3 70
Figura 43 Tempo até atingir a temperatura de extração 4 70
Figura 44 Empenos: todas as direções 71
Figura 45 Empenos: eixo X 72
Figura 46 Empenos: eixo Y 72
Figura 47 Empenos: eixo Z 73
Figura 48 Tempo de Enchimento 75
Figura 49 Pressão de Comutação V/P 76
Figura 50 Força de Fecho 76
Figura 51 Contração volumétrica: Corte 1 77
Figura 52 Contração volumétrica: Corte 2 78
Figura 53 Contração volumétrica: Corte 3 78
Figura 54 Contração volumétrica: Corte 4 79
Figura 55 Temperatura do fluido de refrigeração 80
Figura 56 Número de Reynolds no circuito 81
Figura 57 Pressão do refrigerante no circuito de controlo de temperatura 82
Figura 58 Tempo até atingir a Temperatura de Extração 1 83

Figura 59 Tempo até atingir a Temperatura de Extração 2 83
Figura 60 Tempo até atingir a Temperatura de Extração 3 84
Figura 61 Tempo até atingir a Temperatura de Extração 4 84
Figura 62 Empenos em todas as direções 85
Figura 63 Empenos em X 86
Figura 64 Empenos em Y 86
Figura 65 Empenos em Z 87
Figura 66 Evolução das fases de Produção de Moldes 89
Figura 67 Conhecimentos necessários no gabinete de Projeto de Moldes (Ferreira, 2006) 91
Figura 68 Fluxo de Produção do SM da YSE 96
Figura 69 Proposta de *Layout* 106
Figura 70 Novo Fluxo de Trabalho 106
Figura 71 Tempo do processo em função do número de postiços 110

Lista de Tabelas

Tabela 1 Cronologia da história da Yazaki. 3
Tabela 2 Resumo das etapas do ciclo de moldação. 24
Tabela 3 Definição do diâmetro das "linhas de água" em função do caudal. 33
Tabela 4 Valores obtidos no estudo analítico. 54
Tabela 5 Resumo das condições e parametrização da simulação. 59
Tabela 6 Resumo das condições de processamento. 74
Tabela 7 Balanço e análise dos resultados obtidos. 88
Tabela 8 Necessidades básicas para a produção de moldes. 94
Tabela 9 Recursos existentes no SM da YSE 97
Tabela 10 Tempos totais do processo. 99
Tabela 11 Prazos e tempos médios do SM 99
Tabela 12 Valores da razão de trabalho de cada posto. 100
Tabela 13 Tempo de execução por processo. 100
Tabela 14 Capacidade de produção diária por posto 101
Tabela 15 Descrição das melhorias obtidas através da alteração do SM. 107
Tabela 16 Capacidade de produção diária depois das propostas 109
Tabela 17 Análise do investimento proposto. 111

Lista de Equações

[1] 31
[2] 31
[3] 31
[4] 32
[5] 32
[6] 32
[7] 32
[8] 33
[9] 33
[10] 100

Lista de Abreviaturas e Símbolos

Acrónimos

3D- Três Dimensões

APIP- Associação Portuguesa da Indústria de Plásticos

CAD- *Computer Aided Design*

CAE- *Computer Aided Engineering*

CAM- *Computer Aided Manufacturing*

CENTIMFE - Centro Tecnológico da Indústria de Moldes e Ferramentas Especiais

CEFAMOL- Associação Nacional da Indústria de Moldes

CMM- *Coordinate Measuring Machine*

CNC- *Computer Numeric Control*

CSC- *Custom Service Center*

DMLS- *Direct Metal Laser Sintering*

DOE- *Design of Experiments*

EDM- *Electrical Discharge Machining*

EUA- Estados Unidos da América

GM- *General Motors*

IMD- *International Institute for Management Development*

MM- Manutenção de Moldes

OLED- *Organic Light Emitting Diode*

PBT- Polibutileno Tereftalato

PDU- *Power Distribution Units*

PME- Pequenas e Médias Empresas

PR- Prototipagem Rápida

PSA- Grupo Peugeot & Citroen

R&D- *Research and Development*

SM- Setor da Maquinação

TM – Tempo de Maquinação

TT – Tempo Total

V/P- Volume/Pressão

WEDM- *Wire Electrical Discharge Machining*

YEL- *Yazaki Europe Limited*

YSE- Yazaki Saltano de Ovar

YUK- *Yazaki United Kingdom*

Notações Matemáticas

$\dot{Q}_{TM}$ – Fluxo de calor transferido pelo meio refrigerador (W).

$\dot{Q}_{PI}$ – Fluxo de calor cedido pelo fundido (W).

$\dot{Q}_{AMB}$ – Fluxo calor transferido para o ambiente (W).

$\dot{Q}_{COND}$ – Fluxo de calor por condução (W).

$\dot{Q}_{CONV}$ – Fluxo de calor por convecção (W).

$\dot{Q}_{RAD}$ – Fluxo de calor por radiação (W).

A_{lat} – Área exposta do molde (m^2).

α - Coeficiente de transferência de calor para convecção livre do ar (± 15 W/m^2 °C).

T_{amb} e T_{molde} – Temperatura do meio ambiente e do molde (°C).

ε – Fator de emissão (0.25 para o aço).

C_{Rad} – Coeficiente de radiação do corpo negro (5.77 W/m^2K^4).

θ_{amb} e θ_{molde} – Temperatura absoluta (K = °C + 273.15).

C – Calor específico do fluído (4.186 KJ/Kg °C para a água).

ΔT – Variação de temperatura do fluido (°C).

A_{fix} – A área de contacto do molde (sistema de fixação) (m^2).

β – Factor de proporcionalidade / condutividade térmica do material do molde (W/m^2 °C). (Aços de baixa liga: β=100; Aços de alta liga: β=80; Ligas de cobre: β=20)

m – Massa do fundido injetada (kg).

h_{inj} – Entalpia específica do plástico à temperatura de injeção (J/kg).

h_{ext} – Entalpia específica do plástico à temperatura de extração (J/kg).

t_c – Tempo de residência do material no molde (s).

e – Distância dos canais à superfície moldante (m).

k – Condutividade térmica do material do molde (J/m.s.°C).

d – Diâmetro dos canais de refrigeração (m).

ΔT – Variação da temperatura entre a parede da cavidade e o líquido refrigerante (°C).

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

O trabalho que se apresenta seguidamente decorreu no âmbito da realização da dissertação para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Mecânica, na Universidade de Aveiro, trabalho que foi realizado em contexto empresarial, resultante de uma parceria entre a Universidade e a YSE.

Esta parceria surge no âmbito de um projeto de cooperação com a sociedade entre o Departamento de Engenharia Mecânica e a YSE, reforçada pelo interesse do autor em ganhar experiência e conhecimento em contexto empresarial, aumentando, deste modo, a sua capacidade de resposta em situações laborais caracterizadas por um nível de *stress* e responsabilidade que considera serem uma mais-valia tanto a nível profissional como a nível de desenvolvimento pessoal.

A YSE é uma multinacional, detentora de um forte *know-how* no que concerne a injeção de plásticos. O trabalho aqui levado a efeito reveste-se de um grande desafio na medida em que implica aliar os interesses da Yazaki ao conhecimento académico, de modo a desenvolver metodologias de trabalho que possam vir a constituir ferramentas assertivas de produção.

Deste modo, o trabalho apresentado abrange dois temas complementares, a que correspondem objetivos distintos. A primeira parte do trabalho consiste na exploração, estudo e aplicação de estratégias emergentes, a nível de sistemas de arrefecimento de moldes, bem como a análise do seu impacto nos ciclos de moldação, como tentativa de otimizar o processo de injeção. Este estudo será realizado com propostas de alterações ao molde 7183-3440, já existente na empresa, embora se tenha como objetivo lato que o conhecimento adquirido possa vir a ser aplicado a todo o universo de moldes da Yazaki.

A segunda parte do trabalho inicia-se com a otimização dos métodos e processos praticados no setor da maquinação (SM), possibilitando, deste modo, a rentabilização dos seus recursos, para que usando como caso-de-estudo o molde e o estudo de otimização realizado no molde 7183-3440, se leve a efeito o levantamento das valências existentes e necessárias para que este setor venha a deter a capacidade de produzir moldes deste género.

Assim, pretende-se com este estudo, contribuir para o aperfeiçoamento dos níveis de competitividade da empresa desenvolvendo metodologias de trabalho de auxílio quer à conceção e projeto de ferramentas moldantes como ao fabrico das mesmas tirando partido das valências existentes no setor da produção e maquinação.

1.2 A Corporação Yazaki Saltano

A empresa YSE faz parte de uma multinacional Japonesa, líder mundial no que concerne cabelagens para automóveis, tendo também negócios noutros mercados, como por exemplo na área das Energias (*Yazaki Europe*, 2016).

A história da Yazaki inicia-se em 1929 quando o Sr. Sadami Yazaki começa a vender cabelagens para o mercado automóvel. Em 1935, o governo Japonês decide implementar novas medidas para tentar reforçar a economia e o progresso do país, o que possibilitou o início da produção nacional de automóveis por parte das empresas japonesas. Esta medida teve como consequência efeitos bastante positivos para a Yazaki, permitindo o crescimento progressivo da empresa, de tal maneira que, em 1939, surgiu a possibilidade de expansão do negócio, levando à criação da *Yazaki Electric Wire Industrial Co. Ltd.,* em 1941, com cerca de 70 trabalhadores.

Como resultado das medidas implementadas pelo governo, a engenharia automóvel no início dos anos 40 começa a revelar-se um mercado bastante promissor com elevado potencial de crescimento. No entanto, apenas cerca de uma década depois, o Sr. Yazaki, começa a focar-se na produção centralizada de cabelagens para automóveis, proporcionando uma transição inovadora e arriscada, contudo, com excelentes resultados, o que tornou a empresa líder a nível mundial neste mercado (*Yazaki Europe*, 2016).

Esta evolução permitiu que a Yazaki fosse adquirindo uma rede de conhecimentos resultante dos negócios relativos ao mercado automóvel. Através da aquisição destas competências, a empresa conseguiu, então, implementar diversos tipos de equipamentos para a indústria de gás urbano, tendo sido pioneira em sistemas de arrefecimento, como o de absorção solar, desenhado e construído em 1974.

Nos anos seguintes, a Yazaki continuou a sua expansão em novos mercados através do desenvolvimento e fornecimento de um número significativo de produtos que permitem a utilização de inúmeras fontes de energia, tais como, cabos de transmissão de eletricidade, sistemas de segurança para gás, sistemas de condicionamento de ar e *chillers* de absorção.

Devido à crescente expansão e desenvolvimento da Yazaki e a uma política de sustentabilidade, esta começou a prestar especial atenção às questões ambientais e energéticas, tornando-as uma prioridade. Deste modo, a empresa implementou a criação de um setor específico para a produção de componentes que respeitassem as questões ambientais e energéticas, sendo este, atualmente, o segundo maior setor no grupo Yazaki.

Presentemente, o Grupo Yazaki tem a sua sede mãe localizada no Edifício Mita-Kokusai, em Tóquio (Japão), enquanto que a sua sede europeia se encontra sediada em Colónia (Alemanha) e a sede dos Estados Unidos da América (EUA) localizada em Michigan. Relativamente aos seus parceiros de negócios, a Yazaki trabalha diretamente com algumas marcas de carros, como a Toyota, Honda, GM, Ford, Fiat Chrysler, Tesla, Subaru, Nissan, Mazda, Jaguar, Land Rover e PSA, sendo estes os seus principais clientes. Por outro lado, a Yazaki vende ainda, em menor quantidade, para empresas de energia elétrica, gás e de construção em geral.

Seguidamente, na Tabela 1, será apresentado um sumário que descreve cronologicamente a história da Yazaki.

Tabela 1 Cronologia da história da Yazaki.

1929	Fundação da Yazaki pelo Sr. Sadami Yazaki.	**1981**	Início da produção de fibra ótica e de conectores.
1938	Abertura da primeira fábrica de fio elétrico.	**1986**	Abertura da primeira fábrica de produção na Europa, localizada em Portugal.
1941	Fundação da *Yazaki Corporation* em Tóquio pelo Sr. Sadami Yazaki.	**1987**	Abertura do primeiro Departamento de *Research and Development* (R&D), na Europa, localizada na Alemanha.
1949	Início da produção de cabelagens para automóvel.	**1993**	Primeiro *Cluster* de instrumentação com ligação à *SAAB Europe*.
1950	Início da produção de sistemas de instrumentação e medida.	**1998**	*Yazaki United Kingdom* (YUK) muda de nome para *Yazaki Europe Limited* (YEL).
1959	Fundação da *Yazaki Parts Co., Ltd.*	**2001**	Deslocação para novas instalações em Colónia, com centro de testes separado.
1960	Início da produção e montagem de sistemas de medição de gás.	**2001**	*Joint Venture* com a *Siemens*.
1963	Abertura do primeiro escritório de vendas num país exterior (EUA).	**2003**	Primeiro *Cluster with Organic Light Emitting Diode* (OLED) de produção em massa, na Europa para a *Aston Martin*.
1966	Abertura de um escritório de representação da Yazaki na Suíça.	**2004**	Início da produção de Eletrónica e Instrumentação na *Yazaki Component Technology SRL*, localizada na Roménia.
1979	Início da produção de caixas terminais.	**2007**	A Corporação Yazaki recebe um prémio de excelência em negócio familiar por parte do *International Institute for Management Development* (IMD) na Suíça.
1980	Criação da *Yazaki Europe*, com a abertura do primeiro escritório de vendas no Reino Unido.		

1.2.1 A YSE

Considerada uma das primeiras fábricas de produção da Europa, a YSE iniciou-se no mercado das cabelagens após a sua inauguração em 1991, estando a sua planta ilustrada na Figura 1.

Embora a Corporação Yazaki detivesse três fábricas em Portugal, a YSE, a *Produtos Elétricos Lda.* e a *Yazaki Saltano de Portugal CEA Lda.,* atualmente e devido à crise económica mundial que se fez sentir, apenas a empresa de Ovar se encontra a laborar, tendo o Grupo Yazaki deslocado parte da sua produção para países cujos custos laborais são significativamente mais baixos que os de Portugal.

Presentemente, a YSE encontra-se dividida em três departamentos principais, designadamente, o *Components Manufacturing*, o *Wire Harness Manufacturing* e o *Porto Technical Centre*, estando estes representados na Figura 2.

Figura 1 Planta da YSE (imagem gentilmente cedida pela YSE)

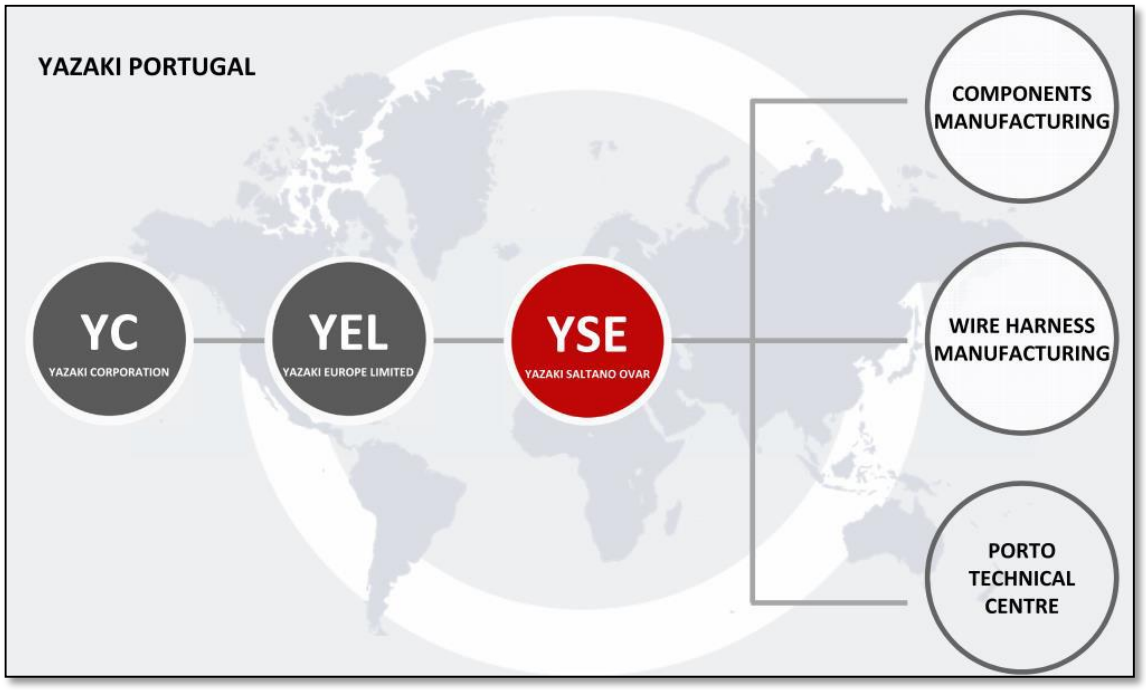


Figura 2 Departamentos da YSE (imagem gentilmente cedida pela YSE)

Além disso, a YSE também se encontra dividida em diversas divisões, representadas na Figura 3, e setores sendo que cada um deles se destina a uma função específica.

Relativamente ao número de colaboradores, a empresa emprega cerca de 1836 pessoas, estando este número em constante variação, uma vez que a YSE contrata regularmente novos trabalhadores, devido ao seu constante crescimento.

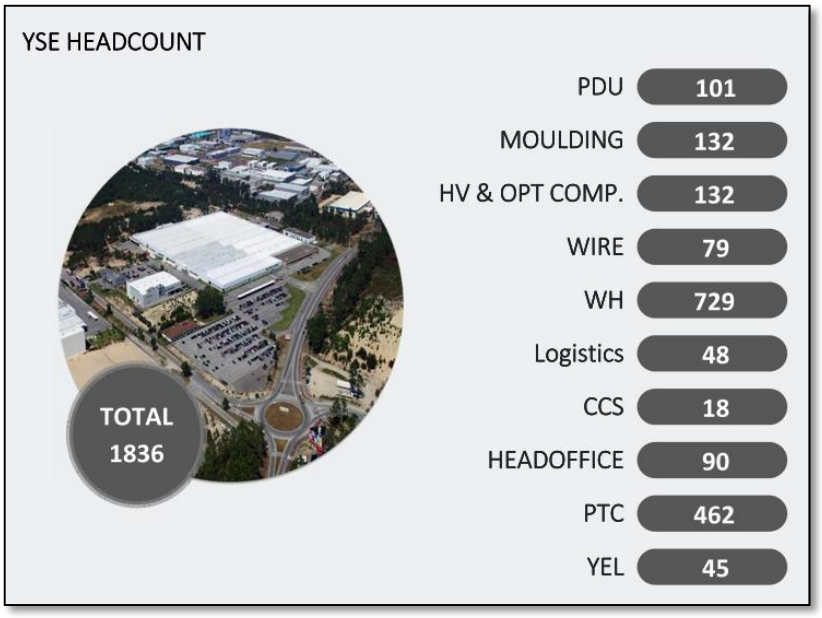


Figura 3 Número de trabalhadores por Divisão (imagem gentilmente cedida pela YSE)

1.2.2 A divisão de Moldes da YSE

A divisão de Moldes da YSE foi criada em junho de 1994 em parceria com a *Yazaki de Turim* (Itália), tendo esta iniciado a sua laboração com seis máquinas de injeção *NISSEI*, duas de 80 toneladas, duas de 40 toneladas e duas de 10 toneladas, que englobavam o trabalho correspondente a 12 moldes.

Atualmente, esta divisão contém cerca de 140 funcionários, 87 máquinas de injeção e cerca de 405 moldes, possuindo também moldes que se encontram ainda na fase de testes e afinação para a posterior produção de peças.

Devido não só ao crescimento da empresa, mas também a um projeto iniciado em 2011 que seguia a filosofia de melhoria contínua e que procurava a redução significativa dos tempos de ciclo ao nível da injeção de peças plásticas, conseguiu-se uma melhor cadência de produção e uma melhor resposta às necessidades dos clientes. O sucesso deste projeto ao longo dos anos foi permitindo não só ter a capacidade de produzir mais com o mesmo número de máquinas, mas também produzir para outras fábricas do Grupo.

Como resultado, no ano passado (2015), a YSE produzia mensalmente cerca de 29 milhões de peças utilizando 79 máquinas de injeção. No presente ano, a fábrica adquiriu mais 11 máquinas de injeção, passando a ter um total de 90 máquinas, o que permitiu aumentar a sua capacidade de produção mensal de 29 para 33 milhões de peças, resultando numa variação positiva de cerca de 13.8%. É de salientar que como estes níveis de produção continuam a não ser suficientes relativamente às encomendas que a fábrica recebe, a YSE procede ainda à

subcontratação de serviços externos (e.g. Celoplás, InovePlástica, Microplástico, GLN), numa compra média de 12 milhões de peças por mês. Toda a produção interna e externa da YSE é vendida ao *Custom Service Center* (CSC) que depois se encarrega da distribuição para as outras empresas do Grupo.

Em relação às perspetivas futuras desta divisão, estas passam pela continuação do seu crescimento, tanto a nível de produção como a nível de número de máquinas, o que implica um crescimento do espaço físico atualmente ocupado por esta divisão.

1.2.3 Enquadramento do SM

O crescimento da empresa e da divisão de Moldes, em particular, que como já foi referido anteriormente, resultou num incremento do número de máquinas e de moldes, teve como consequência o aumento do fluxo de trabalho na manutenção dos moldes (MM).

Perante este cenário, a divisão de Moldes da empresa ponderou diversas soluções para acompanhar o aumento de trabalho sentido, decidindo, então, apostar num setor que pudesse apresentar respostas rápidas à MM. De acordo com esta visão estratégica, em 2012, foi criado o SM, dentro da Divisão de moldes da YSE. Este permitiu não só a diminuição do tempo de reparação dos mesmos mas também a diminuição da dependência a fornecedores externos.

A principal tarefa do SM passa pela produção de postiços, visando a MM, assegurando cadências de produção e minimizando tempos de paragem. Deste modo, foi desde logo assumido que o único cliente deste setor seria a divisão dos Moldes.

No início, este setor contava com duas fresadoras com a tecnologia *Computer Numeric Control* (CNC) - uma *SPINNER VC810* e uma *MIKRON VCE 800 PRO-X,* da *AgieCharmilles* -, duas retificadoras - uma *KENT* e uma *JONES-SHIPMAN 540X* -, uma máquina de erosão por penetração - *FO 350 SP,* da *AgieCharmilles* -, um projetor de perfis *Mitutoyo* na sala de medição e uma coluna de medição de precisão - *LH-600E*, da *Mitutoyo*. Além disso, contava ainda com dois operadores das retificadoras, uma pessoa responsável pela fresagem CNC e respetivo *Computer Aided Design/ Computer Aided Manufacturing* (CAD/CAM) e um operador responsável pela máquina de erosão por penetração.

Seguidamente, na Figura 4, apresenta-se o *layout* do setor no seu início de laboração.

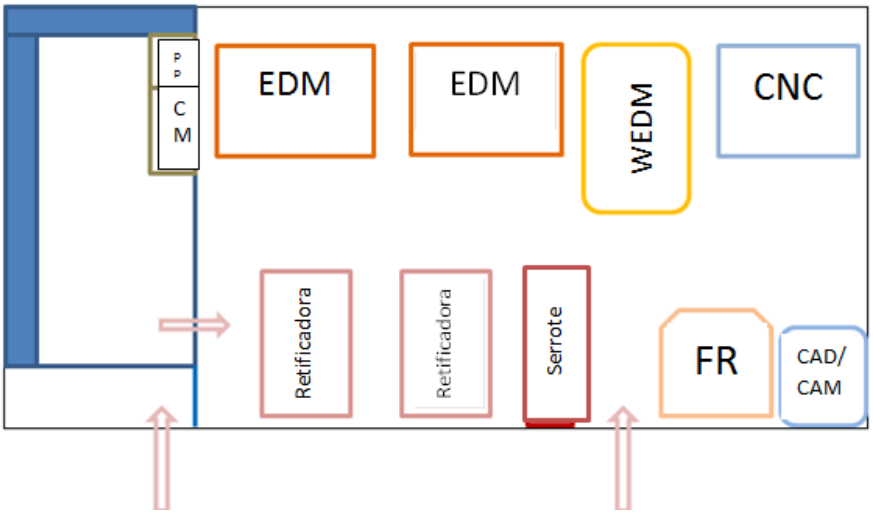


Figura 4 *Layout* do SM da YSE

1.3 Desafios da dissertação

A indústria de injeção de plásticos é uma das indústrias com maior taxa de crescimento a nível mundial, sendo este mercado de transformação de plásticos considerado um dos poucos a ter um volume de faturação na ordem dos biliões de dólares.

Atualmente, quase todos os produtos de uso quotidiano envolvem a utilização de peças plásticas, sendo a maior parte desses mesmos componentes obtidos pelo processo de injeção de polímeros. Este processo é conhecido por possibilitar a criação de peças com formas e geometrias diversas e até complexas com baixo custo unitário (Tang *et al.*, 2006).

O setor dos moldes nacional é um dos que ilustra, de forma exemplar, a evolução da indústria portuguesa no último meio século, apresentando também, simultaneamente, algumas características que são completamente ímpares e excecionais quando comparado com os restantes setores da indústria nacional, nomeadamente na sua capacidade de inovação (Silva, 2007).

Deste modo, este trabalho apresenta-se no seguimento dessa inovação, explorando também o desenvolvimento de todas as fases inerentes a esta, como o projeto, maquinação e medição de uma ferramenta moldante e dos seus constituintes.

Assim, para o desenvolvimento desta dissertação, tomou-se como principal desafio o melhoramento e aperfeiçoamento de um molde existente na empresa, o 7183-3440, com a

integração de novas tecnologias e estratégias associadas ao universo dos moldes, mais precisamente, no que concerne a inovação ao nível do controlo de temperatura.

Devido ao célere desenvolvimento tecnológico, as diferentes soluções referentes ao controlo de temperatura são cada vez mais numerosas e abrangentes, ditando arquiteturas, configurações e possibilidades no que a este sistema funcional diz respeito. Sabe-se hoje que este sistema funcional tem um papel primordial na minimização do tempo de ciclo, no controlo de qualidade das peças a obter e, portanto, na cadência de produção, constituindo, assim, uma premissa fundamental quer durante a conceção e fabrico quer na fase de obtenção das peças plásticas.

A evolução e aparecimento de novas técnicas tem, pois, constituído o mote de investigação e transferência de tecnologia. O controlo de temperatura numa ferramenta moldante faz-se hoje, também, por recurso ao uso de materiais de elevada condutividade térmica, arrefecimento pulsado (*pulse cooling*) ou até mesmo canais conformais.

No entanto, todo este conhecimento adquirido ao longo de um caso-de-estudo, só fará sentido se transposto para uma metodologia de trabalho assertiva que possa vir a ser interiorizada no seio empresarial. Assim, pretende-se dotar o gabinete de projeto de conhecimento técnico-científico conducente à utilização de toda uma metodologia CAD-CAE(Computer Aided Design/Computer Aided Engineering) de apoio à conceção de ferramentas moldantes que possa facilmente ser posta ao serviço do SM e produção, por se tratar de conhecimento interno e interiorizado.

1.4 Objetivos da dissertação

O presente trabalho de dissertação propõe um método de otimização do processo de moldes existente na empresa YSE, sendo que, para tal, o autor recorre ao uso de novas estratégias e tecnologias relacionadas com a refrigeração de moldes, como por exemplo, o uso de *softwares* de simulação reológica com canais conformais.

Assim, o trabalho pretende demonstrar, através de uma bibliografia adequada, diversas estratégias de refrigeração inovadoras que têm vindo a ser utilizadas no setor de moldes atual, sendo que posteriormente para cada uma dessas estratégias definidas não só são apresentadas as metodologias corretas para o seu projeto, desenvolvimento e aplicação, mas também são avaliados os impactos resultantes no ciclo de injeção do molde do caso-de-estudo, com o objetivo final de otimização do processo de moldação. De seguida, é então proposto, um estudo prévio do molde 7183-3440, no qual além de ser exposto um levantamento das metodologias projetuais adequadas ao projeto e desenvolvimento de moldes são também apresentados diversos parâmetros possíveis de aperfeiçoamento, estando estes mais relacionados com o processo de arrefecimento da moldação, uma vez que das três fases pertencentes a um ciclo (enchimento, compactação e arrefecimento), a fase de arrefecimento é aquela que representa uma maior porção de tempo total do ciclo - cerca de 60% - interferindo, como consequência, mais significativamente na qualidade final da peça.

Na segunda parte deste trabalho de dissertação, pretende-se definir uma proposta de aperfeiçoamento, de maneira a ser possível a otimização dos diversos métodos e processos que são presentemente praticados no SM da YSE, tendo como objetivo final a rentabilização dos seus recursos. Para tal, o estudo de otimização realizado no molde 7183-3440 será usado como caso-de-estudo para o levantamento das diversas necessidades que o SM precisará de colmatar para a produção não só desse molde, mas também para a produção de moldes idênticos.

Neste contexto, o conhecimento adquirido na empresa através da utilização dos seus recursos, da experiência dos operários e engenheiros que nela trabalham, da observação da preparação e injeção de plásticos, da produção de componentes para moldes, da MM bem como de toda a gestão e encadeamento destes processos permite o desenvolvimento projetual do molde bem como a análise das necessidades para a sua produção.

Deste modo, estabeleceram-se como principais objetivos deste trabalho:

1. Estudar e otimizar o ciclo de moldação e o molde 7183-3440;
2. Pesquisar e aprender novas estratégias de arrefecimento;
3. Estudar e caracterizar um novo e mais eficaz sistema de refrigeração;
4. Analisar o novo sistema de arrefecimento proposto;
5. Fazer um levantamento dos recursos existentes na YSE no que concerne o projeto e fabrico de moldes;
6. Propor soluções no que concerne as valências internas conducentes ao projeto e fabrico de moldes do setor da maquinação.

Em suma, com a realização desta dissertação, pretende-se definir uma solução para tornar o processo de produção do molde 7183-3440 não só mais eficiente como também mais rentável. Além disso, também é pretendido fazer a recolha da informação relativamente às ferramentas e/ou mão-de-obra que a Divisão de moldes necessita, de maneira a ter a capacidade de produzir moldes deste género. Assim, com a realização deste trabalho pretende-se auxiliar a empresa no que concerne à otimização dos seus métodos e processos através da definição de um conjunto de regras e metodologias a adotar, tanto na área de conceção e desenvolvimento de ferramentas moldantes, como na área de fabrico e maquinação, sendo que para isso, propõe-se a utilização das mais-valias já existentes na empresa, permitindo, assim, elevar os seus níveis de competitividade.

1.5 Guia de leitura

A presente dissertação encontra-se organizada em nove capítulos. No capítulo 1 são evidenciados os principais motivos que levaram à realização deste trabalho, assim como a descrição da corporação Yazaki, da YSE, da Divisão de Moldes e do SM desta empresa. São também apresentados os principais desafios e objetivos que se esperam resolver e atingir com o desenvolvimento deste trabalho. Por fim, é apresentada a descrição da estrutura desta dissertação que aqui se expõe.

No Capítulo 2 apresenta-se uma revisão bibliográfica onde é realizada uma introdução histórica da indústria portuguesa dos moldes e plásticos assim como a análise da sua situação atual e competitiva. É realizada também uma abordagem explicativa relativa à injeção de polímeros, ao processo de injeção e aos moldes de injeção, sendo feita uma análise mais aprofundada no que concerne os sistemas de controlo de temperatura, desde as técnicas convencionais até aquelas que se estão a tornar cada vez mais emergentes no mercado - como os canais conformais - e as que ainda se encontram em fase de desenvolvimento e investigação, como o arrefecimento pulsado.

No Capítulo 3 apresenta-se o caso-de-estudo propriamente dito, no qual é realizada uma análise da geometria, funcionalidade e características fundamentais da peça correspondente ao molde em estudo. Além disso é também apresentada uma análise do molde relativamente aos seus sistemas, as suas dimensões, bem como a sua geometria, composição, funcionalidade e a máquina onde trabalha.

No Capítulo 4 realiza-se o estudo analítico do projeto do sistema de arrefecimento no qual são especificados os métodos a adotar para uma correta elaboração do mesmo, bem como a análise do estudo já existente, realizado entre a Universidade de Aveiro e a YSE, na qual se encontram descritos os pontos mais problemáticos do projeto. São também caracterizadas as simulações que se realizaram, descrevendo não só a composição e diferenças das mesmas, mas também o objetivo a que cada uma se propõe.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados de cada uma das simulações numéricas efetuadas, sendo também elaborada uma análise explicativa e comparativa relativamente aos dados já existentes, expondo no fim um resumo das conclusões retiradas.

No Capítulo 6 é realizado um estudo relativo aos requisitos necessários para a empresa ter a capacidade de produzir moldes idênticos ao caso-de-estudo. Adicionalmente, é também apresentada uma breve introdução explicativa da necessidade desses requisitos, sendo posteriormente descritas detalhadamente essas necessidades quer relativamente ao gabinete de projeto quer à sala de maquinação.

No Capítulo 7 é apresentado o enquadramento das valências existentes no SM da YSE, quer a nível de máquinas e *softwares* quer a nível de mão-de-obra disponível, para posterior comparação com as necessidades expostas no capítulo 6.

No Capítulo 8 é realizado o estudo da produção do SM da YSE, onde se obtêm os "gargalos" de produção e são identificados os principais problemas. Com base neste estudo, são descritas propostas para o aumento da capacidade de produção, sendo também exposto o impacto das mesmas na produção bem como uma análise desses resultados.

No Capítulo 9 apresenta-se a comparação entre as mais-valias existentes na empresa e as necessidades básicas para a produção de moldes similares ao estudado, sendo também descrita, a evolução necessária para que a YSE passe a ter a capacidade de produção interna de moldes.

Finalmente, no Capítulo 10 evidenciam-se as principais conclusões retiradas com a elaboração deste trabalho, quer na área da otimização do processo de injeção, recorrendo à alteração do sistema de controlo de temperatura, quer na área de estudo das necessidades básicas para a produção de moldes e aplicação dessa temática no caso particular da YSE, bem como da otimização do SM para que isso se torne possível.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Breve Introdução Histórica da Indústria Portuguesa de Moldes

Para caracterizar a situação atual da indústria portuguesa de moldes é importante conhecer os fatores que estiveram na origem do seu aparecimento. Deste modo, a indústria de moldes metálicos para injeção de materiais plásticos teve a sua origem associada à fundação da primeira fábrica de vidro na Marinha Grande, decretada por Sebastião José de Carvalho e Melo - Marquês de Pombal - em 1769. A escolha da Marinha Grande - situada a 150 km a norte de Lisboa - para implementação dessa fábrica ter-se-á fundamentado em dois fatores principais: a sua proximidade ao mar, uma vez que a areia constitui a matéria-prima fundamental para o fabrico de vidro e a abundância de lenha existente no Pinhal de Leiria que era usada como combustível nos fornos (Ferreira, 2001).

Nesse mesmo ano, o Rei D. José chamou à corte portuguesa o inglês Guilherme Stephens para instalar na Marinha Grande a Fábrica de Vidro do Coina, hoje conhecida por *Fábrica Escola Irmãos Stephens* (FEIS), o que permitiu dar início à industrialização desta região (*CEFAMOL*, 2016). No entanto, passado algum tempo, Stephens começou a detetar a existência de alguns problemas na fábrica, tendo sido o mais significativo o facto de haver pouco pessoal qualificado. Este facto obrigou ao recrutamento de operários especializados na transformação do vidro provenientes de outros países, especialmente de Itália, Inglaterra, Irlanda e Bélgica. Assim, os operários estrangeiros ensinaram aos portugueses a arte de transformar o vidro, permitindo a criação de mão-de-obra qualificada na Marinha Grande, o que se revelou decisivo para o desenvolvimento desta indústria. Como tal, estas medidas contribuíram decisivamente para o crescimento económico e social da Marinha Grande como um grande centro industrial vidreiro, tendo esta passado a ser conhecida como a capital do vidro em Portugal.

Em 1923, deu-se um grande salto qualitativo para o nascimento da produção de moldes na Marinha Grande com a contratação de um técnico, Aires Roque, para a FEIS. Ao constatar que os moldes necessários na produção do vidro eram importados de vários países europeus, nomeadamente da Alemanha e da Áustria, Aires Roque demonstrou um grande espírito inovador ao lançar-se na fabricação dos primeiros moldes em ferro fundido, permitindo a criação de mão-de-obra especializada, sendo que as técnicas e tecnologias associadas a este

tipo de produto eram diferentes relativamente às usadas nos moldes metálicos para injeção de materiais plásticos.

Em 1926, instalou-se uma crise no setor vidreiro levando Aires Roque para Lisboa onde este adquiriu uma oficina para produção de moldes para prensa. Passados três anos, volta à Marinha Grande acompanhado pelo seu irmão Aníbal H. Abrantes, e juntos instalam a primeira oficina de moldes para vidro prensado. Esta oficina desenvolveu-se e transformou-se numa sociedade por quotas partilhada pelos dois irmãos, a *Aires Roque & Irmão*.

Em 1935, foi criada a primeira fábrica de plásticos, a *Nobre & Silva*, tendo esta contatado com Aníbal H. Abrantes para produzir alguns moldes para baquelite, uma vez que esta matéria plástica com a qual se formavam tampas e outras peças plásticas simples estava muito em voga neste período do século (Silva, 2007).

Com a deflagração da Segunda Guerra Mundial as matérias plásticas deixaram de ser importadas, o que afetou e alguns momentos paralisou a construção destes novos moldes. Apesar disso, com o finalizar da guerra, deu-se o arranque definitivo da nova indústria de fabrico de moldes para plásticos.

Nos anos subsequentes, Aires Roque continuou a trabalhar para a indústria do vidro. Em 1937, muda-se para Oliveira de Azeméis - concelho que é considerado o "Berço do Vidro"- e torna-se o percursor da indústria de moldes para vidro nessa região, tendo sido a fábrica da Marinha Grande entregue ao seu irmão Aníbal H. Abrantes. Em 1946, este acabaria por comprar a quota do seu irmão na *Aires Roque & Irmão*, mudando-lhe o nome para *Aníbal H. Abrantes*. Após isso, a fábrica deixou de produzir moldes para a indústria de vidro, dedicando-se exclusivamente ao fabrico de moldes para baquelite.

Ainda nesse ano, Aníbal H. Abrantes associa-se a António Santos e fundam a *Santos & Abrantes*, localizada em Oliveira de Azeméis. É nesta empresa que se produz o primeiro molde para plásticos dessa região. Nasce assim outro núcleo de conhecimentos da técnica e tecnologias relativas ao fabrico de moldes para plásticos (Beira *et al.*, 2004) .

Em 1946, surge uma nova classe de matérias plásticas, os termoplásticos. Estes materiais apresentam como característica fundamental a alteração de propriedades físicas e mecânicas com a variação da temperatura (Ferreira, 2001). Devido a esta característica única, o termoplástico permitiu dar origem ao fabrico do primeiro molde para injeção, sendo o processo realizado tecnologicamente diferente do anterior, uma vez que o primeiro funcionava por conformação mecânica. Além disso, a técnica de injeção exige que o material em estado semilíquido seja introduzido sob pressão no interior do molde - que confere a forma final da peça - após o arrefecimento do plástico.

Na sequência da grande expansão económica que se seguiu à Segunda Guerra Mundial e com o aparecimento dos termoplásticos, o fabrico de moldes para injeção de plásticos beneficiou de um enorme crescimento não só em Portugal como também no resto do mundo.

O ano de 1954 representou um marco fundamental na evolução da indústria de moldes nacional, dando-se início à sua internacionalização, uma vez que uma empresa suíça de instrumentos musicais celebrou um contrato com a *Aníbal H. Abrantes* para a produção de moldes para brinquedos, permitindo que esta comercializasse os moldes para todo o mundo.

Este facto atraiu novos clientes estrangeiros, levando ao aparecimento de diversos agentes de moldes, empresas intermediárias, e à internacionalização de outras empresas de moldes portuguesas, dando origem à vertente exportadora do setor.

