



Projeto

Mestrado em Engenharia da Conceção e Desenvolvimento do Produto

***Análise do efeito da temperatura do sistema de  
injeção nas peças plásticas obtidas***

**Márcio José Esteves Raposo**

Leiria, março de 2018





Projeto

Mestrado em Engenharia da Conceção e Desenvolvimento do Produto

***Análise do efeito da temperatura do sistema de  
injeção nas peças plásticas obtidas***

**Márcio José Esteves Raposo**

Projeto de Mestrado realizada sob a orientação do Doutor Mário António Simões Correia, Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria e coorientação do Doutor Henrique Amorim Almeida, Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

Leiria, março de 2018



# Dedicatória

---

À Minha Família,  
Aos Meus Amigos,



# Agradecimentos

---

Agradeço aos meus orientadores Professor Doutor Mário Correia e Professor Doutor Henrique Almeida, pelo desafio da ideia e motivação deste trabalho. As suas orientações, diretrizes e conselhos foram também fundamentais durante toda esta “caminhada”.

À minha família, em particular à minha mulher Juliana, que durante tantos dias e noites suportou a minha ausência, sempre com palavras de incentivo e motivação, muitas vezes nas alturas mais difíceis, Muito Obrigado!

À Yudo EU, por toda a ajuda e colaboração na realização deste trabalho, particularmente ao meu superior direto, Eng.º Carlos Galo, que desde o primeiro dia me apoiou, quer do ponto de vista técnico quer de motivação, com os conhecimentos, e pro - atividade que lhe são características; aos meus colegas do departamento Comercial Hugo, Nuno, Fábio, Néilson, Pedro e Solange, pelo espírito de equipa e companheirismo; ao Paulo Fortes, pela ajuda na fase inicial do trabalho e na seleção do sistema; ao departamento de I&D, Francisco Milhinhos e Tiago Silva, pela partilha de conhecimentos e ideias; ao departamento de Projeto, pela ajuda e conhecimentos que me transmitiram; e de uma forma geral a toda a restante estrutura da empresa, que de uma forma ou de outra contribuíram para a realização deste trabalho, Muito Obrigado!

Aos meus colegas do mestrado em *Product Design Engineering*, em particular ao *Bilal Chabane Chaouch*, que sempre me apoiou e motivou no sentido de este trabalho chegar a “bom porto”, Obrigado!



**“Obstáculos são aquilo que vemos quando desviamos os  
nossos olhos do objetivo”**

Henry Ford  
(1863 – 1947)



# Resumo

---

Neste trabalho avalia-se de forma numérica a distribuição da temperatura de um sistema de injeção num molde de injeção plástica, como ferramenta para a produção de peças plásticas, sendo que o enfoque é dado nas zonas da peça plástica, cavidade e bucha. A motivação deste trabalho vem da necessidade de apresentar um estudo nesta área da injeção de plásticos, sendo que não há muita informação proveniente de trabalhos científicos e experimentais, nomeadamente no domínio do sistema de injeção por canais quente, do ponto de vista da análise puramente térmica e não reológica.

As análises térmicas são cada vez mais uma ferramenta de trabalho na indústria em geral e neste sector em particular, auxiliam de forma efetiva as fases de dimensionamento, análise e projeto, na conceção e desenvolvimento de novos artigos fabricados por injeção de termoplásticos. Nesse sentido, este trabalho visa analisar e estudar do ponto de vista académico essas áreas de atividade, e surge como prolongamento de algumas questões, que frequentemente são colocadas pela indústria de fabrico de moldes e de peças plásticas: Qual é a influência da temperatura do sistema de injeção no molde de injeção e na peça plástica a injetar? Em que medida o calor gerado pelo sistema de injeção influencia de forma colateral a qualidade da injeção?

Assim, neste trabalho começa por fazer-se uma apresentação geral da indústria de transformação de plástico, bem como a maioria das máquinas e ferramentas utilizadas no setor. Seguidamente, faz-se uma exposição sobre os tipos de moldes e finalmente sobre os conceitos e tipos de sistemas de injeção.

De seguida expõem-se a temática das simulações e faz-se uma análise aprofundada dos vários tipos de simulações existentes e também uma apresentação dos mecanismos de transferência de calor.

Apresenta-se de seguida as metodologias adotados no caso de estudo onde o molde de injeção, sistema de injeção e a peça plástica em estudo é descrito. O procedimento numérico é igualmente apresentado. Por fim, este trabalho termina com a apresentação e discussão dos resultados obtidos nas várias simulações térmicas realizadas no software de simulação NX/Siemens.

**Palavras Chave:** Moldes de Injeção Plástica; Sistema de Injeção; Simulação Numérica; Análise Térmica; Temperatura; Transferência de Calor.



# Abstract

---

In this work, the temperature distribution of an injection system in a plastic injection mould is numerically evaluated, with special focus to the areas of the plastic part, cavity and core. The motivation of this work comes from the need to present a study in this area of plastic injection, due to the fact that there is not much scientific and experimental information, namely in the field of the hot channel injection systems, from the point of view of thermal analysis and not rheological.

Thermal analyses are gaining interest as a tool in the industry and in general in this sector in particular, effectively assists the phases of design, analysis and design, in the design and development of new plastic products manufactured by injection of thermoplastics. In this sense, this work aims in analysing and studying from an academic point of view these areas of activity in order to answer questions related to critical issues towards both the injection mould and the plastic component being injected: What is the influence of the temperature on the injection mould and on the plastic part being injected? To what extent does the heat generated by the injection system influence the quality of the injection?

This work begins by making a general presentation of the plastic processing industry, as well as most of the machines and tools used in the industry. Next, an exposition is made on the types of moulds and on the concepts and types of injection systems.

Then the numerical simulation is presented and an in-depth analysis of the various types of simulations is performed, as well as types of heat transfer mechanisms.

Next, the methodologies adopted with the case study where the injection mould, injection system and plastic part under study is described. The numerical procedure is also presented. Finally, this work ends with the presentation and discussion of the results obtained in the various thermal simulations performed in the *NX/Siemens* simulation software.

**Keywords:** Plastic Injection Moulds; Injection System; Numerical Simulation; Thermal analysis; Temperature; Heat transfer



# Lista de figuras

---

Figura 1: Distribuição geográfica das exportações de moldes [3].	6
Figura 2: Ciclo de injeção [10].	8
Figura 3: Molde 2 placas (placa fixa e placa móvel), 1 cavidade [15].	11
Figura 4: Molde 2 Placas [9].	11
Figura 5: Molde 'Sandwich'[10].	12
Figura 6: Prato de injeção rotativo [28].	12
Figura 7: Máquina de injeção de 280 toneladas [11].	13
Figura 8: Vista esquemática de uma máquina de injeção[11].	14
Figura 9: Funcionamento da unidade de injeção[12].	15
Figura 10: Pormenor do funcionamento da unidade de injeção[13].	15
Figura 11: Configuração genérica de um canal frio [12].	17
Figura 12: Peças e gito injetadas com canal frio[14].	18
Figura 13: Sistema de injeção open com carburador e bicos [12].	21
Figura 14: Constituintes de sistema de injeção [17].	23
Figura 15: Pormenor de uma ponteira de injeção (ataque direto)[29].	23
Figura 16: Constituintes de sistema valvulado [17].	26
Figura 17: Esquematização do mecanismo de transferência de calor por condução [22].	32
.....	32
Figura 18: Correntes de convecção [24].	33
Figura 19: Convecção forçada[24].	34
Figura 20: Espectro de radiação eletromagnética[24].	35
Figura 21: Deformação/Empeno: A peça de cima da figura deformou em relação à de baixo[26].	39
Figura 22: Queimado.....	40
Figura 23: Filamento visível no gito de uma peça [26].	41
Figura 24: Exemplo de peça com material degradado[26].	42
Figura 25: Ecrã Inicial NX 11.....	45
Figura 26: Sistema de Injeção utilizado - Isometric View.....	45
Figura 27: Corte sistema de injeção simplificado.....	47
Figura 28: Peça com dimensões 335 x 50 x 3,15 [mm].	48

Figura 29: Vista lateral da peça com o sistema de injeção. ....	48
Figura 30: Molde vista exterior. ....	49
Figura 31: Molde Corte Lado operador .....	50
Figura 32: Malha Tetraédrica 10. ....	51
Figura 33: Malha tamanho 5mm.....	52
Figura 34: Malha Tamanho 10mm. ....	52
Figura 35: Menu lateral Simcenter. ....	53
Figura 36: Conjunto de Cargas aplicadas. ....	54
Figura 37: Lista de controladores utilizados.....	55
Figura 38: Pormenor termopar.....	55
Figura 39: Restrições Aplicadas. ....	56
Figura 40: Lista de aços e local de utilização. ....	58
Figura 41:Ligas não ferrosas utilizadas. ....	59
Figura 42: Propriedades mecânicas do ABS [27].....	61
Figura 43: Limitação da temperatura de peça a 150°C.....	62
Figura 44: Limitação da Temperatura de peça a 300°C.....	63
Figura 45:Temperatura de peça limitada a 100°C.....	64
Figura 46:Pormenor das temperaturas limítrofes da peça. ....	65
Figura 47: Temperatura na Peça = 150°C.....	66
Figura 48: Temperatura nas zonas limítrofes da peça. ....	66
Figura 49: Temperatura da peça limitada a 200°C.....	67
Figura 50:Pormenor das temperaturas limítrofes da peça. ....	67
Figura 51: Temperatura da peça limitada a 250 ° C.....	68
Figura 52: Pormenor das temperaturas limítrofes da peça. ....	69
Figura 53: Temperatura na peça limitada a 300°C.....	70
Figura 54: Pormenor da temperatura nas zonas limítrofes da peça. ....	70
Figura 55: Sem temperatura na peça com temperatura do sistema definida para 300°C. .....	71
Figura 56: Pormenor das temperaturas, sem limitação na peça.....	71
Figura 57: Evolução da temperatura nas zonas limítrofes da peça, no plano X (-190 a -40). ....	72
Figura 58: Evolução da temperatura nas zonas limítrofes da peça, no plano X (10 a 165).....	73

Figura 59: Evolução da temperatura nas zonas limítrofes da peça, no plano Y (-170 a -70). .....	74
Figura 60: Evolução da temperatura nas zonas limítrofes da peça, no plano Y (-50 a 80). .....	75
Figura 61: Evolução da temperatura nas zonas limítrofes da peça, no plano Z (234 a 120). .....	76
Figura 62: Evolução da temperatura nas zonas limítrofes da peça, no plano Z (100 a 20). .....	77



# Lista de tabelas

---

Tabela 1: Propriedades de condução de calor de alguns materiais [23]. .....	32
Tabela 2: Emissividade das Superfícies. ....	37
Tabela 3: Propriedades dos aços utilizados.....	59
Tabela 4: Propriedades das ligas não ferrosas.....	60
Tabela 5: Propriedades de transformação do ABS. Fonte: YUDO.....	61



# Lista de siglas / equações

---

Equação 1: Dimensionamento da força de fecho da máquina de injeção .....	14
Equação 2: Dimensionamento do volume do peso de injeção .....	18
Equação 3: Relação de temperaturas numa análise de estado estacionário. ....	30
Equação 4: Primeira Lei de Fourier. ....	33
Equação 5: Transferência de calor por convecção. ....	34
Equação 6: Lei de Stefan-Boltzmann.....	36



# Índice

---

<b>DEDICATÓRIA</b>	<b>I</b>
<b>AGRADECIMENTOS</b>	<b>III</b>
<b>RESUMO</b>	<b>VII</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>IX</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>XI</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>XV</b>
<b>LISTA DE SIGLAS / EQUAÇÕES</b>	<b>XVII</b>
<b>ÍNDICE</b>	<b>XIX</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1. Enquadramento histórico e motivação	1
1.2. Estrutura da tese	2
<b>2. ESTADO DE ARTE</b>	<b>5</b>
2.1. Enquadramento histórico e panorama atual	5
2.2. Injeção de termoplásticos	7
2.3. O molde	8
2.3.1. Constituintes do Molde	8
2.3.2. Tipos de moldes	10
2.4. A máquina de injeção	13
2.5. O sistema de injeção	16
2.5.1. Canais frios	17
2.5.2. Canais Quentes (Hot Runners)	18
2.5.2.1. Tipos de sistemas de canal quente	20

<b>3.</b>	<b>SIMULAÇÕES NUMÉRICAS DE CALOR</b>	<b>28</b>
3.1.	Simulações reológicas	29
3.2.	Simulações Térmicas	30
3.2.1.	<i>Steady State Thermal Analysis</i>	30
3.3.	Mecanismos de transferência de Calor	31
3.3.1.	Condução	31
3.3.2.	Convecção	33
3.3.3.	Radiação	35
<b>4.</b>	<b>DESCRIÇÃO DO PROBLEMA</b>	<b>38</b>
<b>5.</b>	<b>MATERIAIS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL</b>	<b>44</b>
5.1.	Escolha do <i>software</i>	44
5.2.	<i>Software NX Siemens 11</i>	44
5.3.	Construção do modelo CAD	45
5.3.1.	Sistema de injeção	45
5.3.2.	A peça	47
5.3.3.	O Molde	49
5.4.	O Modelo FEM	50
5.5.	O Modelo SIM	53
5.6.	Materiais Selecionados	57
5.6.1.	Aços	57
5.6.2.	Ligas não ferrosas	59
5.6.3.	Polímero	60
<b>6.</b>	<b>DESCRIÇÃO E INTERPRETAÇÃO DE RESULTADOS</b>	<b>62</b>
6.1.	Condições de análise	62
6.2.	Limitação da temperatura na peça	62
6.3.	Resultados	64
6.3.1.	Análise no eixo X	72
6.3.2.	Análise no eixo Y	73
6.3.3.	Análise no eixo Z	75
<b>7.</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>78</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>80</b>





# 1. Introdução

---

## 1.1. Enquadramento histórico e motivação

---

A indústria de componentes plásticos e de moldes em Portugal, remonta ao século XX, onde o seu surgimento deriva da existência da indústria vidreira localizada na Marinha Grande, instalada na região desde o século XVII, o que possibilitou o aproveitamento de alguns conhecimentos e tecnologias até então utilizadas no vidro, para a construção dos primeiros moldes para plástico, por volta dos anos 40 do século XX [1].

Após a segunda guerra mundial, houve o surgimento de novas matérias-primas bem como de um aumento significativo da procura por componentes plásticos, como forma de alimentar toda uma indústria automóvel e aeronáutica em franco desenvolvimento pós guerra, sendo que no durante a década de 50, se inicia o processo de exportação dos primeiros moldes para a Grã- Bretanha[2]. Em 2014, o sector dos moldes para injeção de plástico dá emprego a aproximadamente 10.000 pessoas, num universo de 700 empresas, sendo que o distrito de Leiria contribui com aproximadamente 50% desse total [3].

As indústrias de fabricação de plásticos e moldes de injeção, têm nas zonas da Marinha Grande e Leiria um dos seus polos mais importantes a nível nacional [4]. Esta região, tem em conjunto com a região de Oliveira de Azeméis, considerável importância a nível internacional, principalmente junto dos grandes fabricantes automóvel europeus, que têm ao longo dos últimos anos contribuído para a constante evolução e também para uma investigação e aprendizagem conjunta.

Também a nível mundial, a indústria de plásticos e moldes de injeção, tem feito o seu percurso evolutivo, sendo que a par dos fabricantes portugueses, também outros países, nomeadamente China, Coreia do Sul, Japão, Itália e Alemanha têm hoje uma posição de destaque em volume de moldes vendidos[3].

Os desafios verificados, levou a que se desenvolvesse a tecnologia de injeção por canal quente, isto é, a integração de componentes no interior do molde, nomeadamente resistências e termopares, que permitissem manter o polímero no estado fundido, a uma temperatura controlada, até à zona moldante, eliminando parcial ou totalmente a existência de gito. Esta tecnologia permite também o controlo mais rigoroso do perfil térmico, fundamental para a transformação dos novos materiais poliméricos utilizados. A evolução desta indústria, levou ao surgimento no ano de 1963, no Canadá, daquilo que se considera ser a primeira patente mundial de um sistema de injeção completo, como se conhece hoje. Contudo esta tecnologia apenas começou a ser mais utilizada a partir da década de 80, com o surgimento de novos fabricantes e o alargamento da utilização, passando de uma percentagem de utilização em novos moldes de 15 % para mais de 60% [5].

Tendo em consideração o aquecimento no molde de toda a zona envolvente do sistema de injeção, bem como a existência de alguns fenómenos térmicos associados (dilatações, contrações, queima de material) o presente trabalho visa o estudo aprofundado da influência do efeito da temperatura do sistema nas cavidades moldadas, ou seja uma análise a todas as consequências da utilização desta tecnologia, tendo em consideração que este sistema poderá estar colocado a diferentes distâncias da cavidade, e que haverá também diferentes comportamentos com diferentes materiais poliméricos processados.

O objetivo deste trabalho é compreender melhor os fluxos térmicos por forma a definir qual a configuração e posicionamento ótimo de um sistema de injeção, de modo a otimizar todo o processo, para cada material processado, e tendo em consideração a arquitetura específica de cada molde de injeção.

## **1.2. Estrutura da tese**

---

### **Capítulo 1 – Introdução**

No primeiro capítulo é feito uma contextualização histórica do tema, integrado com as principais motivações e objetivos do trabalho. Apresenta-se em traços gerais a evolução da indústria de plásticos e moldes de injeção, no contexto nacional, e justifica-se o aparecimento do sistema de injeção por canais quentes, apresentando-se de seguida o motivo de estudo deste trabalho.

Neste capítulo é também apresentada e explicada a estrutura física da tese e os diversos capítulos falados.

### **Capítulo 2 – Estado de Arte**

Faz-se uma introdução histórica com a correspondência até aos dias de hoje. É apresentado todo o processo de injeção de uma forma geral, com particular enfoque nos sistemas de injeção. Neste capítulo faz-se uma análise às tecnologias existentes ao nível do processo de injeção e construção de moldes de injeção. Analisa-se os vários tipos de sistema de injeção, nos seus diversos componentes: Bicos, *manifolds*, resistências, termopares, bem como dos materiais utilizados na construção dos diversos componentes.

### **Capítulo 3 – Simulações Numéricas de calor**

Neste capítulo são apresentadas genericamente as simulações numéricas mais utilizadas hoje na indústria, e faz-se também uma apresentação do tipo de simulação elaborada no âmbito deste trabalho. É ainda efetuada uma análise e exposição dos vários mecanismos de transferência de calor.

### **Capítulo 5 – Descrição do problema**

Neste capítulo é feita uma descrição minuciosa do ponto de partida para este trabalho. Justifica-se o trabalho com consequências atuais do problema apresentado.

### **Capítulo 6 – Materiais e Procedimento Experimental**

Neste capítulo é efetuada a descrição pormenorizada de todos os testes, experiências e simulações levadas a cabo no decorrer do trabalho.

### **Capítulo 7 – Descrição e Interpretação de resultados**

Neste capítulo é efetuada uma análise crítica aos resultados obtidos

### **Capítulo 8 – Conclusões e Trabalhos Futuros**

Neste capítulo são apresentadas sumariamente as conclusões retiradas da presente investigação. São também apresentados os possíveis trabalhos futuros.



## 2. Estado de arte

---

### 2.1. Enquadramento histórico e panorama atual

---

O início da indústria de injeção de plástico e fabricação dos primeiros moldes de injeção, remonta ao final do séc. XIX, nos Estados Unidos quando John Wesley começou por injetar peças simples com base num material celulósico que ele próprio tinha desenvolvido[6]. Esta invenção pouco expressão teve, durante algumas décadas, e apenas na década de 20 do século passado há registos de novos desenvolvimentos, nomeadamente na construção de novas máquinas de injeção, por parte de empresas alemãs [7]. Contudo, esta tecnologia passou relativamente despercebida até à enorme procura por produção em massa de produtos baratos e mais leves, originada durante a segunda guerra mundial. Após o fim da guerra, a indústria dos plásticos e moldes de injeção não mais parou de crescer, quer em Portugal quer no resto do mundo, beneficiando da utilização cada vez mais massificada enquanto matéria prima, particularmente em áreas de grande crescimento, nomeadamente a área automóvel, aviação, área médica, embalagem e muitas outras.

Com um crescimento sustentado nos últimos 40 anos, atualmente a indústria de moldes de injeção portuguesa representa um *cluster* tecnológico com uma faturação aproximada de 800 milhões de euros dos quais 75% corresponde à percentagem de exportação, e que coloca atualmente Portugal como o 8º maior exportador de moldes a nível mundial [3]. Os principais países destinos de exportação, podem ler-se na Figura 1.

## EXPORTAÇÃO DOS MOLDES PORTUGUESES

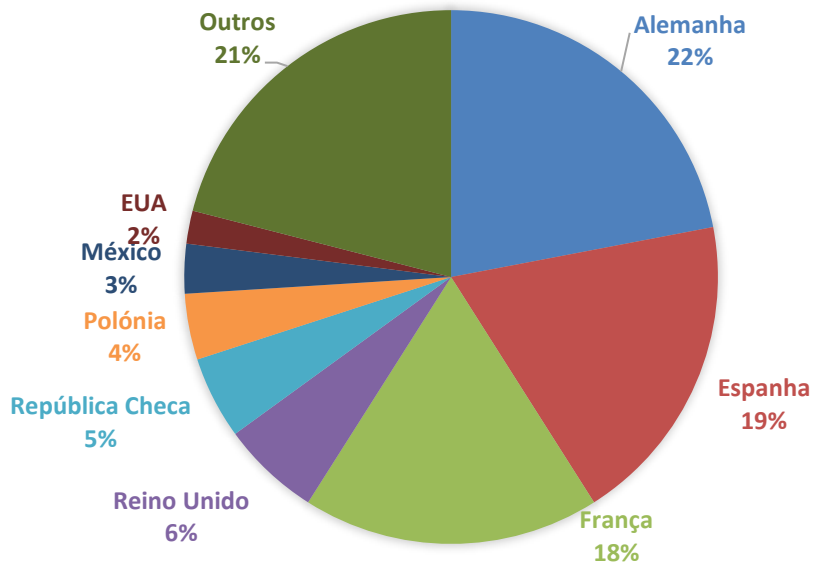


Figura 1: Distribuição geográfica das exportações de moldes [3].