Outro fator que contribuiu para a expansão do setor ao longo das décadas seguintes foi o acréscimo da utilização de peças plásticas produzidas por injeção em diversas indústrias, sendo as mais relevantes as indústrias: automóvel, aeronáutica, eletrónica, de eletrodomésticos e dos brinquedos. Em geral, esta procura era oriunda de países carentes de mão-de-obra, que vieram a Portugal à procura de uma remota indústria de moldes, que funcionava até então como mera subsidiária da indústria vidreira.

O êxito alcançado pela fábrica mãe, *Aníbal H. Abrantes*, levou antigos colaboradores da empresa a arriscarem e a fundarem as suas próprias oficinas, o que permitiu que nos anos seguintes nascessem outras empresas de fabricação de moldes para injeção de materiais plásticos (Silva, 2007). Como exemplo, na Marinha Grande surgiu a *Emídio Maria da Silva* (1947), a *Calazans Duarte* (1956), a *Somema* (1958) e a *Somoplaste* (1965). Por outro lado, em Oliveira de Azeméis fundaram-se a *António Santos* (1950), a *Moldoplástico* (1955), a *Simoldes Aços* (1959) e a *Pinhos & Ribeiro* (1963) (Ferreira, 2001).

Tendo em vista a contribuição para um maior desenvolvimento do setor em causa, é criada, em 1969, a Associação Nacional da Indústria de Moldes (CEFAMOL), que tem como principais objetivos a promoção dos moldes portugueses no exterior e a negociação com o governo e outras organizações oficiais, sendo estas nacionais ou estrangeiras, a fim de resolver assuntos do interesse da indústria portuguesa de moldes. O seu raio de ação inclui a pesquisa tecnológica, a formação profissional e o intercâmbio de informações técnicas e científicas com outras entidades da mesma área. É de referir que a CEFAMOL abrange a globalidade dos subsectores da indústria de moldes e não apenas os moldes para plásticos. Por consequência, em meados dos anos 80 já se exportava para mais de 50 países e na região da Marinha Grande e Leiria existiam mais de 64 empresas ligadas aos Moldes (*CEFAMOL*, 2016).

Em 1975, surge também a Associação Portuguesa da Indústria de Plásticos (APIP), uma associação sem fins lucrativos que sucede ao então Grémio Nacional dos Industriais de Composição e Transformação de Matérias Plásticas que datava de maio de 1957. A APIP surge com os principais objetivos de promover e apoiar a indústria de Plásticos bem como defender os seus interesses económicos, sociais e associativos, junto das entidades nacionais e organizações internacionais (*APIP*, 2016).

Em 1983, foi instalado o primeiro sistema CAD/CAM (Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing) na Indústria Portuguesa de Moldes. Mais tarde em 1991 é criado o Centro Tecnológico da Indústria de Moldes e Ferramentas Especiais (CENTIMFE) com o objetivo de dar apoio tecnológico ao setor e desenvolver atividades de interface entre outras "Instituições de saber" e a indústria, permitindo, desta forma, a promoção e a difusão da investigação e desenvolvimento tecnológico bem como o desenvolvimento das redes de cooperação e conhecimento.

2.2 Situação Atual e Competitividade da Indústria Portuguesa de Moldes & Plásticos

A competitiva relação entre a qualidade, preço e prazos de entrega tem impulsionado a Indústria Portuguesa de Moldes & Plásticos, permitindo o seu crescimento e a consolidação da sua notoriedade no mercado internacional.

Segundo os dados de 2015, o Setor Português de Moldes é composto por cerca de 450 empresas - com dimensão de pequenas e médias empresas (PME) - dedicadas ao fabrico de moldes e ferramentas especiais, empregando cerca de 8000 trabalhadores, com uma distribuição geográfica bipolar, designadamente, nas regiões da Marinha Grande e Oliveira de Azeméis (Miguel, Gomes e Portuguesa, 2015). Nesse mesmo ano, a exportação atingiu um valor superior a 590 milhões de euros – o melhor ano de sempre da Indústria em termos de produção e exportação pela quarta vez consecutiva, como é ilustrado na Figura 5– sendo o valor total de produção estimado de cerca de 690 milhões de Euros, facto representativo de que ao longo dos anos Portugal tem demonstrado uma elevada capacidade de adaptação às necessidades dos seus clientes e às evoluções quer dos mercados quer das tecnologias.

A análise da evolução da balança comercial (Figura 5) ao longo desta última década (2005 a 2015) demonstra a forte vocação exportadora do setor, em que o saldo da balança comercial revela uma tendência de crescimento nos anos considerados, tendo passado de 230 milhões de euros em 2005 para 440 milhões de euros em 2015.

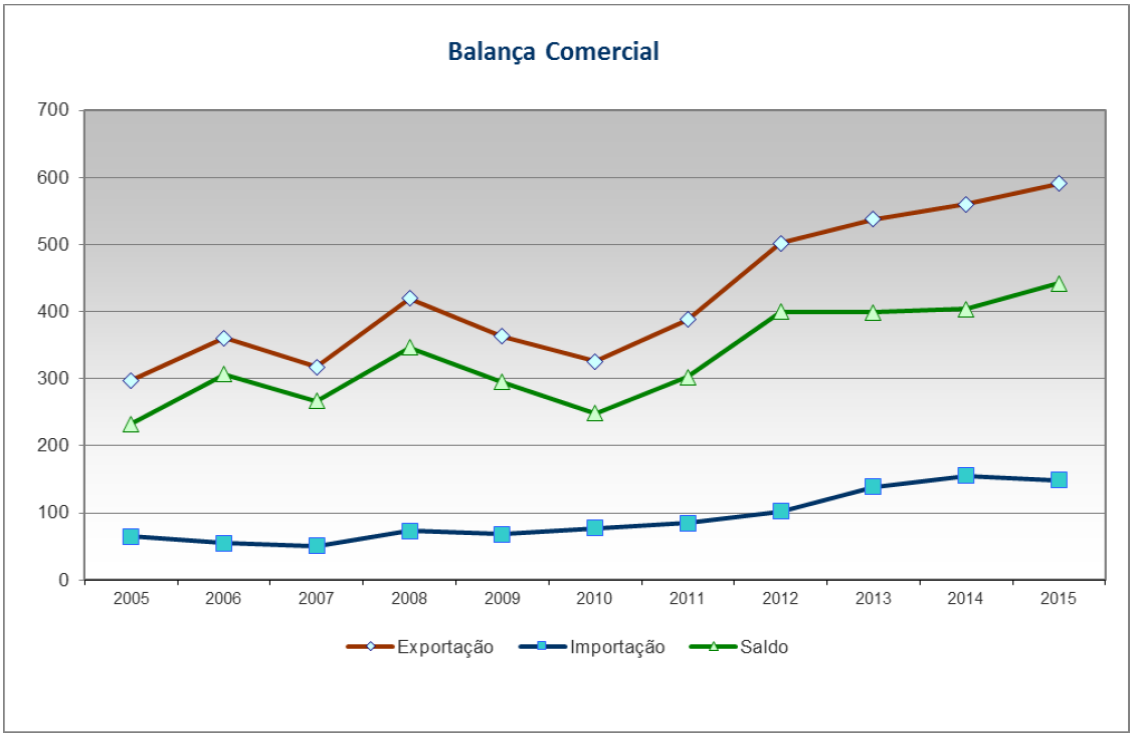


Figura 5 Balança comercial do setor dos moldes (Miguel, Gomes e Portuguesa, 2015)

Atualmente, Portugal encontra-se entre os principais fabricantes mundiais de moldes, nomeadamente, na área dos moldes para injeção de plásticos (8º a nível global, 3º a nível europeu), exportando mais de 85% da sua produção total (Figura 6). Deste modo, a análise da Figura 6 permite sublinhar a forte orientação exportadora do Setor, uma vez que a exportação nunca é inferior a 75% da produção, tendo o valor mais baixo sido registado nos anos associados à crise mundial registada nos últimos anos.

Valores Estimativos para o ano de 2014 e 2015
Fonte: CEFAMOL

Figura 6 Evolução do Mercado de Exportação (Miguel, Gomes e Portuguesa, 2015)

Esta situação que se verifica com maior intensidade desde 2004 também deriva do crescimento assinalável que a indústria nacional, nomeadamente a de plásticos, tem tido ao longo dos últimos anos, tendo sido esta muitas vezes impulsionada pelo alargamento da cadeia de valor das empresas de moldes.

Atualmente, e perante o nível de mutações técnicas e tecnológicas aceleradas, a indústria de moldes e de plásticos tem evoluído para uma crescente interligação e cooperação, procurando por um lado uma adaptação em tempo real às exigências dos mercados, e por outro, antecipação dos ciclos e tendências mundiais.

O progresso e a vanguarda desta indústria deve-se, não só à sólida experiência e *know-how*, mas também ao cumprimento dos prazos de entrega, ao rigoroso controlo de qualidade, à competitividade e ao investimento em alta tecnologia, sendo estes os fatores que asseguram a continuidade do fornecimento de moldes portugueses aos mercados mais exigentes.

Adicionalmente, pela análise da Figura 7, salienta-se que os cinco principais destinos das exportações portuguesas foram em 2015: Alemanha (22%), Espanha (19%), França (18%), Reino Unido (5%) e Republica Checa (5%).

Este grupo é seguido por dois mercados que representam, respetivamente, 4% e 3% das exportações nacionais – Polónia e México.

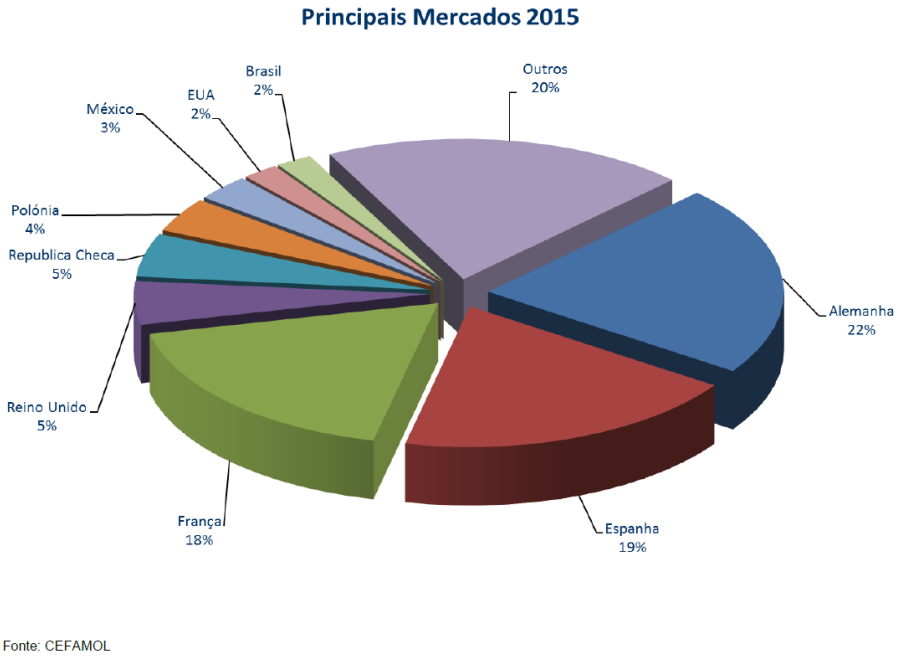


Figura 7 Principais Mercados em 2015 (Miguel, Gomes e Portuguesa, 2015)

A informação estatística, referente às principais indústrias servidas pelo Setor de Moldes faz sobressair a ideia de que a indústria automóvel tem vindo a consolidar o seu crescimento e importância no desenvolvimento do Setor, tendo evoluído de um peso relativo de apenas 14%, em 1991, para 74% em 2014 (Miguel, Gomes e Portuguesa, 2015).

Outra indústria em destaque é a da embalagem que também tem vindo a crescer de uma forma sustentada, representando neste momento 10% da produção nacional de moldes. No entanto, também se regista a presença do Setor noutros de grande importância para o desenvolvimento de novos produtos na economia mundial, assim como a procura por novas áreas e nichos, tais como a indústria aeronáutica e de dispositivos médicos (Figura 8).

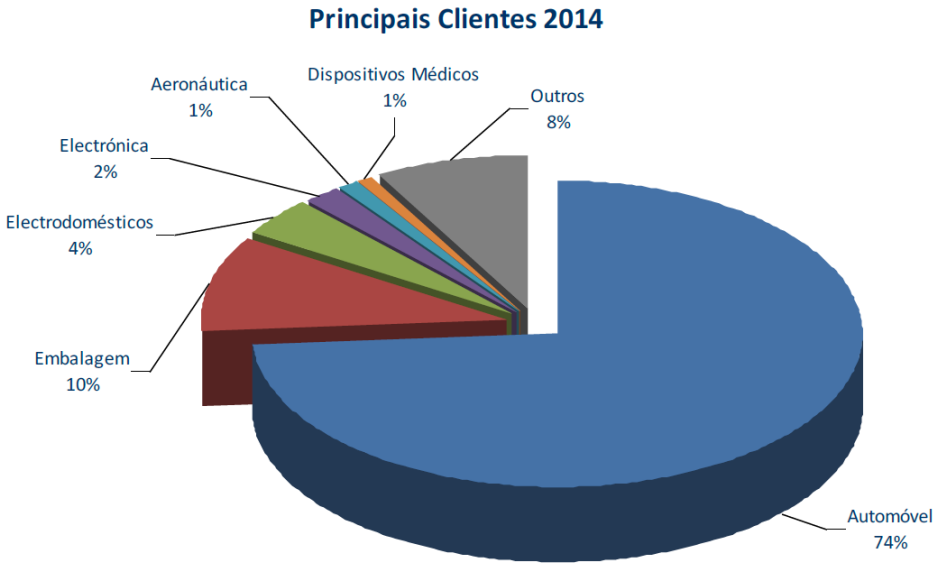


Figura 8 Principais Clientes do Setor em 2014 (Miguel, Gomes e Portuguesa, 2015)

2.3 A injeção de polímeros

A primeira tentativa de moldar por injeção um material plástico data da segunda metade do século passado quando, em 1872, nos EUA, foi patenteada a primeira máquina para o uso específico de nitrato de celulose.

A evolução da moldação por injeção foi muito lenta até aos anos 30, tendo por altura da Segunda Grande Guerra sofrido uma grande expansão devido ao aparecimento de uma gama bastante extensa de termoplásticos a preços competitivos bem como devido à implementação de sistemas hidráulicos de acionamento.

A partir da década de 50, com o desenvolvimento de uma nova geração de equipamentos - máquinas de parafuso alternativo, a moldação por injeção afirmou-se rapidamente como um dos mais importantes processos de transformação de plásticos.

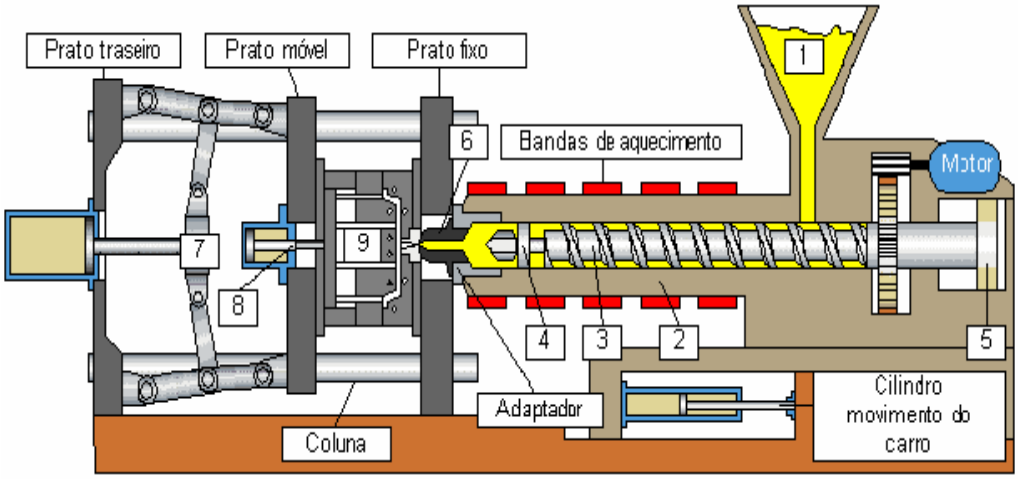
Hoje em dia, cada casa, cada automóvel, cada escritório, cada fábrica, contém uma quantidade enorme de diferentes tipos de artigos produzidos por injeção de plásticos em moldes. Deste modo, o processo de moldação por injeção é considerado um dos principais processos de transformação de materiais poliméricos, sendo, igualmente, aquele que maior importância económica tem. O seu sucesso deve-se, maioritariamente, à diversidade e complexidade das formas que se podem moldar, à possibilidade de obter acabamentos

superficiais bastante interessantes, à facilidade de automatização do processo e à garantia de produção de peças com tolerâncias dimensionais bastante reduzidas (Harada, 2004).

As máquinas de injeção geralmente dispõem de uma câmara cilíndrica preliminar aquecida, dotada de parafuso sem fim, a qual funciona como uma zona de fusão e homogeneização do polímero antes do mesmo ser admitido no canal de injeção do molde. A refrigeração do material é feita dentro do molde, de forma a permitir a sua solidificação e a remoção da impressão sem deformação.

Os equipamentos básicos para o processo de injeção são a máquina de injeção e o molde, sendo que a obtenção de peças de boa qualidade e ciclos de produção eficientes envolve também o uso de equipamentos auxiliares, tais como: controladores de temperatura do molde, sistemas de secagem e transporte da matéria-prima e sistemas para manuseamento e transporte das moldações (robots, tapetes rolantes, entre outros) (Cruz, 2004). Apesar de as máquinas atuais manterem ainda o mesmo projeto básico, os sistemas de controlo são hoje, naturalmente, muito mais sofisticados.

Na Figura 9 apresenta-se uma imagem ilustrativa do esquema de uma máquina de injeção.



Legenda

1. Tremonha
2. Cilindro de Plasticização
3. Fuso/Parafuso
4. 1 Válvula anti-retorno
5. Cilindro hidráulico
6. Bico de Injecção
7. Sistema de Fecho
8. Sistema de Extracção
9. Molde

Figura 9 Esquema de uma máquina de injeção (Aulas de Tecnologia de Polímeros, DEM, UA)

2.4 O processo de moldação por injeção

O processo correspondente à injeção de termoplásticos obedece a uma rotina cíclica, sendo que o conjunto de operações necessárias à produção de uma peça moldada se designa por ciclo de moldação.

A otimização deste ciclo é, portanto, fundamental para assegurar a competitividade económica do processo, dado que a rentabilização dos equipamentos necessários apenas se obtém ao trabalhar em séries de centenas de milhares de peças ou até mesmo milhões. Ainda do ponto de vista da divisão de Moldes da YSE esta otimização é imprescindível, pois para além de gerar mais lucros, dá a capacidade à fábrica de conquistar mais projetos de produção a

outras fábricas do grupo, contribuindo assim para a evolução e o crescimento das instalações de Ovar.

O processo de moldação inicia-se com a preparação da matéria-prima a ser injetada, sendo o polímero aquecido e desumidificado dentro dos secadores, respeitando as características do material, como por exemplo a temperatura e o tempo de secagem. Toda a qualidade do processo é afetada por esta etapa inicial, pois não pode haver humidade durante o ciclo de moldação. De seguida esta matéria-prima já tratada abastece a unidade de injeção.

A Figura 10 representa as diferentes etapas do ciclo de moldação.

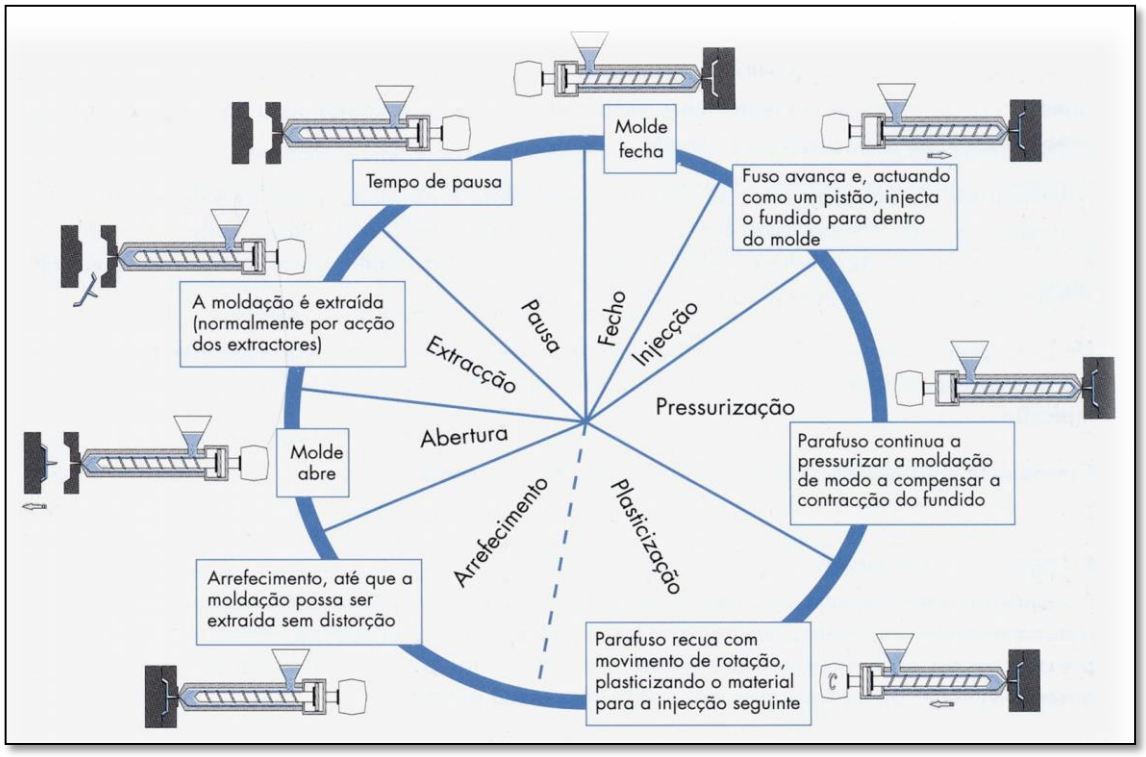
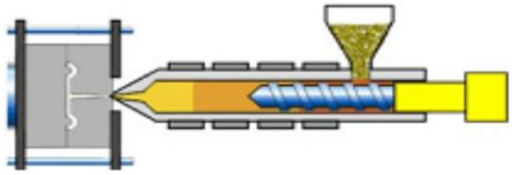
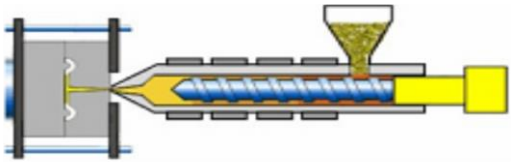
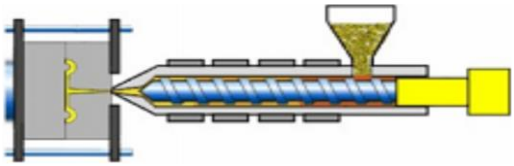
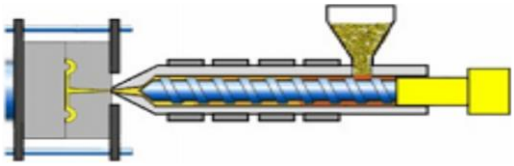
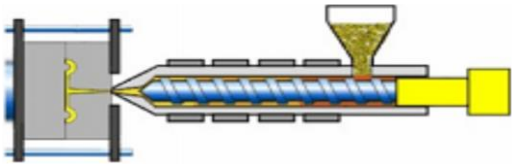
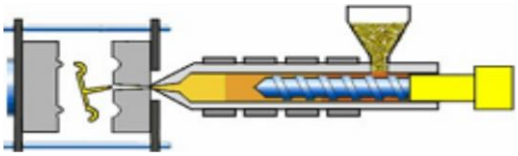
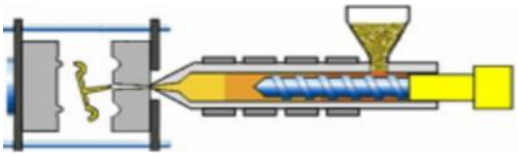


Figura 10 Fases do Ciclo de Moldação (Cruz, 2004)

Com base na Figura 10, apresentam-se, de seguida na Tabela 2, as diferentes etapas que constituem um ciclo de moldação por injeção.

Tabela 2 Resumo das etapas do ciclo de moldação.

Fecho do molde 	A máquina de injeção procede ao fecho do molde e de todos os componentes móveis necessários à moldação e extração das peças.
Injeção 	O fuso roscado move-se devido a um pistão hidráulico injetando o polímero pasticizado, que acaba por preencher a impressão por recurso a canais de injeção. A velocidade de injeção deve obedecer a um compromisso entre a qualidade da peça e o tempo de enchimento.
Compactação 	Também designada por segunda pressão, esta fase inicia-se após o enchimento da peça. Tem como função, forçar a entrada de mais matéria-prima no interior do molde, com o objetivo de compensar a contração resultante do arrefecimento e solidificação do produto.
Pasticização 	Após a solidificação do canal de injeção, o fuso da máquina roda e inicia-se a pasticização do material para o novo ciclo. O movimento de rotação obriga o material a fluir para a frente do fuso e este recua axialmente, devido à pressão, deixando um aglomerado de material fundido junto ao injetor, que se denomina almofada.
Arrefecimento 	Esta etapa do ciclo de moldação consiste na permuta de calor através do material do molde bem como entre o fundido e o sistema de controlo de temperatura. O tempo de arrefecimento depende principalmente da eficácia do sistema de refrigeração, da geometria e espessura da peça. Este tempo

	é definido pelo tempo que a peça demora a atingir a temperatura ótima de extração.
Abertura do molde e extração 	Aquando da abertura do molde, ocorre também a extração da(s) peça(s). Geralmente, a abertura do molde é feita em duas partes, o lado da injeção e o lado da extração. Desta forma, a peça injetada fica exposta e pronta para ser extraída. De seguida, as placas extratoras avançam empurrando a peça através de extratores. O produto final normalmente cai por gravidade ou é retirado por um robot. Após a extração da peça, as placas extratoras recuam e o molde volta a fechar. O tempo consumido por estas fases depende principalmente das características da máquina injetora, mas também da complexidade do molde e do método de injeção da peça.
Molde Aberto 	Esta é a etapa após a extração da peça e antes do fecho do molde. O seu valor deve ser igual a zero, 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.

2.5 Moldes para injeção de polímeros

Os moldes para injeção de polímeros são ferramentas que possibilitam a moldação das peças numa máquina de injeção. O tamanho, tipo - moldes de canais frios e de canais quentes - ou grau de complexidade - extração simples ou com movimentos - são tudo aspetos que podem variar, de caso para caso. Na sua forma mais simplificada, são constituídos por duas partes que se ajustam, definindo uma ou várias impressões com a geometria da(s) peça(s) que se pretende(m) obter. O seu objetivo principal é dar a forma desejada ao material a moldar. No entanto, existem outras tarefas destinadas a este componente, nomeadamente: a alimentação

desde o bico de injeção até à impressão permitindo o seu enchimento, a ventilação da impressão, o manter a impressão fechada durante o tempo necessário, o garantir a reprodutibilidade dimensional de ciclo para ciclo, o arrefecimento da moldação e a sua extração, sendo a qualidade superficial do molde fundamental no acabamento superficial da peça moldada.

O nível de sofisticação do projeto e do tipo do molde depende, basicamente, de aspetos económicos e tecnológicos. De entre os principais, destaque-se o número de peças a produzir, o tipo de material plástico a injetar, as especificações determinadas para as mesmas (aspetos funcionais e estéticos da peça), capacidade da máquina em que o molde vai trabalhar e o uso de equipamentos periféricos (Rosato e Rosato, 2000).

De uma maneira geral, o projeto mecânico do molde é abordado com grande cuidado, desde o desenho rigoroso dos seus componentes, à seleção dos materiais até à definição de tolerâncias e ajustes. Apesar de todo o cuidado que se possa ter na conceção de um molde, não se evita que depois de montado o molde para ensaios, este tenha que regressar algumas vezes à fábrica para correções mais ou menos complicadas, no entanto, quanto melhor for a simulação durante o projeto deste, menor é a probabilidade de isto acontecer.

A morfologia desenvolvida na moldação é condicionada pelo molde, devido a vários aspetos do seu projeto e construção. Por exemplo, a composição química do material do molde assim como a conceção do sistema de controlo de temperatura influenciam a velocidade de arrefecimento do fundido, a cinética da cristalização e, consequentemente, o desenvolvimento da estrutura.

2.5.1 Constituição do molde

A constituição dos moldes é determinada pela necessidade de realizar adequadamente as funções associadas à execução do ciclo de moldação.

Segundo este conceito, um molde pode ser considerado como uma estrutura (um conjunto de placas ou chapas) onde são montados ou maquinados os sistemas funcionais que como o nome sugere, são os sistemas que permitem que o molde desempenhe a sua função.

Posto isto, os principais sistemas funcionais de um molde são:

- Zonas moldantes;
- Centragem e guiamento;
- Alimentação;
- Escapes de gases;
- Controlo de temperatura;
- Extração.

As zonas moldantes correspondem ao espaço definido pela conjugação da cavidade e da bucha, que conferirá a forma à(s) peça(s) a produzir.

O sistema de centragem e guiamento é o sistema que permite por um lado montar o molde na máquina, e por outro ajustar as duas (ou mais) partes do molde, assegurando a reprodutibilidade dimensional das peças.

O sistema de alimentação é o sistema que permite a passagem do polímero fundido desde o cilindro da máquina de injeção até às zonas moldantes, permitindo o seu enchimento.

O sistema de escape de gases é o sistema que possibilita que o ar existente nas zonas moldantes possa sair, possibilitando o seu enchimento com o polímero fundido.

O sistema de controlo de temperatura, ou de arrefecimento, é o que contribui para um mais célere arrefecimento das peças, sendo um dos mais importantes, pois corresponde a cerca de 60% do tempo do ciclo e mais trabalhoso a ser estudado devido à elevada liberdade de sistemas possíveis. Como tal, este será o sistema mais abordado ao longo do presente documento.

O sistema de extração é o que permite fazer a extração das peças.

Consequentemente, a estrutura de um molde é um conjunto de vários componentes, como, placas, calços, extratores, parafusos, entre outros, cujo número depende do tipo de molde (*Manual Do Projetista de Moldes*, 2007)

2.6 Sistemas de controlo de Temperatura

Idealmente, no processo de injeção de materiais poliméricos, o molde deveria estar à temperatura do fundido durante a fase de injeção, sendo que durante a fase de extração, tanto o molde como as peças moldadas, deveriam estar à temperatura ambiente.

Nestas condições, seria necessário uma pressão de injeção muito reduzida e as peças seriam isotrópicas devido ao modo lento como teria sido feito o seu arrefecimento. Posto isto, as peças obtidas, corresponderiam àquilo a que se chama de "peças perfeitas". No entanto, como é percetível, o seu preço por unidade, seria extremamente proibitivo, o que faria com que a empresa que assim funcionasse não obtivesse lucro e consequentemente, fosse à falência em pouco tempo.

Assim, por razões económicas devem-se produzir as peças à maior velocidade possível, sendo, por isso, o arrefecimento do polímero fundido um aspeto fundamental no funcionamento do molde, procurando-se conjugar a rapidez do ciclo e o melhor nível de propriedades das peças com as especificações técnicas e económicas do produto.

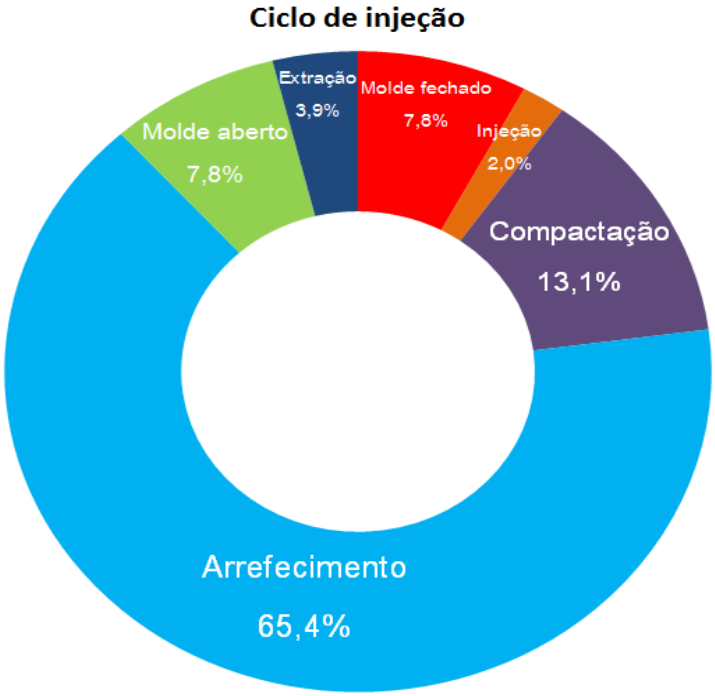


Figura 11 Proporção das Fases do Ciclo de Moldação (BIOMERICS, 2015)

Na Figura 11 é passível de se verificar que o sistema de refrigeração é talvez um dos que mais influencia o tempo de ciclo da moldação, uma vez que o tempo de arrefecimento representa cerca de 60% da duração total do ciclo de injeção, sendo mais longo no caso de materiais semi-cristalinos que nos materiais amorfos. O arrefecimento do material injetado é realizado por transferência de calor através da massa do molde para as superfícies moldantes que se encontram a uma temperatura consideravelmente mais baixa. Deste modo, a maneira como se faz o arrefecimento deve ser controlada, não só em termos de gradiente de temperatura do fluido refrigerante, mas também da sua uniformidade na superfície da zona moldante, de forma a evitar os chamados empenos, nas peças (STEINKO, 2004).

Para facilitar, acelerar e controlar o processo de transferência de calor são maquinados tão perto quanto possível das zonas moldantes furos de passagem para um fluído refrigerante. Estes furos também designados por "linhas de água", uma vez que a água é o fluído de refrigeração mais utilizado e mais rentável economicamente, constituem o sistema de controlo de temperatura de um molde.

É importante referir também que, o uso de "sistema de controlo de temperatura" ou de "sistema de arrefecimento", depende, especialmente da perspetiva de análise. Do lado da peça, o que se pretende, é arrefecê-la o mais rapidamente possível, logo, faz todo o sentido designar-se "sistema de arrefecimento". Em contrapartida, da análise do lado do molde, o que se deseja

é controlar a sua temperatura. Assim, para que um molde atinja, por exemplo a temperatura de 100°C, este terá de ser aquecido, por isso não é totalmente coerente designar o sistema que vai "aquecer" o molde por "sistema de arrefecimento". Então, neste caso o mais correto e universal será chamá-lo de "sistema de controlo de temperatura", embora o uso de ambas as expressões esteja correto.

Analisando agora os extremos desta questão, afirma-se que, um molde mais quente facilita o fluxo do fundido, produz peças com melhor aspeto superficial e menores tensões internas, ou seja, que um molde mais quente concede à peça uma melhor qualidade. No entanto, necessita de um tempo de arrefecimento mais longo, o que faz aumentar o seu preço. Analisando o extremo oposto, resulta que de um molde mais frio, obtém-se um fluxo mais dificultado, podendo não chegar a encher toda a peça com o polímero fundido (peças incompletas), produzindo peças com pior aspeto superficial e maiores tensões internas e menores tempos de arrefecimento (*Manual Do Projetista de Moldes*, 2007).

Um projeto devidamente realizado bem como a otimização de um sistema de controlo de temperatura consiste, deste modo, em encontrar um compromisso entre estas duas situações, no qual o objetivo das empresas é sempre obter peças com qualidade aceitável no tempo de ciclo mais curto quanto possível de maneira gerar maiores lucros.

2.6.1 Projeto de sistemas de controlo de temperatura

Como foi já mencionado anteriormente, o projeto do sistema de controlo de temperatura de um molde é algo de extrema importância, tendo influência sobre aspetos fundamentais, como por exemplo, a qualidade final da peça, o tempo de ciclo e consequentemente toda a rentabilidade e eficiência do molde.

Assim, o projeto destes sistemas deve obrigatoriamente ter em conta algumas regras gerais que permitam bons resultados na prática, como por exemplo:

- Preferência de circuitos independentes e simétricos, relativamente à zona ou zonas de enchimento do molde, tentando que estes acompanhem o melhor possível a forma das peças. Deste modo, o arrefecimento conferido às peças será igual entre elas no caso de múltiplas cavidades e as temperaturas na superfície moldante será mais uniforme;
- O percurso do refrigerante não deve ser longo ao ponto de que a variação da sua temperatura seja superior a 5°C (*Manual Do Projetista de Moldes*, 2007). Por isso, afirma-se ser melhor ter múltiplos circuitos independentes do que um único, mas mais longo, uma vez que se o aquecimento do fluído de refrigeração for muito grande a uniformidade de temperaturas será obviamente menor. Além disso, a existência de circuitos independentes pode permitir ter diferentes temperaturas no molde. Uma temperatura ligeiramente mais baixa em zonas onde é necessário retirar mais calor

(zonas mais espessas da peça) e, ligeiramente mais alta, onde seja necessário retirar menos calor, contribuindo assim para um arrefecimento mais uniforme.

- O fluído refrigerante que circula no molde em circuito fechado deve passar numa unidade de tratamento, por exemplo, no termorregulador, que consegue controlar o caudal do fluído. O sentido de circulação deve ser termorregulador, entrada do molde, saída do molde, regulador de caudal, termorregulador. Com este sistema, garante-se que os canais estão sempre cheios e que a transferência de calor seja mais eficiente.

A arquitetura dos sistemas de arrefecimento depende principalmente da forma da peça, e das suas dimensões, dado que elas condicionam o "espaço" existente para a sua implementação. Contudo, se para o arrefecimento exterior da peça, não existem, geralmente, grandes problemas, uma vez que o espaço se pode "criar", já o mesmo não se pode afirmar no arrefecimento no interior das peças, em que espaço está limitado pela geometria da peça. Além disso, para dificultar o projeto, são estas zonas que normalmente necessitam de uma maior remoção de calor.

2.6.1.1 Dimensionamento das "linhas de água"

Durante o processo de moldação, as temperaturas nas diferentes partes do molde oscilam devido ao ritmo regular do ciclo e também devido a alterações nas condições de processamento. A exata modelação do processo de arrefecimento, se possível, envolveria uma quantidade de trabalho matemático incomportável em termos práticos. Por isso, costumam aceitar-se e fazer-se algumas hipóteses simplificativas que não só tornam o problema maneável e comportável de se fazer em tempo útil, como não afetam de maneira significativa os resultados que em termos práticos continuam a ser satisfatórios. Deste modo, as simplificações referidas anteriormente consistem em:

- Processo quase estático;
- As flutuações nas temperaturas e nos fluxos térmicos durante os ciclos são desprezáveis;
- Consideram-se os valores médios das propriedades durante os períodos em questão.

Para efeitos de balanço térmico no molde, considera-se como positivo o calor recebido pelo molde e como negativo o calor cedido. Seguidamente, na Figura 12 ilustram-se os processos de transferência de calor ocorridos no molde.

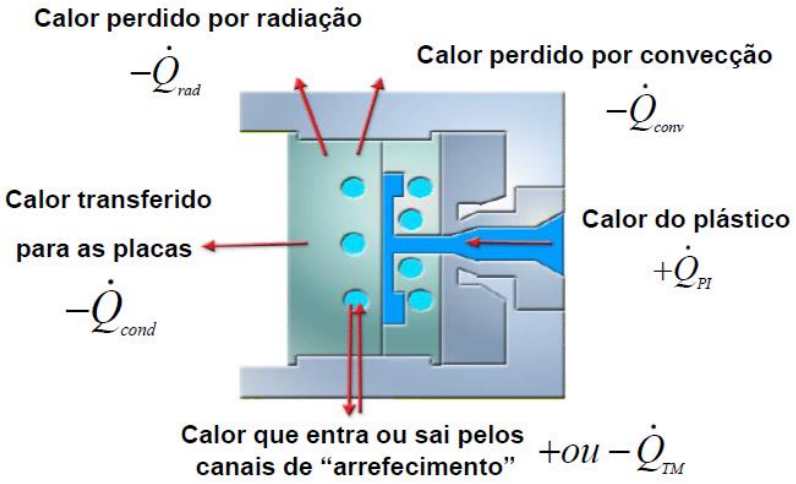


Figura 12 Balanço Térmico de um Molde (Slides das aulas de Projeto e Fabrico de Moldes e Ferramentas, DEM, UA)

Resumindo, o balanço térmico do molde pode ser expresso matematicamente pela equação 1 (Ricardo e Moreira, 2009):

$$\sum_i \dot{Q}_i = \dot{Q}_{TM} + \dot{Q}_{PI} + \dot{Q}_{AMB} = 0 \quad [1]$$

Onde:

$$\dot{Q}_{AMB} = \dot{Q}_{COND} + \dot{Q}_{CONV} + \dot{Q}_{RAD} \quad [2]$$

O fluxo de calor cedido pelo fundido, durante o tempo em que a cavidade do molde permanece cheia é dado pela equação 3:

$$\dot{Q}_{PI} = \frac{m*(h_{inj}-h_{ext})}{t_c} \quad [3]$$

A transmissão de calor para o ambiente ocorre através de três processos naturais: condução, convecção e radiação (*Manual Do Projetista de Moldes*, 2007).