Sendo uma indústria de elevado cariz tecnológico e em constante evolução de processos e métodos, também neste sector se caminha atualmente no sentido da implementação da Indústria 4.0, onde se visa permitir evoluções a nível operacional e técnico tais como [8]:

- **Capacidade de operação em tempo real:** Aquisição e tratamento de dados em tempo real.
- **Virtualização:** Propõe a existência duma cópia em tempo real das fábricas inteligentes, ou a criação dos processos em formatos digitais.
- **Descentralização:** A tomada de muitas decisões poderá ser feita através de sistemas *cyberfísicos*, através dos inputs recolhidos por esses sistemas.
- **Orientação a serviços:** Todos os serviços estarão disponíveis para consulta de todos os intervenientes na organização.
- **Modularidade:** Sistemas de produção por módulos, mais fáceis de adaptar e reorganizar.
- **Interoperabilidade:** Todos os recursos e sistema da fábrica estão ligados entre si e são capazes de comunicar uns com os outros através da internet das coisas e da internet dos serviços.

## 2.2. Injeção de termoplásticos

---

Por injeção de termoplásticos, pode definir-se tudo o que seja introduzir, por meio de pressão e temperatura, um polímero fundido dentro de uma ferramenta moldante, podendo esta técnica ser aplicada nas mais variadas formas, tais como [9]:

- Vertical;
- Horizontal;
- Lateral;
- Bi-injeção;
- Injeção de 3 componentes;
- Injeção assistida a gás.

Em todos estes processos, há variadíssimas aplicações que respondem a diferentes nichos de indústria e desafios. Neste trabalho, para efeitos de análise em pormenor da temática e controlo de variáveis, vai dar enfoque ao processo de injeção horizontal de um componente.

A obtenção de peças plásticas por injeção é um processo cíclico, Figura 2, e que visa a produção industrial ou em grande escala de produtos plásticos, desde os mais quotidianos, para uso doméstico, aos que vemos integrados nos automóveis, e outros de alta precisão, utilizados na indústria aeronáutica, médica, entre outras.

Para produzir uma determinada peça plástica por injeção, precisamos de um molde de injeção e de uma máquina de injeção, para além de todo um conjunto de periféricos e ferramentas necessárias à estabilização do processo e que garantem que este decorre sem paragens, em condições perfeitamente controladas.

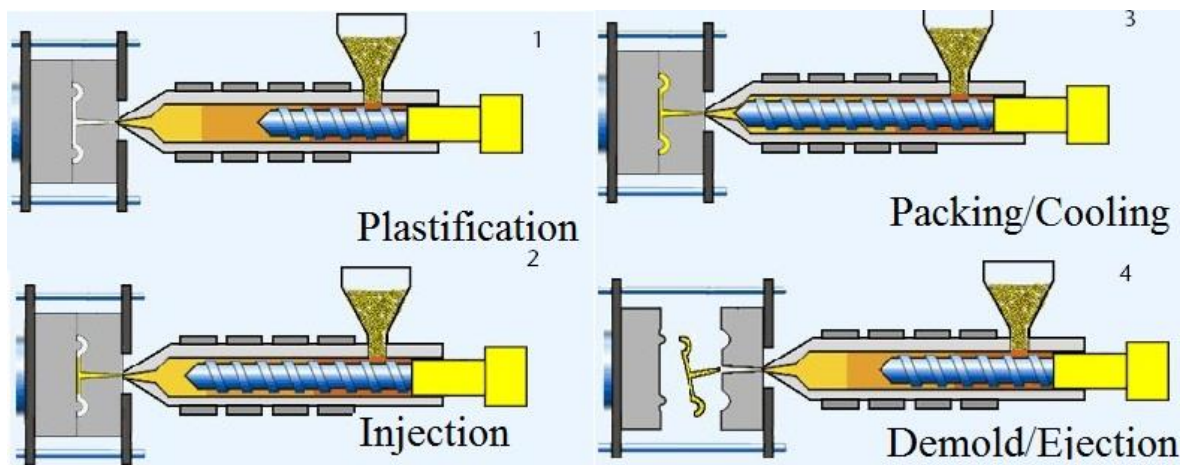


Figura 2: Ciclo de injeção [10].

## 2.3. O molde

---

Um molde, é sempre uma ferramenta protótipo, isto é, uma ferramenta desenvolvida especificamente para um determinado produto plástico. Pode dizer-se que não há um produto standard nos moldes, apesar de, na sua fase de projeto e fabricação se tender a usar cada vez mais componentes standards e normalizados para toda a indústria. O molde é uma ferramenta intermédia para atingir um fim: a peça plástica. Desta forma pode dizer, que os moldes existem por que existe plástico, e que todas as decisões tomadas durante o fabrico do molde são ditadas pelos efeitos e melhorias que se conseguirá obter na peça plástica.

O molde não existe enquanto produto final, para o consumidor. Existe como um meio para atingir um fim.

### 2.3.1. Constituintes do Molde

---

Sendo um sistema protótipo, há, no entanto, pontos comuns nas várias arquiteturas possíveis dos moldes de injeção. De uma forma genérica, um molde é constituído pelos seguintes subsistemas [4]:

- **Prato Fixo**

O prato fixo do molde é a metade no molde que fica fixa ao prato fixo da máquina. É normalmente nesta metade que se aloja a cavidade da peça. Em configurações típicas, é nesta zona do molde que se encontra o sistema de alimentação do molde.

- **Prato Móvel**

O prato móvel é a metade do molde que normalmente aloja a bucha do molde, isto é, a zona negativa da cavidade ou cavidades do molde. É também nesta metade do molde que se encontra o sistema de extração e todos os seus componentes (extratores, placa de extração, etc). Na Figura 4 podemos observar os dois constituintes acima descritos.

- **Sistema de alimentação**

O sistema de alimentação do molde é o sistema responsável por conduzir o plástico fundido, desde que é expelido pela máquina de injeção, até às zonas moldantes. Pode ter duas variantes: fria ou aquecida. Na versão fria, após cada injeção, o plástico arrefece e constitui o gito, que é extraído juntamente com a peça. Na versão quente, o plástico é mantido fundido após cada injeção, pelo que não existe nenhum ou quase nenhum desperdício de material.

- **Sistema de controlo de temperatura ou sistema de refrigeração**

O sistema de controlo de temperatura, vulgarmente conhecido por sistema de aquecimento/arrefecimento, é o conjunto de canais, normalmente circulares, que são efetuados nas chapas do molde, com o objetivo de promover o aquecimento ou arrefecimento das zonas moldantes.

- **Sistema de extração**

O sistema de extração é constituído pelo conjunto de elementos responsáveis por promover a extração da peça, depois da abertura do molde. Podem ter várias geometrias e configurações, e podem ser acionados mecanicamente, com o movimento de abertura/fecho da máquina, ou ser acionados por um outro movimento hidráulico ou eléctrico.

- **Zonas Moldantes**

Por zonas moldantes define-se todas as superfícies interiores do molde, destinadas a moldar diretamente a peça ou peças que se pretende injetar. As zonas moldantes é a parte mais sensível do molde, uma vez que, qualquer problema superficial que ocorra nestas zonas, será imediatamente repercutido nas peças.

Para além dos constituintes standard dos moldes de injeção, as diferentes aplicações a que os fabricantes de moldes tiveram de dar resposta, possibilitaram e promoveram o desenvolvimento de diferentes configurações de molde, sendo que algumas das mais usuais na indústria são as que se seguem.

### 2.3.2. Tipos de moldes

---

- a) **Molde duas placas:** Molde constituído por 2 placas, uma cavidade e uma bucha.

O molde de duas placas é a configuração mais típica dos moldes de injeção. É uma configuração bastante versátil ao nível das aplicações possíveis (área automóvel, *packaging*, *home appliance*, eletrónica, etc), e trata-se da solução técnica e financeira mais adequada à esmagadora maioria dos projetos de injeção de termoplásticos.

Neste tipo de arquitetura, existem duas placas ou pratos, onde tipicamente são posicionadas as cavidades e as buchas, respetivamente no prato fixo e prato móvel.

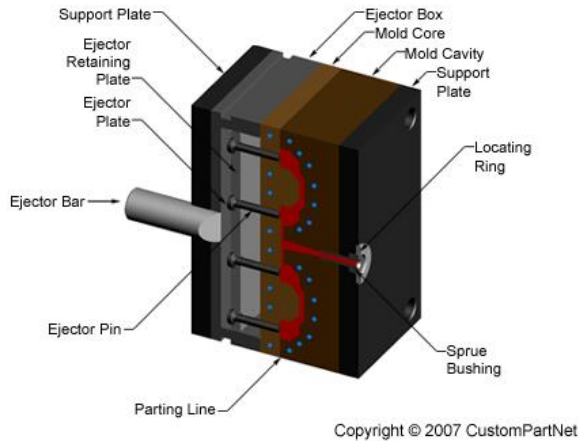


Figura 3: Molde 2 placas (placa fixa e placa móvel), 1 cavidade [15].



Figura 4: Molde 2 Placas [9].

- b) **Molde Sandwich (Stack mold):** Molde constituído por 2 zonas de cavidades e duas zonas de buchas.

O molde ‘*Sandwich*’ ou *stack mold*, é uma solução utilizada particularmente em algumas áreas (*packaging*, eletrónica) e visa principalmente a otimização de recursos e a produção em ciclos mais rápidos. Devido ao facto de ser constituído por duas zonas moldantes, permite normalmente a duplicação da produção horária de uma determinada peça, utilizando sensivelmente os mesmos recursos (máquina, energia, tempo) quando comparado com um molde de duas placas convencional. É uma solução particularmente adequada a projetos com grandes volumes de produção.

O seu funcionamento assenta na existência de um *transfer* ou canal central, onde a máquina de injeção injeta, e que conduz o material até ao prato central do molde. Nesse prato central, o material seguidamente é introduzido nas duas zonas de cavidades ao mesmo tempo, promovendo assim o enchimento em simultâneo das zonas moldantes.

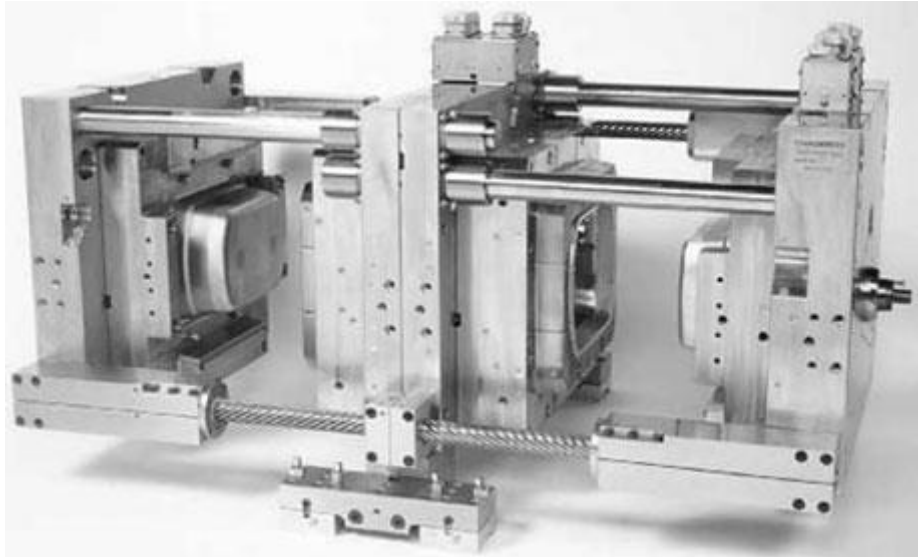


Figura 5: Molde 'Sandwich'[10].

- c) **Molde Rotativo:** Molde que efetua um movimento de rotação, sobre o eixo de injeção.

Neste tipo de molde de injeção, o molde é colocado sobre um prato rotativo (na máquina de injeção, que promove um movimento (180° graus, na maioria das aplicações) de forma a haver uma outra injeção, numa outra parte da peça ou peças.

Este tipo de tecnologia de molde permite a exploração de outros tipos de injeção como por exemplo a sobremoldação (*overmoulding*) e a bi-injeção.

O princípio de funcionamento baseia-se numa rotação, após cada injeção, de um dos pratos do molde, que recoloca a peça injetada na primeira fase, numa outra estação de operação ou fase de injeção. Este movimento é normalmente efetuado por um acionamento, que pode ser pneumático, hidráulico ou elétrico.



Figura 6: Prato de injeção rotativo [11].

## 2.4. A máquina de injeção

---

A máquina de injeção é o equipamento central de todo o processo de injeção Figura 7. Na máquina de injeção ocorrem algumas das operações mais importantes do processo de transformação de plásticos por injeção, das quais se podem destacar a plasticização do polímero e a sua introdução no molde. É através da máquina de injeção que todo o processo é definido, pelo que ao idealizar-se uma determinada peça em plástico tem de se levar em consideração a máquina necessária para produzir essa peça.



*Figura 7: Máquina de injeção de 280 toneladas [11].*

A máquina de injeção tem a função de introduzir o material fundido dentro das cavidades moldantes, pelo que na sua estrutura, trabalham em simultâneo vários subsistemas que interagem entre si, de forma a conseguirem atingir o resultado final de produção da peça. Os principais sistemas podem agrupar-se da seguinte forma:

- Sistema ou unidade de injeção: Toda a estrutura responsável por plasticizar e introduzir o polímero fundido dentro do molde. Pode dizer-se que é aqui que se definem uma boa parte das características físicas, mecânicas e químicas da peça, ou seja, o processo de injeção depende quase na sua totalidade desta unidade da máquina.

- Sistema ou unidade de fecho: Estrutura responsável por suportar toda a pressão exercida nas cavidades do molde, por parte da unidade de injeção. A força de fecho de uma máquina de injeção define-se pela capacidade de sustentar a pressão na cavidade, isto é pela relação da expressão:

$$F_t = \frac{A_p \times P_m \times K_m \times N_{cav}}{1000}$$

*Equação 1: Dimensionamento da força de fecho da máquina de injeção. Fonte: YUDO*

Onde:

$F_t$  = Força de Fecho em Tonelada

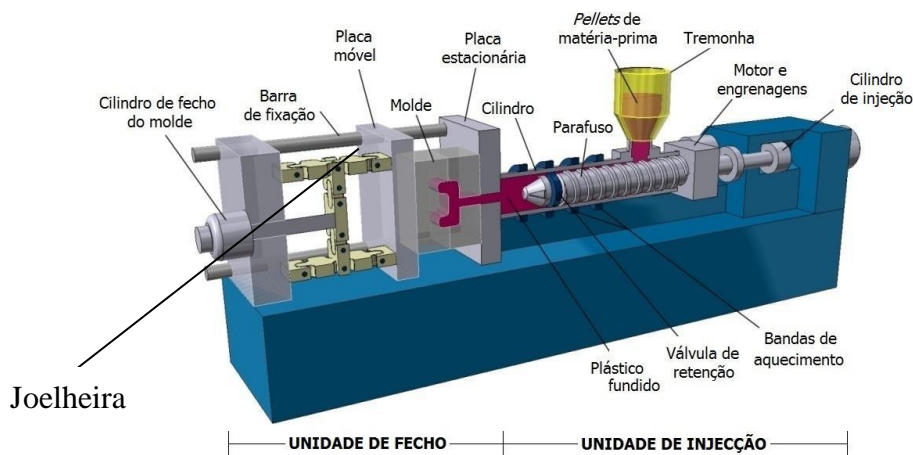
$A_p$  = Área Projetada em  $\text{cm}^2$

$P_m$  = Pressão média de injeção em Bar

$K_m$  = Constante do material ( $1 \leq K_m \leq 2$ )

$N_{cav}$  = Número de cavidades

Ao observar-se a Figura 8 pode ter-se uma ideia mais pormenorizado dos constituintes da máquina de injeção. Pode dizer-se, que um ciclo de injeção começa com o fecho do molde entre as duas placas ou pratos da máquina. Este fecho é levado a cabo pelo cilindro de fecho da máquina, e garantido durante toda a fase de injeção / enchimento da peça, por um sistema de joelheira mecânica, conforme representado. Após garantido o fecho da máquina, pode dizer-se que o sistema de fecho da máquina concluiu a primeira fase do ciclo.



*Figura 8: Vista esquemática de uma máquina de injeção[12].*

Simultaneamente, a máquina de injeção efetua a carga de material para a injeção seguinte, Figura 9, isto é, o fuso da máquina, ou parafuso, recua progressivamente de modo a deixar entrar matéria dentro da câmara de plasticização. A este processo chama-se dosagem, e mais não é do que a acumulação de material na última fase da câmara de plasticização, com o objetivo de este ser seguidamente injetado dentro do molde.

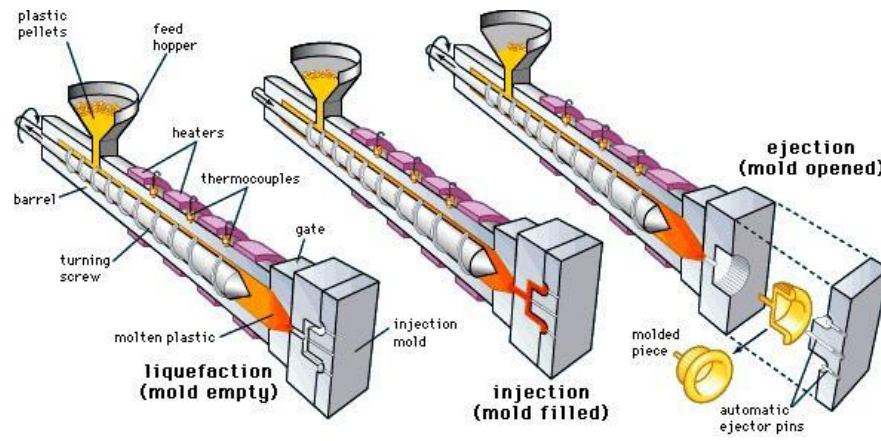


Figura 9: Funcionamento da unidade de injeção[13].

De salientar que, o cilindro recua, pelo efeito da força oposta à compactação do material, uma vez que o fuso da máquina, que é acionado pelo cilindro de injeção, apenas possui movimento de rotação. Esse movimento de rotação, promove a passagem de material pela válvula anti-retorno, que ao atingir o limite definido para cada injeção, fecha, e confina o volume da próxima injeção, conforme explicado na Figura 10.

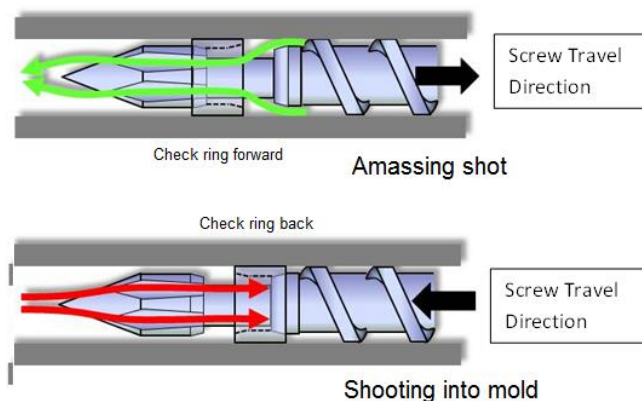


Figura 10: Pormenor do funcionamento da unidade de injeção[14].

Toda a plasticização do material é garantida pelas várias resistências que estão distribuídas uniformemente pelo cilindro ou câmara de plasticização da máquina, sendo que estas garantem a fluidez do material nas várias zonas definidas do conjunto de plasticização, e que são: a zona de alimentação, localizada por baixo da tremonha e ocupando cerca de  $\frac{1}{4}$  do fuso; zona de compactação, localizada imediatamente a seguir e que ocupa cerca de  $\frac{1}{2}$  do fuso, e a zona de medição, que é a última zona do fuso, e que ocupa a restante percentagem.

## 2.5. O sistema de injeção

---

O sistema de injeção ou sistema de alimentação são subsistemas constituintes do molde, que têm por função a condução do material polimérico desde o momento em que este sai do bico da máquina até à zona ou zonas moldantes. Ou seja, por sistema de injeção define-se o conjunto de canais, câmaras e passagens por onde o material flui, mas que não pertencem à geometria funcional da peça que se injeta.

Estes canais podem ter diversas geometrias, formas e configurações. No entanto, em projeto de moldes, tenta-se sempre minimizar o volume destes canais, para se conseguir um menor desperdício e um comprimento de fluxo inferior.

A existência de canais é muitas vezes uma necessidade funcional ou técnica, na medida em que permite otimizar espaço em molde, isto é, rentabilizar de uma forma mais efetiva as áreas disponíveis para cavidades ou zonas moldantes.

Atualmente, podem definir-se dois grupos de canais:

- Canais Frios ou *Cold Runner*
- Canais Quentes ou *Hot Runner*

Neste trabalho abordar-se-á com especial enfoque a temática dos canais quentes, sendo a tecnologia mais recente e a largamente mais utilizada hoje em dia.

## 2.5.1. Canais frios

Entende-se por canal frio ou *cold runner* toda a área que vai desde o injetor do molde até a zona moldante, que, não sendo parte integrante da peça, é extraída em cada moldação, constituindo um resíduo denominado por gito.

Este resíduo é assumido como um desperdício, que solidifica juntamente com a peça, mas que não acrescenta nenhum valor à mesma, sendo muitas vezes extraído ainda unido à peça e separado por via de um processo manual ou mecânico, auxiliar.

Na Figura 11, uma exemplificação típica de um molde com canal frio. Ao finalizar a injeção, todo o canal frio, na imagem representado com a cor verde, é extraído juntamente com as duas peças moldadas. O material que constitui o gito é desperdiçado.