- **Condução –** o fluxo de calor por condução dá-se para as placas de fixação do molde e é proporcional à diferença entre as temperaturas do molde e do ambiente, podendo ser calculado pela equação 4:

$$\dot{Q}_{Cond} = A_{fix} * \beta * (T_{amb} - T_{molde}) \quad [4]$$

A troca de calor para o ambiente por condução é talvez a forma de transferência de calor com maior importância, uma vez que representa aproximadamente entre 70-80% do total das perdas de calor para o ambiente.

- **Convecção –** o fluxo de calor por convecção ocorre pela área lateral do molde e pode ser calculado pela equação 5:

$$\dot{Q}_{CONV} = A_{lat} * \alpha * (T_{amb} - T_{molde}) \quad [5]$$

- **Radiação –** o fluxo de calor por radiação pode ser calculado pela equação 6:

$$\dot{Q}_{Rad} = A_{lat} * \varepsilon * C_{Rad} * \left(\left(\frac{\theta_{amb}}{100}\right)^4 - \left(\frac{\theta_{molde}}{100}\right)^4\right) \quad [6]$$

Conhecido o valor do calor transportado pelo fundido e das trocas de calor com o ambiente, a quantidade de calor que terá que se retirar com o fluido de arrefecimento é calculado pela equação de balanço térmico:

$$\dot{Q}_{TM} = -\dot{Q}_{PI} - \dot{Q}_{AMB} \quad [7]$$

Com este dado consegue-se estimar o caudal mínimo do fluido refrigerante, fixando o aumento da sua temperatura durante a passagem pelo molde. Esta variação de temperatura deve-se situar entre os 2 a 5 °C. Posto isto, o caudal é dado pela equação 8:

$$\dot{m} = \frac{|\dot{Q}_{TM}|}{C * \Delta T} \quad [8]$$

Conhecido o caudal de fluido refrigerante, pode-se determinar o diâmetro recomendado para as "linhas de água". De acordo com a Tabela 3 podem seguir-se algumas regras de projeto no sentido de acomodar "linhas de água" bem como elementos normalizados nos sistemas de refrigeração, seguindo as correspondências entre caudal e diâmetro de condutas.

Tabela 3 Definição do diâmetro das "linhas de água" em função do caudal.

Caudal (l/min)	Diâmetro (mm)
3,8	8
9,5	11
38	19
85	23,8

Para que a transferência de calor seja ainda mais eficiente e a qualidade das peças assegurada, deve-se garantir que o escoamento é turbulento. Deste modo, este regime de sempre ser imposto, sendo que isto ocorre quando o número de Reynolds é superior a 3500.

Por outro lado, o comprimento dos canais de refrigeração é outro critério de extrema importância a ter em conta, sendo que este deve ser o maior possível. Por isso, deve-se sempre verificar, através da seguinte equação, se o comprimento das "linhas de água" existente no molde é superior ao mínimo necessário para assegurar a transmissão de calor pretendida.

$$L = \frac{2 * |\dot{Q}_{TM}| * e}{k * \pi * d * \Delta T} \quad [9]$$

2.6.2 O arrefecimento convencional

Os sistemas de controlo de temperatura usados nos moldes de injeção possuem arquiteturas que são determinadas em função do perfil da cavidade, conforme a superfície externa da peça, ou em função do macho, conforme a superfície interna da peça (Cruz, 2004)(Harada, 2004)(Manrich, 2005)(Manrich, 2005).

Ainda de acordo com os autores referidos acima, os sistemas de refrigeração usados nos moldes de injeção podem ser mais ou menos tipificados incluíndo canais convencionais, as típicas "linhas de água" (obtidas por furação), as lâminas, cascatas, serpentinas (espiral ou helicoidal) e até canais que acompanham o perfil das cavidades dos moldes de injeção, como os canais obtidos por prototipagem rápida (PR).

Os sistemas provenientes da maquinação, aplicando-se o processo de furação, encontram-se conectados de forma a criar um circuito fechado, ou seja, o fluido circula nas cavidades do molde e retorna ao ponto de partida. Os circuitos desenvolvidos por este processo podem ter um único nível ou vários dependendo da altura da moldação e da arquitetura escolhida.

Seguidamente será apresentada uma descrição detalhada no que concerne as estratégias de arrefecimento mais importantes.

2.6.2.1 Sistema de arrefecimento com furação em "U"

A configuração dos canais em "U" ilustrada na Figura 13 é maioritariamente usada para cavidades longas e estreitas. De forma a permitir o fluxo do fluido refrigerante, as conexões dos furos podem ser idealizadas de três maneiras: intersectando-se as furações no interior do molde ao aplicarem-se tampões de vedação, através de placas de ligação, sendo uma sobreposta à face da placa do molde e a outra embutida na placa do molde ou através da conexão externa por mangueiras. Salienta-se que quando se opta pela conexão dos furos através de placas, torna-se necessário soldar ou aparafusar as placas, com a aplicação de parafusos, através de agentes de vedação como O-ring ou juntas.

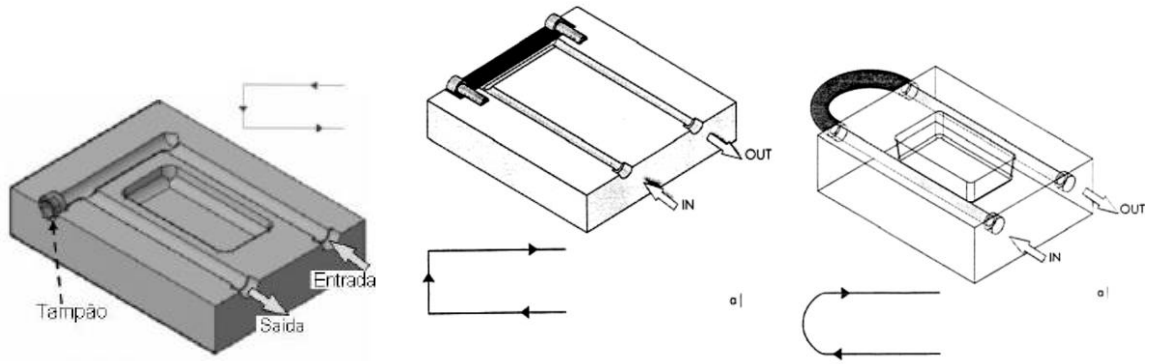


Figura 13 Configurações de canais em "U" (conexão: por furos, por placas e por mangueira)(*Manual Do Projetista de Moldes*, 2007)

2.6.2.2 Sistemas de arrefecimento com furação em "Z"

Os sistemas com furação em "Z", ilustrados na Figura 14, são aplicados, normalmente, na refrigeração de moldes com uma ou duas cavidades quando estas apresentam uma altura elevada. O desenvolvimento deste tipo de circuito é recomendado para peças que possuam um perfil baixo, em função do grau de complexidade da geometria aplicada na configuração do molde.

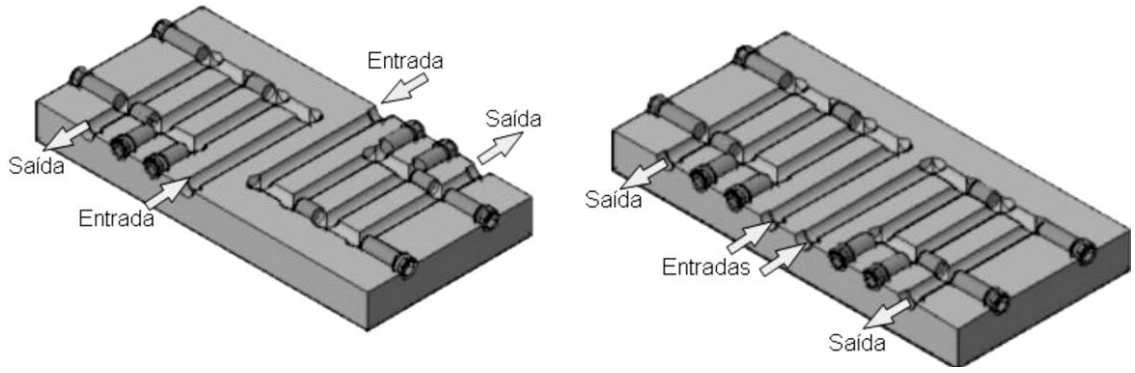


Figura 14 Circuitos com furação em "Z" (simétrica espelhada e simétrica) (*Manual Do Projetista de Moldes*, 2007)

Portanto, pode-se optar entre a utilização de dois tipos de circuitos. Por um lado, a configuração simétrica espelhada que é mais utilizada quando se tratam de duas peças simétricas (direita e esquerda), sendo este tipo de circuito mais adequado para a obtenção de

um arrefecimento mais uniforme dessas peças. No entanto, possui o inconveniente de ter as entradas e saídas em lados opostos do molde. Por outro lado, pode-se optar pela configuração simétrica, sendo esta a mais recomendada, normalmente, por ter as entradas e saídas no mesmo lado do molde. Em ambas as situações, as entradas do fluido refrigerante podem-se localizar "ao centro" e as saídas nos "extremos", ou vice-versa. Na configuração desses dois tipos de circuitos recorre-se ao uso de tampões, de maneira a criar os desvios de percurso necessários para anular quaisquer fugas de refrigerante (Bom, 2014).

2.6.2.3 Sistemas de arrefecimento para cavidades circulares

Os sistemas de refrigeração de cavidades circulares, apresentados na Figura 15, são principalmente empregues na refrigeração de peças que apresentam um perfil circular e/ou em peças que possuem uma grande área com perfil mais alto.

Exemplificando, para um produto como uma bacia, o sentido e a disposição dos furos podem ser trabalhados, tornando-os perpendiculares ao furo de entrada do fluido de refrigeração, podendo estes ser ou não independentes, sendo esta dependência ditada pelo tamanho do percurso.

Este tipo de circuito permite que os canais possam ser maquinados perto da superfície interna do postiço, ou seja, próximo da superfície da cavidade, possibilitando a obtenção de uma melhor eficiência do sistema na refrigeração da peça.

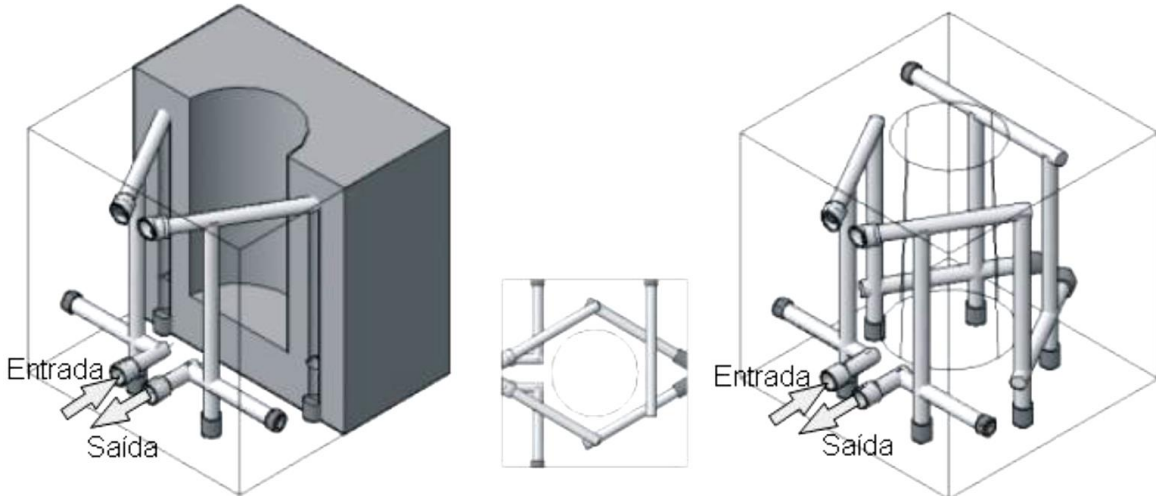


Figura 15 Arrefecimento de cavidades circulares (*Manual Do Projetista de Moldes*, 2007)

2.6.2.4 Sistemas de arrefecimento com circuitos inclinados

Os sistemas com circuitos inclinados, ilustrados pela Figura 16, são maioritariamente usados em machos compridos, cujos furos estão ligados. Este sistema permite evitar a furação da parede lateral do macho e os defeitos oriundos de possíveis marcas no produto injetado. O grande inconveniente é não poder ser aplicado em todos os perfis de machos, sendo que só pode ser aplicado em formas muito peculiares, pois dificilmente o circuito acompanhará o perfil do macho e possivelmente a refrigeração não será eficiente (*Manual Do Projetista de Moldes*, 2007).

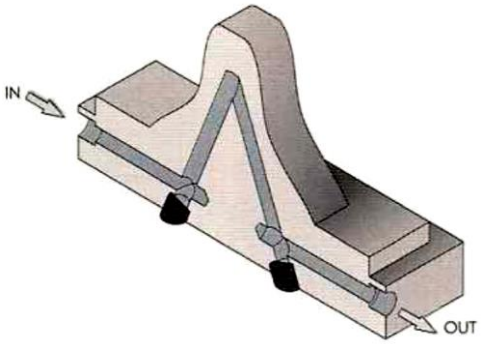


Figura 16 Circuito de água inclinado (*Manual Do Projetista de Moldes*, 2007)

2.6.3 Sistemas de arrefecimento maquinado com aplicação de tubos de cobre

Os sistemas de refrigeração com aplicação de tubos de cobre são sistemas polivalentes, uma vez que se apresentam na configuração "U", "Z", circular e retangular. Esta é uma alternativa aplicada quando os furos de refrigeração intersetam a linha de junção do molde. Por isso, os postiços são montados em caixas abertas. Quanto aos tubos utilizados para se formar o circuito de refrigeração, estes necessitam ser flexíveis, de modo a acompanharem a configuração do circuito "U", "Z", circular e retangular, dependendo das necessidades apresentadas. As folgas existentes entre o tubo de cobre e a caixa, em função da maquinação dos canais, necessitam de ser preenchidas com uma liga de baixo ponto de fusão, o que facilita a transferência de calor. A união das placas do molde envolvidas pode ser realizada por parafusos (Bom, 2014).

2.6.4 Sistemas de arrefecimento de circuito em cascata (bubbler)

O sistema de refrigeração em cascata, exemplificado pela Figura 17, é composto por um tubo maquinado inserido numa furação existente no macho. O fluxo do fluido refrigerante passa inicialmente pelo interior do tubo e depois "escorre" pelas paredes existentes entre o tubo e o macho, na forma de uma cascata saindo por um canal próprio para esse efeito.

Nestes sistemas de controlo de temperatura, deve-se ter especial atenção durante a fase de projeto e fabrico, de maneira a evitar a formação de possíveis bolsas de ar na base da câmara da bucha, dado que estas podem provocar perfis de temperatura pouco uniformes.

Por consequência, esse tipo de sistema é recomendado quando se deseja levar a refrigeração a algum lado do molde, onde, pela falta de espaço, não é possível a criação de um canal de retorno, permitindo, assim, "levar" e "trazer" o fluido através de um único furo (Menges e Mohren, 1993).

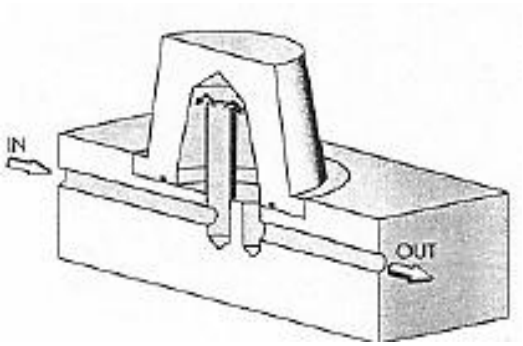


Figura 17 Circuito de refrigeração em cascata (*Manual Do Projetista de Moldes*, 2007)

2.6.5 Sistemas de arrefecimento de circuito em lâmina (baffles)

O circuito em lâmina, apresentado na Figura 18, é uma alternativa ao referido anteriormente, sendo uma solução de refrigeração para sítios do molde onde a falta de espaço não permite a existência de um canal de abastecimento e de retorno do refrigerante (*Graphite Techonologies*, 2016). Corresponde, portanto, a um sistema similar ao *Bubbler*, tanto no que se refere à sua conceção como à sua aplicação, tendo como principal diferença o tipo de separação utilizado na furação para que haja possibilidade da circulação do fluido (*Manual Do Projetista de Moldes*, 2007).

A separação ocorre através de uma lâmina separadora, que divide a furação em dois canais semicirculares, sendo que a lâmina separadora deve estar sempre perpendicular ao furo de passagem, no caso de entrada, obrigando o fluido a subir por uma das suas extremidades e a descer pela outra.

Quanto à fixação das lâminas, esta pode ser com cabeça roscada ou somente encaixado na placa. O perfil da palheta pode ser encontrado reto ou torcido em espiral, sendo que esta última torna o sistema mais eficiente, devido ao aumento da turbulência formada no interior do circuito (Menges e Mohren, 1993).

Outro caso onde a utilização de uma lâmina separadora pode ser útil é o de circuitos em "Z" em que por falta de espaço, estes só possam ter por exemplo três ramos. Isto faria com que a entrada e a saída ficassem em lados opostos. A utilização de uma lâmina separadora no canal central permite fazer com que a entrada e a saída passem para o mesmo lado, uma vez que, desta forma, o canal central passa a funcionar como se fossem dois canais. Adicionalmente, esta técnica pode também ser usada em cavidades fundas, como por exemplo, cavidades cilíndricas como se mostra na Figura 18.

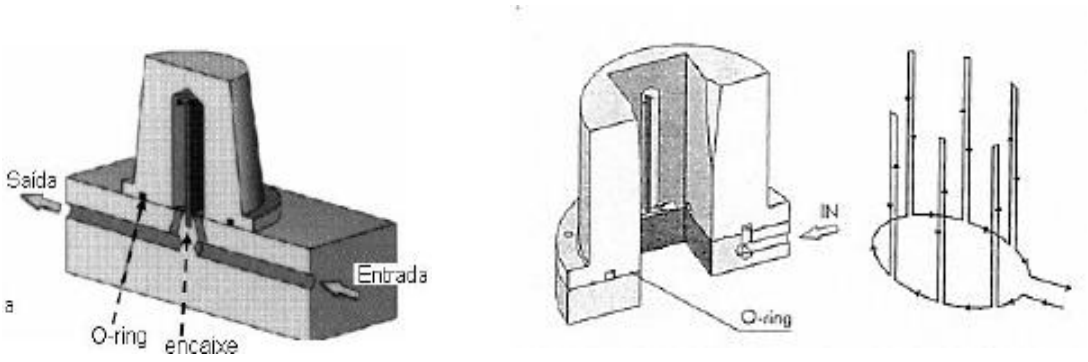


Figura 18 Circuitos de refrigeração em lâmina (*Manual Do Projetista de Moldes*, 2007)

Segundo (Eiamsa-Ard e Wannissorn, 2015) consegue-se concluir que a diferença entre as temperaturas das superfícies - usando sistemas de cascata ou lâmina - não é significativa. No entanto, é importante referir que existem diferenças consideráveis quando estas se comparam com as estratégias de arrefecimento lineares ("linhas de água" convencionais). Ainda se refere que as diferenças geométricas apresentadas entre os sistemas de cascata e de lâmina se relacionam com o espaço necessário para cada estratégia, uma vez que o sistema de cascata exige mais espaço que o de lâmina. Este facto explica também as diferenças apontadas por (Eiamsa-Ard e Wannissorn, 2015) onde o sistema em cascata consegue ter uma *performance* cerca de 18% melhor que o sistema em lâmina, sendo este resultado justificado pela maior área de transferência conseguida com a primeira estratégia.

2.6.6 Sistemas de arrefecimento com canais conformais

O sistema de canais conformais foi pensado com o intuito de uniformizar a temperatura do molde ao longo da superfície moldante. Contudo é o aparecimento da tecnologia *Direct Metal Laser Sintering* (DMLS) de manufatura aditiva que permite à indústria de moldes o fabrico de insertos e postiços com canais conformais diretamente a partir de modelações tridimensionais. É reportado que este tipo de refrigeração assegura qualidade do produto e ainda aumenta a produtividade em 20% (Mayer, 2009) .

O fabrico de insertos e postiços por DMLS é feito através de várias tecnologias de impressão tridimensional, sendo as mais usadas as impressões do género por camadas. O produto vai, consequentemente, sendo feito camada após camada em que cada uma destas é depositada estrategicamente de maneira a formar os canais conformais. Todo este processo resulta numa peça de metal onde estão contidos os canais de refrigeração, que tinham sido modelados em três dimensões (3D).

No entanto, as "linhas de água" tradicionais continuam a ser usadas para abastecer e remover o refrigerante dos canais conformais, presentes nos insertos ou postiços com esta tecnologia.

O arrefecimento através de canais conformais pode ser definido como um circuito de arrefecimento que se ajusta ao contorno da superfície da peça a ser moldada, como é exemplificado na Figura 19, ou seja, consegue minimizar a distância dos canais à peça a ser moldada, permitindo ao molde que está em contacto com a peça aquecer e arrefecer mais rapidamente durante cada ciclo (Moldflow, 2014). As vantagens proporcionadas por este tipo de refrigeração passam pela elevada taxa de arrefecimento e a diminuição do tempo de ciclo, sendo isto devido às possibilidades criadas pelos processos de maquinação por adição de material.

Como foi já referido, com a evolução das tecnologias de PR, torna-se possível incluir os canais conformais no fabrico de moldes, insertos e postiços com a possibilidade de estes terem formas bastante variadas e complexas. Contudo, quando se utilizam técnicas de fabrico por adição de material, é extremamente importante que o regime do fluido dos canais conformais seja estudado e compreendido antes do processo de fabrico do molde ser iniciado. Assim, recorre-se à simulação do comportamento do refrigerante de maneira a detetar possíveis aperfeiçoamentos antes do início do fabrico da ferramenta moldante (*Manual Do Projetista de Moldes*, 2007). Por isso, afirma-se que, para se obterem bons resultados com esta técnica, devem-se fazer estudos prévios da geometria e diâmetros dos canais conformais bem como avaliar o seu impacto no ciclo de injeção, tendo já sido confirmado com diversos estudos que, de facto, se conseguem obter resultados mais satisfatórios a nível de produção (Au, Yu e Chiu, 2011).

Assim, recorrendo ao uso de análise de elementos finitos e fazendo-se um estudo para um mesmo molde com arrefecimento convencional e outro com sistema de refrigeração com

canais conformais, consegue-se concluir que o tempo de ciclo é minimizado com o uso da última técnica de refrigeração.

Através da análise de elementos finitos, consegue-se observar igualmente, que é possível aprimorar a qualidade das peças moldadas a partir da correta determinação da geometria e temperatura do fluido (Au, Yu e Chiu, 2011).

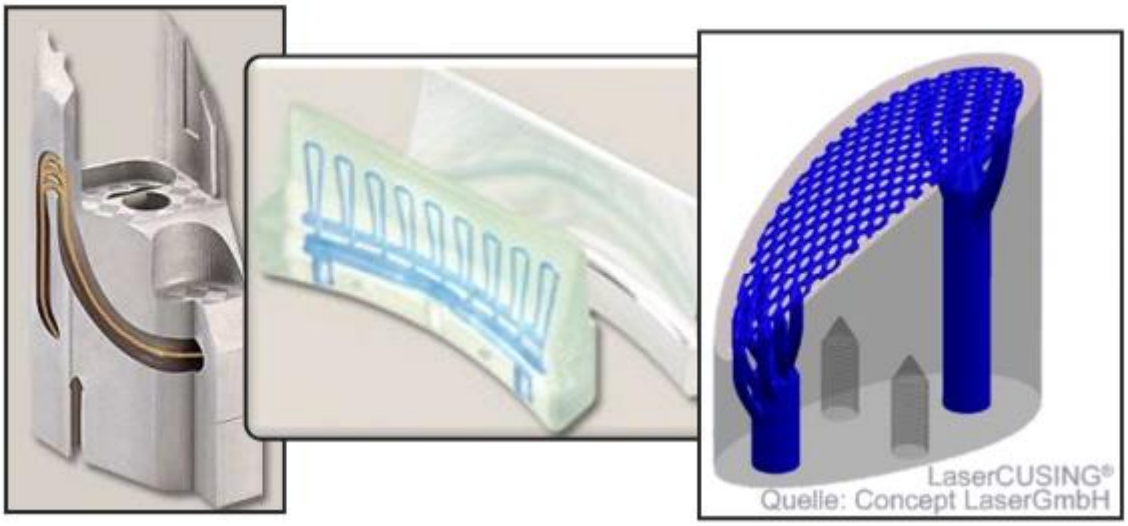


Figura 19 Circuitos de arrefecimento com canais conformais (*Concept Laser*, 2016)

Esta premissa foi também comprovada pelo estudo apresentado (Brooks e Brigden, 2016) no qual são comparados três tipos de sistemas de arrefecimento: o convencional, através de furos de 8 milímetros, com o seu centro afastado 12 milímetros da parede do molde, um com canais conformais de 6 milímetros, com o seu centro a 9,5 milímetros da parede e outro com canais conformais que acompanham toda a geometria da peça, estando os circuitos conformais distanciados de 3 milímetros das paredes do molde e tendo uma espessura de 5 milímetros. Em ambos os casos a temperatura de entrada do fluido é de 30°C. Diminuir a temperatura do molde após o arrefecimento ajuda a controlar a temperatura do molde durante o ciclo de injeção, o que tem uma influência direta no tempo de arrefecimento.

Os resultados deste estudo mostram que em comparação com o arrefecimento convencional, o arrefecimento com os canais conformais de 6 milímetros apresenta uma redução de 17,96% no tempo de ciclo e uma melhoria na qualidade final da peça. Contudo, o sistema de arrefecimento com camadas conformais é o que apresenta melhores resultados, uma vez que apresenta uma melhoria de cerca de 26,34% no tempo de arrefecimento quando

em comparação com o sistema convencional, mantendo a melhoria no que concerne a qualidade final da peça.

Também por aquilo que é passível observar na comparação entre o sistema de controlo de temperatura convencional e conformal, presente em (Bom, 2014) e (PARK e PHAM, 2009), se conclui que quando se utiliza - para a mesma peça - um sistema de controlo de temperatura com canais conformais, se consegue não só uma redução mais significativa do tempo de ciclo, como também se consegue uma peça com qualidade superior no final do ciclo de injeção. Segundo os resultados de (Bom, 2014), apenas com a substituição do sistema de controlo de temperatura convencional para canais conformais, consegue-se obter um aumento da eficiência média da refrigeração de 19% (convencional) para 36% (canais conformais). Além disso, a melhoria a nível da eficiência média do sistema de refrigeração tem uma influência direta no tempo de ciclo, que diminui cerca de 17%. Ainda, relativamente aos valores médios do empeno neste estudo podemos observar que a utilização de canais conformais, que acompanham melhor toda a superfície da peça moldada, permite uma diminuição de cerca de 10,5% do empeno da peça.

2.6.7 Arrefecimento pulsado (pulse cooling)

O conceito de arrefecimento pulsado (*pulse cooling*) na injeção de polímeros baseia-se no facto do fluido refrigerante apenas ser usado nos locais onde é realmente necessário, contrariamente ao que se sucede com o arrefecimento em contínuo, onde o fluido percorre os canais de refrigeração durante todo o ciclo.

Alguns investigadores afirmam que com o uso do método da refrigeração pulsada e com a redução da temperatura do fluido refrigerante é possível reduzir os tempos de ciclo bem como diminuir o consumo de energia do processo de injeção, quando comparado, com o método de arrefecimento em contínuo (Smith *et al.*, 2007).

O controlo da temperatura ótima da superfície moldante garante a manutenção da temperatura necessária para a injeção do polímero e posteriormente para a remoção de calor de molde proveniente desse processo, assegurando que a temperatura da ferramenta moldante volta, novamente, à temperatura necessária de injeção do polímero do próximo ciclo. Os conceitos principais a ter em conta para este controlo de temperatura são a geometria e a localização dos canais de arrefecimento, o caudal e temperatura do fluido refrigerante e as propriedades físicas e térmicas dos materiais do molde e das peças a serem injetadas.

O arrefecimento convencional baseia-se num caudal contínuo de refrigerante que circula pelos canais de arrefecimento durante todo o processo, no qual a temperatura do refrigerante deverá ser ligeiramente inferior à temperatura alvo do molde (Chen *et al.*, 2009).

O outro método, mais recente e, como consequência, menos estudado, corresponde ao arrefecimento pulsado. Esta estratégia permite controlar a temperatura da superfície do molde, através do uso intervalado de refrigerante através dos canais de arrefecimento, como resposta às alterações de temperatura registadas por sensores colocados no interior da

ferramenta moldante. Adicionalmente, também permite que as temperaturas do fluido sejam mais baixas e que este apenas circule pelos canais quando os sensores detetarem que a temperatura se encontra mais alta que a temperatura pré-definida.

Idealmente, o fluido refrigerante deveria circular uma vez por ciclo, ou seja, na fase de injeção não existiria refrigerante a circular e durante o arrefecimento este estaria "ligado". Como vantagens desta estratégia espera-se, o aumento da qualidade do produto, uma redução do tempo de ciclo, redução da energia necessária, redução da manutenção, versatilidade e facilidade do uso destes sistemas e redução das fissuras.

No estudo realizado por (Chen *et al.*, 2009) no qual foram testados os efeitos possíveis do sistema de controlo de temperatura pulsado, é demonstrado que este processo embora seja mais complexo de pôr em prática durante o ciclo de moldação, apresenta resultados bastante satisfatórios - quando comparado com os sistemas convencionais - como a redução do tempo de ciclo que neste caso atingiu valores na ordem dos 50%.

Noutro estudo apresentado por (Chen *et al.*, 2008), no qual foram moldadas as partes poliméricas dos discos *Blu-Ray*, foram usados como sistemas de controlo de temperatura, os sistemas convencionais e o sistema pulsado, obtendo-se resultados coniventes com os anteriores. Neste caso, em comparação com o sistema convencional de "linhas de água", o sistema de arrefecimento pulsado permitiu uma redução da temperatura do molde de 90°C para 82°C, o que resultou numa diminuição do tempo de ciclo de 10%. Segundo os autores, esta técnica de arrefecimento permite não só a redução do tempo de ciclo como garante igualmente uma diminuição dos empenos.

2.6.8 Uso de ligas de cobre

As ligas de cobre são várias e têm um teor em elementos de liga inferior a 1% (com exceção do berílio que pode atingir os 2%). Estas atuam, em geral, como bons condutores elétricos, permitindo conservar uma boa resistência à corrosão, enquanto que as suas propriedades mecânicas são melhoradas por encruamento ou endurecimento estrutural (Barralis e Maeder, 2005). O *Ampco 18* - liga de CuAl- apresenta, por exemplo, elevada resistência à fadiga e compressão.

2.6.8.1 Ligas cobre-berílio (CuBe)

O berílio é um material usado para o aumento da resistência mecânica das ligas de cobre, proporcionando boa rigidez, maior leveza e estabilidade dimensional. As ligas de CuBe são utilizadas em moldes para proporcionar uma transferência de calor relativamente rápida. Assim, as ligas CuBe dividem-se em dois grupos:

- Com alta condutividade térmica;

- Com alta resistência.

A condutividade térmica do primeiro grupo é geralmente cerca de 10 vezes superior à dos aços inoxidáveis e aços-ferramenta, tendo uma maior dureza e resistência que o alumínio.

Contudo, não são normalmente recomendados para moldes com altas cadências de produção, devido à sua relativamente baixa resistência ao desgaste, tenacidade e resistência à compressão, em comparação com o aço-ferramenta. Apesar disso, estas ligas estão num lugar especial no fabrico de moldes (Figura 20) em que a economia no fabrico e o tempo de ciclo são de extrema importância. Por outro lado, durante a vida útil de um molde, os custos de substituições periódicas podem ser uma grande desvantagem (Rosato e Rosato, 2000).

É comum encontrar postiços onde a realização de circuitos de refrigeração não proporciona um arrefecimento adequado da peça. Deste modo, a aplicação de postiço neste tipo de materiais torna-se vantajoso pois, em detrimento de um circuito de arrefecimento, existe um material capaz de transportar o calor, fazendo ele próprio o arrefecimento da peça por condução.

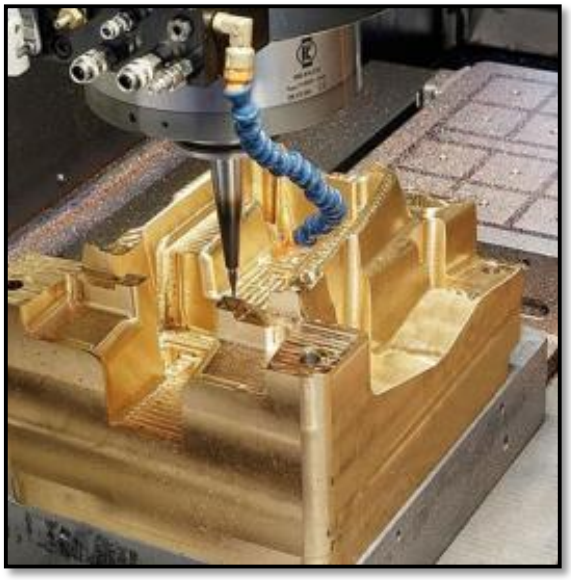


Figura 20 Postiço em liga de Cobre-Berílio (AmpcoMetal)

Propriedades como elevada condutividade térmica, resistência mecânica, baixo atrito e fácil maquinação tornam as peças uma mais-valia para o fabrico e construção de moldes, permitindo melhorar a qualidade do produto final assim como rentabilizar o molde, o que permite diminuir tempo de ciclo de injeção.

No entanto, estes materiais apresentam pelo menos um problema, quando se analisa a realidade da divisão de Moldes da YSE, que reside no facto de a maior parte dos materiais utilizados serem carregados com fibra de vidro, dado que quando as ligas de CuBe estão em

contacto com fibra de vidro apresentam um elevado nível de desgaste, potenciado por corrosão química.

Posto isto, embora este material apresente excelentes qualidades físicas quando aplicado em moldes e cause bons resultados no ciclo de moldação, não é totalmente fiável utilizá-lo para já nesta realidade.

2.7 CAE

O projeto de desenvolvimento de um molde é um processo que pode ser divido em quatro etapas (Park e Dang, 2012). Na primeira, é efetuado o modelo da peça a produzir e o molde para a respetiva peça. De seguida, com base nos cálculos auxiliares do projeto previamente realizados, os modelos são testados e aperfeiçoados com recurso a sistemas CAE, de forma a ser possível otimizar a produção e qualidade dos mesmos. Terminado esse processo, procede-se então à fabricação do molde e consequentemente à produção de peças por injeção.

A utilização dos sistemas CAE para simulação do processo de moldação por injeção e apoio ao projeto de moldes é consideravelmente vantajosa na aceleração do tempo de desenvolvimento dos mesmos.

O *Autodesk Moldflow Insight*® é uma das ferramentas computacionais de simulação de fluxo mais utilizada hoje em dia para este tipo de aplicações. Esta ferramenta utiliza o método dos elementos finitos para a solução numérica, com base nas equações de *Navier-Stokes* que descrevem o fluxo polimérico do fundido.

Posto isto, o funcionamento deste programa baseia-se na aplicação das seguintes premissas (Shoemaker, 2006):

- Utilização das equações de *Navier-Stokes* para fluídos não-newtonianos;
- Pressão, temperatura e velocidades em 3D são calculadas em cada nó da malha;
- É assumido que existe condução de calor em todas as direções;
- Os efeitos de inércia e gravidade podem ser incluídos nos cálculos;
- Considera-se uma condição de deslizamento na interface polímero/parede do molde;
- A dependência da pressão nos efeitos de viscosidade e nos efeitos de viscosidade extensional são considerados.

Refere-se também que as equações nas quais os cálculos do escoamento do polímero fundido se baseiam, estão em conformidade com os princípios de conservação da massa, conservação de momento e conservação de energia (Kennedy, 1995).

Relativamente às condições que o programa utiliza para as propriedades do material polimérico durante a fase de enchimento, salientam-se as seguintes:

- No enchimento, é assumido que a densidade do polímero é constante, o que significa que este não é compressível;
- O polímero fundido é considerado como sendo um fluido Newtoniano geral, não se considerando os efeitos viscoelásticos;
- Embora a condutividade térmica dos polímeros dependa da temperatura, esta é considerada como sendo constante durante a fase de enchimento.

No que se refere ao cálculo das contrações, este programa considera que durante o ciclo de injeção a peça se encontra limitada pelas paredes do molde. É igualmente tido em conta que a contração da camada solidificada é impedida através de dois mecanismos: a adesão das camadas mais exteriores da peça às paredes do molde e as forças de distensão da pressão do fluído durante a compactação.

No *Autodesk Moldflow Insight*® a análise da contração, é distinguida em duas variações: a contração ao longo da espessura da peça e a contração prevista segundo o comprimento da peça. Por exemplo, esta última é maioritariamente causada pela diminuição abrupta da temperatura do polímero ao longo da fase de enchimento, em que a solidificação do fundido é mais rápida do que no ponto de injeção.

Posto isto, a realização de uma simulação deve seguir um procedimento adequado, que compreende a correta definição dos dados iniciais e dos parâmetros de saída dos resultados (Shen, 2008).

Para a realização de análises CAE é necessário reunir um determinado número de pré-requisitos iniciais, indispensáveis para o estudo. Para tal são necessários, os seguintes dados iniciais:

- Informação geométrica ou modelo CAD 3D, que reúne informações relevantes tais como o volume de injeção, a extensão de fluxo, variação de espessura da moldação ao longo do fluxo;
- Material de moldação, estabelecendo as condições reológicas e térmicas do fluxo de fundido;
- Material do molde, que estabelece as condições para a determinação do balanço térmico entre o fundido e o molde.

Concluindo, a utilização de ferramentas de CAE no projeto de peças e moldes deverá permitir a melhoria do projeto, quer de peças, quer do molde, pela possibilidade de previsão do comportamento.

Capítulo 3

Caso-de-estudo

Para o desenvolvimento do presente trabalho foi proposta a otimização de um dos moldes atualmente utilizados pela YSE, permitindo, deste modo ilustrar as melhorias possíveis de serem realizadas no universo de moldes existente na empresa.

Assim, o molde 7183-3440 foi selecionado para o caso-de-estudo, sendo esta escolha justificada não só pelo facto de este molde já ser objeto de estudo noutros projetos de investigação que têm como parceira a Universidade de Aveiro, mas também devido ao desafio que o mesmo proporciona dado que este possui um arrefecimento pouco eficiente com "linhas de água" parcialmente vazias de fluido. É de salientar que esta característica origina um arrefecimento não uniforme, e por consequência, um tempo de ciclo mais elevado. Além disso, também leva a que os empenos e as deformações presentes nas peças obtidas por moldação fiquem muito próximos da tolerância estabelecida, apesar do material usado ser carregado com 15% de fibra de vidro.

3.1 Identificação da peça

A peça em estudo corresponde a um conector elétrico de dimensões reduzidas que tem como destino final o uso no fabrico de cablagens automóveis. O molde usado para a obtenção destas peças possui 4 cavidades, com sistema de alimentação híbrido - bicos quentes e canais de alimentação frios - e sistema de refrigeração convencional.

Relativamente à sua morfologia, é uma peça com uma forma geométrica irregular, tendo 25 mm de comprimento, 16 mm de largura e 18 mm de altura, sendo que o desenho técnico da mesma não pode ser apresentado por questões de confidencialidade. Além disso, possui uma espessura que difere de extremidade para extremidade, sendo que esta varia desde uma espessura mínima de 0,45 mm até uma espessura máxima de 3,3 mm. Apesar dos dados demonstrarem que esta peça apresenta, a nível geométrico, uma variação considerável na espessura, deve ser tido em consideração que a mesma possui inúmeros detalhes e pormenores de tamanhos reduzidos, o que torna a peça muito reticulada e irregular.

Acrescenta-se ainda que a nível dimensional a tolerância estipulada pelo gabinete de qualidade da empresa é de ± 0.06 mm. No entanto, as peças só são aceites em termos de qualidade quando passam em dois testes distintos, o visual e o funcional, sendo que o primeiro

consiste na análise da forma do conetor enquanto que o segundo consiste em encaixar os terminais na peça, que mais à frente no processo serão montados neste conector. Salienta-se também que as peças apenas são medidas rigorosamente uma vez por ano (em média), sendo que se cumprirem os requisitos do desenho são consideradas conformes não carecendo de ajustes. Em contrapartida, senão os cumprirem, obrigam a estudos e a reajustes no processo de injeção.

Atendendo aos diversos requisitos desta peça, como por exemplo, a necessidade que esta tem de ser acoplada e desacoplada, de manter a sua rigidez, de manter a sua geometria e de assegurar a ligação com os cabos elétricos esta peça é fabricada no termoplástico PBT com 15% de fibra de vidro (PBT+GF15), comercializado pela *Dupont* com a designação comercial de *Crastin* SK602 NC010 PBT®.

Seguidamente, na Figura 21 apresentam-se algumas imagens reais da peça em análise.

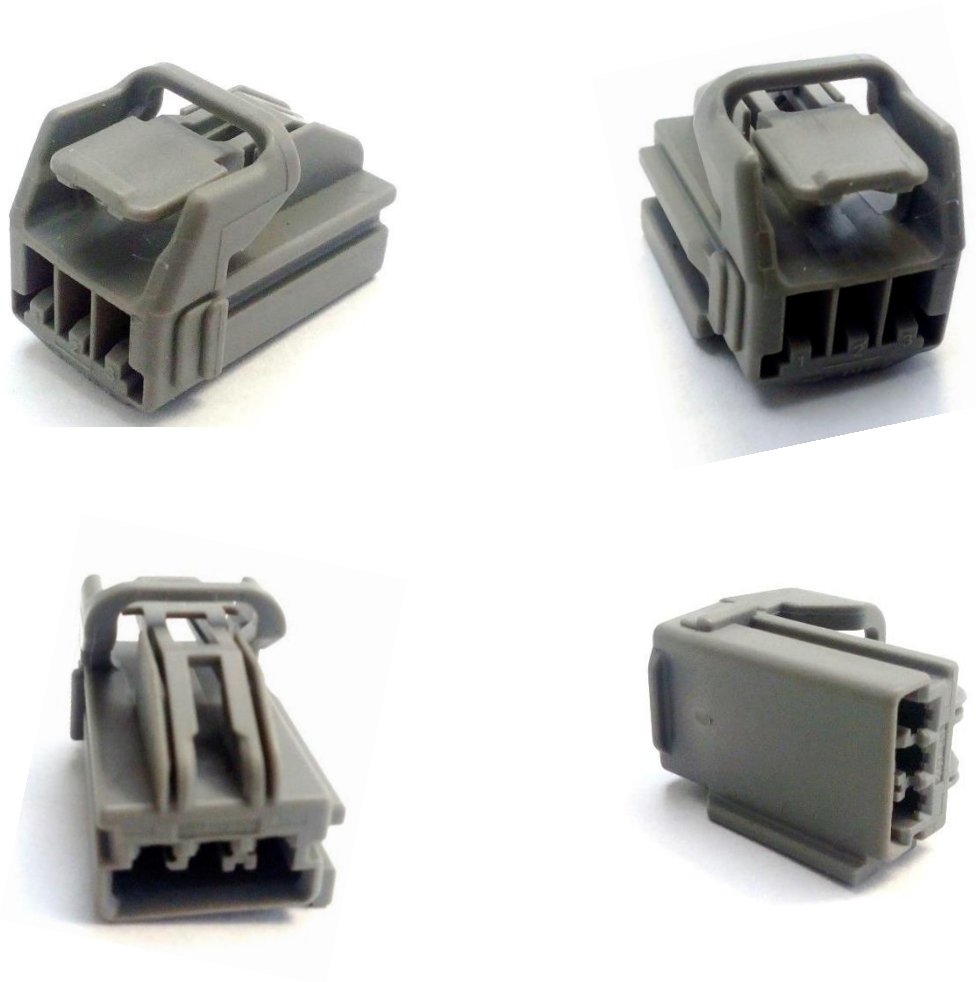


Figura 21 Apresentação da peça em estudo

3.2 Molde existente

O molde escolhido para o caso-de-estudo foi projetado e fabricado pela empresa *Rectimold*, sendo este constituído por duas placas e tendo uma capacidade para moldar 4 peças por ciclo. Este encontra-se presentemente a ser operado numa máquina de 50 toneladas de força de fecho, *Allrounder* 320 C 50 tons 2.3 oz (25mm) da marca *Arburg.*

Apesar do desenho técnico do molde não poder ser apresentado, salienta-se que a nível de dimensões externas o molde apresenta 300 mm de largura, 346 mm de altura e 368 mm comprimento. Na Figura 22 apresentam-se imagens da modelação em 3D do molde em estudo.

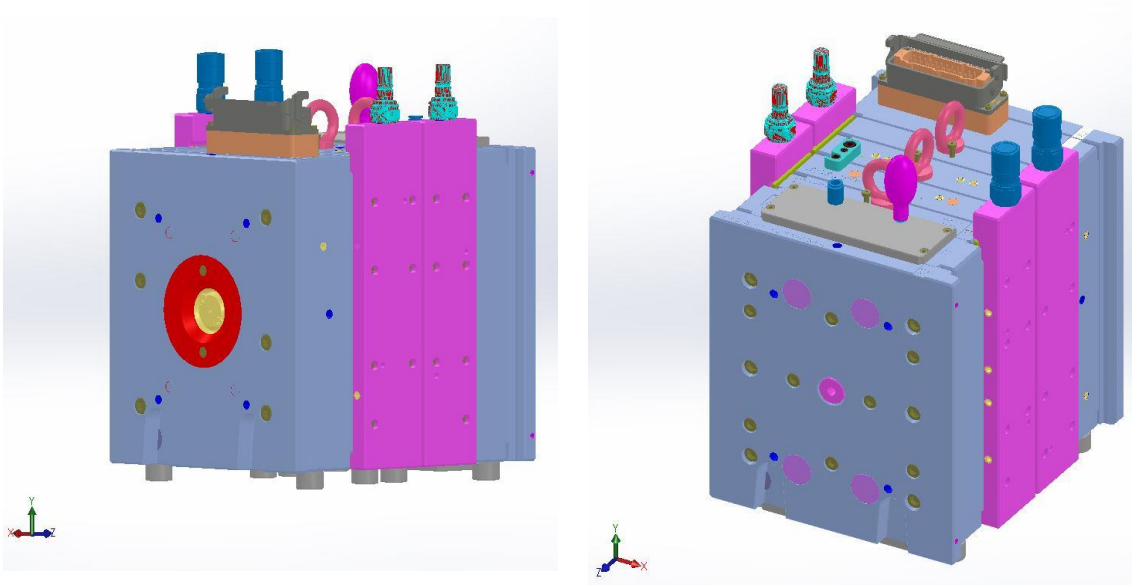


Figura 22 Imagens do exterior do molde (modelação em 3D)

Quanto ao sistema de alimentação, este molde é considerado "híbrido", uma vez que é constituído por uma alimentação que é feita através de dois bicos quentes em conjunção com canais frios, sendo que cada bico quente abastece duas cavidades. Deste modo, o fundido que sai do bico quente percorre um canal frio até começar a encher a peça, levando, posteriormente, à formação do jito quando esse caminho solidifica. Na Figura 23 apresenta-se um pormenor deste sistema funcional.

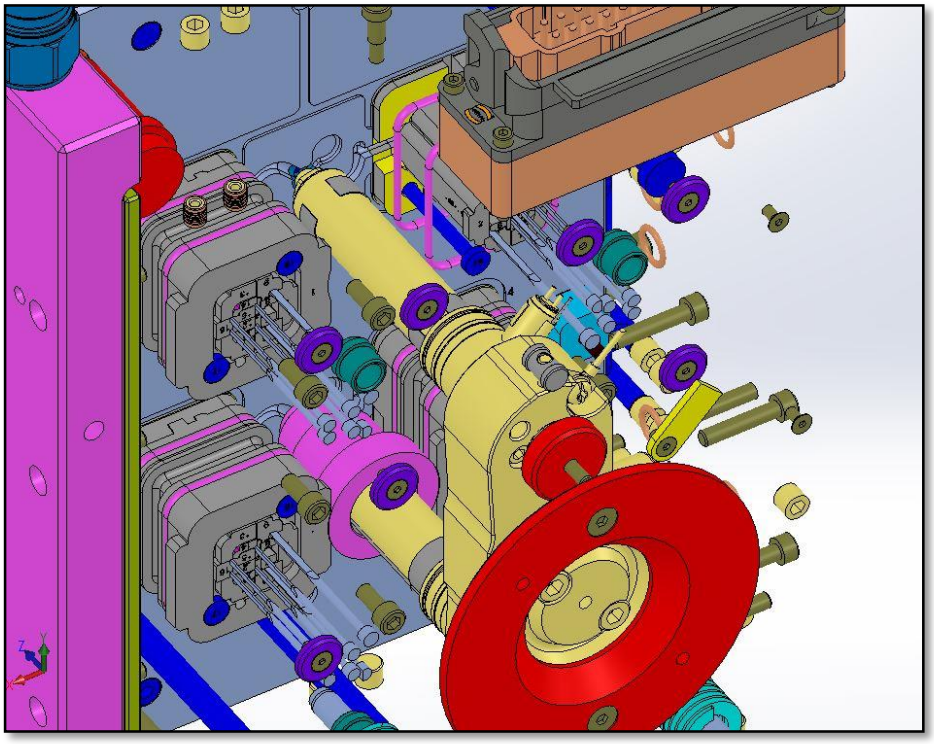


Figura 23 Sistema de alimentação do molde

Relativamente ao sistema de controlo de temperatura, este molde é composto por dois coletores, sendo que um permite o abastecimento e o outro a saída do fluído refrigerante. Cada um dos coletores é composto por um canal de refrigeração cujo diâmetro é de 14 mm, permitindo, assim, a formação de vários circuitos de diâmetros de 8 mm.

De seguida, caracterizando a parte fixa do molde – que corresponde ao lado da injeção -, o coletor origina sete circuitos em série, dos quais quatro se situam nos *pockets* e os restantes são considerados "linhas de água", tendo estes como principal função o arrefecimento da peça e o controlo da temperatura do molde nas zonas próximas do bico quente.

Por outro lado, analisando a parte móvel do molde – que corresponde ao lado da extração -, salienta-se que o coletor origina nove circuitos, dos quais quatro se localizam nos *pockets*, e os restantes situam-se mais afastados do plano de apartação. Na Figura 24 apresenta-se um pormenor construtivo do sistema de arrefecimento do molde.

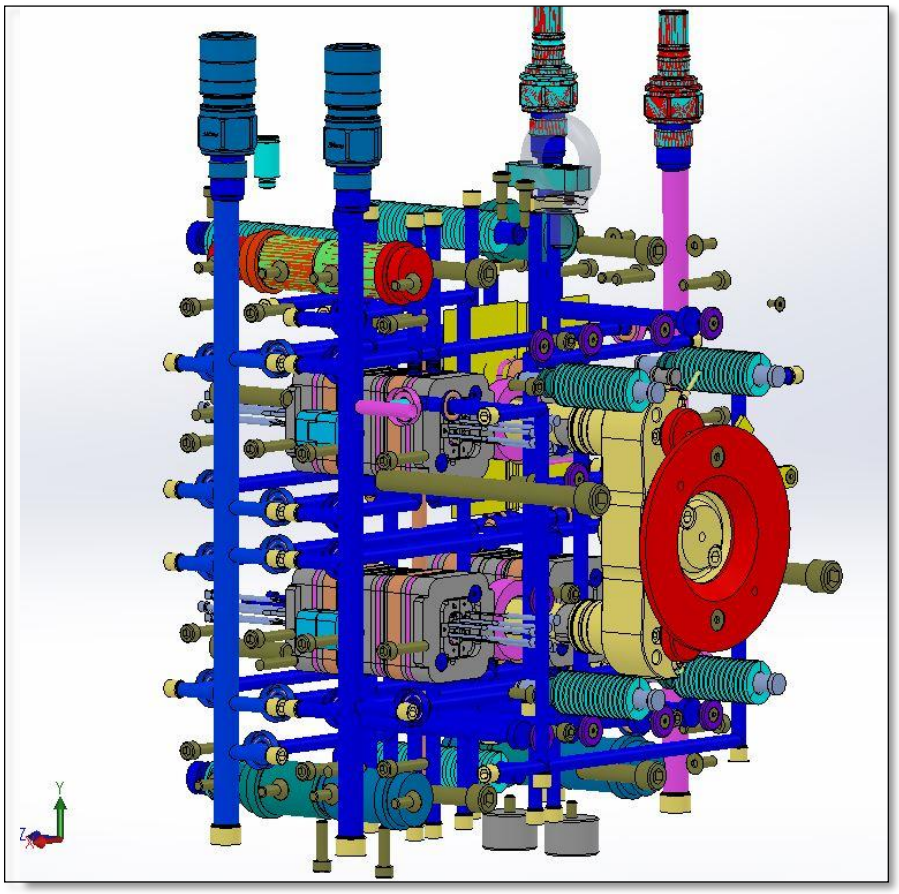


Figura 24 Sistema de arrefecimento do molde

Analisando os componentes físicos inerentes ao molde em estudo, observa-se que este possui dois sistemas de extração, um do lado da extração e outro do lado da injeção (que é menos habitual), podendo-se encontrar do lado da extração seis extratores por peça e do lado oposto cinco extratores por peça. Do lado da injeção, o sistema de extração tem o seu funcionamento baseado nos princípios de ação das molas. Quando o molde fecha estas ficam comprimidas, permitindo que os extratores sejam recolhidos, contudo, aquando da abertura do molde as molas vão distendendo continuamente. Esta abertura tem como consequência a deslocação dos extratores deste lado, fazendo com que as peças não fiquem alojadas no interior do molde da parte fixa, uma vez que é neste lado que é moldada a maior parte da peça.

Do lado da extração, o molde baseia-se no sistema tradicional, no qual a máquina em que está montado é acionada através do movimento de joelheira. Além dos 6 extratores por peça existentes neste lado, é importante referir que existem também 3 extratores dedicados à extração de cada jito.

Quanto aos *pockets* ou blocos moldantes, estes são estruturas que são montadas nas placas de aço do molde. Neles são maquinadas as "linhas de água" que permitem fazer o arrefecimento

do material fundido e, ainda mais importante, é nestas estruturas ocas, que são montados os postiços que dão forma ao interior e exterior da peça, conferindo a esta os detalhes e pormenores desejados.

Estes postiços poderiam estar aglutinados num só, originando um só núcleo em vez de 24 postiços, no entanto, existe a necessidade de se fazer cada vez mais uma divisão maior, em que cada postiço passa a ter dimensões mais reduzidas devido à elevada necessidade de se proporcionar uma fuga de ar satisfatória de dentro das cavidades no momento da injeção, conseguindo-se desta maneira evitar defeitos consequentes. Seguidamente, nas Figuras 25 e 26 apresentam-se pormenores dos sistemas de extração. Na Figura 27 podem ser visualizados detalhes dos blocos moldantes e postiços.

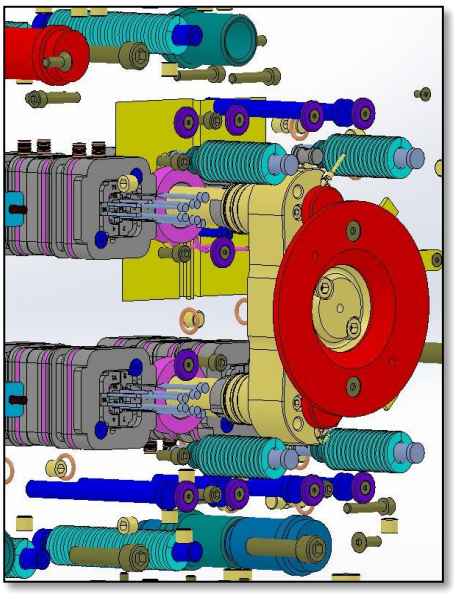


Figura 25 Sistema extração lado fixo

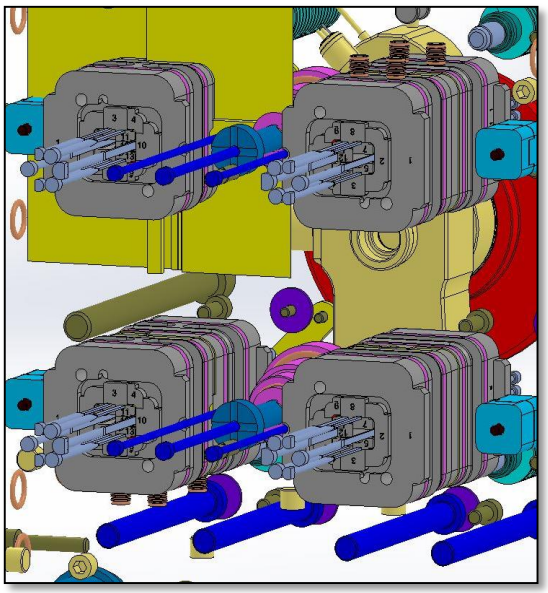


Figura 26 Sistema de extração lado móvel

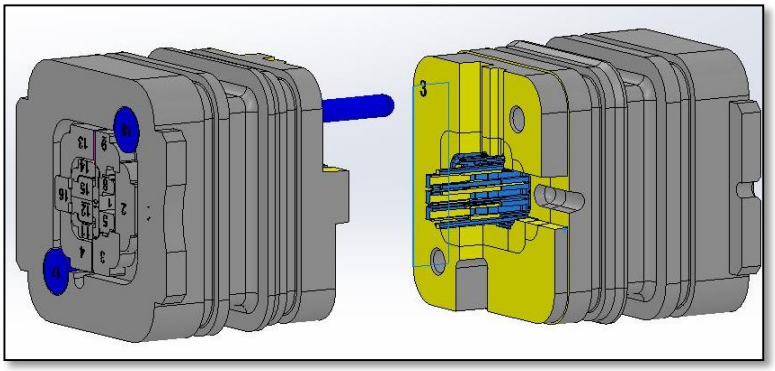


Figura 27 Blocos moldantes e postiços

Capítulo 4

Estudos realizados

4.1 Projeto do sistema de arrefecimento – estudo analítico

O estudo analítico do sistema de arrefecimento de uma ferramenta moldante é uma parte importante da fase de projeto permitindo a idealização e auxílio na definição das opções que devem ser tomadas, como por exemplo, o diâmetro dos furos correspondentes às "linhas de água" assim como o seu comprimento mínimo, sendo estas medidas definidas em função da carga térmica a ser retirada do molde.

Uma vez que o molde do caso-de-estudo já existe, a fase de projeto já se encontra, portanto, terminada e por isso não é viável introduzir novas alterações, nem a nível dos diâmetros nem do comprimento das "linhas de água". Como tal, o estudo analítico do sistema de arrefecimento do molde não servirá como ponto de partida para as propostas de otimização desta ferramenta moldante. Contudo, de maneira a atingir os objetivos correspondentes à otimização do molde descrito e ao estudo dos procedimentos e métodos de trabalho adequados a adotar por um gabinete de projeto e desenvolvimento de moldes, realizou-se o estudo analítico correspondente ao sistema de controlo de temperatura para este caso-de-estudo, de modo a adquirir alguma sensibilidade crítica relativamente ao projeto desenvolvido, tendo ficado bem patente o sobredimensionamento do mesmo no que concerne o comprimento das "linhas de água" para garantir a extração da carga térmica inerente.

De acordo com as metodologias apresentadas no (*Manual Do Projetista de Moldes*, 2007) e com as descritas no Capítulo 2, a realização deste estudo baseia-se num balanço térmico em que a carga térmica inserida no molde corresponde ao calor que o fundido liberta a partir do momento em que é injetado no molde mais o calor libertado pelos bicos quentes, sendo que a remoção dessa mesma carga térmica ocorre por convecção, condução e radiação. Assim, os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 Valores obtidos no estudo analítico.

Grandezas	Valores
$\dot{Q}_{PI+BQ}$ *(W)*	965,9
$\dot{Q}_{Cond}$ *(W)*	-50,1
$\dot{Q}_{Conv}$ *(W)*	-105,0
$\dot{Q}_{Rad}$ *(W)*	-14,1
$\dot{Q}_{TM}$ *(W)*	-796.7
$\dot{m}$ ($\dot{v}$) [kg/s (l/min)]	0,095 (5,7)
D *(*mm)	11
L_{min} (mm)	0,959

É de notar que as metodologias aqui apresentadas não contemplam a diferença entre a aplicação de circuitos de refrigeração em série ou em paralelo. Por isso, tendo em conta as correspondências presentes na Tabela 3, observa-se que para um caudal de 5,7 l/min o diâmetro correspondente será de 11 milímetros. No entanto, refere-se que o caudal dividir-se-á pela parte móvel e fixa do molde. Mais se acrescenta que, devido à geometria da peça, bem como à existência de bicos quentes, o ideal seria ter uma separação deste caudal em vários circuitos de arrefecimento específicos para as zonas de maior necessidade, como é o caso das zonas próximas à superfície da peça e dos bicos-quentes, em vez de um único circuito de refrigeração em série que extraísse o calor destas regiões do molde, estratégia que poderia não ser eficiente.

Conclui-se que, atendendo à realidade deste molde e desta peça em particular existe a necessidade de uma considerável divisão do caudal de 5,7 l/min por diversas "linhas de água", pelo que o diâmetro de cada linha de água deverá ser menor que os 11 milímetros obtidos pelas regras de projeto. Assumindo então, pelo menos um circuito de refrigeração para cada peça e um para o controlo de temperatura na zona dos bicos-quentes afirma-se que o caudal em cada "linha de água" corresponderá a um diâmetro de canal de 8 milímetros, por não haver correspondência de diâmetros menores, pois se existisse considera-se que seriam uma possibilidade interessante a considerar.

4.2 Análise simulação numérica realizada em parceria entre a universidade e a YSE

Com base na análise à peça do caso-de-estudo, constatou-se que a variação de espessura da peça é significativa, o que pode originar algumas dificuldades, resultando numa compactação problemática que poderá ser um fator de extrema importância em defeitos relacionados com a contração volumétrica da peça, principalmente nas zonas menos espessas. Como tal, este problema pode resultar em zonas da peça com depressões ou até mesmo "chochos" ou "vazios", devido à contração extrema.

De acordo com os estudos já realizados entre a empresa e a Universidade de Aveiro e com a análise do processo de injeção *in situ*, existem várias observações a serem analisadas. Com base nos relatórios dos estudos prévios e também nas observações registadas na YSE, refere-se que a temperatura de entrada do fluido refrigerante é de aproximadamente 30°C, o que proporciona uma temperatura média da superfície do molde de cerca de 45°C.

Ao aprofundar o estudo, sendo a temperatura de injeção adequada para este polímero de 265°C e a temperatura da superfície da ferramenta moldante de 45°C, é visível que existe um gradiente térmico elevado. Uma vez que o molde apenas tem capacidade para retirar calor da parte externa da peça, este obtém um arrefecimento bastante desequilibrado, pois enquanto do lado externo da peça o molde apresenta uma temperatura média de 45°C, do lado interno da peça atinge-se uma temperatura de aproximadamente 130°C. Tal discrepância térmica resulta num acumular desnecessário de tensões internas devido ao facto de o polímero fundido entrar em contacto com o aço a uma temperatura baixa durante a fase de enchimento, sendo estas tensões agravadas pela ocorrência de um arrefecimento não balanceado. É de notar que estes fatores induzem igualmente deformações e empenos resultando em peças de pior qualidade.

Relativamente à geometria e eficiência do circuito de controlo da temperatura - outro tema bastante importante no universo dos moldes -, através da análise do molde em estudo, facilmente se apercebe que o mesmo está sobredimensionado no que concerne ao número de "linhas de água" relativamente aos cálculos efetuados.

Com base nos estudos já existentes (ver Figura 28) realizados pela Universidade, é possível constatar que esse sobredimensionamento não acrescenta qualquer vantagem, uma vez que acaba por se verificar um estrangulamento significativo do fluido refrigerante, fazendo com que o caudal se apresente em todos os canais num regime laminar, com um número de Reynolds bem abaixo do necessário para um regime turbulento, não constituindo, assim, uma mais-valia do ponto de vista de remoção de calor, resultando num tempo de ciclo maior do que o necessário.

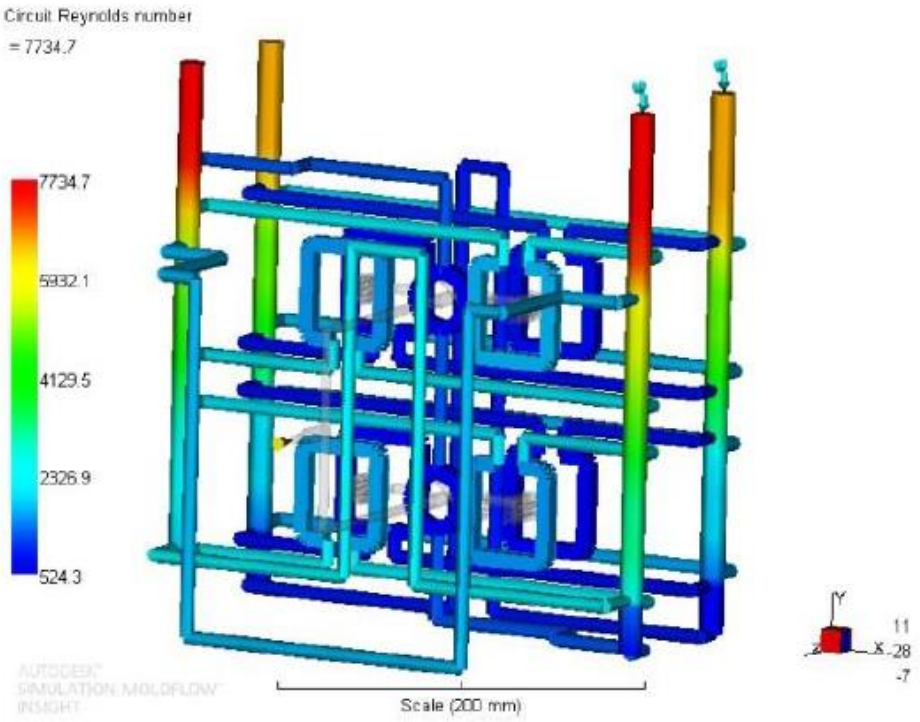


Figura 28 Número de Reynolds do processo atual

Posto isto, afirma-se convictamente, que o sistema de refrigeração utilizado no molde é ineficiente, no diz respeito à remoção de calor, carecendo de estudos subsequentes que permitam fundamentar propostas alternativas para o melhor funcionamento do mesmo.

4.3 Simulação com a mesma arquitetura do sistema de refrigeração

Com a perspetiva de melhorar a eficiência do sistema de controlo de temperatura - no que concerne o estrangulamento existente - e o consequente regime laminar existente nos canais de refrigeração, idealizou-se um sistema com a mesma arquitetura, mas com uma geometria ligeiramente diferente.

Deste modo, na nova geometria - derivada da original - foram eliminadas estrategicamente algumas "linhas de água" que se encontravam mais distantes das cavidades e que por isso se consideraram redundantes para a eficiência do sistema. Esta ideologia, procura encontrar uma solução rápida, prática, simples e acessível economicamente, que atenue o estrangulamento

verificado, como tentativa de aumentar o número de Reynolds na generalidade dos canais, fazendo com que a eficiência de remoção de calor do sistema aumente.

Assim, com base nestas alterações foi realizada uma simulação numérica, na qual se efetuou a modelação do sistema de alimentação e do sistema de refrigeração com as alterações referidas. Relativamente às condições de processamento atuais e às do controlo de temperatura, estas mantiveram-se inalteradas. Os resultados obtidos serão discutidos à frente nesta dissertação.

4.4 Simulação com canais conformais

Posteriormente, tendo em conta a análise do caso-de-estudo e a revisão bibliográfica, chegou-se à conclusão que havia a possibilidade de se obter uma solução com resultados mais significativos do que com a solução anterior, relativamente à eficiência do sistema de refrigeração, à qualidade final da peça e à diminuição do tempo de ciclo.

Esta solução passa pelas tecnologias de fabrico aditivo, como por exemplo DMLS, no qual o arrefecimento é realizado com canais conformais. A nova ideologia do sistema de controlo de temperatura consiste, então, em fazer com que o fluido refrigerante circule mais próximo da peça moldada. Para isso, propõe-se a utilização de *pockets* com canais conformais, permitindo, assim, que os mesmos façam um melhor acompanhamento da superfície moldante, mantendo-se algumas "linhas de água" convencionais para controlo da temperatura nas restantes zona do molde, como é o caso da zona envolvente aos bicos-quentes ou da zona circundante aos postiços que conferem os detalhes internos da peça.

Portanto, com esta nova ideologia de refrigeração, perspetiva-se ser possível a modificação das condições de processamento, nomeadamente, da temperatura do fluido e da superfície do molde para valores que permitam uma diminuição do gradiente térmico sem que se penalize a eficiência de remoção de calor e/ou o tempo de ciclo do processo, tendo como garantia o aumento da qualidade final da peça.

Para averiguar estes pressupostos, foi realizada uma segunda simulação numérica. Este estudo numérico englobou a modelação dos canais conformais - em que a sua localização foi previamente estudada a partir do molde existente - com o intuito de que se os resultados forem realmente satisfatórios e rentáveis, se possam colocar em funcionamento na empresa sem quaisquer obstáculos.

Acrescenta-se ainda, que devido ao potencial apresentado por este conceito de sistema de controlo de temperatura, optou-se por alterar algumas condições de processamento, tendo em vista a otimização da qualidade final da peça. A alteração consistiu num estudo paramétrico tendo como variáveis de controlo a temperatura do fluido refrigerante e, consequentemente, a temperatura do molde, bem como o caudal do fluido.

Capítulo 5

Apresentação e análise dos resultados dos estudos numéricos em Autodesk Moldflow Insight®

Neste capítulo serão apresentados os diversos resultados provenientes da metodologia anteriormente descrita no que concerne as simulações numéricas realizadas. Como tal, são apresentados e descritos os resultados obtidos nos estudos numéricos, relativos à fase de enchimento, arrefecimento e compactação do processo de injeção.

5.1 Simulação com a mesma arquitetura - eliminação de alguns canais de refrigeração

Como já foi referido, esta análise numérica consiste num estudo em que o sistema de refrigeração foi modificado com o intuito de solucionar o efeito de estrangulamento que dita um regime laminar em todas as "linhas de água" do circuito de refrigeração.

O sistema de controlo de temperatura idealizado para esta simulação consistiu na eliminação de algumas "linhas de água" que não afetavam o processo de controlo de temperatura e por isso se consideraram redundantes.

O sistema de refrigeração resultante ficou, então, a ser constituído, na parte fixa, por 6 "linhas de água" convencionais de diâmetro 8 milímetros, das quais 4 são especificamente dedicadas ao arrefecimento das peças e as restantes ao arrefecimento da zona circundante aos bicos quentes. Estes circuitos estão ligados a coletores de entrada e saída do fluido refrigerante, compostos por canais de 14 milímetros de diâmetro. Do lado da parte móvel o sistema tem a mesma morfologia a nível de coletores, no entanto, dá origem a 5 canais de refrigeração de 8 milímetros, 4 dedicados ao arrefecimento das cavidades e 1 à zona próxima ao bico quente. Em suma, relativamente ao sistema de refrigeração original, o apresentado neste estudo numérico possui menos 1 circuito de refrigeração no lado fixo e menos 4 circuitos do lado móvel. No entanto, manteve-se a temperatura de entrada do fluido igual à original (30°C) e os mesmos

caudais de 4.1 l/min e 3.5 l/min nas partes fixa e móvel, respetivamente. Na tabela 5 apresenta-se um resumo das condições e parametrização da simulação realizada.

Tabela 5 Resumo das condições e parametrização da simulação.

Material	Crastin SK602 NC010 PBT
Máquina de injeção	Allrounder 320 C 50 tons (Arburg)
Material do molde	Aço Stavax
Temperatura de injeção	265°C
Temperatura de extração	170°C
Temperatura do refrigerante	30°C
Temperatura do molde	45°C
Caudal do refrigerante (parte fixa/parte móvel)	4,1/3,5 l/min

Após a modelação, foi realizado um estudo de independência de malha com o objetivo de permitir estabelecer um compromisso entre a qualidade e refinamento da malha e o tempo de cálculo consequente, permitindo, deste modo, obter resultados fidedignos por parte do programa em tempo útil para a sua análise. Assim, este estudo numérico ficou constituído por 2360848 elementos tetraédricos usados na modelação dos 4 conetores, o que corresponde a 590212 elementos por conector. No que concerne o sistema de alimentação e o sistema de refrigeração, foram usados na sua modelação 6766 elementos bidimensionais.

Como a Figura 29 mostra, as 4 cavidades ficam preenchidas simultaneamente ao fim de 0,55 segundos, no entanto, apenas são necessários cerca de 0,45 segundos para encher os conetores, sendo o restante tempo gasto pelo polímero para percorrer o sistema de alimentação hibrido. Adicionalmente, a análise da mesma figura sugere que não existe qualquer dificuldade no enchimento das cavidades, apesar das diferentes geometrias do sistema de refrigeração.

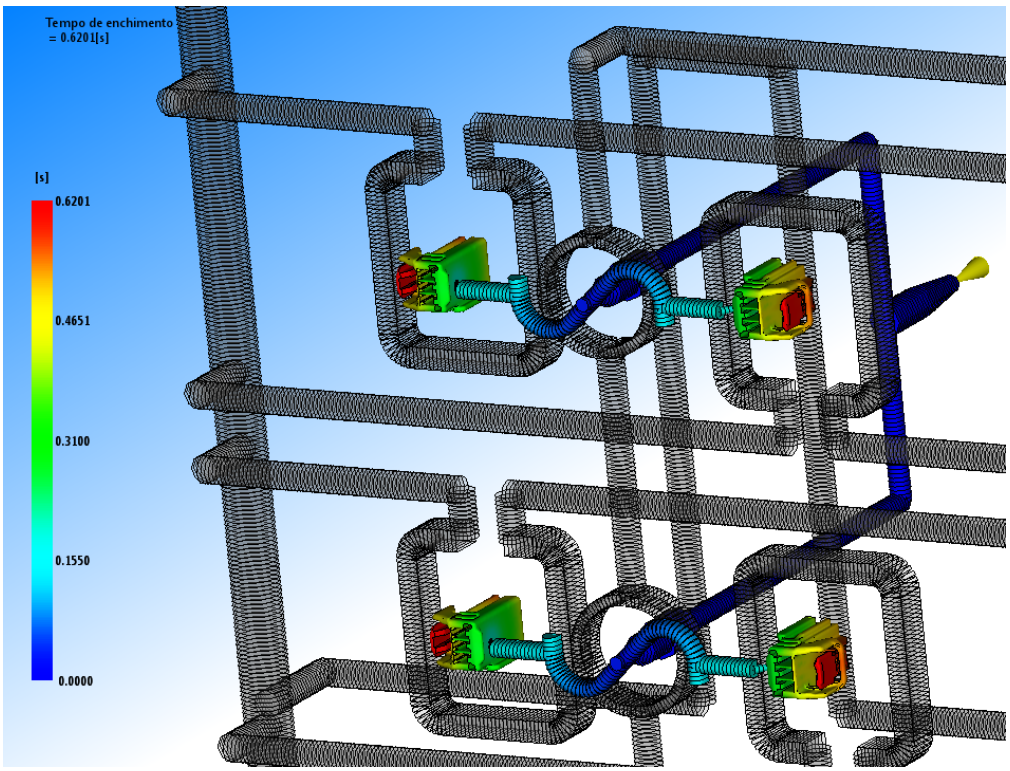


Figura 29 Tempo de Enchimento

Através da Figura 30 pode-se analisar a distribuição da pressão do polímero no ponto de transição V/P (Volume/Pressão), ou seja, no fim do enchimento. Da sua análise, constata-se que o valor máximo presente na peça - cerca de 37,17 MPa - localiza-se no ponto de injeção da peça que vai diminuindo gradualmente até 0, na zona final do enchimento. Acrescenta-se também que a pressão máxima requerida é de 74,33 MPa.

A Figura 31 reflete o progresso da força de fecho necessária durante o processo de injeção, compactação e arrefecimento do molde e indica a força máxima requerida para se manter o molde fechado durante todo o processo, que passa-se a citar, ser aproximadamente de 11,42 toneladas, valor bastante inferior ao valor máximo da máquina de injeção em que o molde trabalha.

Os valores obtidos são aceitáveis, não mostrando qualquer problema, nem a nível mecânico, nem a nível do processo de injeção.

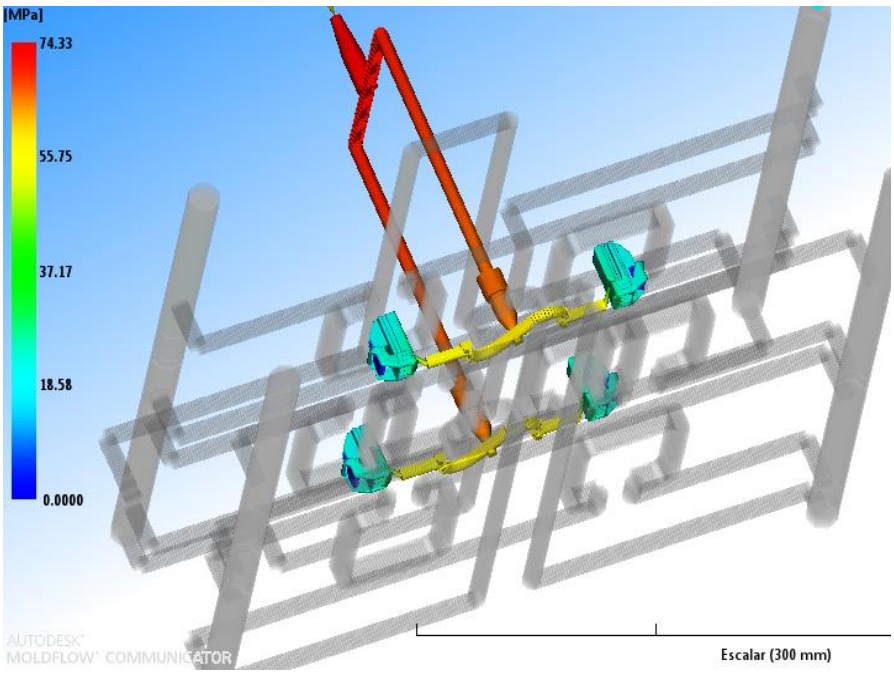


Figura 30 Pressão de Comutação V/P

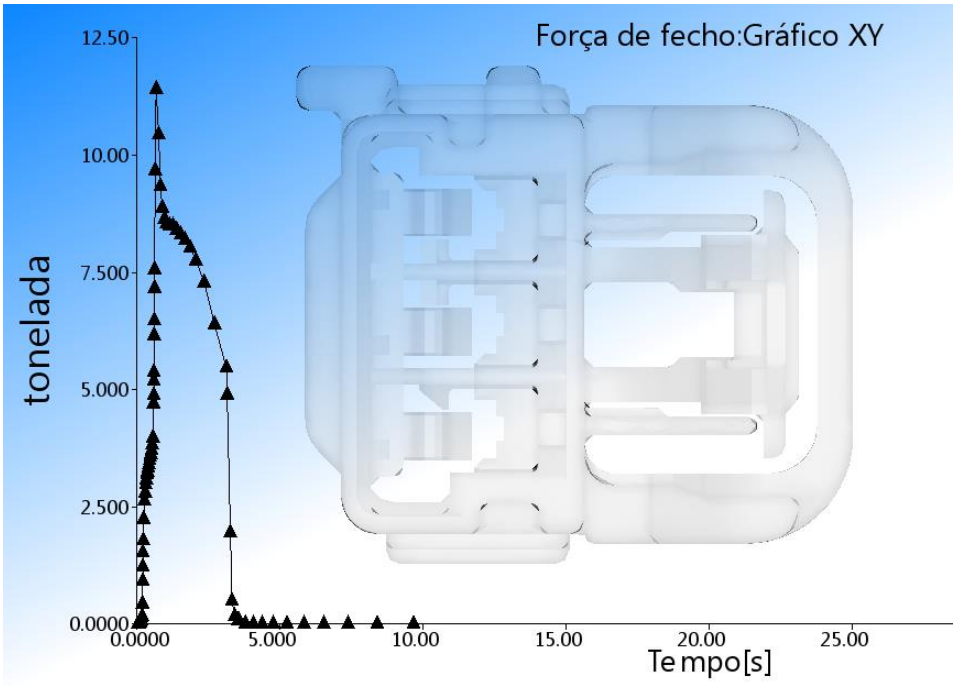


Figura 31 Força de fecho

A contração volumétrica que se encontra nas superfícies e ao longo da espessura do conector elétrico pode ser observada nas Figuras 32 a 35. Esta apresenta-se bastante irregular, uma vez que depende da espessura das paredes, variando entre -0,677% e 17,631%. Embora este último valor seja relativamente elevado, são raras as zonas que o apresentam, sendo que sempre que se verifica localiza-se no interior da peça. É de notar que isto é algo consistente com o facto de a peça apenas ser arrefecida pelo exterior com esta proposta de arrefecimento. A sua variação dimensional implicaria estratégias de arrefecimento pelo interior, algo inviável por recurso a técnicas ditas convencionais, dada a dimensão da peça e a tipologia construtiva do molde. Salienta-se que a literatura refere como valores de contração máxima para este material, 6.3%.