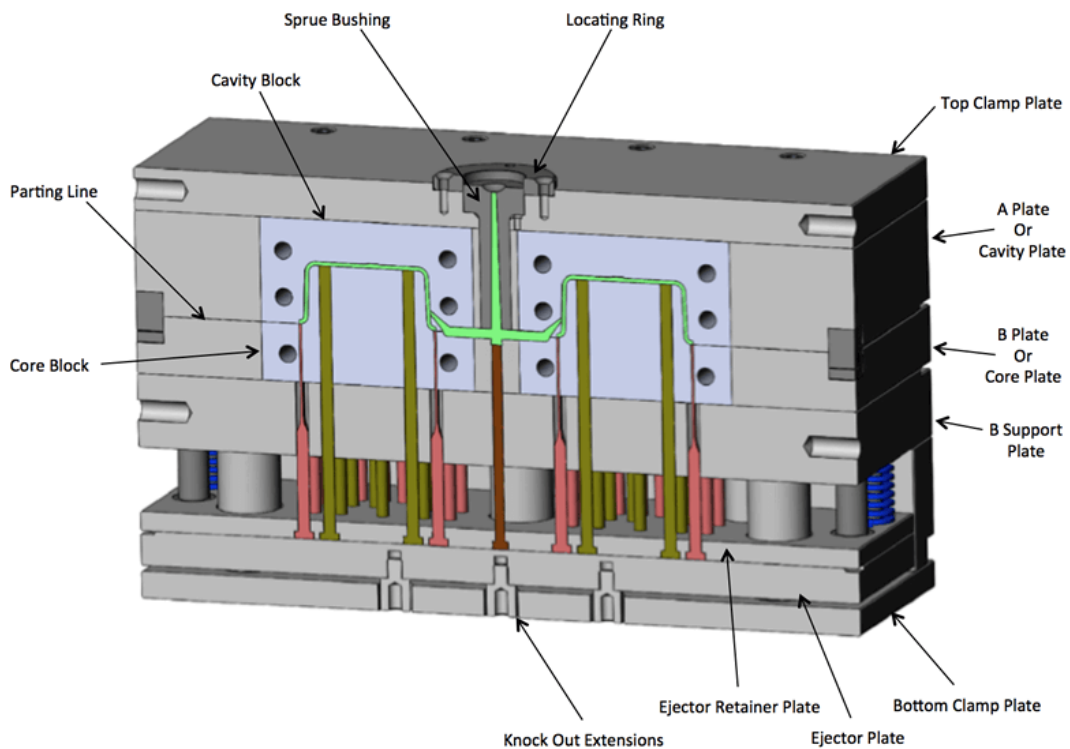


Figura 11: Configuração genérica de um canal frio [12].

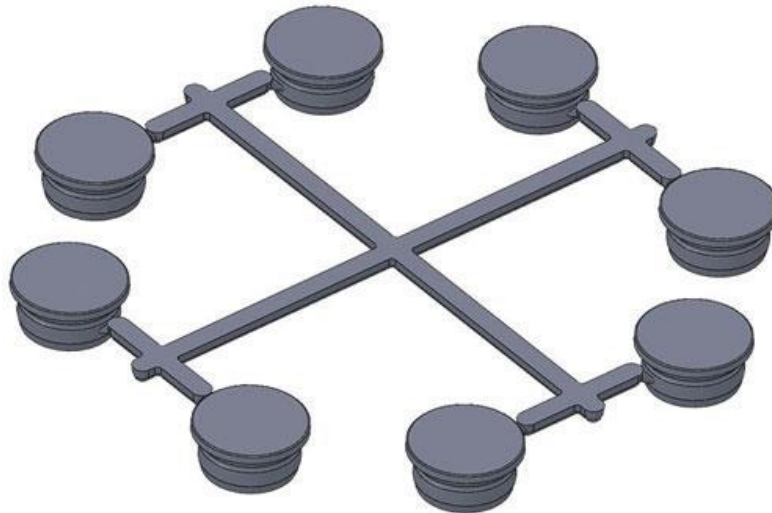


Figura 12: Canais de alimentação e peças injetadas com canal frio[15].

Por vezes, o volume dos canais de alimentação pode igualar ou mesmo ultrapassar o volume de material utilizado na peça (Figura 12), o que obriga não só a sobredimensionar todo o sistema de injeção com base na relação:

$$\text{Peso de Injeção} = \text{Peso da peça} + \text{Peso do canal frio}$$

*Equação 2: Dimensionamento do volume do peso de injeção*

Ou seja, quanto maior for o canal, maior a necessidade de sobredimensionar a montante todo o processo de injeção, isto é, almofada, volume / peso de injeção, tempo de residência na câmara, entre outros parâmetros.

Todos estes inconvenientes, precipitaram o declínio e queda em desuso dos sistemas de canais frio, passando cada vez mais a optar-se por sistemas híbridos ou por sistemas totalmente constituídos por canais quentes.

## 2.5.2. Canais Quentes (Hot Runners)

---

O conceito de canal quente surgiu na década de 60 do século passado, associado às necessidades que então surgiam de eliminação do enorme desperdício proveniente do processo de injeção e do aparecimento de matérias termoplásticas cada mais exigentes ao nível do seu processamento [16].

Vantagens dos sistemas de canais quentes[17]:

- Desperdício reduzido ou inexistente de matéria prima;
- Melhor compactação da peça com benefícios diretos na menor contração/deformação da peça;
- Ciclos de processo mais curtos;
- Máquinas podem ter capacidades de injeção mais reduzidas; o canal quente funciona como prolongamento da câmara da máquina;
- O fluído termoplástico chega ao ponto de injeção da peça em ótimas condições térmicas e químicas;
- Balanceamento de canais mais fácil e possibilidade de balanceamento artificial (com recurso a injeção sequencial);
- Controlo das condições térmicas do fluído termoplástico até ao ponto de injeção (gate).

Todas estas vantagens fizeram dos sistemas de injeção de canal quente uma solução técnica bastante eficaz e largamente utilizada em toda a indústria termoplástica. Permitem também o processamento de polímeros de elevada viscosidade, com janelas de processamento bastante apertadas e com pontos de fusão extremamente elevados.

Por exemplo em indústrias com necessidades de ciclo rápido e repetibilidade elevada, permitiram a eliminação quase completa de resíduos (gatos) o que confere desde logo uma vantagem competitiva em relação aos sistemas de canal frio. Já em outro tipo de indústrias, como a indústria automóvel, ao permitir um maior tempo de compactação e estabilização da peça, permite melhorar significativamente a qualidade dos produtos, bem como também a repetibilidade do processo de injeção.

Pese embora a crescente massificação da utilização de sistemas *hot runner*, há também algumas desvantagens que lhes estão associadas, tais como:

- Custos consideravelmente mais altos envolvidos;
- Maior complexidade de construção de moldes;
- O isolamento térmico do distribuidor do canal quente e dos bicos poderá ter inconvenientes;
- Maior complexidade de manuseamento e custos de manutenção.

## 2.5.2.1. Tipos de sistemas de canal quente

---

Desde o seu surgimento, houve várias configurações e tipos de sistemas de injeção que foram evoluindo até aos dias correntes.

O sistema de injeção, como atrás referido, é o conjunto de canais e secções que conduzem o polímero no estado fundido até à cavidade. O seja, o polímero para ser mantido no estado fundido tem de receber condições de pressão e temperatura idênticas às da câmara de plasticização da máquina de injeção. Assim, nos sistemas de injeção de canal quente, é imperativo a existência de fontes de calor, que podem apresentar várias configurações:

a) Classificação quanto à posição da fonte calor

- Sistema com aquecimento interno do canal

Nesta configuração, a fonte de calor está dentro dos canais do sistema de injeção, promovendo um aquecimento de dentro para fora. Devido à evolução da tecnologia, e ao surgimento dos sistemas *valve gate* (conceito explicado mais à frente) esta conceção é hoje pouco utilizada.

- Sistema com aquecimento externo do canal

Esta é a configuração largamente mais utilizada na indústria. A fonte de calor (resistência) é colocada externamente sob os vários canais, de forma a manter o plástico no estado fundido até este entrar nas zonas moldantes.

b) Classificação quanto ao tipo de sistema:

- **Sistema aberto**

O sistema aberto, como o próprio nome indica é um sistema em que o material plasticizado flui pelo interior do sistema de injeção em regime livre, isto é, durante todo o processo de injeção e mesmo após este, não há nenhum tipo de obstrução ou vedação à passagem do material.

O sistema de injeção com canal aberto é a configuração mais simples, e que mais se aproxima da versão convencional, de canal frio. Veja-se a Figura 13 para melhor se perceber a configuração de um sistema aberto.

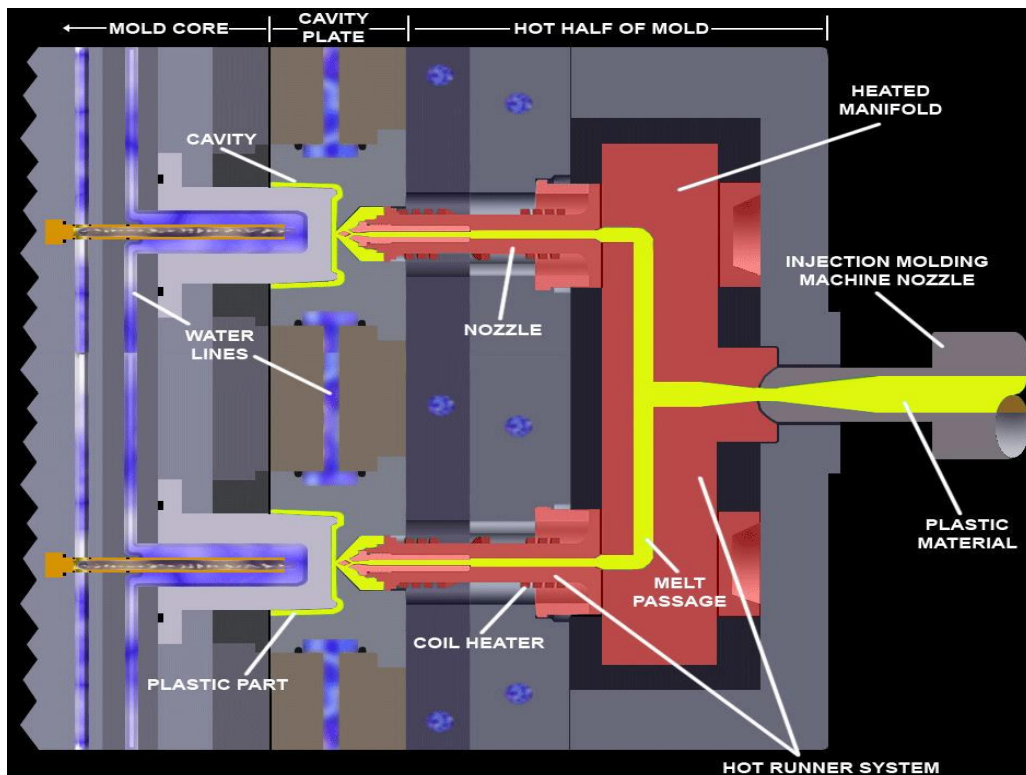


Figura 13: Sistema de injeção open com carburador e bicos [12].

Pela Figura 13 pode observar-se que o material que é injetado através do bico da máquina, é forçado a atravessar todo o carburador aquecido (*heated manifold*). Após percorrer os canais aquecidos dentro do carburador, o material entra nos bicos de forma natural, uma vez que o canal interno destes tem de ter a mesma largura e configuração geométrica do canal do carburador, por sua vez também aquecidos, por meio de resistências, colocadas na parte exterior dos bicos. Após a passagem nos bicos, o material fundido é então forçado a entrar nas zonas moldantes, e a partir desse momento, inicia o processo de plasticização.

O acoplamento dos bicos ao carburador, pode ter duas configurações possíveis: roscado ou encosto. Na configuração roscada, o corpo do bico (rosca macho) rosca diretamente dentro da caixa (rosca fêmea) aberta no carburador. Esta configuração garante um sistema de injeção compacto, mas ao mesmo tempo robusto de fácil montagem, uma vez que, os vários componentes são assim ensamblados no molde como um só bloco inteiro, não havendo problemas de centramento entre os canais do carburador e bicos.