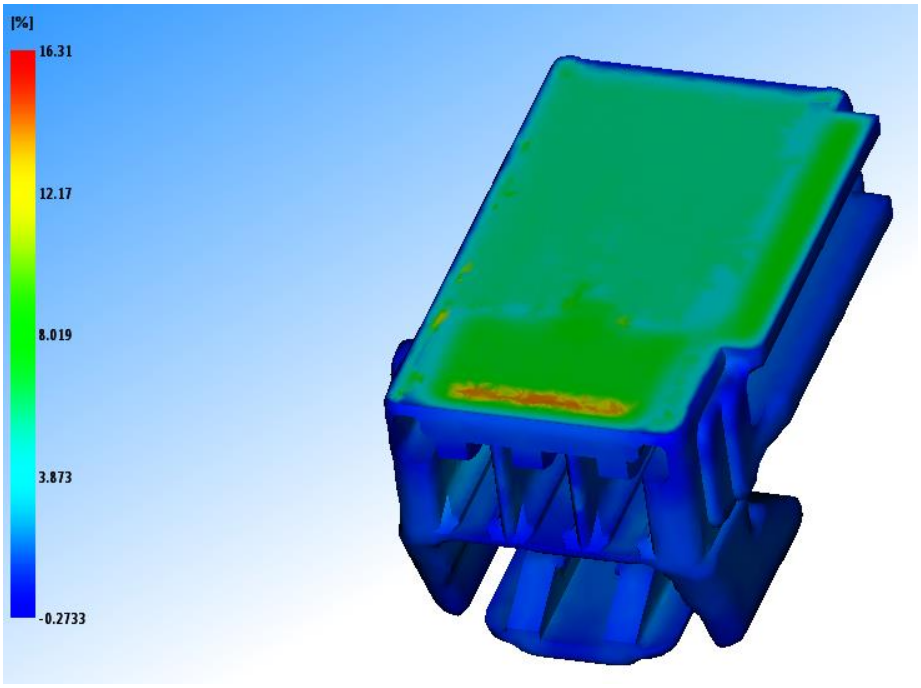


Figura 32 Contração Volumétrica: Corte 1

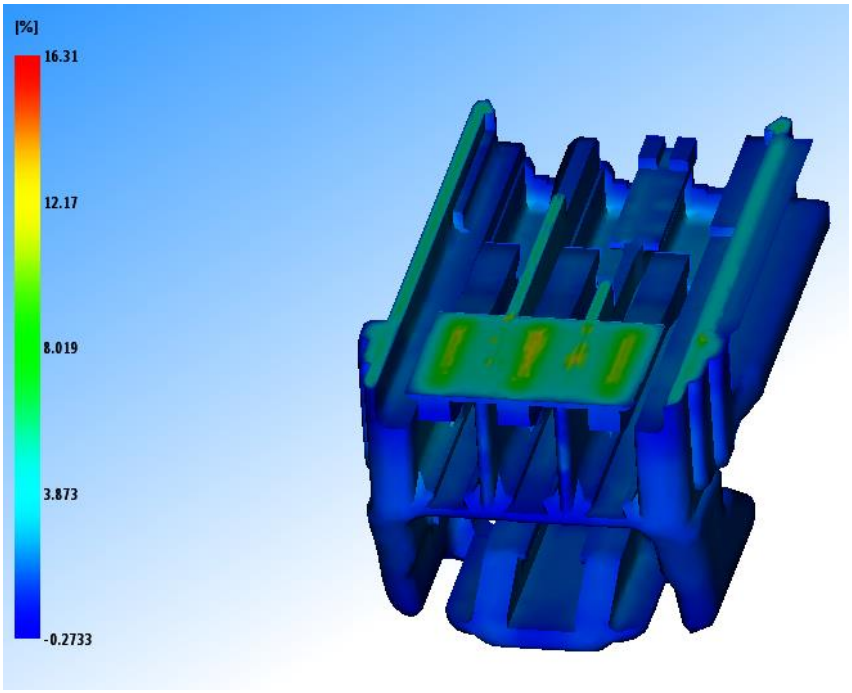


Figura 33 Contração volumétrica: Corte 2

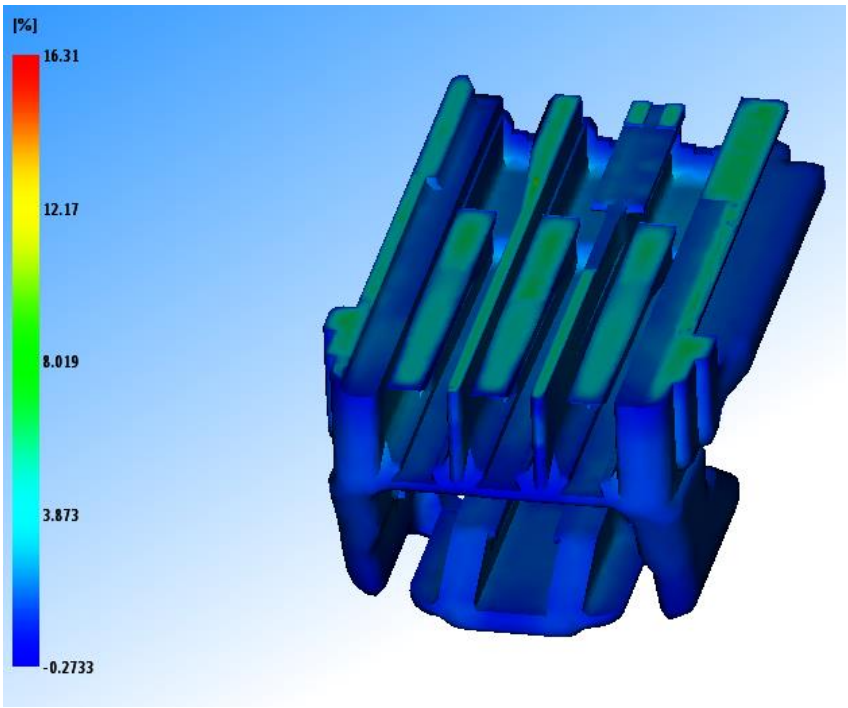


Figura 34 Contração volumétrica: Corte 3

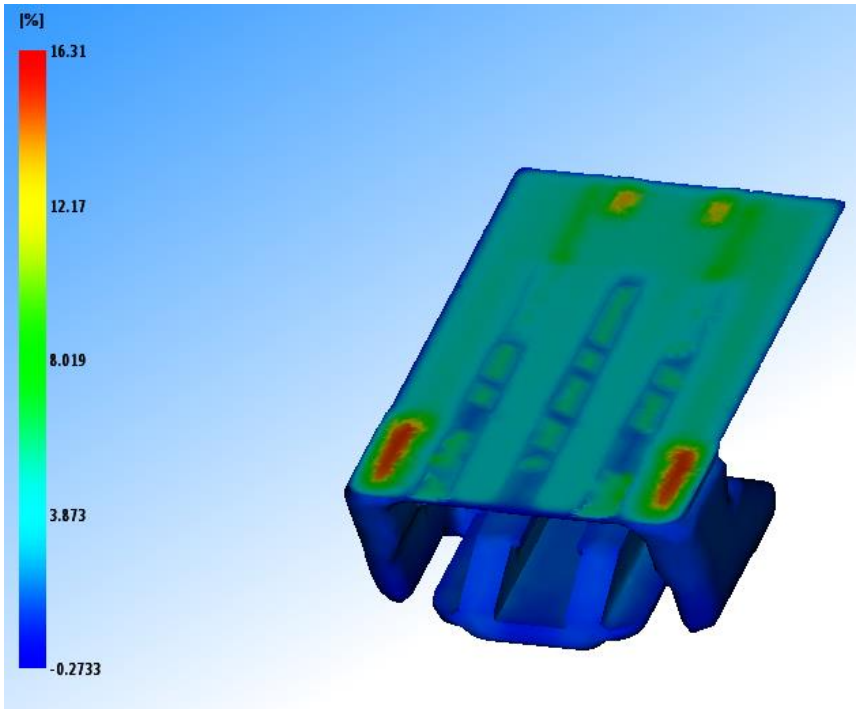


Figura 35 Contração volumétrica: Corte 4

Relativamente à taxa de corte presente nas peças após o processo de injeção, como se pode observar na Figura 36, o valor máximo ocorre apenas no ponto de ataque da peça e afeta uma área bastante reduzida, sendo que no resto da peça os valores são bastante uniformes e residuais, não apresentando qualquer indício de problema de qualidade da peça.

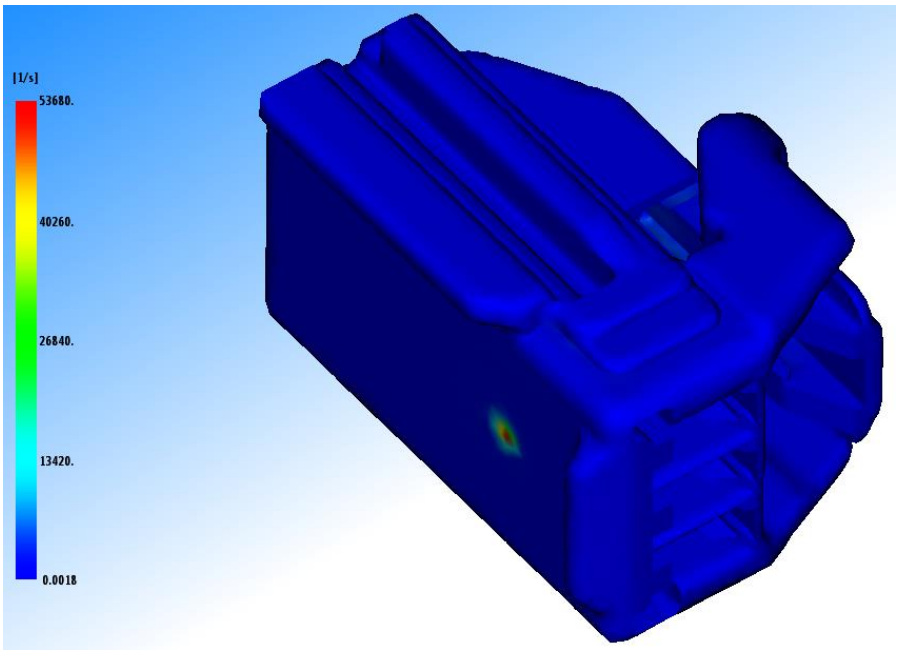


Figura 36 Taxa de corte máxima

Relativamente à análise de arrefecimento serão apresentados os resultados com maior relevância e influência no ciclo de moldação. O sistema de controlo de temperatura que consta deste estudo numérico foi descrito previamente, bem como os parâmetros a este inerentes.

Através da Figura 37 é possível observar a variação da temperatura do fluido refrigerante ao longo do circuito de arrefecimento. É de notar que essa variação é diferente dependendo se se observar o lado fixo ou o lado móvel. Deste modo, no circuito de arrefecimento correspondente ao lado fixo do molde, verifica-se um aumento de temperatura de 0,61°C enquanto que no circuito do lado móvel verifica-se um aumento ainda menor de apenas 0,3°C. Estes valores encontram-se bastante abaixo do valor máximo considerado como aceitável, que é de 5°C acima da temperatura de entrada do fluido no circuito.

O motivo pelo qual ocorre o aumento de temperatura do fluido entre a entrada e a saída do circuito - relativamente aos estudos feitos entre a Universidade e a YSE - relaciona-se diretamente com o facto de algumas "linhas de água" terem sido eliminadas, o que resulta num aumento do número de Reynolds nos diversos canais, dotando os mesmos de um regime mais eficiente na remoção de calor.

Como se torna evidente, a Figura 38 dá a indicação do número de Reynolds nos canais de refrigeração do sistema de controlo de temperatura. Com as condições de processamento anteriormente citadas, e tendo em conta a eliminação de algumas "linhas de água", afirma-se

que existe um aumento generalizado desta grandeza quando comparada com o estudo realizado no âmbito da parceria entre a Universidade e a YSE.

Este aumento é mais significativo no circuito da parte móvel do molde, uma vez que nesta zona foram eliminados um maior número de canais de refrigeração. Em relação ao lado fixo do molde, embora se verifique um aumento do número de Reynolds, este não é tão expressivo. No entanto, é possível concluir que apesar deste aumento, continua-se a verificar a existência de regimes de escoamento do fluido laminares, em vez de turbulentos.

Conclui-se com isto, que com esta nova configuração do sistema de refrigeração, é possível melhorar o problema de estrangulamento que se verificava, embora esta não se mostre para já como sendo a solução a implementar.

Para corroborar e complementar a conclusão anterior, recorre-se à Figura 37 que ilustra a divisão do caudal pelos diferentes canais de refrigeração. Como é óbvio, o aumento do número de Reynolds nestes canais advém do aumento de caudal nestas "linhas de água", dotanto, assim, o sistema de uma maior eficiência na remoção de calor, uma vez que se consegue direcionar uma maior quantidade de fluido refrigerante para as zonas próximas das cavidades, com um número de Reynolds mais elevado.

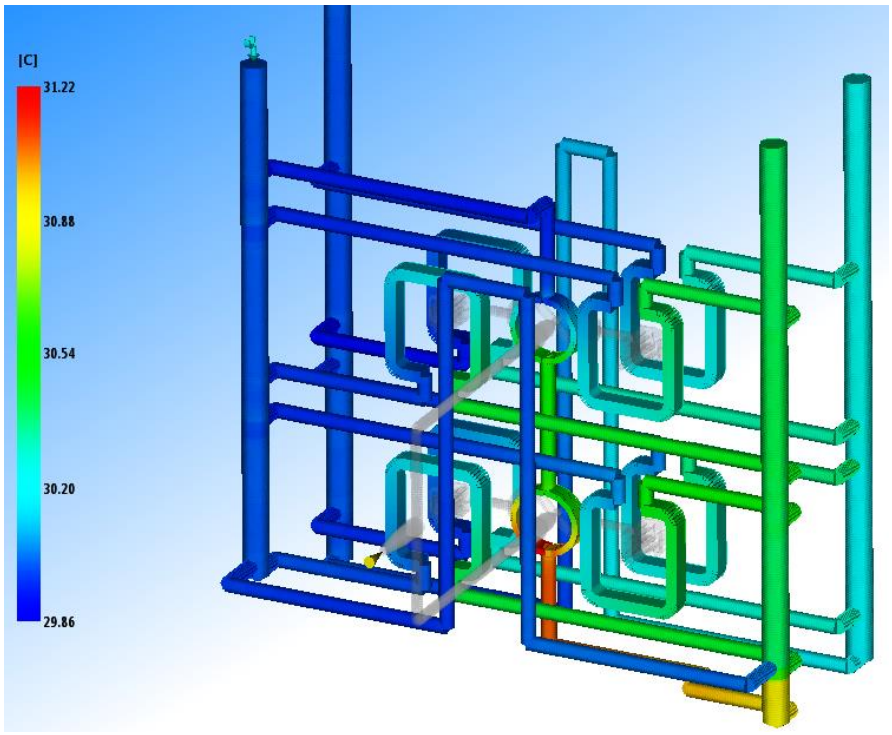


Figura 37 Temperatura do fluido refrigerante

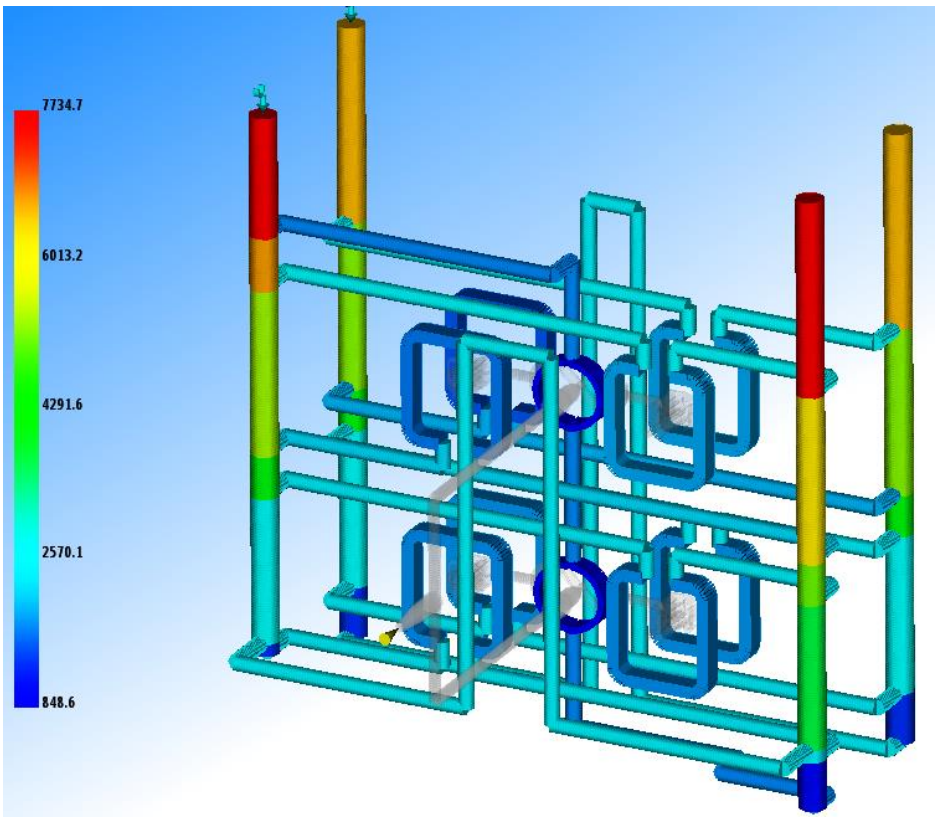


Figura 38 Número de Reynolds do circuito

A pressão dentro do circuito de refrigeração, quer do lado fixo quer do lado móvel, vai sendo repartida através do comprimento das "linhas de água", diminuindo gradualmente desde a entrada até à saída do fluido refrigerante, como pode ser observado através da Figura 39.

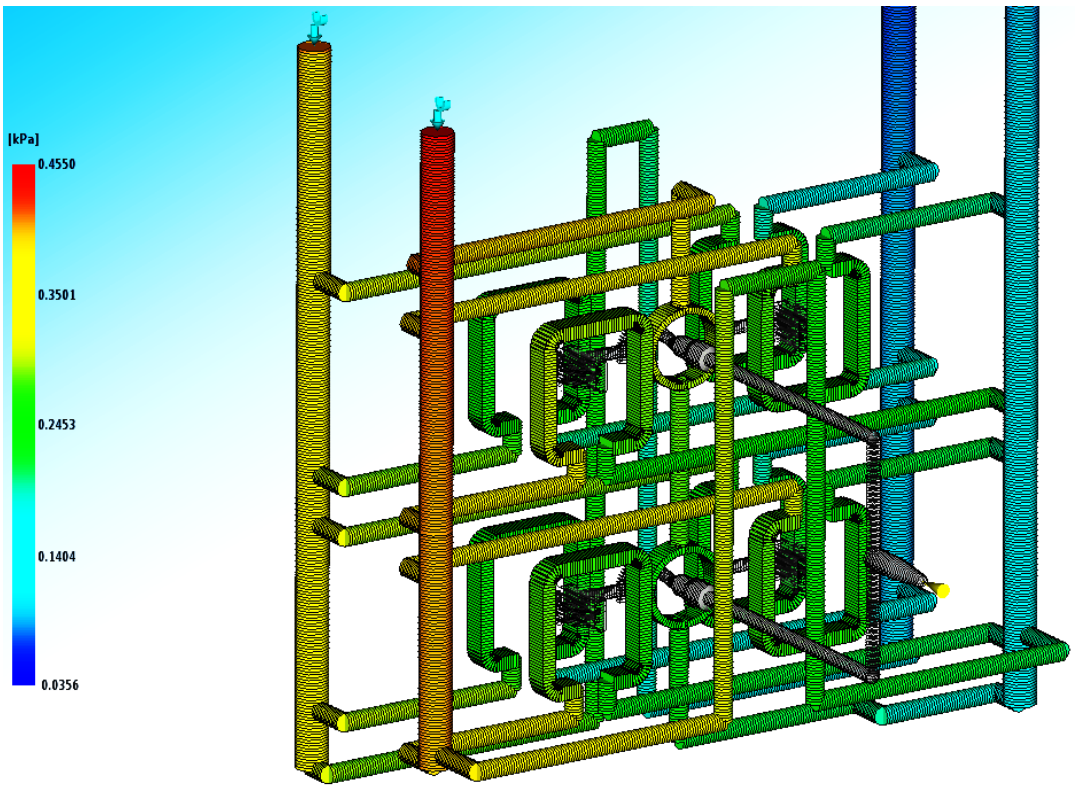


Figura 39 Pressão do circuito

Para um melhor entendimento do tempo que é necessário para que as diferentes zonas das peças atinjam a temperatura de extração recomendada e para que possam ser extraídas corretamente, apresentam-se as Figuras 40 a 43.

Através da sua análise, como era de esperar conclui-se que as seções de menor espessura são as que necessitam de menos tempo para atingirem a temperatura de extração adequada. Conclui-se também que deste resultado da simulação surge que o tempo necessário para uma extração segura e sem danificar a qualidade das peças é de aproximadamente 6,5 segundos.

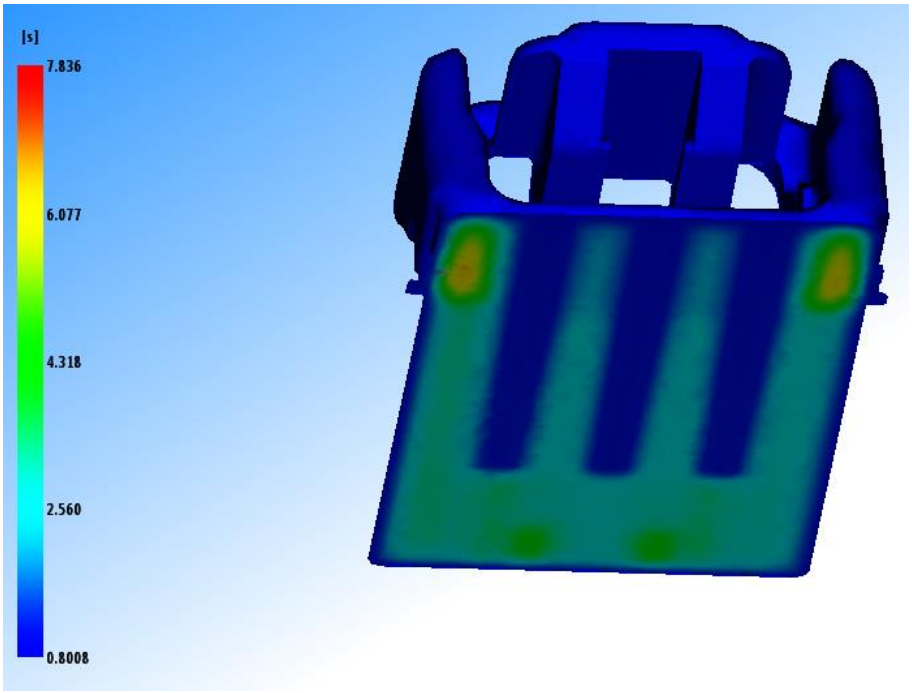


Figura 40 Tempo até atingir a temperatura de extração 1

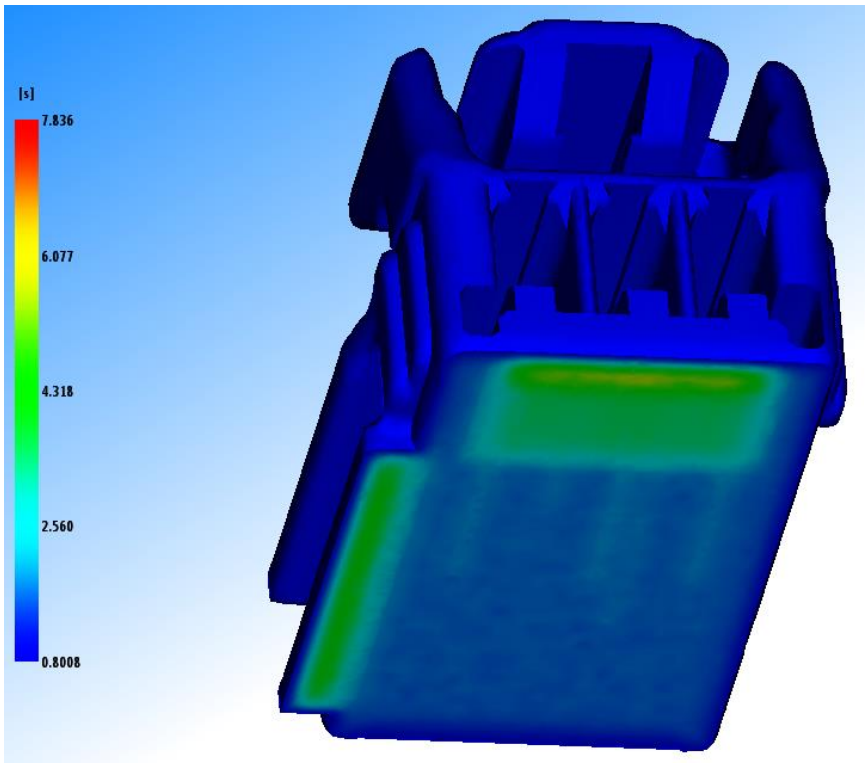


Figura 41 Tempo até atingir a temperatura de extração 2

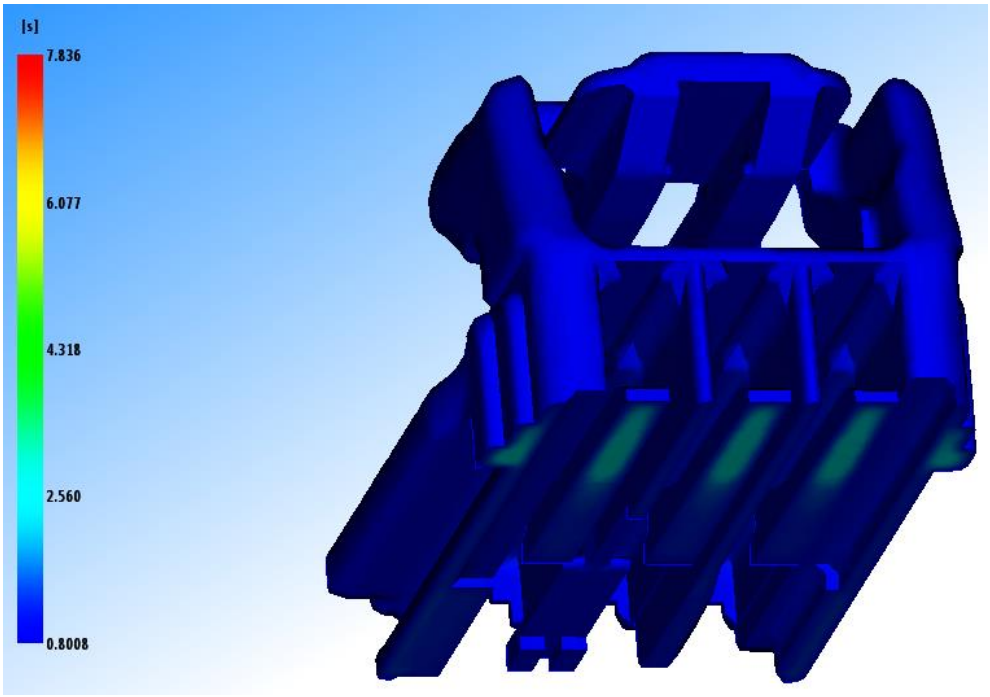


Figura 42 Tempo até atingir a temperatura de extração 3

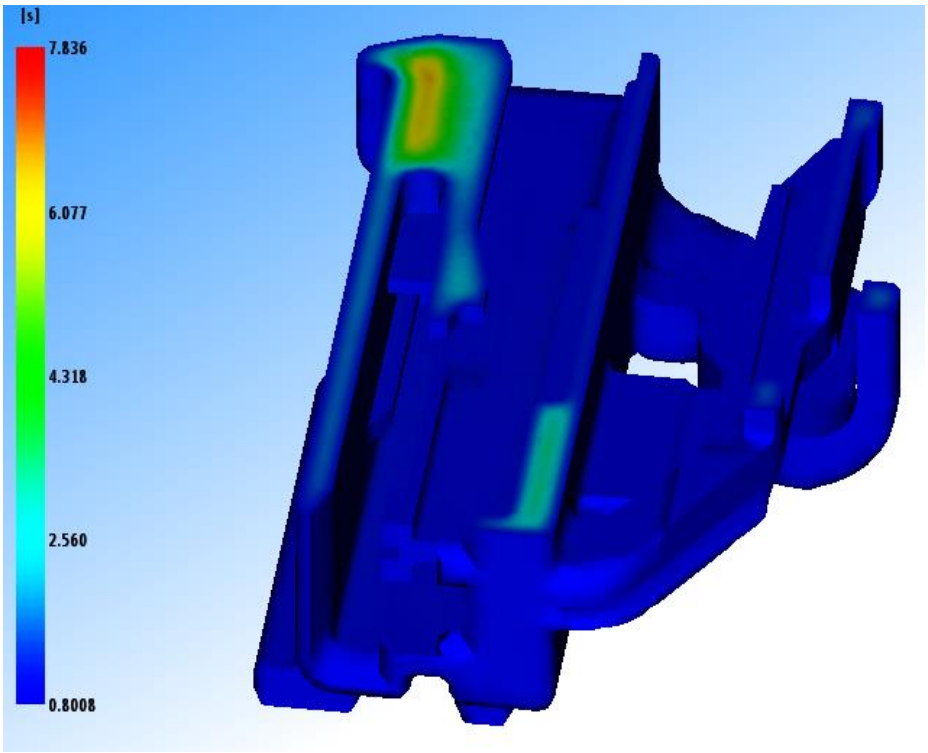


Figura 43 Tempo até atingir a temperatura de extração 4

Com base na Figura 44 consegue-se ter uma previsão de como a peça vai empenar e deformar no fim do ciclo de moldação, verificando-se que esta apresenta um empeno de aproximadamente 0,07 milímetros, apresentando apenas uma região, correspondente ao que se denomina por *lock*, com uma deformação mais intensa (a vermelho na Figura 44, aproximadamente 0,35 milímetros).

Para uma melhor perceção relativamente às deformações das peças nas diferentes direções X, Y e Z apresentam-se respetivamente as Figuras 45, 46 e 47.

Através dos valores das deformações registados, e tendo em conta que a tolerância dimensional da peça é de ±0,05 milímetros, conclui-se que as peças obtidas através deste ciclo de moldação têm pouca margem para mais empenos ou deformações. No entanto, como as peças são testadas funcionalmente, pode ocorrer o caso de estarem ligeiramente fora da tolerância mas cumprirem com a sua função na íntegra e assim serem aceites como conformes para seguirem para o cliente.

Acrescenta-se, ainda, que seria interessante conseguir-se reduzir os valores absolutos dos empenos, obtendo-se assim peças com maior qualidade e que respeitem a tolerância a que estão sujeitas, com uma margem de segurança mais significativa. Por isso, este foi um dos propósitos e objetivos do segundo estudo numérico realizado e que de seguida se apresenta.

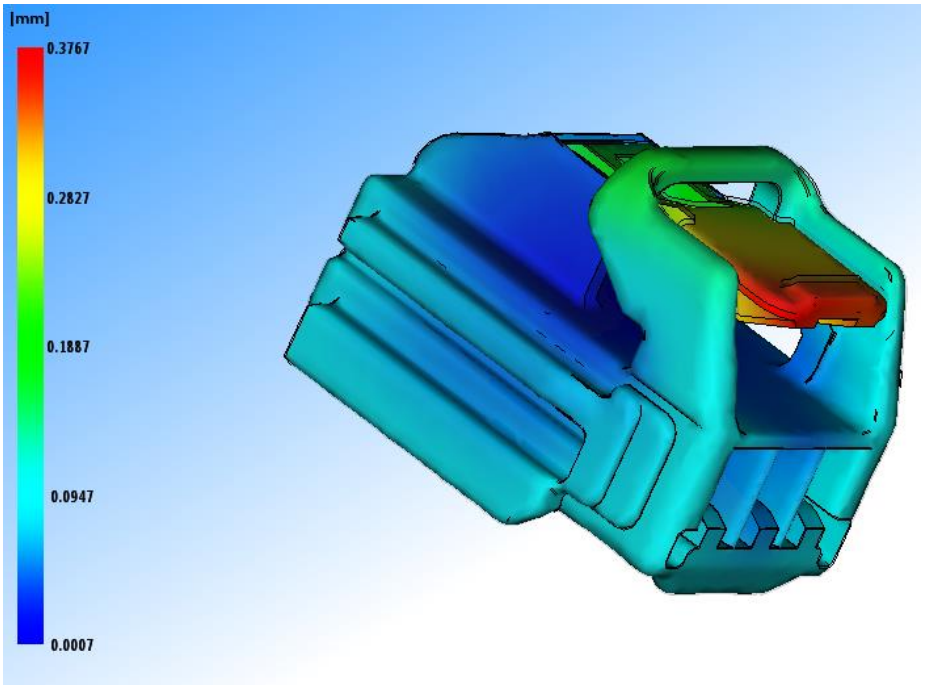


Figura 44 Empenos: todas as direções

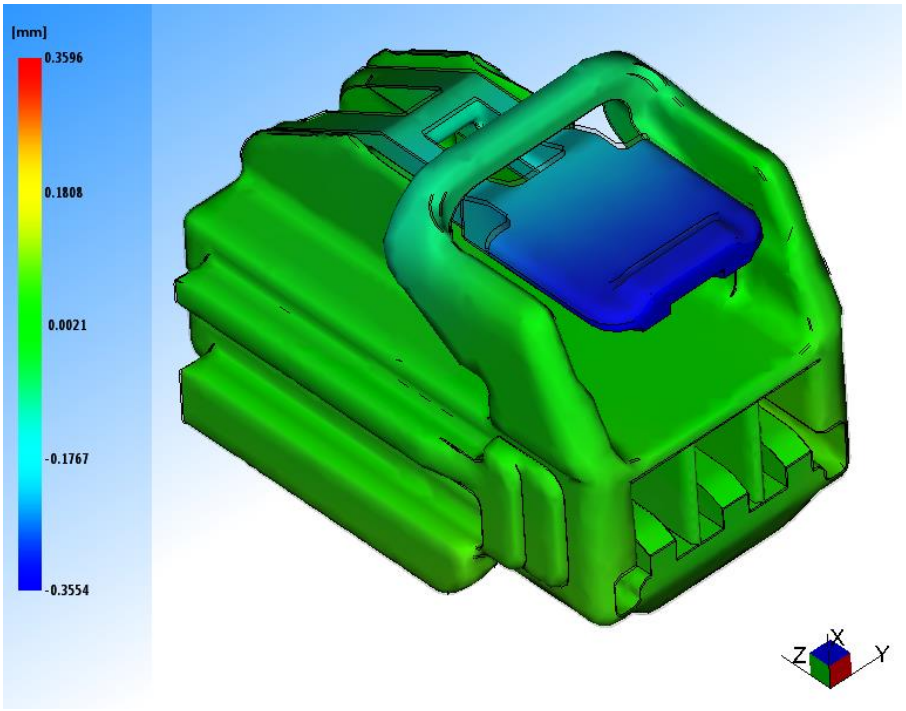


Figura 45 Empenos: eixo X

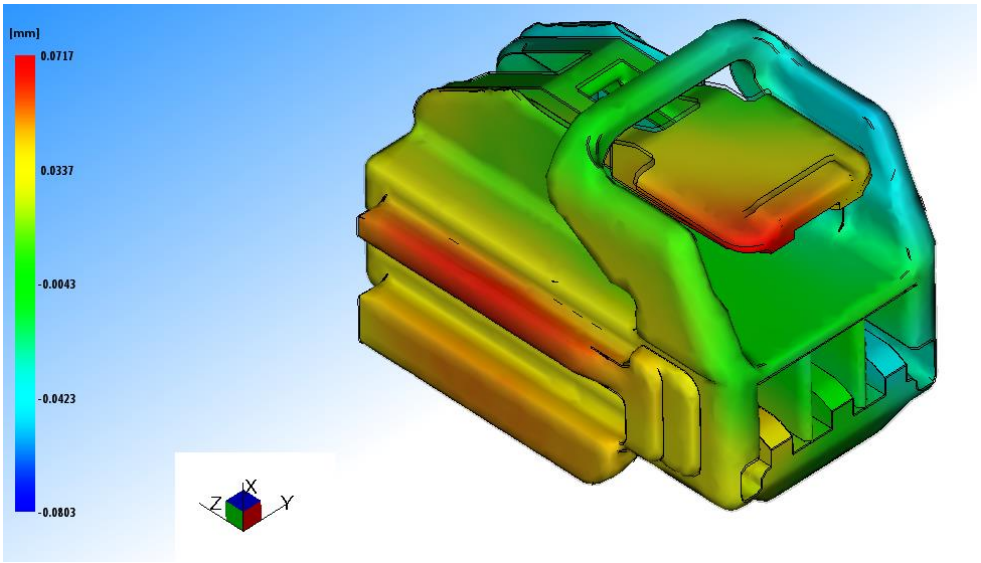


Figura 46 Empenos: eixo Y

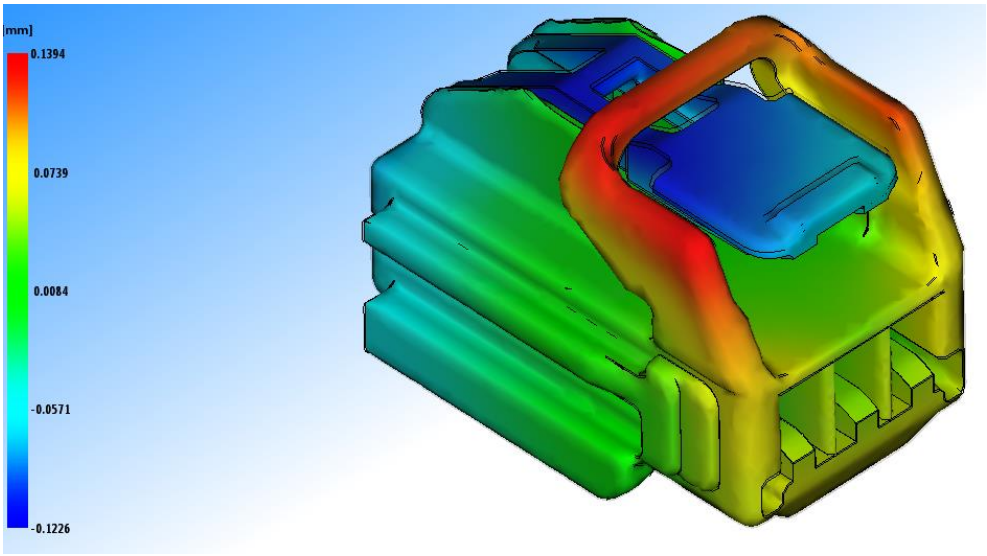


Figura 47 Empenos: eixo Z

5.2 Simulação com sistema de refrigeração conformal

Como já foi explicado anteriormente, esta simulação numérica consiste numa tentativa de otimização não só do tempo de ciclo e da eficiência da remoção de calor do sistema de arrefecimento, mas também do aumento da qualidade final das peças moldadas.