Outra alternativa, é a configuração de bicos de encosto. Nesta solução, como o próprio nome indica, os bicos são colocados sobre o carburador, e fixados na posição com o auxílio de uma das chapas constituintes do molde. Esta solução, garante uma alternativa mais versátil em termos de manutenção, e é normalmente mais utilizada em sistemas multicavidade, uma vez que permite a colocação/retirada rápida de bicos isoladamente.

A configuração apresentada na Figura 13, é uma versão típica de um sistema de injeção *open*, configuração esta que pode ter várias configurações em função da marca e da aplicação em questão. Contudo, pode definir-se alguns constituintes transversais no mercado, são eles:

- Nozzle Locator (NL) ou injector do molde – Trata-se do primeiro componente do sistema de injeção, que recebe o contacto do bico da máquina, e que rosca no corpo do carburador.
- Carburador – Placa em aço, onde internamente são perfurados os canais, normalmente colocados perpendicularmente ao injetor.
- Bicos – Normalmente canais perpendiculares ao carburador, têm a função de manter o plástico em condições ideais até à injeção.
- Ponteira – Parte final do bico, que faz o contacto com a zona moldante ou com o canal frio (se existir). Trata-se de uma zona termicamente bastante sensível. É a zona onde se encontra o *gate*.
- Gate – Última zona de do bico do sistema de injeção. Trata-se do furo por onde todo o material fluí, até a cavidade. Em injeção com ataque direto à peça, tende a ter o menor diâmetro possível, para que o vestígio do ponto de injeção seja mínimo.

Na Figura 14, pode identificar-se a posição dos constituintes acima descritos.

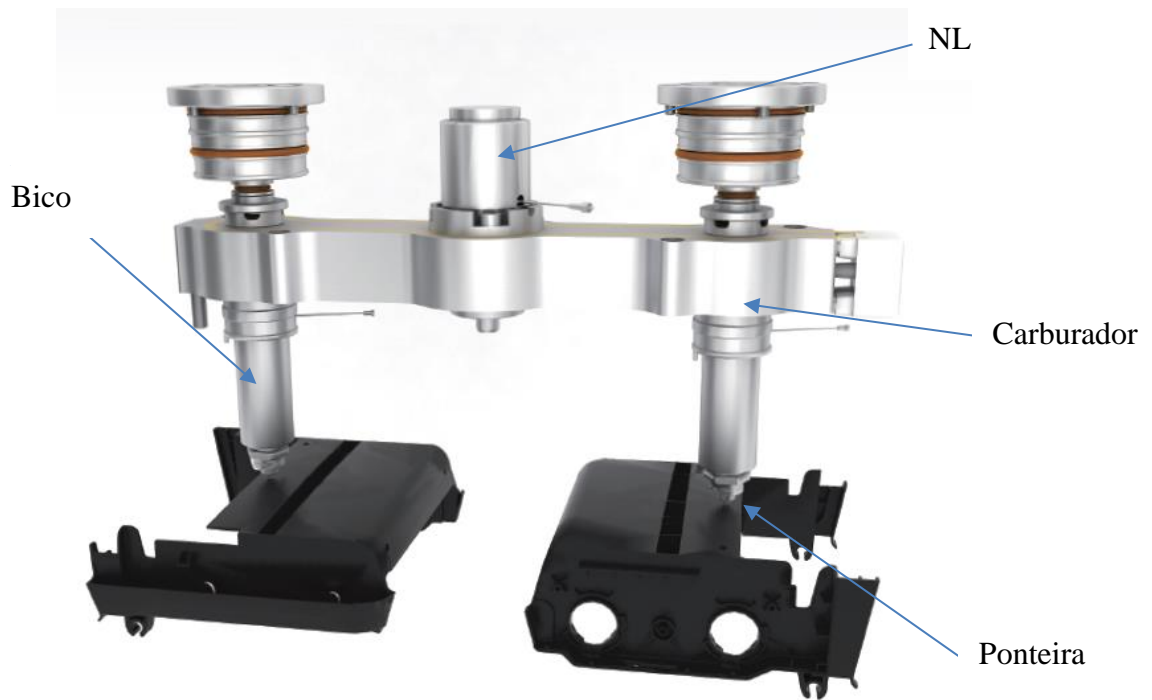


Figura 14: Constituintes de sistema de injeção [18].

Na Figura 15, pode observar-se o pormenor de uma configuração típica de uma ponteira, bico open, do fabricante YUDO. Pode observar-se o canal, bem como o torpedo interior, que é um acessório utilizado, com elevada condutividade térmica, de forma a promover a fluidez do material termoplástico processado.

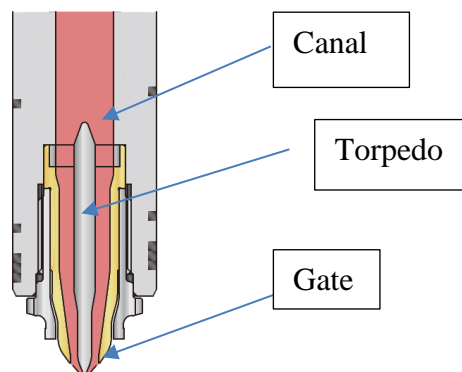


Figura 15: Pormenor de uma ponteira de injeção (ataque direto)[19].

Para além dos constituintes assinalados, todos os sistemas de injeção terão de possuir fontes de calor, resistências, bem como aparelhagem de controlo e monitorização da

temperatura, utilizando para este fim termopares, colocadas quer na zona do carburador, quer na zona dos bicos.

O sistema *Open*, tem algumas vantagens assinaláveis, que se passam a enumerar:

- Facilidade de instalação;
- Baixo custo;
- Operação simples;
- Baixa manutenção.

Entre as desvantagens, salienta-se o facto de um bico aberto ter necessariamente um tempo de ciclo mais longo, quando comparado com um bico valvulado, bem como o perigo de *leakage*, pela extremidade do bico. Estes inconvenientes, poderão comprometer não só a rentabilidade da produção, uma vez que um ciclo mais lento, implica menores tiragens e consequentemente menor rentabilidade do processo, como a própria fiabilidade da produção, gerando problemas de qualidade nas peças plásticas produzidas.

Estas questões, bem como outras associadas à controlabilidade térmica e marcas visíveis de pontos de injeção, levaram ao surgimento dos sistemas valvulados.

- **Sistema fechado (valvulado ou *valve gate*)**

O sistema de injeção valvulado, vulgo *valve gate*, é uma evolução dos sistemas de injeção de camara quente convencionais. Neste tipo de configuração, o sistema é valvulado a cada ciclo de injeção, isto é, após cada fase de injeção, uma válvula interna veda o material para assim impedir que este saia dos bicos de forma indesejada.

A configuração típica de um sistema valvulado é similar ao sistema *open*, contudo neste tipo de sistema, uma válvula, que é presa na parte superior do sistema, percorre internamente todo o canal, fazendo o movimento ascendente e descendente, para efetuar a abertura e o fecho do *gate*. Neste tipo de configuração, uma boa parte do volume do canal é ocupado pelo volume da válvula, havendo sempre necessidade de sobredimensionar o canal do sistema, quando comparado quando um sistema *open*.

Na Figura 16, apresentam-se esquematicamente os constituintes de um sistema valvulado, na sua forma de aplicação mais convencional.

A *valve pin* (1), ou seja, a vareta que fará a vedação do *gate*, percorre todo o canal do bico (4), até à zona da ponteira (5) onde se faz o fecho do canal. Para a abertura e o fecho do sistema é utilizado um cilindro hidráulico, pneumático ou elétrico (2) que promove o movimento descrito. O fluido de trabalho (no caso hidráulico ou pneumático) é conduzido até ao cilindro através de mangueiras pneumáticas ou hidráulicas, conforme o tipo de cilindro. Uma peça localizada sob a curva do canal, *pin guide bush* (6), suporta e apoia a *valve pin* e impede que o material inunde o sistema a montante.

Pela descrição do processo, facilmente se percebe que se trata de um conceito mais avançado, logo à partida pela complexidade de criar um elemento com movimento dentro do canal do sistema, o que traz bastantes complicações do ponto de vista técnico e funcional, quer para o fabricante do canal quente, quer para o fabricante do molde e, inclusive para o fabricante de plástico. Assim, entre as principais desvantagens do sistema valvulado, podemos enumerar a maior complexidade na montagem e projeto do molde e sistema; o maior custo quer inicial, quer de manutenção, e a maior complexidade na sua utilização.

Pese embora algumas desvantagens, o sistema valvulado tem bastantes vantagens, sendo um sistema largamente utilizados em áreas tão distintas como o *packaging*, a área automóvel e a indústria biomédica.

As vantagens, prendem-se não só como as melhorias no processo produtivo, mas também com a possibilidade de abrir algumas possibilidades de processamento de determinados materiais.

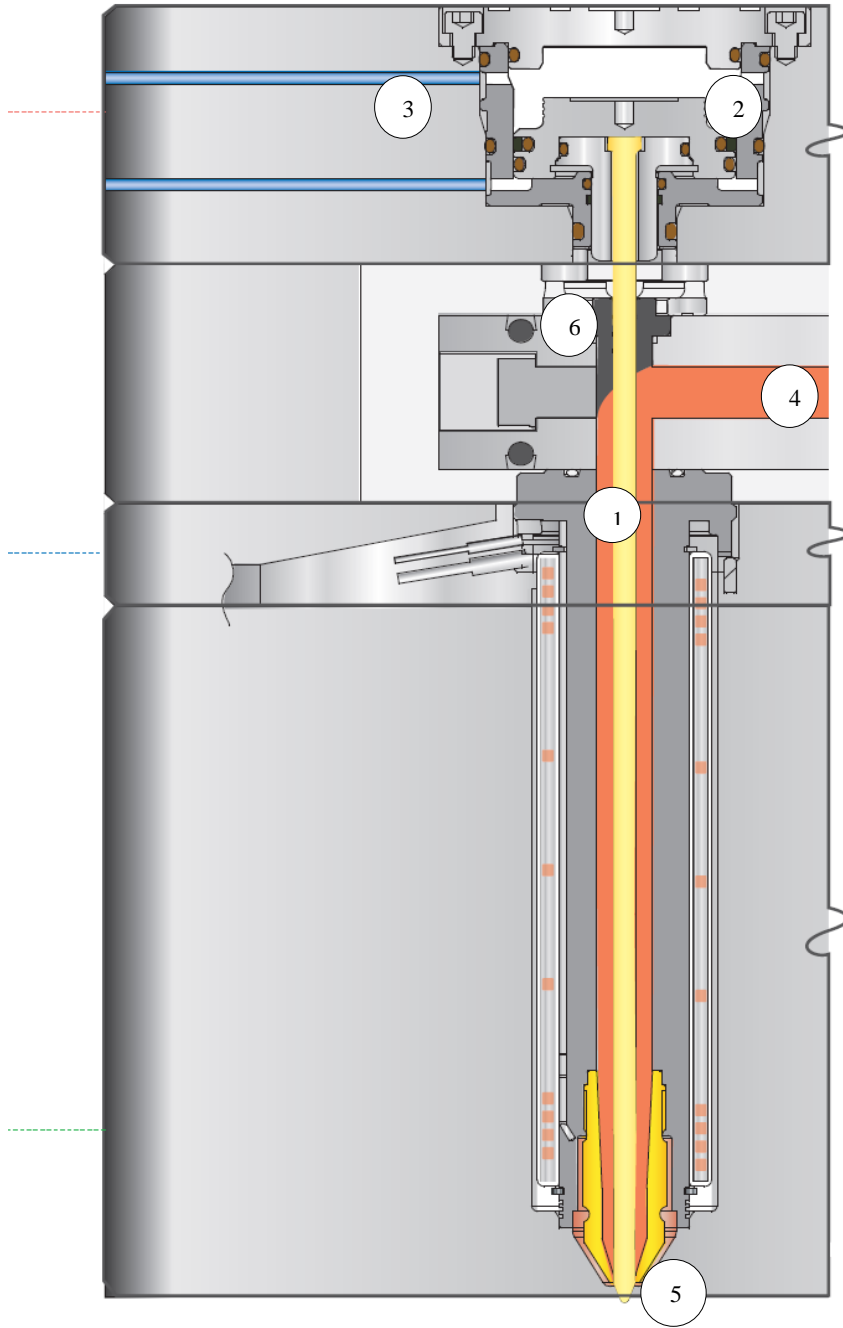


Figura 16: Constituintes de sistema valvulado [18].