Assim, neste estudo utilizou-se a técnica de arrefecimento conformal, estratégia que está a ser cada vez mais implementada no setor dos moldes devido aos resultados que proporciona.

O sistema de controlo de temperatura idealizado para esta simulação consiste na substituição dos *pockets* com os canais de refrigeração maquinados por *pockets* obtidos por fabrico aditivo que possuam canais conformais, de maneira a permitir o melhor acompanhamento da superfície moldante, aumentando, deste modo, a remoção de calor do molde e proporcionando um arrefecimento mais uniforme.

O sistema de refrigeração resultante deriva do anterior, mas com menos canais de refrigeração que o original e com canais conformais nos *pockets* do lado fixo do molde, visto ser deste lado que a maior parte da peça é moldada, ou seja, onde a maior da carga térmica é inserida.

Assim, o sistema é constituído do lado fixo por dois canais de 14 milímetros (coletores) - um de entrada e outro de saída do fluido - 2 "linhas de água" convencionais de 8 milímetros, dedicadas ao controlo da temperatura nas zonas correspondentes aos bicos quentes do molde e 4 "linhas de água" de 8 milímetros, específicas para abastecerem os canais conformais de 2 milímetros presentes nos *pockets*. Do lado móvel não se realizou qualquer alteração relativamente ao estudo numérico realizado primeiramente.

Em relação às condições e parâmetros utilizados, também aqui se realizaram alterações. A temperatura de entrada do fluido passou a ser de 50°C, ficando assim mais perto dos valores recomendados para este material polimérico, o que permite evitar as elevadas discrepâncias térmicas durante o enchimento e desse modo minimizar as tensões internas correspondentes a esta fase do processamento. Alterou-se ainda o caudal do refrigerante para 7,0 l/min de modo a permitir vencer a maior perda de carga induzida pelos canais conformais, mantendo o requisito de escoamento perfeitamente desenvolvido e turbulento para maximizar a remoção da carga térmica.

Na Tabela 6 apresenta-se um resumo das condições e parametrização da simulação realizada.

Tabela 6 Resumo das condições de processamento.

Material	Crastin SK602 NC010 PBT
Máquina de injeção	Allrounder 320 C 50 tons (Arburg)
Material do molde	Aço Stavax
Temperatura de injeção	265°C
Temperatura de extração	170°C
Temperatura do refrigerante	50°C
Temperatura do molde	65°C
Caudal do refrigerante (parte fixa/parte móvel)	7,0/7,0 l/min

Após a modelação deste novo sistema de refrigeração, à semelhança do estudo numérico com algumas "linhas de água" fechadas, foi realizado um estudo de independência da malha permitindo atingir um compromisso entre o tempo de cálculo e qualidade da malha, tendo-se chegado a um domínio de cálculo constituído por 2360848 elementos tetraédricos correspondentes à modelação das 4 peças em estudo, resultando em 590212 elementos tridimensionais por cada conector. Relativamente ao sistema de alimentação e ao sistema de controlo de temperatura do molde, estes ficaram formados com 10312 elementos de feixes bidimensionais.

Como a Figura 48 mostra, as cavidades são preenchidas pelo polímero fundido simultaneamente ao fim de 0,55 segundos. No entanto, apenas são necessários cerca de 0,42 segundos para encher os conectores, sendo o restante tempo ocupado pelo polímero a percorrer o sistema de alimentação híbrido. A partir da análise da mesma figura, conclui-se que não existe qualquer dificuldade no enchimento das cavidades, apesar das diferentes geometrias do sistema de refrigeração. A conclusão prévia é logicamente aceitável uma vez que o sistema de alimentação não foi modificado e as temperaturas do molde e fluido refrigerante são mais propícias ao fácil escoamento do fluido.

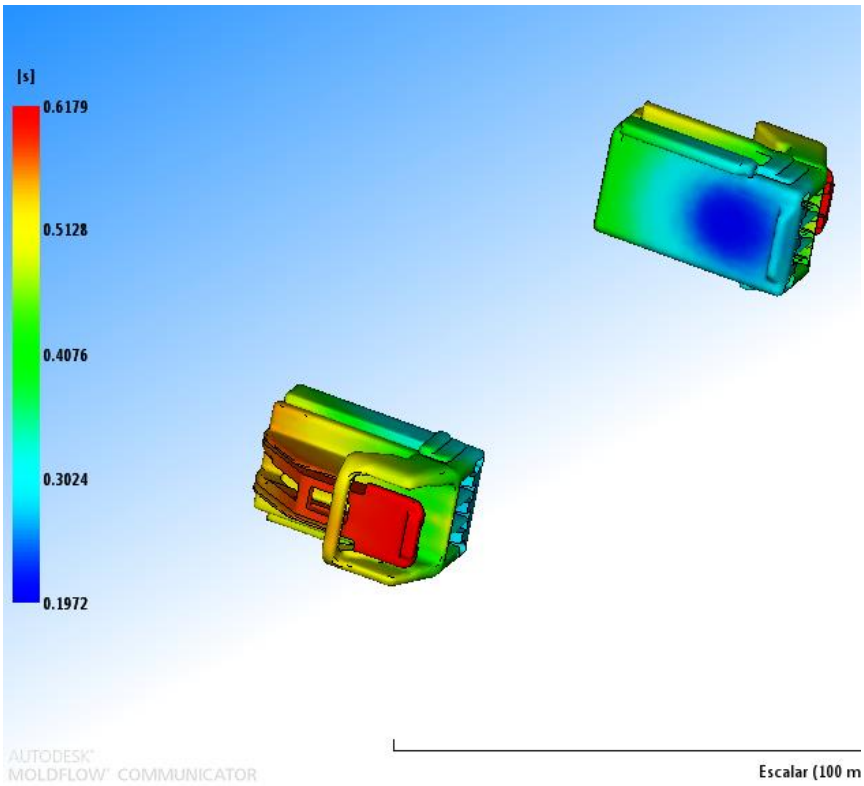


Figura 48 Tempo de Enchimento

Através da Figura 49, pode-se analisar a distribuição da pressão do polímero no ponto de transição V/P, ou seja, no fim do enchimento. Da sua análise constata-se que o valor máximo - cerca de 30,5 MPa – localiza-se no ponto de injeção da peça, diminuindo gradualmente até 0 na zona final do enchimento.

A Figura 50 reflete o progresso da força de fecho necessária durante o ciclo de moldação, compactação e arrefecimento do molde e indica a força máxima requerida para se manter o molde fechado. Este valor é de aproximadamente de 11,25 toneladas, valor bastante inferior ao valor máximo da máquina de injeção em que o molde trabalha.

Também na força de fecho se observa uma ligeira diminuição comparativamente à força de fecho necessária no primeiro estudo, resultante da redução da pressão de injeção necessária.

Os valores obtidos continuam a ser aceitáveis, não mostrando qualquer problema nem a nível mecânico nem a nível do processo de injeção. Pelo contrário evidencia sinais de maior facilidade na etapa de enchimento, consistente com o aumento de temperatura da ferramenta moldante.

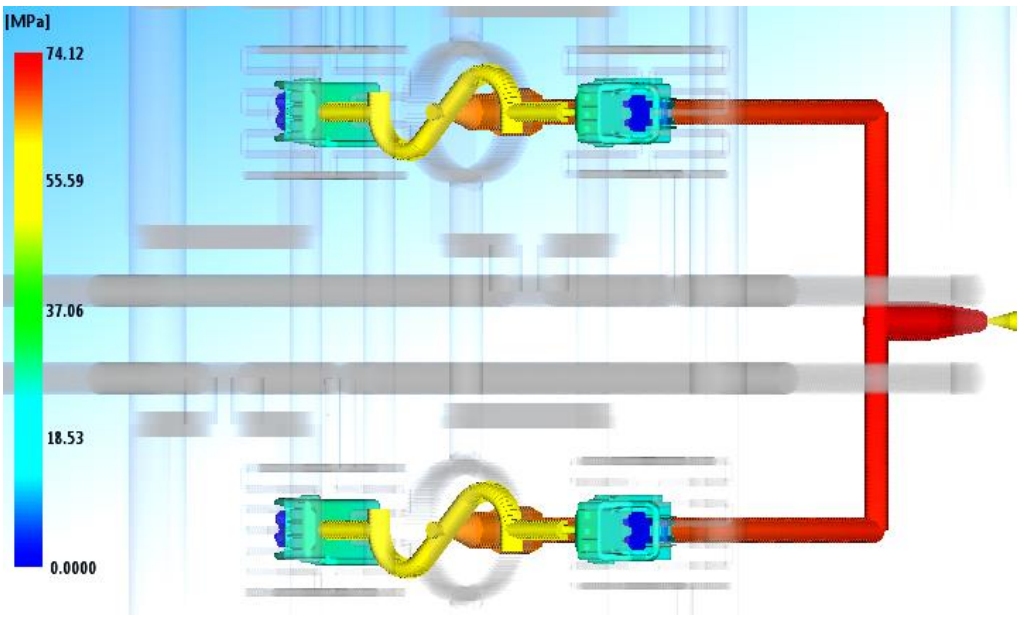


Figura 49 Pressão de Comutação V/P

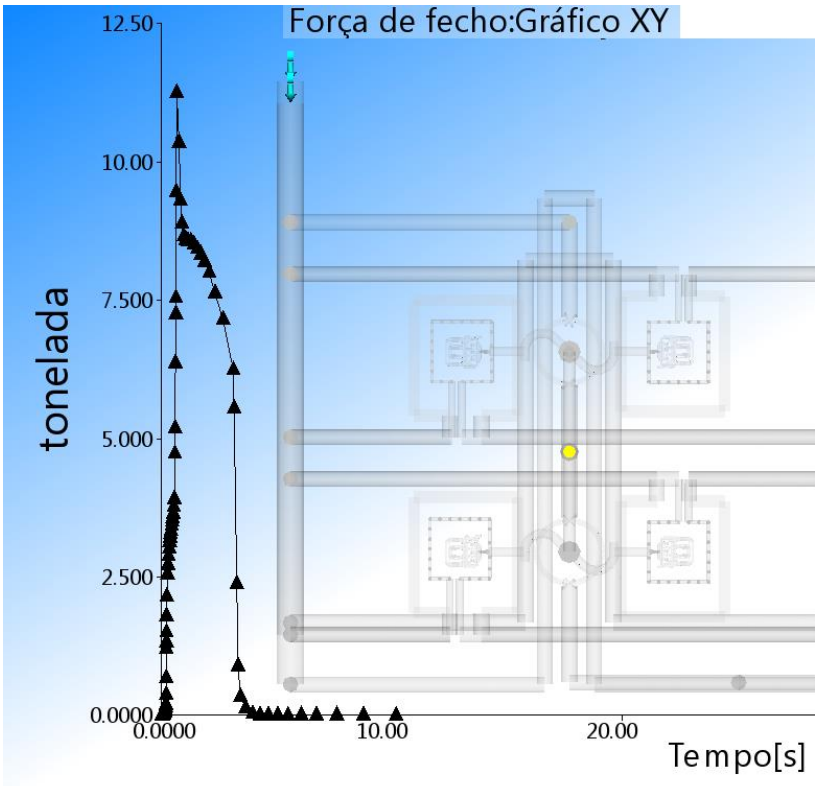


Figura 50 Força de Fecho

A contração volumétrica que se verifica nas superfícies e na espessura das paredes do conector elétrico pode ser observada nas Figuras 51 a 53. Esta apresenta-se bastante irregular, uma vez que depende da espessura das paredes, variando entre 0,417% e 16,293%. Embora este último valor seja relativamente elevado, são raras as zonas que apresentam esta contração. Como foi já referido, o valor máximo de contração volumétrica recomendado para o material de que é feito este conector é de aproximadamente 6,3%.

No entanto, as regiões que apresentam uma contração volumétrica mais elevada derivam da elevada espessura da peça, não prejudicando a sua integridade.

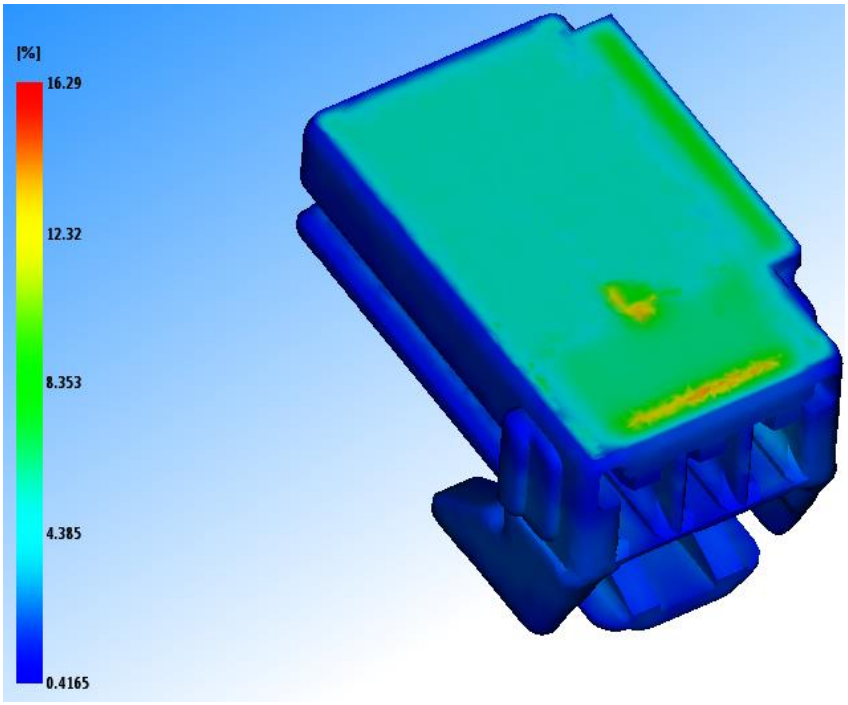


Figura 51 Contração volumétrica: Corte 1

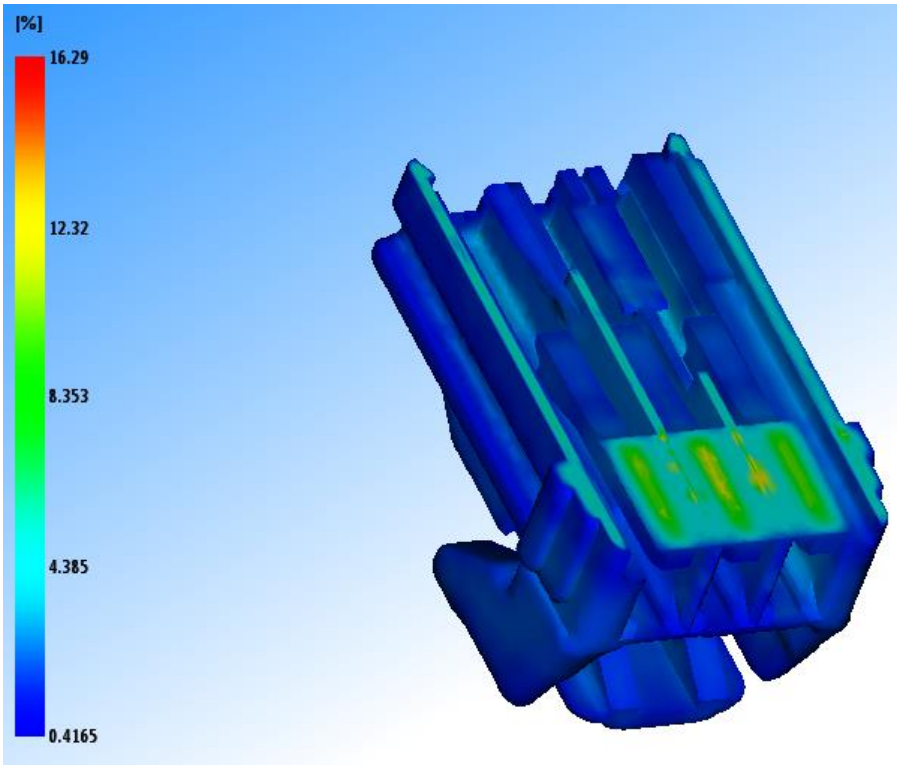


Figura 52 Contração volumétrica: Corte 2

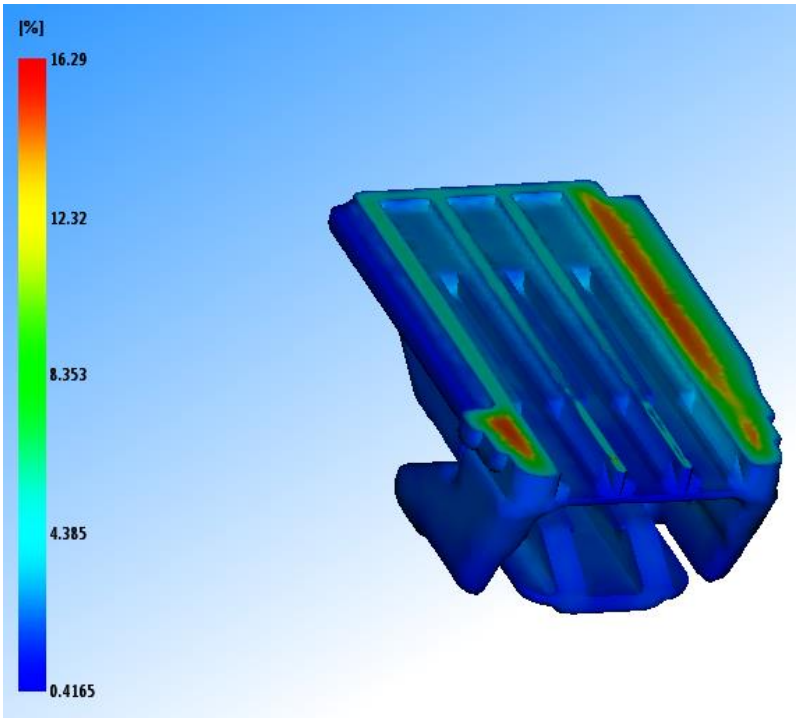


Figura 53 Contração volumétrica: Corte 3

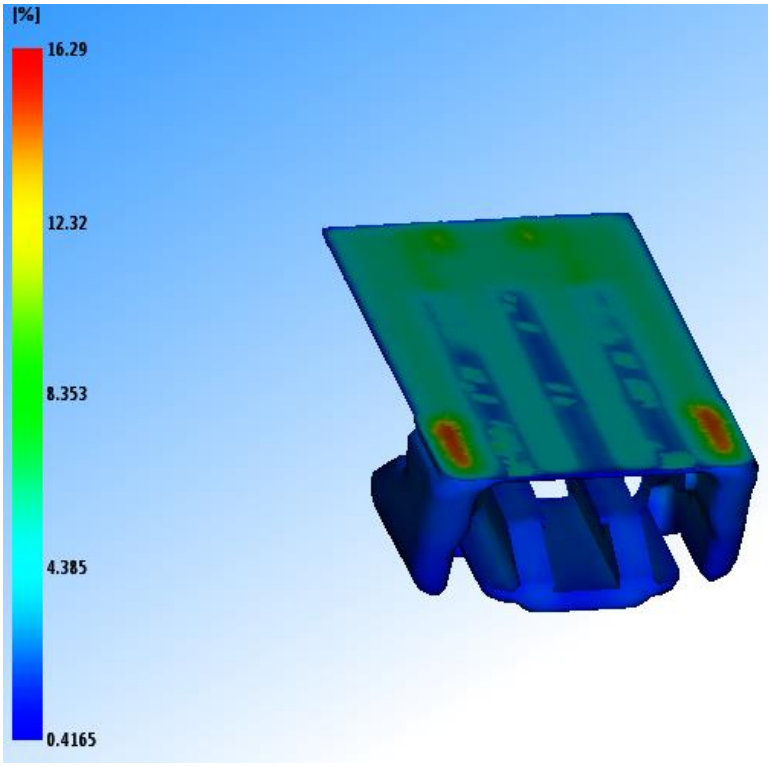


Figura 54 Contração volumétrica: Corte 4

No que concerne a análise de arrefecimento serão exibidos os resultados com maior relevância e influência no ciclo de moldação. O sistema de arrefecimento inovador que consta deste estudo numérico foi descrito previamente, assim como os parâmetros a este relativos.

Através da Figura 55, é possível observar a variação da temperatura do fluido refrigerante ao longo do circuito de arrefecimento. Devido à geometria deste sistema de controlo de temperatura observam-se resultados bastante distintos, quando se compara a parte fixa (com canais conformais) com a parte móvel (com apenas refrigeração convencional).

Relativamente ao fluido que percorre os canais conformais, a diferença de temperatura verificada é de 2,3°C, passando de 49,5°C para 51,8°C. Dado que segundo as regras de projeto, a variação máxima admitida ao refrigerante é de 5°C e a variação apurada ser de 2,3°C, constate que o requisito é cumprido com uma margem elevada.

Ainda relativamente ao lado fixo, não se verifica qualquer variação de temperatura nas "linhas de água" dedicadas ao controlo de temperatura nas zonas periféricas aos bicos quentes.

No que concerne o sistema de arrefecimento do lado móvel, verifica-se que o fluido que circula pelos canais de refrigeração não sofre variação visível da sua temperatura, à semelhança do que também acontece com as "linhas de água" específicas para arrefecimento dos bicos quentes no lado fixo. Este fenómeno é explicado com o auxílio da Figura 56, onde se

apresenta o número de Reynolds nos diferentes canais de refrigeração. Observa-se então que nas "linhas de agua" em que o fluido não sofre variação de temperatura existe um escoamento bem desenvolvido e em regime turbulento (Re>4000), o que aumenta significativamente a eficiência na remoção de calor. Assim sendo, sugere-se que a remoção de calor nestes canais ocorre a uma taxa tão elevada e eficaz, que o calor inserido no molde não é suficiente para fazer com que o fluido refrigerante aumente de temperatura.

No entanto, conclui-se que o caudal assumido está ligeiramente sobredimensionado, uma vez que nas regiões mais relevantes, ou seja, nos canais conformais, verifica-se um aumento da temperatura de 2,3°C, quando o máximo possível seria de 5°C. Deste modo, existe a possibilidade de se diminuir o caudal de entrada, continuando-se a ter capacidade de remover carga térmica nestas zonas do molde. Por isso, pode ser viável diminuir o valor do caudal pressuposto sem comprometer os bons resultados que aqui se mostraram.

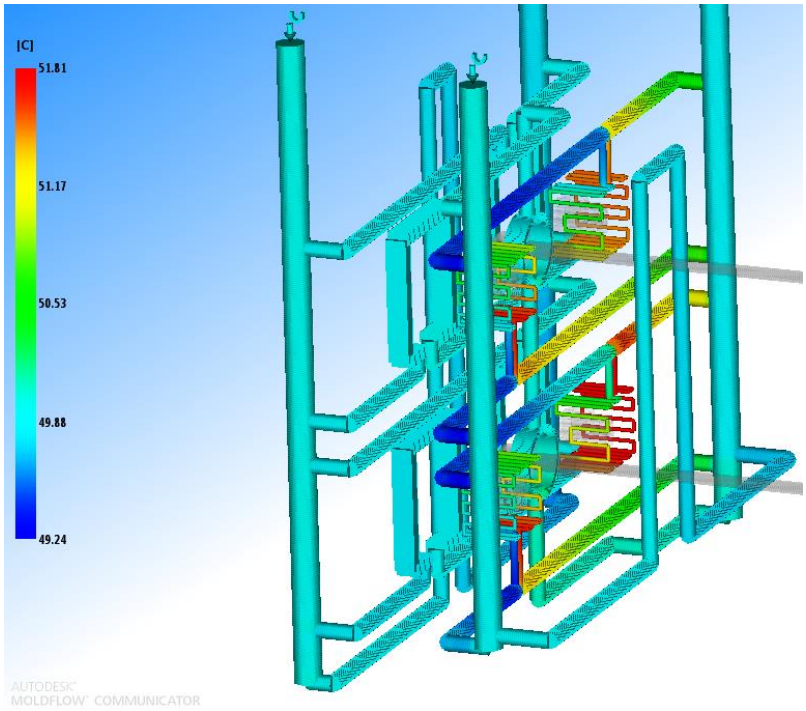


Figura 55 Temperatura do fluido de refrigeração

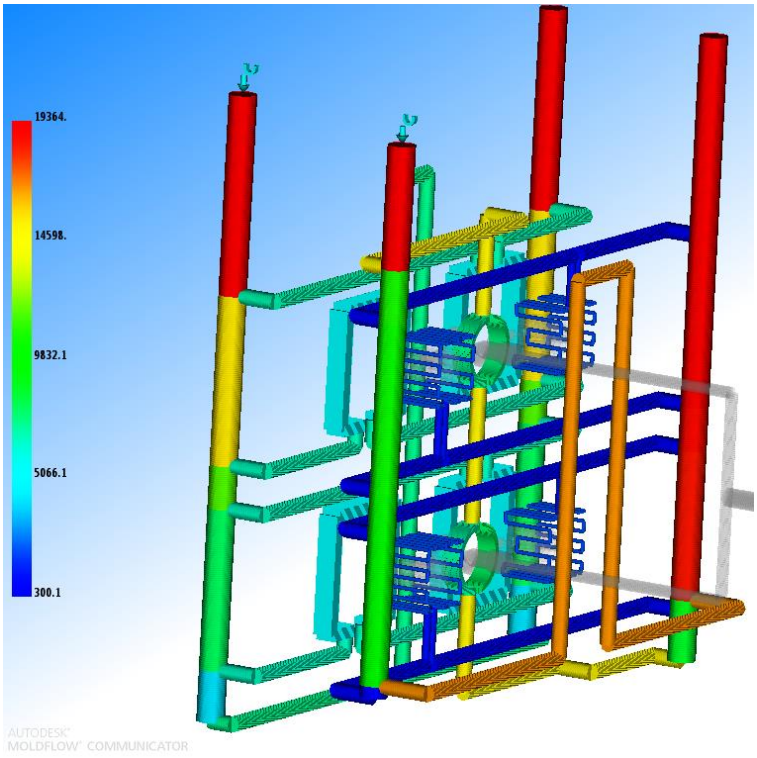


Figura 56 Número de Reynolds no circuito

Através da Figura 57, observa-se que a pressão do circuito de refrigeração apresenta dois comportamentos totalmente distintos, consoante se refere aos lados dos canais conformais ou ao lado só de arrefecimento convencional.

Analisando o lado que apenas tem presentes canais de refrigeração convencional, conclui-se que a pressão é repartida através do comprimento das "linhas de água", diminuindo progressivamente desde a entrada até à saída do fluido refrigerante.

Segundo a análise da pressão do circuito do lado fixo, verifica-se que existe uma acumulação significativa de pressão nas zonas que precedem os canais conformais, atingindo o valor máximo de 8,05 kPa, como era esperado, devido à transição abrupta do escoamento do fluido que passa de canais de 8 milímetros de diâmetro para os canais conformais de apenas 2 milímetros de diâmetro.

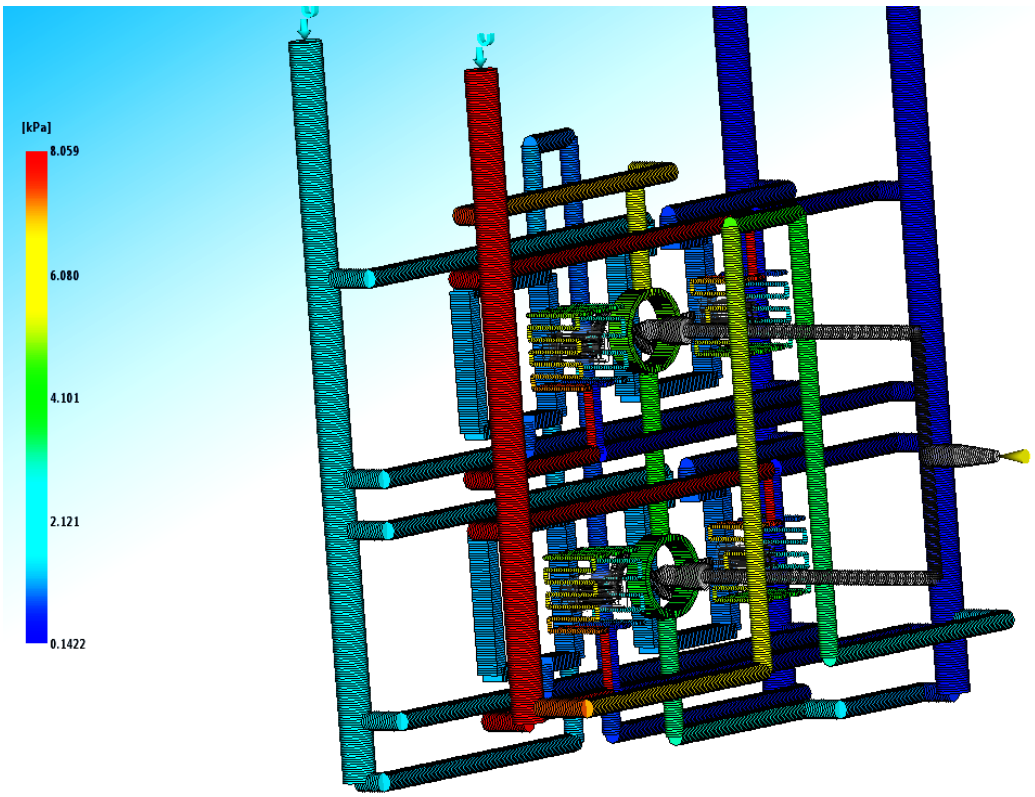


Figura 57 Pressão do refrigerante no circuito de controlo de temperatura

Através da observação das Figuras 58 a 61, conclui-se que as seções de menor espessura são as que necessitam de menos tempo para atingirem a temperatura de extração adequada, facto que é consistente com os estudos anteriores.

Observa-se igualmente que deste resultado do estudo numérico surge que o tempo necessário para uma extração segura e sem danificar as peças é de aproximadamente 5 segundos, visto que passado este tempo, mais de 95% da peça está solidificada e à temperatura de extração, sendo que como as zonas remanescentes localizam-se em partes espessas da peça e no interior da mesma, não apresentam risco de danificar a peça.

Com estes resultados, conclui-se que comparativamente ao estudo numérico anterior existe uma redução do tempo necessário até a peça atingir a temperatura de extração de aproximadamente 1,5 segundos, o que representa uma redução de 30%. Deve contudo, mencionar-se que esta redução no tempo de ciclo se consegue aumentando a temperatura do molde com consequentes benefícios ao nível da qualidade global da peça, ao que se dará particular destaque na análise subsequente.

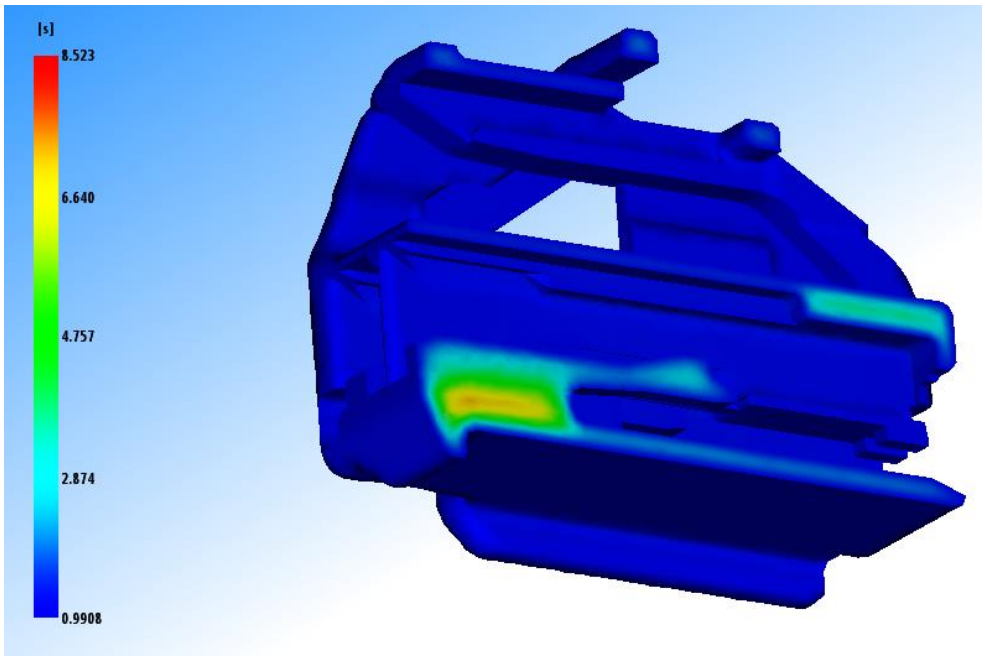


Figura 58 Tempo até atingir a Temperatura de Extração 1

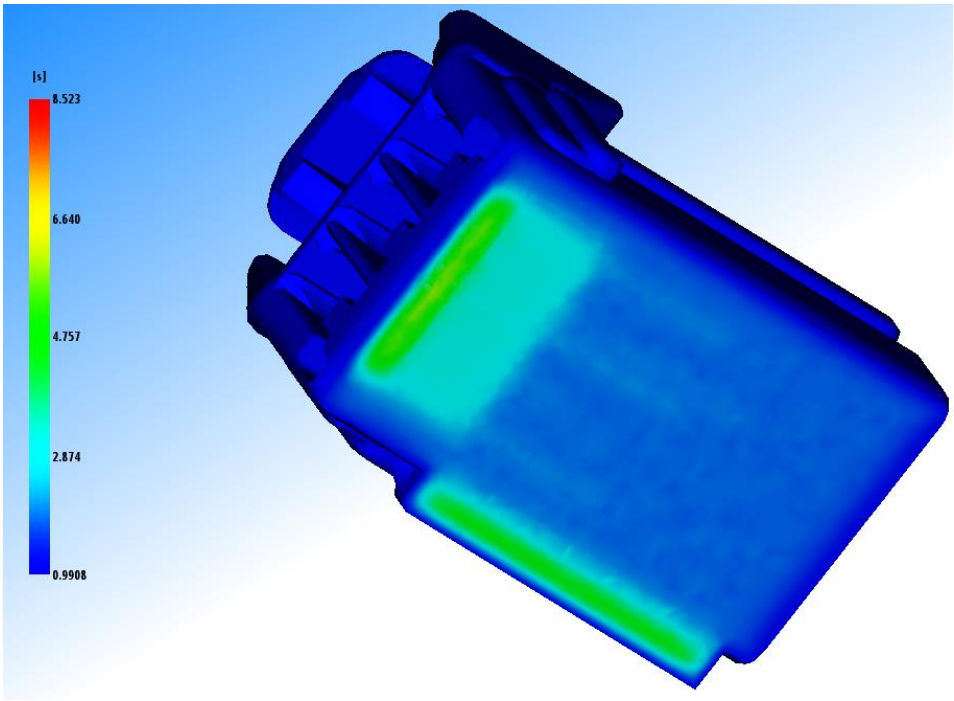


Figura 59 Tempo até atingir a Temperatura de Extração 2

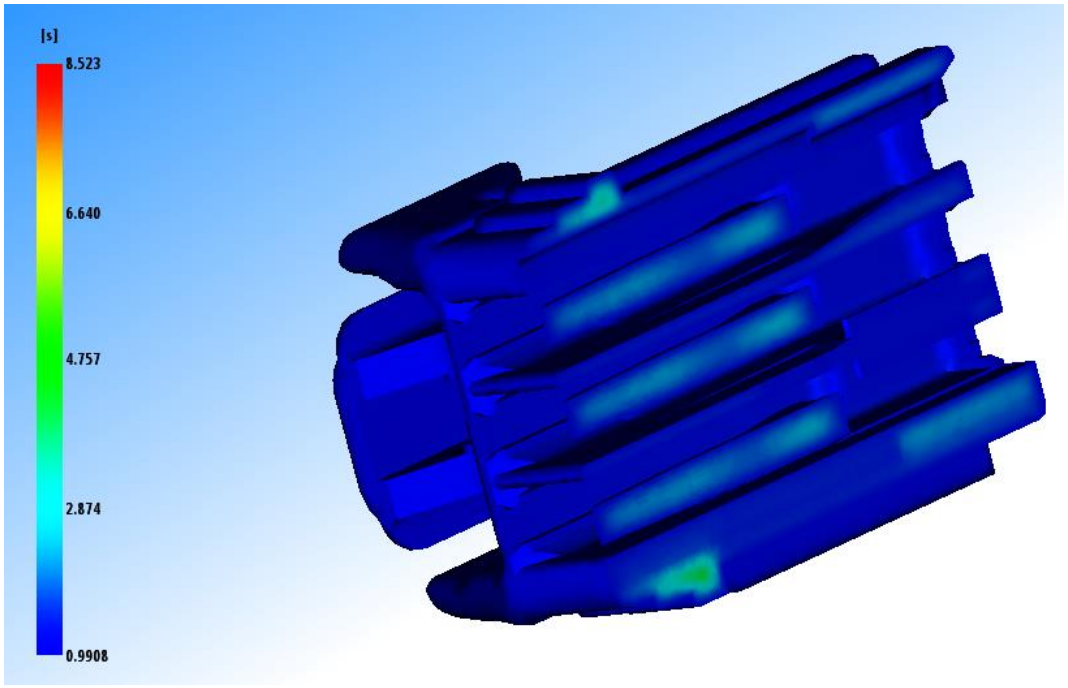


Figura 60 Tempo até atingir a Temperatura de Extração 3

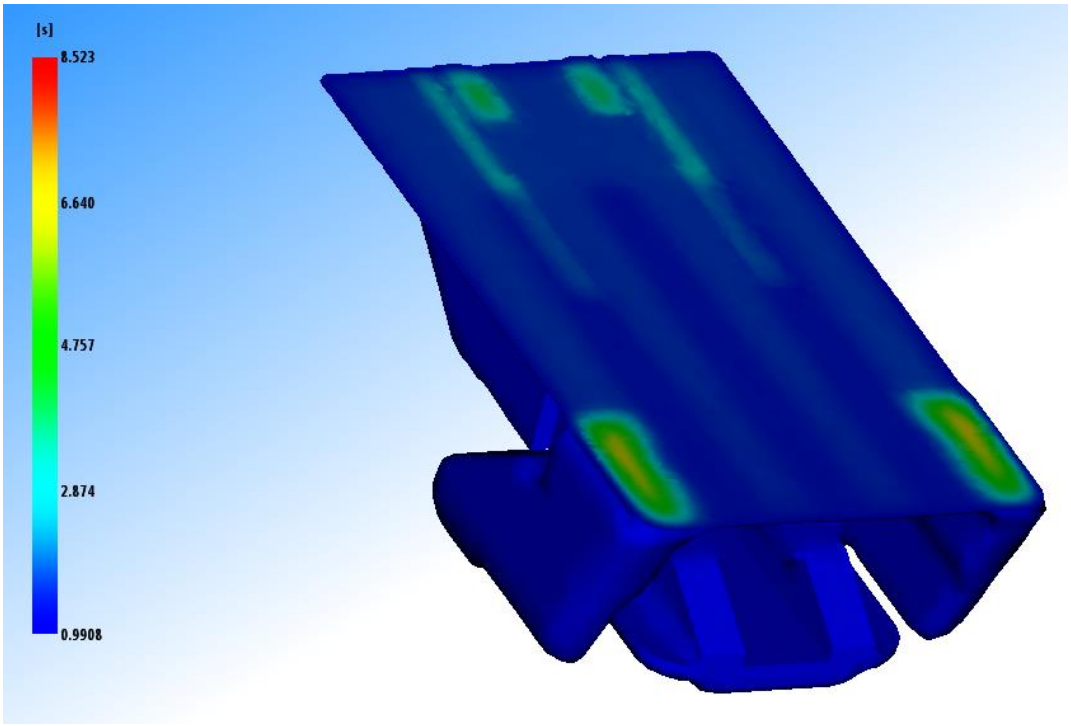


Figura 61 Tempo até atingir a Temperatura de Extração 4

Com base na Figura 62 é possível ter uma previsão de como a peça vai empenar e deformar no fim do ciclo de moldação, concluindo-se que esta apresenta um empeno de aproximadamente 0,045 milímetros. Além disso, também é visível que apresenta apenas uma região, correspondente ao que se denomina por *lock*, com uma deformação mais intensa (a vermelho na Figura 62, aproximadamente 0,35 milímetros).

Para uma melhor perceção relativamente às deformações das peças nas diferentes direções X, Y e Z apresentam-se respetivamente as Figuras 63, 64 e 64.

Conclui-se, portanto, que em comparação com a primeira simulação numérica, o valor do empeno na maior parte da peça sofre um decréscimo de 0,07 para 0,05 milímetros, uma redução correspondente a 29%. Se os valores de empeno e deformação das zonas funcionais do conector se mantiverem em aproximadamente 0,05 milímetros permanecem dentro de cotas. Verifica-se, assim, não só a diminuição do tempo de ciclo como também o aumento da qualidade final da peça.

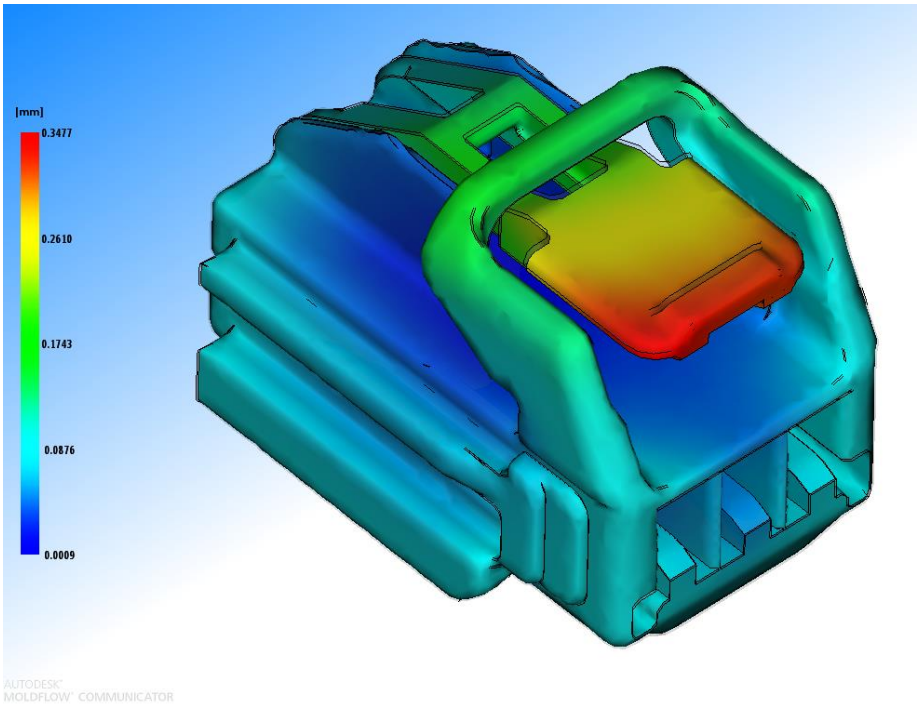


Figura 62 Empenos em todas as direções

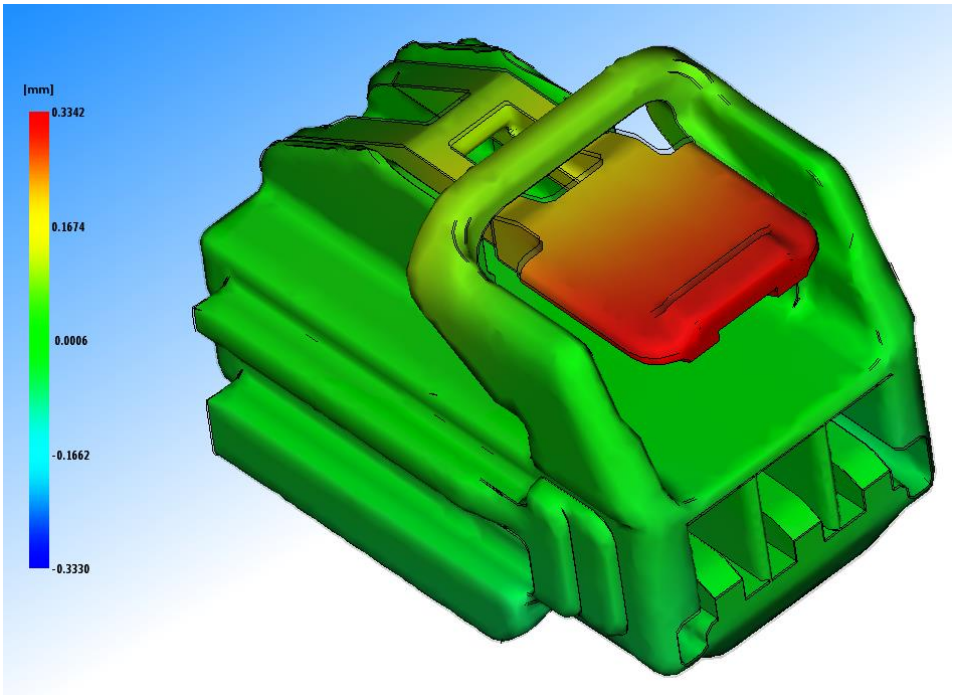


Figura 63 Empenos em X

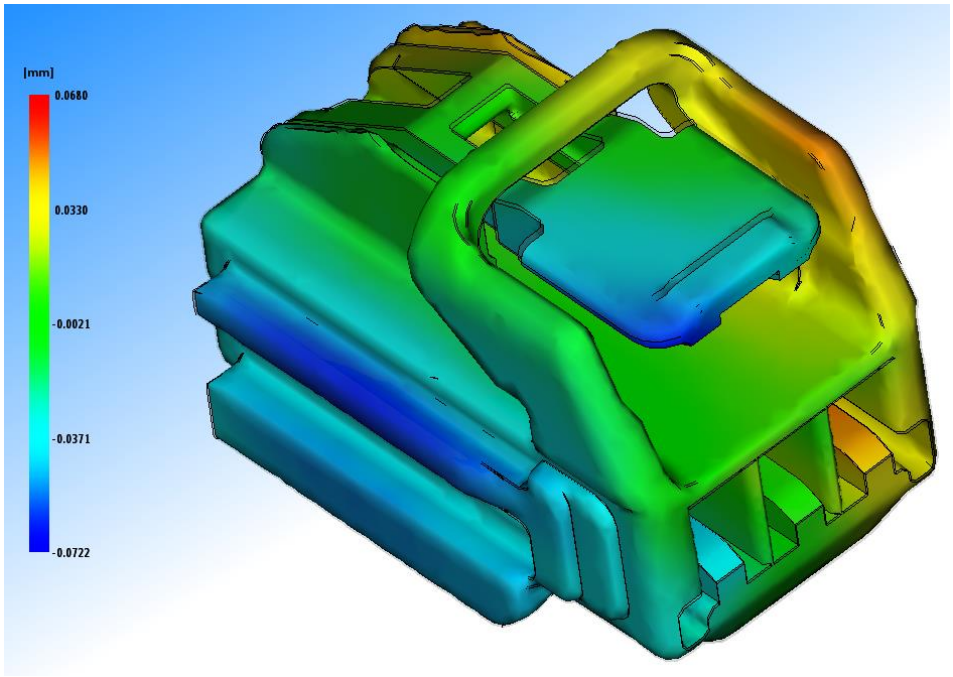


Figura 64 Empenos em Y

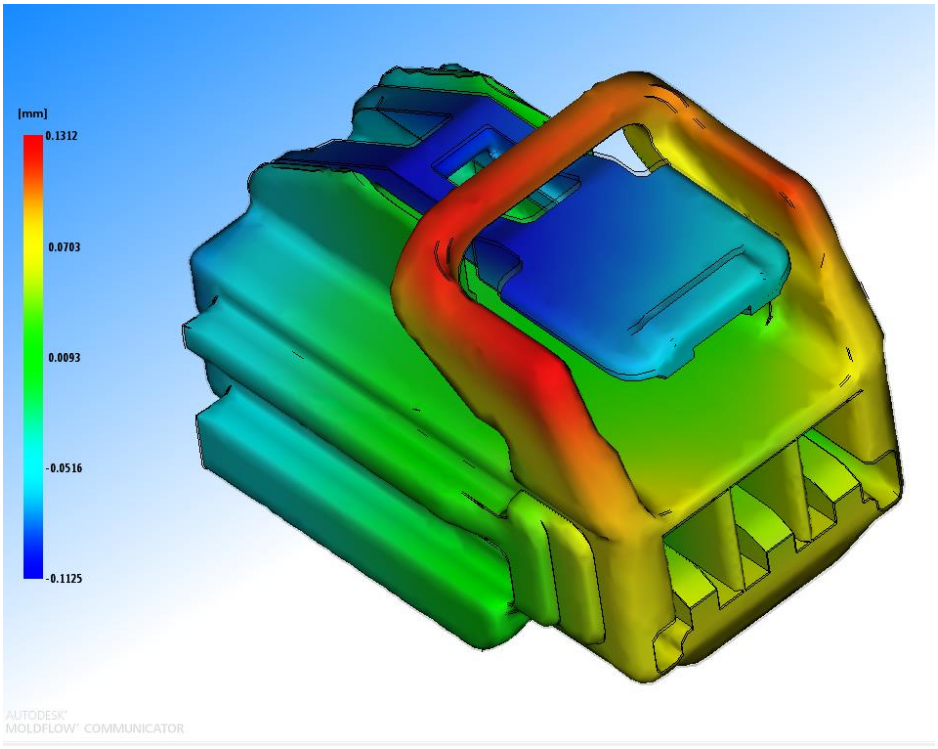


Figura 65 Empenos em Z

Relativamente aos resultados obtidos com a utilização dos canais conformais - em comparação com o cenário atual - consegue-se uma redução do tempo de ciclo de 1-1,5 segundos, perfazendo um tempo de ciclo de aproximadamente 10,5 segundos, bastante mais interessante que os atuais 12 segundos. No que se refere à produção, esta redução permite que, num dia de trabalho sejam injetadas 8228 injeções, mais 1028 do que as atuais 7200 injeções diárias, o que se reflete num aumento de produção de 14,2%, com o mesmo tempo de trabalho.

No âmbito de uma melhor perceção das consequências dos resultados obtidos, fizeram-se alguns cálculos que demonstram o panorama anual. Assim, uma vez que o molde em questão apenas trabalha aos dias úteis e que em cerca de 10% desse tempo o molde encontra-se parado para manutenção, o tempo de trabalho efetivo corresponde a aproximadamente 214 dias por ano. Deste modo, com o tempo de ciclo original de 12 segundos, obtém-se a produção de 1540800 injeções enquanto que com o tempo de ciclo otimizado de 10,5 segundos a produção anual é de 1760914 injeções, ou seja mais 220114. Para produzir esta diferença de injeções com o tempo de ciclo antigo seriam necessários mais 31 dias de produção (um mês e meio), por outro lado, se o objetivo da produção anual deste molde forem 1540800 injeções, atinge-se este número em 188 dias de produção, deixando assim a máquina livre para produção de outras peças 26 dias por ano. Seguidamente, na Tabela 7, apresenta-se o resumo dos resultados obtidos.

Tabela 7 Balanço e análise dos resultados obtidos.

Tempo de Arrefecimento (s)	Injeções/dia	Produção Anual (Injeções)	Tempo de Produção de 1540800 injeções (dias)
12	7200	1540800	214
10.5	8228	1760914	188

Assume-se, portanto, que a aposta nesta nova geometria de arrefecimento traria grandes benefícios, não só a nível desta peça como também no aumento da capacidade e da rapidez de produção. Salienta-se que a possível aplicação desta nova arquitetura de sistema de controlo de temperatura a outros moldes semelhantes ao estudado não só influenciaria a metodologia a ser utilizada no processo de desenvolvimento e/ou otimização de ferramentas moldantes mas também toda a capacidade produtiva e competitiva da YSE.

Capítulo 6

Requisitos para a produção de moldes

O desenvolvimento tecnológico na construção de ferramentas para injeção de termoplásticos tem sido impulsionado pela produção de peças complexas que impõem o requisito de alta qualidade (Harada, 2004).

No entanto, devido às elevadas exigências que se fazem sentir a nível de qualidade, complexidade e prazos de entrega dos moldes, é imprescindível que qualquer empresa que queira iniciar-se na produção de moldes o faça, corretamente.

Posto isto, as necessidades básicas e essenciais relativas à produção de moldes dividem-se em duas áreas distintas: o projeto do molde e a maquinação do molde. A primeira implica um conjunto de valências que permitam a realização de um projeto do molde eficaz, competitivo, mas também célere, pois é nesta fase que se consegue atualmente a maior margem de lucro, sendo também esta a etapa mais fundamental e importante de todo o processo. Por outro lado, a segunda área - a maquinação do molde - requer tanto um bom "parque" de máquinas, bem como de trabalhadores que delas consigam tirar maior proveito.

Refere-se também que a realidade que se faz sentir cada vez mais neste mercado é a de uma competitividade extrema, com um elevado número de empresas nacionais e internacionais a afirmarem-se neste ramo e a conseguirem ter a capacidade de fazer moldes a preços cada vez mais competitivos devido à, já abordada, evolução tecnológica.

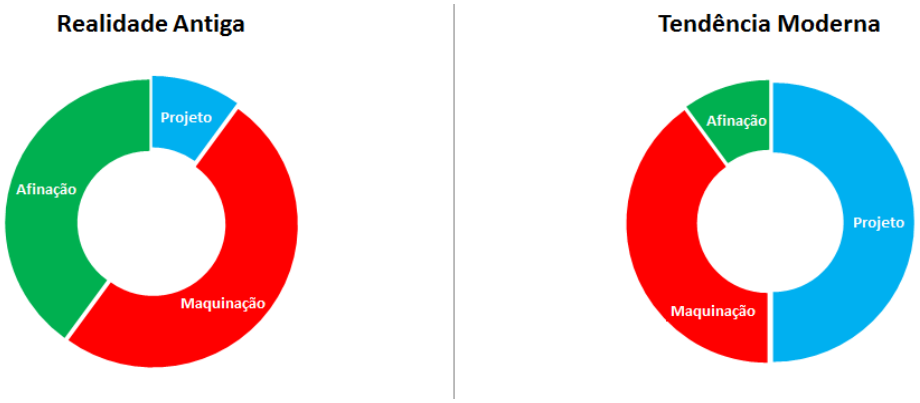


Figura 66 Evolução das fases de Produção de Moldes

A Figura 66 tenta ilustrar o que é referido por vários autores, como sendo a realidade cada vez mais "sentida" neste ramo, bem como aquilo que foi passível apurar na divisão de Moldes da YSE. Antigamente um molde tinha um projeto rápido, onde eram definidos e dimensionados os seus componentes bem como a sua localização, indo posteriormente para fabricação, sendo que, por último, necessitava de um período de afinação, na máquina de injeção, para os parâmetros de injeção, arrefecimento e compactação até se obterem peças finais com qualidade satisfatória.

Nos dias que correm, essa realidade está a ser amplamente substituída por um projeto com um tempo mais longo, cuidado e minucioso com o auxílio de programas de simulação do processo de injeção, permitindo a simulação do preenchimento da cavidade do molde de uma forma mais detalhada, o que torna possível o seu uso na identificação de parâmetros do processo realistas, corroborando a preparação do processo produtivo. O tempo de maquinação dos moldes também vai sendo diminuído com o aparecimento de ferramentas que permitem maquinação a alta velocidade. A principal diferença, que possibilita uma redução significativa de despesas, reside na diminuição do tempo de afinação dos parâmetros do processo com o molde na máquina, que muitas vezes era feito por tentativa e erro, o que aumentava a probabilidade de danificar a ferramenta moldante ou alguns dos seus constituintes.

Resumindo, a filosofia atual é a de que o bom desempenho de uma ferramenta de injeção está diretamente associada ao cuidado e rigor com que o seu projeto é desenvolvido, tanto na conceção funcional como na definição dos materiais utilizados (Harada, 2006).

6.1 Gabinete de estudo e projeto

Segundo o que foi já referido, qualquer empresa que queira produzir moldes e ser rentável nesta atividade, deverá possuir um gabinete de projeto. Ao encargo deste devem ficar, a avaliação do produto, a recolha das características da máquina de injeção, a avaliação dos parâmetros do processo de injeção, a definição do sistema de injeção e o controlo de temperatura, desenvolvimento de cavidades, postiços, gavetas, entre outros e a modelação dos componentes e sistemas do molde (Harada, 2006).

Assim, para se desenvolverem estas tarefas convenientemente, apresenta-se como necessário a nível tecnológico, o uso de ferramentas de simulação do processo de injeção de termoplásticos (CAE), como por exemplo o *Autodesk Moldflow Insight® e Moldex3D® e* o uso de programas de modelação em 3D (*CAD*), como por exemplo o *Solidworks® e Catia®.*

Relativamente às pessoas que trabalham num gabinete de projeto de moldes, assume-se como necessário que estas possuam um conjunto de características, habilidades e conhecimentos relativos: ao processo e desenvolvimento do produto, ao processo de injeção de termoplásticos e aos moldes e os seus sistemas e componentes. Adicionalmente, devem

também ter a capacidade para fazer a interligação destes conhecimentos com as características dos materiais poliméricos. Seguidamente, na Figura 67 é apresentado o referido anteriormente (Ferreira, 2006).

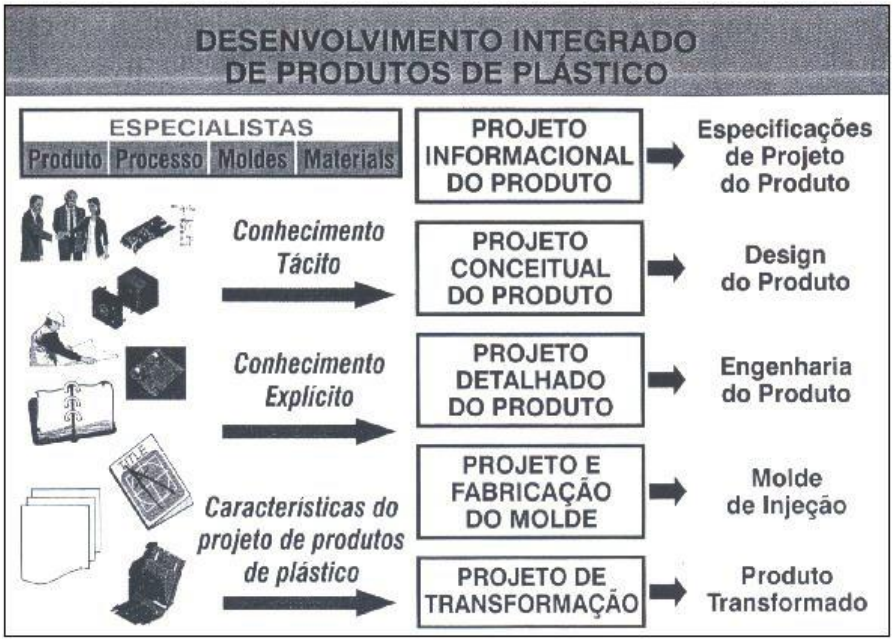


Figura 67 Conhecimentos necessários no gabinete de Projeto de Moldes (Ferreira, 2006)

Assim, o gabinete de projeto proposto teria os meios e as competências para fazer de maneira competitiva, minuciosa e eficiente, as seguintes etapas de desenvolvimento de um molde para injeção de plásticos (SILVA, 2009):

- Levantar e avaliar as especificações do produto e da máquina injetora;
- Orçamentar corretamente o projeto do molde;
- Fazer o acompanhamento do projeto e interação com o cliente e as suas necessidades;
- Determinar a linha de abertura do molde (linha de apartação);
- Definir o número e disposição das cavidades;
- Analisar as propriedades do material, sugerir o material adequado, e as suas características de processamento;
- Projetar e dimensionar os sistemas de alimentação, extração e refrigeração;
- Dimensionar os demais componentes do molde de injeção;
- Utilizar o *software* de simulação do processo de injeção como ferramenta de apoio ao projeto do molde;

- Postular parâmetros de processamento do produto recorrendo aos dados obtidos da simulação do processo de injeção;
- Modelar o molde, os seus sistemas, estruturas e respetivos elétrodos;
- Analisar o molde resultante (dados pertinentes ao mesmo e ao processo);
- Determinar os recursos de segurança aplicados ao molde, para evitar danos à ferramenta, equipamentos e acidentes junto aos operadores durante o processo.

6.2 Maquinação

A fase de maquinação dos moldes e seus constituintes depende da etapa anterior, sendo que se o projeto realizado apresentar falhas, estas irão ser evidenciadas no molde final, onde o improviso e o remedeio do problema apresentam um preço mais elevado, não só devido ao desperdício de matéria-prima mas também devido ao desperdício do tempo de máquina e também muitas vezes devido ao facto de atrasar a elaboração do molde. Como tal, o SM tem uma elevada importância no projeto de um molde, dado que a qualidade do seu trabalho afeta todo o produto final bem como o ciclo de vida da ferramenta de moldação. Assim, características como o rigor dimensional, o acabamento das superfícies e ajustes dos componentes dependem desta fase do fabrico do molde.

Percebendo a importância desta fase, optou-se por fazer um estudo das empresas de referência no que concerne o fabrico de moldes, sendo que nalgumas empresas o estudo realizado foi presencial, com o apoio e acompanhamento do responsável do SM da divisão de Moldes da YSE, enquanto que em outras este estudo foi elaborado por recurso à internet. Por uma questão de respeito e ética profissional, não serão reveladas as empresas visitadas pessoalmente. No entanto, afirma-se que nestas tudo tem origem num gabinete de projeto bem estruturado com tarefas bastante bem divididas que estão a cargo de profissionais competentes e especializados, contando obviamente com o apoio de *softwares* específicos a cada função. Relativamente às empresas das quais se fez um estudo via internet - onde foi possível analisar as suas valências a nível de projeto e maquinação - foram a *VSV Moldes*, *Automolde*s, *Aurimoldes* e a *ABC Moldes*. No que se refere à maquinação dos moldes, constatou-se que as empresas têm um fluxo e uma área de trabalho bastante bem definidas, como se estas formassem subsetores, como: Programação CAM, fresagem CNC (zonas moldantes, estruturas dos moldes, elétrodos, entre outros), eletroerosão por penetração - *Electrical Discharge Machining* (EDM), eletroerosão por fio, retificação, furação/mandrilagem, controlo dimensional, ajustes e montagem de todos os componentes e molde.

É importante referir que, apesar da excelente divisão de tarefas e postos de trabalho, a maior parte das empresas conta com o auxílio de *softwares* de otimização e planeamento do fluxo de trabalho, que permitem encadear sequencialmente dezenas de peças em poucos

minutos. Com estes *softwares*, as empresas conseguem prevenir os erros humanos, acelerar a preparação (reduzir tempos de *setup*) e minimizar a introdução de dados pelos utilizadores. Além disso, estas aplicações têm também a capacidade de integrar vários postos de trabalho como a fresagem CNC, EDM e a medição de pontos - *Coordinate Measuring Machine* (CMM) - (como exemplos destes programas referem-se o: *SolidSet*® e o *Simple*®).

A etapa de elaboração do programa de CAM (PowerMill, MasterCam, etc) advém diretamente da análise das modelações em 3D feitas do molde e dos seus componentes por parte do gabinete de projeto. Neste trabalho, requer-se um operador com conhecimentos sobre características dos materiais, condições de corte, estratégias de maquinação e sensibilidade para as limitações da máquina que irá realizar o programa para que o programa CAM realizado seja eficaz. A nível de máquinas, o ideal será uma máquina de 5 eixos, com vista à facilidade de maquinação de detalhes das zonas moldantes e elétrodos, o que implica a existência de um *software* CAM que disponha desta tecnologia.

Após o programa de CAM estar completo e ser enviado para a máquina pelo programador, os operadores das máquinas de fresagem CNC, devem "chamar" o programa, preparar o material que vai ser maquinado, bem como a máquina, em particular, e então executar o programa. Quando a peça estiver pronta, fica a cargo do operador da CNC enviá-la para a próxima operação. Posto isto, afirma-se como relevante que o(s) operador(es) tenham alguns conhecimentos sobre este tipo de programação bem como conhecimentos sobre esta tecnologia, mas sobretudo destreza no manuseamento destas máquinas, ficando assim dotados para perceber todo o processo, o que lhes permite adquirir a capacidade de perceção e análise crítica de maneira a evitar erros, anomalias ou avarias, sendo que se tal acontecer o processo tem que ser interrompido.

Os operadores responsáveis pelos processos de eletroerosão por penetração e eletroerosão por fio devem ter interiorizado que os processos são relativos a acabamentos de superfícies - detalhes minuciosos - e portanto de grande exigência e perfeição. Para tal, o operador de cada processo deve ter os conhecimentos aprofundados sobre o processo que lhe esteja atribuído, destreza e espírito crítico sobre o manuseamento destas máquinas e tecnologias de maquinação, bem como conhecimentos intrínsecos a todos os operadores de maquinação como, leitura e interpretação de desenhos técnicos e sensibilidade às limitações do processo. Sendo assim, cada operador ficaria responsável pela introdução das ferramentas necessárias, introdução das peças a maquinar, inserção dos zeros da peça e cotas de erosão e programação das máquinas para que estas trabalhem de forma autónoma.

Os operadores que estejam encarregues da furação e mandrilagem devem saber interpretar os desenhos, de forma a fazerem estas operações nos sítios indicados, terem conhecimentos sobre as velocidades de corte ideais para este processo para cada material e diâmetro de furo, em particular. Sendo assim, cada operador deve fazer a preparação das ferramentas, da máquina, da peça a maquinar, bem como do programa a executar, fazendo o acompanhamento do processo e garantindo que o produto final respeita todas as cotas e imposições presentes no desenho da peça.

O trabalho de retificação é um trabalho de apoio e complementação à fresagem CNC bem como à eletroerosão por penetração e por fio, de tal maneira que os detalhes que não se

consigam realizar ou não se justifiquem fazer nos postos anteriores são feitos por retificação. À semelhança dos demais trabalhadores, os retificadores devem ter conhecimentos de leitura de desenho técnico, saber das limitações do processo, das máquinas e principalmente dos materiais, de maneira a que se respeitem as cotas exigidas bem como a qualidade das superfícies das peças.

Uma das etapas mais importantes é o controlo dimensional. Neste posto, as peças deverão ser aprovadas ou não, consoante respeitem a tolerância exigida, indicada no desenho de cada peça. Atualmente, aconselha-se o uso de máquinas de medição por pontos (CMM), devido à possibilidade de elaborar e guardar os programas de medição para cada peça, aumentando a automatização do processo, mas também pelo rigor e precisão que estas máquinas são capazes de oferecer (±2 *microns*). Posto isto, o operador responsável deverá ter o conhecimento suficiente que lhe permita ler as especificações do desenho técnico, elaborar o programa de medição, ou caso ele já exista, fazer modificações, e analisar os resultados mostrados pela máquina. Deverá ainda ter a destreza necessária para operar a máquina na medição de diferentes peças fazendo os ajustes necessários.

Por fim, é necessário realizar trabalho de bancada, no que concerne o ajustamento e polimento das peças bem como a montagem de peças ou moldes consoante cada caso especifico. Neste posto os trabalhadores deverão saber ler e analisar os desenhos de conjunto, de maneira a efetuarem a montagem dos componentes corretamente. No caso da YSE, já existe um sector que tem a capacidade de exercer este trabalho, que é a MM. Posto isto segundo a Secção 6.1 e 6.2, na Tabela 8 apresenta-se um resumo das necessidades básicas para a produção de moldes.

Tabela 8 Necessidades básicas para a produção de moldes.

Gabinete de Projeto	Sala de Maquinação
Pessoas responsáveis pelo acompanhamento do projeto, orçamentação e levantamento das necessidades do cliente bem como das características da máquina de injeção.	Posto(s) CAM
	Posto(s) Fresagem CNC + Operador(es)
	Posto(s) WEDM + Operador(es)
Posto CAE (Pessoa(s) com conhecimentos sobre polímeros e sobre os diversos aspetos do processo de injeção e sistemas constituintes dos moldes).	Posto(s) Retificação + Operador(es)
	Posto(s) EDM + Operador(es)
	Posto(s) Mandrilagem + Operador(es)
Posto CAM (Pessoa(s) com conhecimentos sobre o projeto de moldes e dos sistemas constituintes, com capacidade de fazer a modelação dos mesmos).	Posto(s) CMM + Operador(es)

Capítulo 7

Descrição das valências do SM

O SM iniciou a sua atividade com uma máquina de erosão por penetração (EDM), duas retificadoras, um projetor de perfis, uma coluna de medição vertical e duas fresadoras CNC, sendo que como uma das máquinas estava avariada acabou por ser vendida. A nível do *software* havia um posto de trabalho com o *Solidworks*® e o *Powermill*® para desenho e definição das estratégias de maquinação. Por fim, a nível de pessoal existia uma pessoa responsável pela fresadora e pelo posto de trabalho de CAD/CAM, uma pessoa alocada a cada retificadora e outra pessoa responsável pela máquina de erosão por penetração.

Com o constante crescimento da divisão de Moldes bem como do consequente aumento do número de moldes em utilização, também o SM sentiu a necessidade de crescer, uma vez que as encomendas de trabalho por parte do cliente de "manutenção moldes" aumentaram significativamente, como seria de esperar.

Atualmente, como em parte também já foi referido o SM é constituído pelas mesmas máquinas acima referidas, mais uma máquina de erosão por penetração, uma máquina de erosão por fio - *Wire Electrical Discharge Machining* (WEDM) -, uma máquina de furação rápida e um serrote. Além disso, contrataram também mais uma pessoa para ficar responsável pela segunda EDM, e adicionaram mais um posto de trabalho com *Solidworks*®. Acrescenta-se ainda, que todas as pessoas têm um computador e um sítio de trabalho próprio onde podem consultar desenhos, tirar medidas, fazer programas CAM, modelação em 3D, entre outras funcionalidades, dependendo, claro, da necessidade de cada operador.

É igualmente importante referir, que como estratégia de otimização e aproveitamento da mesa da fresadora, é usado um sistema de paletes, contendo cabeças com o sistema 3R.

Como foi já mencionado, o SM tem como principal função produzir postiços, de maneira a satisfazer as necessidades provenientes da MM da YSE. No entanto, até se chegar ao produto final, existem um conjunto de ações que é necessário realizar, sendo estas designadas por fluxo de produção. No SM este é baseado nos postos de trabalho enunciados anteriormente (erosão por fio, retificação, fresagem, erosão penetração e medição), sendo que tudo se inicia no desenho do postiço. De seguida, o operador responsável pelo CAD/CAM, modela o postiço - caso ainda não exista uma modelação em 3D - e desenha também os elétrodos necessários em 3D. O passo seguinte remete ao operador da máquina de fio que corta um dos perfis do postiço da placa de aço de espessura mais próxima da do postiço.

Neste momento todo o nosso processo está dividido, tendo-se parte do trabalho em aço (postiço) e a outra parte nos elétrodos (cobre). A seguir à máquina WEDM, o postiço vai para a retificação, onde são feitos todos os planos e raios possíveis, entretanto, o operador do CAD/CAM, que também é responsável pela CNC, depois de extrair os elétrodos, prepara o programa de maquinação, prepara as quadras necessárias aos mesmos para estas irem para as cabeças do sistema de paletização e inicia a maquinação dos elétrodos.

Quando o postiço está finalizado em termos da retificação e os elétrodos estão prontos na fresagem, vão para o ultimo posto da maquinação - a erosão por penetração - onde são feitos os pormenores mais complicados e não passíveis de serem feitos até ao momento.

Quando o trabalho efetuado pelo operador da erosão por penetração fica terminado, o postiço vai para a última etapa antes de ser declarado como pronto - a medição e inspeção das suas cotas. Todo o processo de medição atual é ainda manual.

Na Figura 68, apresenta-se em esquema de todo o fluxo de produção do setor.

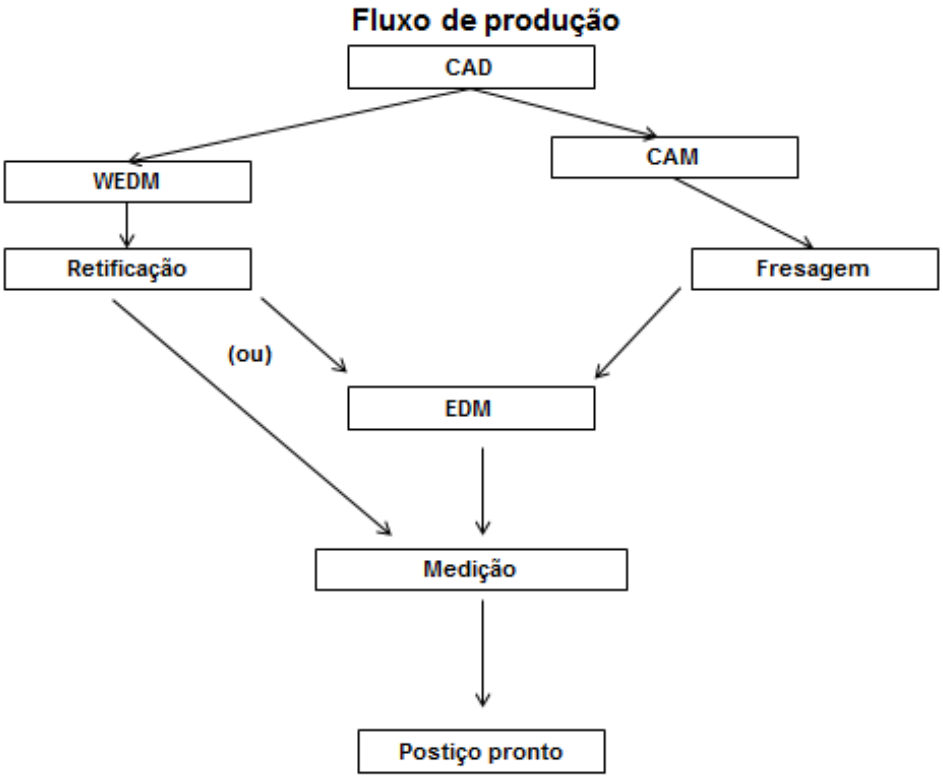


Figura 68 Fluxo de Produção do SM da YSE

De maneira a ser possível uma perceção mais clara das valências fundamentais existentes no SM da YSE, apresenta-se a Tabela 9:

Tabela 9 Recursos existentes no SM da YSE.

Mão-de-Obra	Máquinas
1 Operador de CAD, CAM e CNC	1 Fresadora CNC
2 Retificadores	1 Máquina de WEDM
1 Operador de EDM e WEDM	2 Máquinas EDM
1 Operador de EDM	1 Furação Rápida
	2 Retificadoras

Capítulo 8

Proposta de alteração para o SM da YSE

Como foi referido no Capítulo 1, o SM da YSE iniciou a sua atividade há 3 anos, sendo que este tem como principal função a maquinação de postiços, de tal forma a que a MM seja rápida e eficiente. Apesar de este setor ser relativamente recente, as suas perspetivas de crescimento são bastante positivas, tendo este a ambição de se tornar mais eficiente e até de, num futuro próximo, ter a capacidade de produção de alguns dos seus moldes.

De maneira a adquirir conhecimentos sobre o funcionamento do SM e, como tal, formar uma opinião fundamentada acerca do mesmo, antes de se propor qualquer alteração foi efetuado um estudo da realidade do processo, do fluxo de trabalho, do parque de máquinas e da mão-de-obra existente. Deste modo, seguidamente, é elaborada uma análise estatística sobre o total de 112 processos - referentes aos meses de janeiro e fevereiro de 2016 – sendo esta realizada com o auxílio dos registos mensais de trabalho preenchidos pelos trabalhadores deste setor.

8.1 Estudo da produção do SM

De forma a ser possível calcular os rácios de utilização das máquinas, foram recolhidos os dados relativos ao TM de cada processo nos diferentes postos de trabalho (nos meses de janeiro e fevereiro), tendo sido analisados diversos indicadores de produção, tais como, os tempos relativos aos prazos de entrega, os tempos de *setup*, os tempos de produção total e o tempo médio de espera até iniciar a produção.

Considerando os 112 processos, os resultados referentes aos TTs do processo de cada posto são apresentados na Tabela 10:

Tabela 10 Tempos totais do processo.

WEDM [horas:minutos]		**Retificação** [horas:minutos]		**CAD/CAM/CNC** [horas:minutos]		**EDM** [horas:minutos]		**Medição** [horas:minutos]
TM	**TT**	**TM**	**TT**	**TM**	**TT**	**TM**	**TT**	**TT**
119:50	149:50	546:23	596:38	313:41	564:14	551:30	594:30	26:30

É importante referir que o operador que é responsável pelo trabalho de modelação de postiços e elétrodos (CAD), pela elaboração do programa de maquinação (CAM) dos elétrodos é o também pela preparação da fresadora (CNC). Como tal, mediante a realidade do fluxo de trabalho, assume-se que a diferença entre o TM da fresadora e o TT do processo é o tempo que o operador necessita para modelar as peças e realizar os respetivos programas CAM. Ainda, de acordo com as informações recebidas por parte do operário, refere-se também que o trabalho de CAD/CAM tem as respetivas proporções de 65% e 35%.

Posto isto, atendendo à realidade da YSE, na qual um dia de trabalho (para os operadores) equivale a oito horas, e considerando os resultados anteriores, obtém-se os dados apresentados na Tabela 11:

Tabela 11 Prazos e tempos médios do SM.

Prazo médio de entrega (dias)	**Tempo médio produção (dias)**	**Tempo médio de espera (dias)**
5,27	1,5	3,75

Assumindo também que as máquinas CNC (WEDM, EDM, Fresadora) têm uma autonomia de trabalho de 3 turnos e que as retificadoras têm uma autonomia apenas de 1 turno - pois ao contrário das de tecnologia CNC necessitam de um operador sempre presente a operar as máquinas -, os valores apresentados na Tabela 12, são o resultado da razão calculada entre o trabalho realizado e o tempo disponível para a realização do mesmo.

Tabela 12 Valores da razão de trabalho de cada posto.

			***SETUPS* (%)**
RÁCIOS das Máquinas do Processo	**WEDM (%)**	16,0	20,0
	Retificação (%)	95,7	10,9
	Fresadora CNC (%)	60,4	44,4
	EDM (%)	31,8	47,2

Com base nos dados recolhidos, foi possível ainda proceder a uma estimativa do tempo de trabalho de cada processo nos diferentes postos, de maneira a ser possível calcular o gargalo de produção. Deste modo, na Tabela 13 apresentam-se os resultados obtidos.

Tabela 13 Tempo de execução por processo.

Tempo de execução de cada posto por processo [horas:minutos]					
WEDM	**Retificação**	**CAD/CAM**	**CNC**	**EDM**	**Medição**
2:06	5:28	3:47	4:45	8:29	0:15

Assim, sabendo o tempo de trabalho por processo em cada posto e o número de horas que cada máquina funciona por dia é possível encontrar o gargalo de produção por recurso à equação [10]. Os resultados obtidos são sumarizados na Tabela 14.

$$\textbf{\textit{Capacidade produção diária}} = \frac{\text{"}\textbf{\textit{nº horas trabalho por dia}}\text{"}}{\text{"}\textbf{\textit{tempo de execução por processo}}\text{"}} * \text{nº postos} \qquad [\mathbf{10}]$$

Tabela 14 Capacidade de produção diária por posto.