### **Vantagens dos sistemas *Valve Gate*[20]:**

- Eliminação de desperdício após injeção.

Com esta tecnologia, é possível eliminar o fenómeno de *drooling*, / derrame de material pelos bicos, ou seja, o material que após cada injeção, se vai expelindo pelos bicos, pelo efeito da temperatura e pressão a que está sujeito. Este problema pode causar danos visíveis na peça seguinte, quer a nível estético que a nível mecânico.

- Controlo do vestígio na peça

Com um sistema valvulado, os problemas relacionados com o vestígio na zona do ponto de injeção são totalmente eliminados. Ou seja, em peças com elevada componente estética/visual, ou em materiais com dificuldade em partir na zona do gate, esta solução garante uma total fiabilidade.

- Possibilidade de diminuição do tempo de ciclo.

O sistema valvulado, uma vez que veda o gate de cada bico após injeção, permite o acelerar de todo processo, já que não há risco de perda de material pelo bico. O processo de preparação da nova injeção em cada ciclo, inicia-se imediatamente após o fecho do *gate*.

- Controlo sequencial de abertura.

Com um sistema valvulado com vários pontos de injeção, podemos controlar os tempos de abertura de cada bico, e aproveitar esta função para imprimir um melhor acabamento nas peças nomeadamente ao nível das linhas de fluxo e união do material dentro das cavidades. É possível também utilizar este sequenciamento para equilibrar o enchimento de cavidade em moldes ‘família’, ou seja, moldes em que as cavidades são ligeiramente diferentes e conseqüentemente o perfil de enchimento também o é.

### 3. Simulações Numéricas de Calor

---

Atualmente é possível simular teoricamente uma boa parte dos fenômenos associados à injeção de termoplásticos, através de simulações numéricas computacionais. Essas simulações têm por base aproximações físicas e mecânicas das peças analisadas, bem como, assumem condições de processamento o mais aproximadas possível das reais. As análises CAE (*Computer Aided Engineering*) englobam um alargado número de análise possíveis de elaborar na fase de engenharia e desenvolvimento de um determinado produto ou solução. Visam sobretudo a prevenção de possíveis problemas técnicos e funcionais, da peça ou do processo, mas também auxiliam a tomada de decisões dos *designers* e engenheiros, com vista à conceção do produto e da sua produção em massa.

As análises teóricas baseiam-se em modelos matemáticos denominados modelos de elementos finitos. Estes modelos podem definir-se “*por uma técnica matemática para analisar pontos de tensão ou rotura. A estrutura ou o sistema é dividido em subestruturas chamados elementos finitos*” [21]. Esta definição enquadra-se no contexto de surgimento desta ferramenta, que foi o de tentar prever o comportamento de determinada estrutura mecânica (viga, coluna, etc.) a uma determinada força ou conjunto de forças que sobre ela eram aplicadas.

No âmbito da indústria dos moldes, as simulações mais frequentes são as simulações reológicas onde simulamos o escoamento do plástico fundido no interior do molde. Neste caso em particular, um dos parâmetros analisados é a temperatura do fluxo durante a injeção e durante o ciclo de arrefecimento. De seguida é feita uma breve apresentação das simulações reológicas.

Neste estudo em específico, o objetivo consiste em analisar numericamente a transferência de calor no molde de injeção. Para que se possa avaliar termicamente o molde, será necessário recorrer a outros tipos de simulações numéricas de calor. Deste modo, de seguida será apresentado um dos tipos de regimes da simulação térmica e os tipos mecanismos de transferência de calor.

### 3.1. Simulações reológicas

---

Com o evoluir dos softwares de simulação 3D e do CAD (*Computer Aided Design*), tornou-se possível o cálculo de determinadas condições e ou parâmetros de determinado projeto, bem como a avaliação à priori de problemas outrora impossíveis de prever.

De entre as simulações mais utilizadas na indústria de injeção de plástico, podemos destacar a análise reológica (do grego *rheos* = escoamento[22]) ou simplesmente análise / estudo de enchimento. Este tipo de simulação é também vulgarmente conhecida como análise *Moldflow*<sup>®</sup>, em referência a um dos primeiros fabricantes de software a lançá-lo no mercado.

Como o próprio nome indica, trata-se de uma análise às condições térmicas e mecânicas do escoamento do fluído termoplástico, desde que este sai do bico da máquina, até ao preenchimento completo das cavidades. Ainda que depende muito do tipo de peça e projecto em questão, podemos enumerar alguns dos pontos principais de análise, após a elaboração de um estudo de enchimento, a ter em conta, são eles:

- Preenchimento completo das cavidades;
- Variação de temperatura durante o enchimento;
- Variação de pressão durante o enchimento;
- *Shear Stress* ou Tensão de corte;
- Força de fecho gerada nas cavidades;
- Balanceamento das cavidades;
- Prevenção de defeitos superficiais (linhas de fluxo, bolhas, chupados) entre outros.

Com a introdução de mais alguns dados, nomeadamente os dados de refrigeração do molde, é possível também fazer uma análise à contração e empenos previsíveis de acontecer na peça.

## 3.2. Simulações Térmicas

---

Por simulações térmicas, no contexto da indústria de moldes / injeção de plástico, podem definir-se todo o tipo de análises térmicas, que saiam fora da abrangência de um estudo reológico, isto é, a análise às fontes de calor e transmissão deste, no processo ou antes deste, de forma independente do escoamento do fluido.

Este tipo de análise visa no fundo compreender e interpretar a transferência de calor nas várias zonas de um determinado sistema, avaliar pontos e zonas heterogêneas, corrigir e prever zonas que quer pelo excesso, quer pelo défice de concentração térmica possam vir a representar problemas, no normal ciclo de processamento de termoplásticos.

Neste trabalho, pretendesse efetuar várias simulações térmicas, com diferentes *inputs* e com diferentes condições de análise

### 3.2.1. *Steady State Thermal Analysis*

---

Uma análise térmica *Steady – State*, é uma análise térmica em estado estacionário, ou seja, em que não há alteração das condições processuais durante a análise. O mesmo é dizer que durante a análise, as condições de entrada ou *inputs* não variam, e que as fontes de calor têm uma carga constante. Neste tipo de análise, pretende assim estudar-se a propagação e dissipação de calor ao longo das diversas geometrias e malhas, tendo-se por princípio um regime estacionário.

Para uma análise térmica estacionária (estática) em Simulação, as temperaturas {T} são dadas pela equação abaixo:

$$[K(T)]\{T\} = \{Q(T)\}$$

*Equação 3: Relação de temperaturas numa análise de estado estacionário[23]*

Onde:

k = Condutividade térmica do material (W/m K ou W/m°C)

T = Temperatura ao longo da análise (°C)

Q = Taxa de transferência de calor (Watts)

Com os seguintes pressupostos [23]:

- Não são considerados os fenómenos térmicos ou efeitos transitórios da temperatura durante a análise;
- $k$  pode ser uma constante ou uma função da temperatura;
  - $k$  é introduzido pelas características do material;
- $Q$  pode ser uma constante ou uma função da temperatura;
  - $Q$  é introduzido pela definição das percas e condições fronteira (*Boundary Conditions*).

### 3.3. Mecanismos de transferência de Calor

---

No âmbito das simulações térmicas, existem 3 modos de transferência de calor, nomeadamente a condução, convecção e radiação. Cada modo é descrito de seguida.

#### 3.3.1. Condução

---

A transmissão de calor por condução ocorre pela transferência de energia das partículas elementares “mais energéticas” (com maior agitação) do meio para as partículas elementares adjacentes “menos energéticas”, devido à interação entre as partículas (Figura 17). A transmissão de calor por condução é a transmissão característica dos meios sólidos, mas também ocorre em meios líquidos e gasosos.

A transmissão de calor através do corpo, ou corpos, é influenciada por diversos fatores, tais como:

- A geometria do corpo;
- A espessura das secções;
- O material de que é feito;
- O diferencial térmico existente entre zonas;
- A carga térmica aplicada;
- As perdas térmicas ao longo do período de análise.

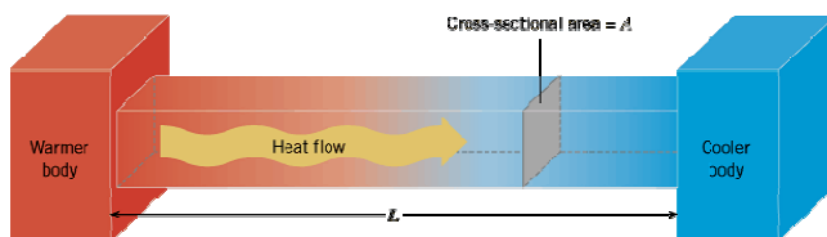


Figura 17: Esquemática do mecanismo de transferência de calor por condução [24].

De entre os fatores supra enumerados podemos particularizar o tipo de material como um dos fatores muito importantes na melhor ou pior taxa de transmissão de calor. Temos materiais que são excelentes condutores, como o cobre e o ouro, e outros menos condutores como o aço inox ou a platina, como podemos verificar na Tabela 1:

Tabela 1: Propriedades termofísicas do material [25].

Material	Condutividade Térmica (W/m°C)		
	A 25°C	A 125°C	A 225°C
Ferro	80	68	60
Aço de baixo carbono	54	51	47
Aço Inox	16	17.5	19
Tungstênio	180	160	150
Platina	70	71	72
Alumínio	250	255	250
Ouro	310	312	310
Prata	420	418	415
Cobre	401	400	398

A característica dos materiais que mais influencia a capacidade sua condução de calor, é uma propriedade termofísica denominado condutividade térmica, representada simbolicamente pela letra **k** e expressa em **W/m °C**.