Posto	Número de postos	Tempo de execução por processo	Horas/dia	Capacidade diária de processos
WEDM	1	2:06	8:00	3,8
Retificação	2	5:28	8:00	2,9
CAD/CAM	1	3:47	6:00	1,5
Fresadora CNC	1	4:45	16:00	3,3
EDM	2	8:29	8:00	1,8
Medição	1	0:15	1:30	5,9

Os rácios calculados têm em conta a capacidade de trabalho de cada máquina e a mão-de-obra existente, bem como o número de máquinas de cada posto de trabalho. Conclui-se, portanto, que como as máquinas com tecnologia CNC possuem a capacidade de serem programadas e de poderem trabalhar sem a necessidade de um operador, permitem a possibilidade de desenvolvimento e evolução do método de trabalho, o que origina que os rácios nessas máquinas possam atingir valores mais satisfatórios, principalmente na WEDM e na EDM. No entanto, afirma-se também que o elevado tempo de *setup* verificado na EDM é outro dos indicadores que mostra a necessidade de otimização, visto ser demasiado longo. Além disso, é de notar que outro problema que influencia a baixa utilização das EDMs é a capacidade de fluxo trabalho inerente ao posto CAD/CAM, uma vez que este por vezes não liberta trabalho suficiente para as EDMs.

Assim, a partir da análise das capacidades de produção, é possível afirmar que existem dois gargalos de produção que correspondem aos postos CAD/CAM e às EDMs. Os resultados obtidos são concordantes com a realidade observada no setor.

Relativamente ao posto CAD/CAM e CNC, que como já foi referido, em empresas conceituadas deste ramo corresponde a pelo menos 3 trabalhadores (um para CAD, um para CAM e outro para operar o centro de maquinação CNC), no SM da YSE está concentrado num único trabalhador, o que faz com que este esteja sobrecarregado de tarefas, o que se reflete numa capacidade diária de apenas 1,5 processos.

No que concerne a capacidade diária dos postos de EDM, o valor obtido de cerca de 1,8 processos corrobora aquilo que se verifica no dia-a-dia de trabalho. Este é um resultado com grande possibilidade de evolução, sendo justificado pelo uso feito das máquinas ser

convencional de erosão elétrodo a elétrodo, onde o carrossel de ferramentas está constantemente vazio por não ser utilizado. Devido a isso, não é tirada qualquer vantagem da tecnologia CNC das máquinas que permite a realização de múltiplos programas com múltiplos elétrodos que ficam armazenados no armazém de ferramentas e que permitem que cada máquina em vez de ter uma autonomia de, por exemplo, uma hora, tenha de sete ou oito horas, dado que ao executar um programa previamente feito de vários elétrodos não necessita da intervenção constante do operador. Além disso, o cenário pouco satisfatório neste posto também se deve ao elevado tempo de *setup* requerido para cada troca de elétrodo, tendo este sido adotado segundo a filosofia de trabalho convencional que preconiza um total de cerca de 50% do tempo do processo. Este tempo é geralmente gasto nos centramentos da peça, definição dos zero-peça para cada elétrodo e introdução de cotas de erosão.

É de realçar que mesmo sem contar com a capacidade dos gargalos, a capacidade média de produção existente no setor ainda não revela ser a máxima possível, tendo em conta a capacidade das máquinas e recursos existentes. Por isso, sugere-se fazer uma remodelação e afinação no processo produtivo do setor, aproveitando os recursos existentes ao máximo, de maneira a não só diminuir os tempos de preparação do trabalho para as máquinas, como também diminuir as intervenções dos operadores nas máquinas, padronizando todo o processo para que independentemente de qualquer peça, o processo possa variar o mínimo possível. Isto permite aumentar a autonomia de trabalho, possibilitando, por exemplo, programar o trabalho para o fim-de-semana sem a necessidade de nesse período estar presente um operador, entre outros aspetos. Desta forma a capacidade de produção do setor pode ser aumentada para níveis que o permitam ser mais rentável, produtivo e eficiente.

8.2 Propostas de aumento de volume de produção do SM

O estudo da produção do SM da YSE permite verificar a necessidade de modificação das filosofias de trabalho bem como o aumento dos níveis de produção, uma vez que estes se encontram em níveis pouco satisfatórios. Esta observação é, presentemente, justificada pela acumulação de tarefas no mesmo operador, pela falta de um padrão/rotina de produção, pela falta de uma etapa de controlo dimensional dos elétrodos e pela existência de tempos de *setup* bastante elevados, sendo estes fatores danosos para a competitividade e eficiência de trabalho.

Através do estudo do mercado existente, é possível concluir que a maior parte dos problemas apresentados tem uma solução bem definida nas empresas estudadas.

Como tal, nesta secção serão sugeridas algumas soluções para os principais problemas observados no setor em questão. Será também apresentada uma análise estimativa do impacto das mesmas na realidade produtiva do setor, tendo em conta a opinião dos trabalhadores da área e por comparação com os dados atuais.

8.2.1 Propostas para o setor

Como forma de organização e separação das tarefas, propõem-se a alteração do espaço pertencente ao SM resultando num aumento do espaço físico a este associado, com a criação de três espaços distintos, um gabinete de projeto, uma sala de maquinação e por fim um gabinete de controlo dimensional, mas também o uso de uma aplicação computacional de apoio à produção e encadeamento de múltiplas peças nos diferentes postos de trabalho. Afirma-se ainda que da análise realizada a aplicação que satisfaz os requisitos com mais qualidade, simplicidade mas também apoio pós-venda parece ser o *SolidSet*®.

No gabinete de projeto propõe-se então a existência das seguintes valências:

- Um posto de trabalho específico para modelação CAD (postiços, elétrodos, componentes e estruturas de moldes e outras peças de serralharia), com o *software* presente no posto de trabalho existente (*Solidworks*®), mas com a aplicação de extração de elétrodos *IMold Eletrode* (vantagens: maior rapidez e simplificação da extração de elétrodos, exportação de ficheiro com cotas de erosão, e outras informações relevantes);
- Um posto de trabalho específico para elaboração de programas de maquinação CAM (das peças provenientes do posto CAD) com recurso aos softwares já existentes *PowerMill*® (para o centro de maquinação CNC) e o *FeatureCam*® (para a eletroerosão por fio), estando em rede com as respetivas máquinas, para envio dos programas;
- Um posto de trabalho com computador específico, para organização de entradas/pedidos de trabalho, gestão e encomendas de material, expedição de produtos acabados;

No espaço dedicado à maquinação propriamente dita, sugere-se a permanência de todas as máquinas existentes, e a possível aquisição de outro centro de maquinação CNC (mas com 5 eixos), permitindo assim a diversificação do trabalho realizado. Ficando esta divisão do setor composta por:

- Um posto de trabalho com um centro de maquinação CNC 3 eixos para maquinação de elétrodos e outras peças (estruturas de moldes, componentes e outras peças), a partir dos programas CAM, elaborados no gabinete de projeto e com um computador com o módulo (MILL) correspondente do *SolidSet*®, em comunicação com a máquina. Neste posto o operador apenas teria de preparar o material a maquinar, a sua fixação na fresadora, e no *SolidSet*® escolher qual o programa a executar (no caso em particular da fresadora CNC existente, que contém o sistema de "paletes", o *SolidSet*® pode incorporar também esse sistema, permitindo ao operador escolher a base em que vai por a peça, ajustando os "zero-peça", e verificando se existe colisão com outras peças, caso seja esse o caso). Acrescenta-se ainda, não como imprescindível,

mas de um ponto de vista de autonomia de processo e capacidade de produção continua de elétrodos, a sugestão de aquisição do sistema automático de troca de elétrodos *El-Station* (comercializado pela ISICOM), visto este permitir uma produção em contínuo e eliminando os tempos de paragem obrigatórios da máquina;

- No caso de aquisição de um centro de maquinação de 5 eixos, adicionar-se-ia um posto de trabalho com a mesma filosofia, existente no posto de maquinação de 3 eixos, existindo algumas diferenças resultantes da complexidade das peças e da variedade de trabalho;
- Um posto de trabalho de WEDM, contendo além da máquina um computador para visualização das peças a maquinar e respetivas posições. Neste posto deveriam ser maquinados os elétrodos mais simples, os postiços, bem como outras peças que o gabinete de projeto (posto de CAM) estimasse ser mais rápido nesta máquina que no centro de maquinação. Sugere-se que nesta máquina também se deveria dividir a capacidade da mesa de trabalho, por diversas cabeças, fazendo que com o mesmo programa fosse possível maquinar diferentes peças em diferentes sítios (à semelhança do que já acontece na fresa CNC). Neste posto o operador deverá preparar o material a maquinar, colocar corretamente na máquina segundo a ficha de maquinação e ajustar os parâmetros da máquina consoante o trabalho a executar. Tendo em vista a mão-de-obra existente neste setor da YSE, este mesmo operador enquanto decorre o processo de WEDM, poderá executar também o trabalho de retificação que seja necessário de momento. Este posto poderá ser também integrado no *SolidSet*, permitindo ao operador indicar se o trabalho está em lista de espera, a ser efetuado ou se está terminado;
- Dois postos de retificação, cada um com um computador associado, para visualização de peças, desenhos e respetivas cotas de maquinação, com a função de fazerem o trabalho auxiliar aos dois postos anteriores, mas também outros trabalhos necessários a outras peças de serralharia diversa, necessário a outros setores da YSE. Neste posto, o operador recebe o material dos postos anteriores, WEDM ou centro de maquinação CNC, e efetua o trabalho de acabamento da(s) peça(s) ou preparação do próximo posto, eletroerosão por penetração. Neste posto, poderá também existir um módulo do *SolidSet*, que permite indicar em que fase se encontra o trabalho, à espera, a maquinar ou finalizado, à semelhança do que poderá acontecer na WEDM;
- Dois postos de erosão por penetração, cada um com um computador com o módulo de EDM do *SolidSet*, cada máquina deverá ter na sua mesa de trabalho pelo menos duas posições pré-estabelecidas, com bases para as quadras (à semelhança do que acontece na fresadora CNC e do que é proposto para a máquina WEDM). Neste posto, o operador apenas terá de inserir os elétrodos nas posições corretas do armazém, a(s) peça(s) a erodir nos sítios indicados da mesa, caso seja uma peça colocada fora das posições pré-definidas, o operador terá de fazer o centramento da peça, para encontrar o "zero-peça", e enviar do *SolidSet* (que tem a capacidade de gerar o programa de erosão automaticamente a partir das cotas de erosão exportadas pelo *IMold Eletrode*, e pelos desvios registados no módulo de CMM, aquando da medição,

necessitando apenas que o operador escolha o tipo de erosão a efetuar) o programa para a máquina;

Na sala reservada ao controlo dimensional, aconselha-se a permanência dos equipamentos existentes (projetor de perfis e coluna de medição) e afirma-se interessante a aquisição de uma máquina de medição por coordenadas (CMM), permitindo a averiguação dimensional dos elétrodos (que atualmente não é realizada), bem como de todas as outras peças, maquinadas no setor. Sendo assim, a sala de medição ficaria composta por:

- Um projetor de perfis, útil a medições a meio do processo, ou de outras peças de serralharia mecânica;
- Uma coluna de medição vertical, que à semelhança do projetor de perfis pode ser usado por qualquer operador dependendo da necessidade do processo ou da peça a fabricar;
- Um posto de trabalho constituído por máquina de medição por coordenadas e um computador com o módulo CMM do *SolidSet*, onde se farão as medições dos elétrodos antes da erosão, em que a aplicação do *SolidSet* memoriza as cotas do elétrodo, e os seus desvios e rotações (para posterior ajuste do programa de erosão no módulo EDM), serão feitas também as medições de todas as peças que sejam necessárias e possíveis;
- Considera-se não imprescindível, mas oportuno, a aquisição de uma máquina de gravação a laser, que evite a contratação desses serviços, que muitas vezes provocam atrasos na entrega das peças, para gravação dos postiços e outras peças maquinadas no setor;

Apresenta-se na Figura 69, uma proposta de estrutura de *layout* para o SM e na Figura 70 o novo fluxo de trabalho do setor, englobando já as mudanças propostas.

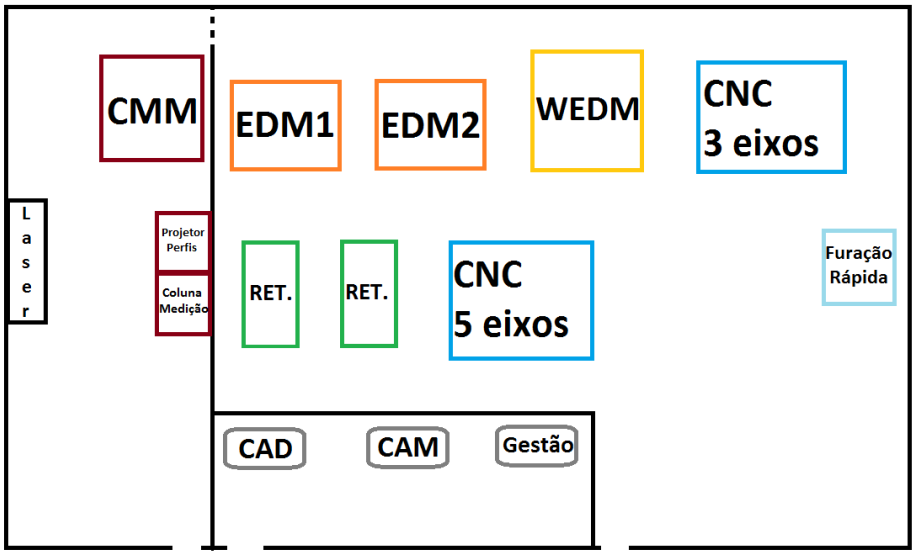


Figura 69 Proposta de *Layout*

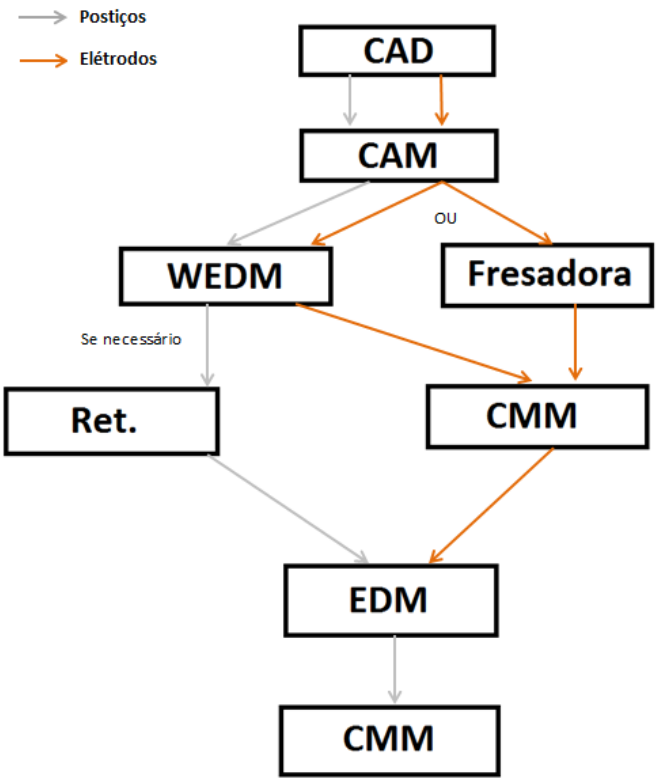


Figura 70 Novo Fluxo de Trabalho

A partir da análise das propostas apresentadas, é visto também como útil que haja a seguinte mão-de-obra, com as respetivas especializações e conhecimentos que cada área requer:

- 1 especialista para o trabalho CAD;
- 1 programador CAM (*PowerMill*® e *FeatureCam*®);
- 2 operadores para as máquinas EDM;
- 1 operador dos centros de maquinação (3 e 5 eixos);
- 1 trabalhador para a CMM e gestão do setor;
- 1 operador para a WEDM e retificação;

Sendo assim, prevê-se que seja necessário um total de 7 trabalhadores, para o correto funcionamento deste setor, embora este número deva ser ajustado consoante o nível de trabalho verificado.

8.2.2 Impacto na produção

Com base nas propostas efetuadas anteriormente, apresenta-se uma estimativa do impacto das mesmas na produção do setor. As estimativas foram realizadas com fundamento naquilo que foi recolhido nas visitas às empresas de fabrico de moldes, nas visitas às empresas de comercialização de *software* para este mercado (como: *Isicom*, *Rerom*, *Emílio Campos Azevedo*) e na opinião dos trabalhadores da YSE com experiência em cada área.

Assim sendo apresenta-se, na Tabela 15 um resumo das melhorias esperadas, originadas pelas propostas realizadas:

Tabela 15 Descrição das melhorias obtidas através da alteração do SM.

Posto	**Melhoria no tempo de execução**	**Justificação**
CAD	25%	Aquisição de *software* de extração de elétrodos. Com esta aplicação o operador de CAD, ganha as funções de definir as cotas de erosão.
CAM	Mantém	Não há melhoria no tempo de execução, no entanto com a divisão das tarefas CAD/CAM por dois operadores, a capacidade de produção neste ponto irá aumentar.

Centro maquinação CNC	15%	Com a aquisição da *EL-Station*, os tempos de *setup* são eliminados, pois este sistema tem a capacidade de produzir em contínuo, acrescenta-se ainda a elevada autonomia gerada, e ainda a facilidade e rapidez de uso proporcionados pelo *SolidSet*.
WEDM	10%	Devido ao trabalho de programação ser feito no posto de CAM e além disso a autonomia aumenta com a possibilidade de maquinação de várias peças com a divisão da mesa por postos de trabalho.
Retificação	Mantém	O processo e máquinas utilizadas são convencionais, e constatou-se que a maneira de trabalho neste posto não tem razão para ser alterado, mas visto que, parte do trabalho efetuado neste posto será posteriormente feito na WEDM, cada processo não terá obrigatoriamente de passar por este posto, e caso aconteça, o trabalho a efetuar dependerá da geometria da peça. A produção a nível geral passará a não depender deste trabalho.
EDM	40%	Aquisição do *SolidSet* diminui drasticamente os tempos de preparação, o ajuste dimensional nos programas consoante os desvios dimensionais dos elétrodos que diminuem os erros, obtendo um trabalho com qualidade final mais rapidamente e devido ao padrão/rotina do trabalho ser igual independentemente da geometria das peças.
Medição (CMM)	50%	Com a aquisição de uma CMM, todas as medições que são realizadas manualmente e através de leitura de desenhos técnicos, passarão a ser feitos automaticamente pela CMM, sendo um processo mais célere e fiável.

Sendo assim consoante as propostas apresentadas, surge a necessidade de perspetivar novas capacidades de produção. Essas projeções são apresentadas sumariamente na Tabela 16.

Tabela 16 Capacidade de produção diária depois das propostas.

POSTO	Nº MAQ.	Tempo de execução por processo	h/dia	Capacidade diária
WEDM	1	1:53	16:00	8,5
Retificação	2	5:28	8:00	(2,9)
CAD	1	1:50	8:00	4,3
CAM	1	1:20	8:00	6,0
Fresa CNC	1	4:02	24:00	5,9
EDM	2	5:05	16:00	6,3
Medição	1	0:08	4:00	30,0

Visto que o trabalho de retificação não se verifica necessário a todas as peças, por isto, embora seja o que representa uma capacidade diária mais baixa, não limita a capacidade produção, não sendo mais à frente considerado como gargalo da produção.

8.3 Análise de resultados

Com base nos resultados provenientes da folha de produção mensal do SM, conclui-se que a produção mensal deste não corresponde à produção diária do gargalo de produção, mas sim, à média de produção dos setores, excluindo a medição. Deste modo obtém-se uma produção mensal média de 53 processos, o que considerando 20 dias úteis por mês, resulta uma produção diária de 2,7 processos.

Seguindo a mesma lógica, após a implementação das propostas, excluindo da média de capacidade de produção, o posto de medição e a retificação (por esta passar a ser um processo auxiliar e não imprescindível), obter-se-á uma média de capacidade diária de aproximadamente 6,2 processos.

Com estes valores, o aumento médio de produção será de aproximadamente 230%, valor que se considera bastante fiável, considerando a produção das empresas visitadas, bem com as opiniões recolhidas de especialistas desta área.

Atualmente as necessidades do cliente do SM da YSE, a Manutenção Moldes, são de cerca de 100 processos por mês, que são repartidos entre o Setor em estudo e outra empresa da área, numa razão de 50% aproximadamente para cada uma.

Sendo o objetivo da direção da Divisão de Moldes da YSE, a redução da dependência deste fornecedor, no entanto não acabando com a ligação existente, o objetivo será uma divisão de encomendas na ordem dos 75% para o Setor interno e 25% para a empresa externa. Posto isto, com a capacidade proporcionada será possível o cumprimento desta ambição, bem como ainda existirá disponibilidade para executar outros trabalhos, como outros serviços de maquinação e até a produção de 2 ou 3 moldes por ano.

A partir da análise dos valores obtidos, o Setor terá uma capacidade de fabricação de 100 processos por mês (corresponde a 20 dias úteis), no entanto terá um máximo de encomendas de aproximadamente 75 processos. Tendo em conta a capacidade de produção, o trabalho requerido será realizado em cerca de 15 dias úteis, por isso matematicamente ter-se-á 5 dias desocupados por mês, para maquinação de outros componentes. Contudo, para se ter uma noção clara deste cenário declara-se que, 5 dias por mês, representam 60 dias (3 meses de trabalho) num ano, tempo suficiente, realizar a produção de 2 a 3 moldes do género daquele que foi estudado neste documento.

Pormenorizadamente, segundo a maneira de maquinação sem a implementação das propostas, cada conjunto de 4 postiços iguais demora em média 21h a ser realizado (ver Figura 71). Visto que o molde tem 24 postiços diferentes em cada cavidade, resultam 24 conjuntos de 4 postiços, que demorariam em média 504 horas (21 dias) a serem fabricados. Uma vez que o tempo livre, obtido pela otimização são 60 dias, e as placas restantes dos moldes apresentam uma geometria simples assim como os blocos moldantes, o que resulta num tempo de produção mais curto destes componentes, comprova-se assim que com esta otimização é possível o fabrico de 2 a 3 moldes por ano.

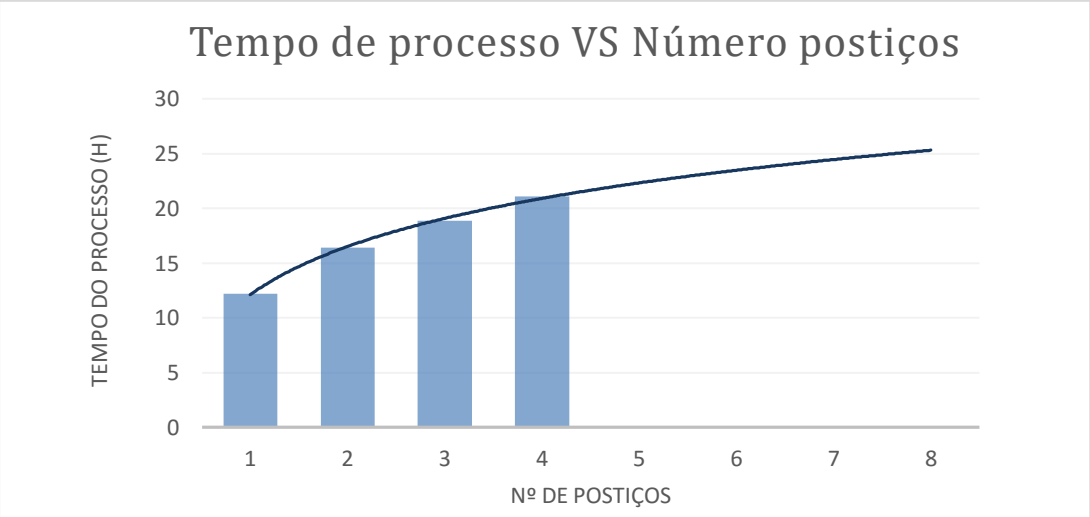


Figura 71 Tempo do processo em função do número de postiços

Contudo, todas as propostas sugeridas no presente documento, têm um custo associado, o que constitui um investimento para a YSE. Em contexto empresarial as análises de investimento têm uma importância bastante maior, relativamente ao contexto académico, sendo um ponto decisivo para a implementação ou não, das medidas propostas.

Posto isto, foi realizado um estudo do investimento necessário, apresentado na Tabela 17, com base nas propostas realizadas para o SM, tendo em conta não só o custo mensal do setor, como também o volume mensal de faturação do mesmo e o aumento de produção e faturação resultantes do investimento proposto. Afirma-se também que o valor de faturação mensal prevista é calculado a partir da evolução de produção esperada, assumindo que o preço médio de cada processo se mantém constante, apos a implementação das propostas.

É de notar que uma vez que por motivos de confidencialidade não se obtiveram valores mais específicos do custeio do setor, escolheu-se para a realização do cálculo do retorno usar uma fração da faturação total do mesmo.

Tabela 17 Análise do investimento proposto.

Investimentos	Valores (€)	**Faturação mensal atual**	Confidencial
SolidSet	18000	**Aumento previsto da faturação**	230%
IMold Eletrode	5000	**Faturação mensal prevista**	Confidencial
El-Station	12000	**Custo atual mensal do setor**	Confidencial
CMM	150000	**Fração da faturação para amortização do investimento**	Confidencial
Fresadora *CNC* 5 eixos	150000	**Valor de amortização mensal**	8600 €
Investimento TOTAL	335000	**Retorno**	39 meses (3 anos e 3 meses)

Uma vez que, as propostas sugeridas possuem um "tempo de vida" relativamente comprido, afirma-se que um retorno de aproximadamente 3 anos é bastante satisfatório.

Conclui-se, portanto, que a implementação das medidas de melhoramento propostas para o SM tem como consequência melhorias bastante significativas não só a nível do aumento de produção, como também possibilita a produção de outro tipo de componentes e abre ainda a oportunidade para a produção de moldes. Ali-se também a estes resultados um retorno de 3 anos, valor que torna estas propostas credíveis, como também de elevado interesse no âmbito de desenvolvimento e crescimento sustentável deste setor.

No entanto é de referir que o projeto, desenvolvimento e maquinação de moldes necessitam de mais requisitos dos que aqui se propõem, informação que será discutida mais à frente nesta dissertação.

Capítulo 9

Evolução necessária para produção de moldes na YSE

Considerando a informação presente no capítulo que descreve os requisitos fundamentais de um setor/empresa para a produção de moldes, os dados presentes na descrição dos recursos existentes atualmente no SM da YSE, assim como assumindo que as propostas de alteração para o SM já se encontram implementadas, é possível concluir que para a existência da capacidade de estudo, desenvolvimento e produção de moldes na YSE, é necessário a aquisição de certas valências, que estão ainda em falta.

No que concerne o gabinete de projeto de moldes (inexistente na YSE), relativo ao desenvolvimento, estudo e conceção de moldes, considera-se necessária a criação desta valência, onde a nível de competências da mão-de-obra, será necessário a inclusão de mão de obra detentora de conhecimentos específicos.

Propõe-se então a contratação para este gabinete, pelo menos, de uma pessoa com capacidade para fazer o levantamento e avaliação das especificações do produto e da máquina de injeção, orçamentação do projeto do molde, para fazer o acompanhamento do projeto. Uma pessoa com conhecimentos aprofundados sobre polímeros, as suas características, bem como os seus processos de transformação nomeadamente a injeção e com capacidade para aproveitar a vantagem de um *software* CAE de simulação do processo, onde se consiga simular o processo de obtenção de peças plásticas tendo em vista tanto o apoio ao projeto do molde como o *tuning* das variáveis e parâmetros de processamento. Uma pessoa com capacidade para realizar o projeto e dimensionamento do molde, definição da linha de apartação, número de cavidades, sistemas de alimentação, refrigeração, extração e também com capacidade de modelação no *software* CAD usado na YSE, de todos os componentes estruturas e afins necessários à produção de um molde (poderá corresponder à mesma pessoa que exerce este trabalho no Setor da maquinação, caso a carga de trabalho o permita).

Deste modo o gabinete de projeto teria um total de 3 pessoas e estaria dotado de potencial para ser utilizado não só no processo de desenvolvimento e projeto de moldes, como também seria bastante útil no processo de otimização e resolução de problemas dos moldes e processos de injeção existentes na empresa, sendo por isso uma aposta que mostrará benefícios nesta Divisão, principalmente a médio e longo prazo.

A nível de programas auxiliares como já foi referido, um gabinete de projeto corretamente configurado, necessitará de um satisfatório *software* de CAE e CAD. Como software CAE, da simulação do processo de injeção, sugere-se o *Autodesk Moldflow Insight*® ou o *Moldex3D*® devido às suas potencialidades mundialmente reconhecidas. No que se refere ao software de modelação, sugere-se a aquisição de licença(s) adicional(ais) ao software que a Divisão de Moldes já utiliza (*Solidworks*®), ainda tenho a possibilidade de instalar como *add-in* o *IMold*® que permite o rápido desenvolvimento e modelação destes moldes, devido à sua extensa base de dados de componentes e sistemas de moldes.

Por fim, a nível de maquinaria, seria aconselhável apenas a aquisição de uma mandriladora, para a conceção das "linhas-de-água" nas placas do molde, pois todas as restantes necessidades encontram-se colmatadas com as aquisições propostas no Capítulo 8.

Assim ter-se-ia uma estrutura que não só permitiria o estudo, melhoria, modificação e otimização dos moldes existentes, bem como a capacidade de projeto, desenvolvimento e fabrico de moldes novos.

Capítulo 10

Conclusão

A revisão bibliográfica demonstrou que para além da crescente procura por soluções de refrigeração mais eficientes, existem atualmente no mercado soluções inovadoras que prometem não só uma melhoria no tempo de arrefecimento, mas também um aumento relativo da qualidade final das peças moldadas, como é o caso dos sistemas de refrigeração com canais conformais e com ligas de CuBe.

No Capítulo 2 foram ainda revisitadas também algumas metodologias a considerar no projeto e desenvolvimento de ferramentas moldantes, como as diversas opções a nível construtivo no universo dos moldes, nomeadamente nos diferentes tipos de sistemas de controlo de temperatura, bem como a importância e vantagens do uso de programas de simulação do processo de injeção.

Posto isto, foram estudadas as possibilidades de melhoria a nível do sistema de arrefecimento do molde 7183-3440 da YSE e facilmente se pôde concluir que a aposta mais viável e com promessas de maior facilidade de aplicação na prática e possibilidade de generalizar ao universo de moldes da empresa, seria a do uso de canais conformais. Mais se refere que, a proposta de utilização de ligas de CuBe, no molde em estudo assim como na globalidade dos moldes da YSE mostrou ser uma aposta inviável, devido ao uso de polímeros carregados com fibra de vidro que provocam um elevado desgaste químico nas respetivas ligas de alta condutividade.

No entanto, no seguimento da aplicação das metodologias de projeto, verificou-se qual seria a possibilidade de otimização do sistema de refrigeração já existente no molde, pelo que através de um estudo analítica e da análise do sistema de controlo de temperatura, decidiu eliminar-se algumas linhas de água que se consideraram redundantes. Esta decisão revelou-se pouco interessante, no sentido em que os resultados obtidos, através de uma simulação numérica, mostraram melhorias insignificantes ao nível do tempo de ciclo e da qualidade final da peça, no entanto serviu para concluir que o molde se encontra sobredimensionado no que se refere à quantidade de circuitos de refrigeração, facto que afeta a eficiência deste sistema.

Uma vez provada a dificuldade de melhoria significativa do sistema de refrigeração por recurso a condutas de refrigeração, ditas convencionais, elaborou-se uma simulação numérica que incluía então os promissores canais conformais. Os resultados obtidos comprovaram a reputação desta técnica de refrigeração, enunciada na revisão bibliográfica, com a diminuição do tempo de ciclo em 1-1,5 segundos e aumento da qualidade final da peça em 29%. Apenas com esta redução a nível de tempo de ciclo, averiguou-se que mantendo a produção anual atual,

a máquina de injeção em que o molde trabalha ficaria desocupada 26 dias, conclui-se, portanto, que se se aplicar este conceito aos moldes similares a este, existirá a possibilidade de se aumentar a produção da empresa de modo significativo. Refere-se também que é possível que a única modificação necessária seja o *pocket* onde estarão presentes os canais conformais, o que poderá aumentar ainda mais o interesse desta proposta.

No entanto explorando também o interesse da YSE em adquirir a capacidade de produção de moldes deste género, fez-se uma proposta de alteração ao SM, pois conclui-se que os métodos praticados tinham a possibilidade de ser otimizados. Posto isto chegou-se à conclusão que com a afinação dos métodos usados assim como alguns investimentos será possível aumentar a produção do Setor em 230%, deixando ainda tempo livre para a produção de 2 a 3 moldes por ano. Sendo assim, consegue-se aumentar não só a produção em massa de postiços, como diversificar os produtos maquinados, aumentando a competitividade e utilidade do Setor.

No que concerne as necessidades para produção de moldes da YSE, conclui-se que a nível de maquinação, considerando que é implementada a proposta de alteração para o SM seria apenas necessário a aquisição de uma mandriladora e a nível de mão de obra considera-se que existam na YSE recursos suficientes para a realização das funções requeridas. No entanto, relativamente ao gabinete de projeto de moldes na YSE conclui-se que é necessária a criação desta valência, devido a não existir atualmente na empresa nada semelhante.

Para finalizar, considera-se que os objetivos foram cumpridos. A otimização do molde foi conseguida, bem como a análise do seu impacto no fluxo de produção da YSE. São também igualmente delineadas as metodologias a adotar por um gabinete de projeto de moldes, assim como os requisitos para a produção de moldes similares ao estudado.

10.1 Trabalhos futuros

Nesta secção são apresentados algumas direções ou caminhos que poderão ser prosseguidos na melhoria e otimização dos sistemas de arrefecimento e no aumento de produção de peças por injeção da YSE. De uma forma sumária sugere-se para desenvolvimentos futuros as seguintes ideias:

- Implementação do sistema de arrefecimento pulsado;
- Análise do impacto da aplicação do conceito apresentado ao universo de moldes da YSE;
- Estudo da possibilidade de colocação de circuitos de refrigeração no interior das peças.

Referências

APIP - [Em linha], atual. 2016. [Consult. 22 mai. 2016]. Disponível em WWW:<URL:http://www.apip.pt/APIP/Associacao.aspx>.

AU, K. M.; YU, K. M.; CHIU, W. K. - Visibility-based conformal cooling channel generation for rapid tooling. **CAD Computer Aided Design**. . ISSN 00104485. 43:4 (2011) 356–373. doi: 10.1016/j.cad.2011.01.001.

BARRALIS, J.; MAEDER, G. - **Prontuário de metalurgia - elaboração, estruturas propriedades e normalização**. Lisboa : Fundação Calouste Gulbenkian, 2005

BEIRA, E. *et al.* - **DOS MOLDES À ENGENHARIA DO PRODUTO, A TRAJECTÓRIA DE UM CLUSTER**

BIOMERICS - **BIOMERICS** [Em linha], atual. 2015. Disponível em WWW:<URL:http://biomerics.com/engineering/scientific-injection-molding/process-development/>.

BOM, Tiago José Duarte - Comparação do desempenho de tecnologias alternativas de fabrico de moldes de injecção de plásticos. 2014).

BROOKS, Hadley; BRIGDEN, Kevin - Design of conformal cooling layers with self-supporting lattices for additively manufactured tooling. **Additive Manufacturing**. . ISSN 2214-8604. 11:2016) 16–22. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2016.03.004.

CEFAMOL - [Em linha], atual. 2016. [Consult. 23 abr. 2016]. Disponível em WWW:<URL:http://www.cefamol.pt/cefamol/pt/Cefamol_IndustriaMoldes>.

CHEN, Shia Chung *et al.* - Influence of using pulsed cooling for mold temperature control on microgroove duplication accuracy and warpage of the Blu-ray Disc. **International Communications in Heat and Mass Transfer**. . ISSN 07351933. 35:2 (2008) 130–138. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2007.06.011.

CHEN, Shia-chung *et al.* - Improve Cooling Effect of Injection Molding by Pulsed-Cooling Method. **SPE ANTEC, Tech. Papers**. 55 (2009) 2496–2500.

Concept Laser - [Em linha], atual. 2016. [Consult. 10 mai. 2016]. Disponível em WWW:<URL:http://www.concept-laser.de/en/technology/lasercusingr.html>.

CRUZ, Sérgio - **Moldes De Injeção**. 2º. ed.

EIAMSA-ARD, Kunnayut; WANNISSORN, Kittinat - Conformal bubbler cooling for molds by metal deposition process. **CAD Computer Aided Design**. . ISSN 00104485. 69:2015) 126–133. doi: 10.1016/j.cad.2015.04.004.

FERREIRA, C. V. - Metodologia de Projeto para Produtos de Peças Plásticas. **Ferramental**. 2006).

FERREIRA, Irene Sofia Carvalho - Caracterização da indústria de moldes na região da Marinha Grande, na óptica da Qualidade. 2001).

Graphite Techonologies - [Em linha], atual. 2016. [Consult. 10 abr. 2016]. Disponível em WWW:<URL:<www.graphite-technologies.com/download.php?a=catalogs&cid=21>>.

HARADA, J. - **Moldes para Injeção de Termoplásticos: Projetos e Princípios**. São Paulo :

Artiber, 2004

HARADA, Julio - A importância do projeto de moldes para injeção de termoplásticos. **Ferramental**. 2006).

KENNEDY, P. - **Flow analysis of injection molds**. Munich : [s.n.]

MANRICH, S. - **Processamento de Termoplásticos**. São Paulo : Artiber, 2005

Manual Do Projetista de Moldes - Em . Marinha Grande : CENTIMFE, 2007. p. 1–14.

MAYER, Siegfried - Optimised mould temperature control procedure using DMLS. **EOS Whitepaper, EOS GmbH Ltd**. 2009) 1–11.

MENGES, G.; MOHREN, P. - **How to Make Injection Molds**. 2º. ed. Munich: Hanser : [s.n.]

MIGUEL, Nuno; GOMES, Duarte; PORTUGUESA, A. Indústria - A indústria portuguesa de moldes para plásticos. 2015).

MOLDFLOW, Simulation - Transient Cool : Conformal cooling. 2014).

PARK, H. S.; PHAM, N. H. - Design of Conformal Cooling Channels for an Automotive Part. **International Journal of Automotive Technology**. 10:2009) 87–93. doi: DOI 10.1007/s12239–009–0011–7.

PARK, Hong-Seok; DANG, Xuan-Phuong - Design and Simulation-Based Optimization of Cooling Channels for Plastic Injection Mold. Em **New Technologies – Trends, Innovations and Research**. [S.l.] : Constantin Volosencu, 2012

RICARDO, Nuno; MOREIRA, Pinho - Optimização das Condições de Processamento Utilizando Simulação Numérica Estágio realizado na Empresa Simoldes Plásticos. 2009).

ROSATO, Dominick V.; ROSATO, Donald V. - **Injection Molding Handbook**. 3. ed.

SHEN, Y. K. - **Analysis for optimal gate design of thin-walled injection molding**. [S.l.] : International Communications in Heat and Mass Transfer, 2008

SHOEMAKER, J. - **Moldflow Design Guide A Resource for Plastics Engineers**. 1. ed. Hanser : Gardner Publications, 2006

SILVA, Álvaro Ferreira - Moldes : um caso exemplar do desenvolvimernto industrial português. **Indústria de Moldes no Norte de Portugal: PROTAGONISTAS**. 2007) 43–45.

SILVA, SÉRGIO L. - **SISTEMÁTICA PARA O PROJETO DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO DE MOLDES PARA INJEÇÃO DE POLÍMEROS**. [S.l.] : UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, 2009

SMITH, A. G. *et al.* - Optimisation of Continuous and Pulsed Cooling in Injection Moulding Processes. **Plastics, Rubber and Composites: Macromolecular Engineering**. . ISSN 14658011. 36:2007). doi: 10.1179/174328907X177572.

STEINKO, W. - **Avaliação do projeto térmico do molde garante qualidade e redução de custos.** [S.l.] : Plástico Industrial, 2004

TANG, S. H. *et al.* - Design and thermal analysis of plastic injection mould. **Journal of Materials Processing Technology**. . ISSN 09240136. 171:2 (2006) 259–267. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2005.06.075.

Yazaki Europe - , atual. 2016.