Verifica-se também que, a taxa de calor transferido é proporcional à diferença de temperatura, à área e à espessura do corpo que esta a ser atravessado, sendo expresso na Lei de Fourier:

$$\dot{Q}_x = k A \frac{T_1 - T_2}{L}$$

*Equação 4: Lei de Fourier.*

onde:

$\dot{Q}_x$  = Taxa de calor transferido por unidade de tempo (W/m<sup>2</sup>)

k = Condutividade térmica do material (W/m K ou W/m°C)

A = Área de transferência (m<sup>2</sup>)

$\Delta T$  = Diferença de temperatura entre as extremidades do material (K ou °C)

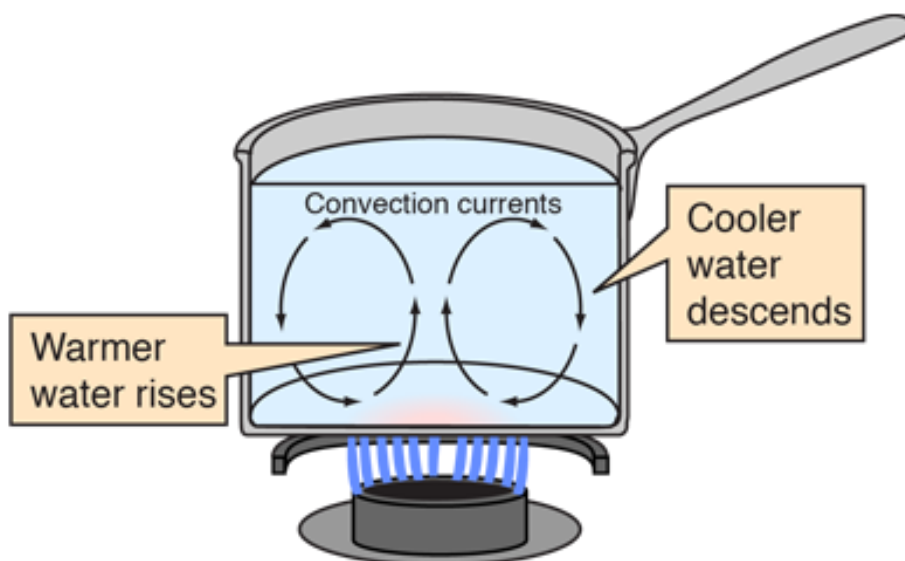
$\chi$  = Espessura do material)

### 3.3.2. Convecção

---

A transmissão de calor por convecção ocorre quando há transmissão de calor entre um sólido e um meio envolvente fluído (líquido ou gasoso). A convecção ocorre devido a dois fenómenos: movimento aleatório das moléculas mais energéticas, normalmente presente no corpo sólido mais quente, e transferência de energia devido ao deslocamento de porções de fluído[26].

Uma esquematização do processo de transferência de calor por convecção, é o fenómeno ocorrido numa panela de água, aquecida por uma fonte de calor externa, conforme esquematizado na Figura 18:



*Figura 18: Correntes de convecção [26].*

Na Figura 18, podemos perceber a transferência de calor da superfície metálica da panela (fundo e paredes laterais) para a água que está dentro da panela. A água que está na panela, ao ser aquecida, inicialmente por condução da superfície para a água, gera um movimento ascendente do fluido, denominado por corrente de convecção, que promove a transferência de calor para a água.

A transferência de calor por convecção, pode ocorrer de duas formas diferentes [26]:

- Convecção Natural: quando o fluido “banha” a superfície de uma forma natural, isto é, sem o incremento de velocidade ou caudal por nenhum agente ou mecanismo externo, conforme apresentado no exemplo acima;
- Convecção Forçada: quando o fluido é forçado contra a superfície (por exemplo, através da ação de uma bomba hidráulica, ou de um ventilador), com o propósito de promover a taxa de transferência de calor, conforme esquematizado na Figura 19:

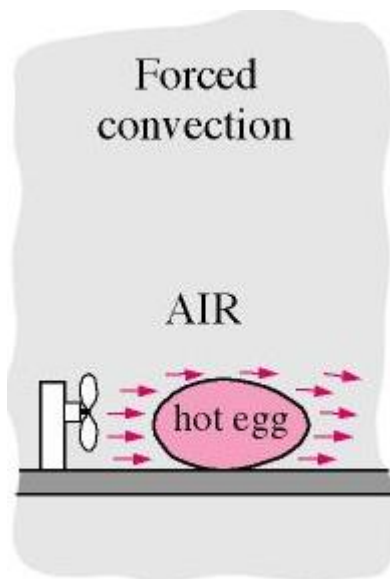


Figura 19: Convecção forçada[26].

A equação que expressa a transferência de calor por convecção, deriva da lei de Newton para o arrefecimento, e é apresentada na Equação 5:

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = h A (T_S - T_{\infty})$$

Equação 5: Transferência de calor por convecção.

onde:

$\dot{Q}_{\text{conv}}$  = Calor transferido por unidade de tempo (W)

A = Área da superfície de transferência (m<sup>2</sup>)

h = Coeficiente de transferência de calor por convecção (W/m<sup>2</sup> K ou W/m<sup>2</sup>°C)

$\Delta T$  = Diferença de temperatura entre a superfície e o fluido circundante (K ou °C)

### 3.3.3. Radiação

A transferência de calor pelo mecanismo de radiação consiste na transmissão por meio de radiação eletromagnética. Todos os corpos com temperatura superior a 0 K (-273,15 °C) emitem radiação térmica. Por definição, designa-se por radiação térmica, toda a energia radiada na gama de comprimentos de onda 0,1 a 100  $\mu\text{m}$ , do espectro eletromagnético[26], apresentado na Figura 20:

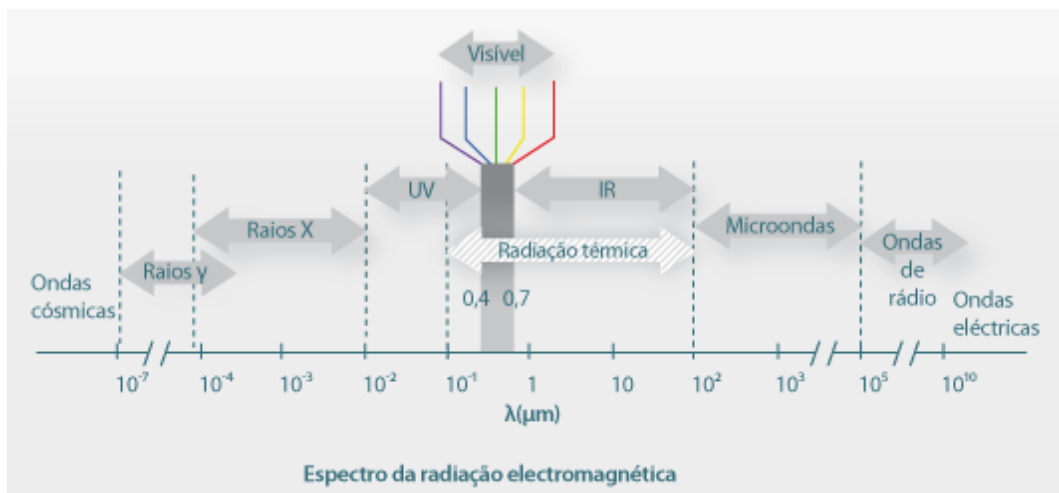


Figura 20: Espectro de radiação eletromagnética[26].

A radiação, ao contrário dos outros dois mecanismos de transferência de calor não necessita de um meio físico para a sua propagação, podendo propagar-se no vazio. Um exemplo desse fenómeno é a radiação emitida pelo sol, que percorre cerca de 150 milhas de quilómetros no espaço vazio, até penetrar na atmosfera terrestre [27].

A taxa de radiação de um corpo depende não só da geometria da superfície, mas também do tipo de material constituinte. Materiais bons emissores são geralmente materiais bons absorvedores. Outro fator que influencia fortemente a transmissão de calor por radiação

é a temperatura do corpo radiante e o seu diferencial para a temperatura do meio envolvente. Ou seja, para o mesmo material e geometria da superfície, a taxa de transferência será tanto maior quanto maior for a temperatura absoluta do corpo emissor e a diferença para o meio envolvente.

A energia radiante emitida por um corpo é dada pelo lei de Stefan-Boltzmann (*Josef Stefan 1835-1893, Ludwig Boltzmann 1844-1906*), apresentada na Equação 6:

$$\dot{Q} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot A \cdot T_s^4 \quad (W)$$

*Equação 6: Lei de Stefan-Boltzmann.*

onde:

$\dot{Q}$  = Calor transferido por unidade de tempo (W)

$\sigma$  = Constante de *Stefan-Boltzmann* ( $5,67 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$ )

$\varepsilon$  = Emissividade da superfície

A = Área da superfície

T = Temperatura absoluta da superfície

O conceito de emissividade térmica é uma característica não só do material, mas também da própria geometria e do acabamento da peça e/ou superfície, nomeadamente, aspetos como brilho, porosidade e polimento, cor, etc. Os valores de emissividade variam entre 0 e 1, e podemos encontrar alguns exemplos de emissividade típicas de alguns materiais na Tabela 2:

Tabela 2: Emissividade das Superfícies[27].

Material	Temperatura (°C)	Emissividade ( $\epsilon$ )
Alumínio, placa	100	0.09
Cobre, Polído	100	0.052
Ferro	100	0.31
Vidro	22	0.94
Verniz – Esmalte branco	23	0.906
Verniz Preto Brilhante	24	0.875
Papel Isolante	21	0.91
Porcelana, Vidro	22	0.92
Tijolo de cerâmica	23	0.93
Superfícies pintadas	100	0.27-0.67

## 4. Descrição do problema

---

O problema deste trabalho de projeto surgiu em contexto laboral, decorrente da atividade profissional do autor. Hoje em dia é frequente a análise e a preocupação com a questão térmica, das peças plásticas injetadas, quer do ponto de vista do fabricante de moldes (moldista), quer do ponto de vista do fabricante de plástico (vulgo injetador) e inclusive também do fabricante do sistema de injeção, quando implicado. A conjugação de temperatura de injeção com o tempo de arrefecimento nem sempre é uma relação pacífica, e estas duas variáveis interferem diretamente quer no custo quer na qualidade e aspeto final da peça.

Numa outra análise, é cada vez mais necessário simular e tentar prever o que vai acontecer com determinado projeto – peça plástica – em determinadas condições de processamento, diferente matéria-prima e diversas aplicações finais.

A indústria de injeção de termoplásticos é uma indústria onde os custos do projeto – principalmente os custos de lançamento de novos projetos são elevados, daí a necessidade de exaustivas análises numéricas, cada vez mais aproximadas da realidade, de forma a diminuir a margem e a evitar custos desnecessários com complicações não previstas. Todo este conjunto de fatores levou à massificação nos últimos anos quer de estudos de carácter reológico (estudo de enchimento e/ ou de empeno) mas também a estudos de outra natureza, por exemplo os estudos de análise térmica e mecânica.

Neste contexto, as análises puramente térmicas ou mecânicas, são uma tecnologia ainda mais recente, na medida em que só mais recentemente, se constatou quer a sua necessidade, quer a sua utilidade em inúmeras situações. A sua necessidade advém do facto de cada vez na indústria se trabalhar quer com margens mais apertadas, com prazos de fabrico mais curtos, o que promove constantemente a busca por soluções mais rápidas e mais económicas. Outra consequência destas mudanças é também a exigência de se errar cada vez menos, daí o enfoque cada vez maior na previsão e simulação dos projetos, e das suas inúmeras variáveis. Também pela condicionante dos prazos mais apertados, surge a necessidade de simular, na medida em que não se pode errar, e cada vez há menos tempo para errar, sendo que o erro tem de ser cada vez mais mitigado ou eliminado.

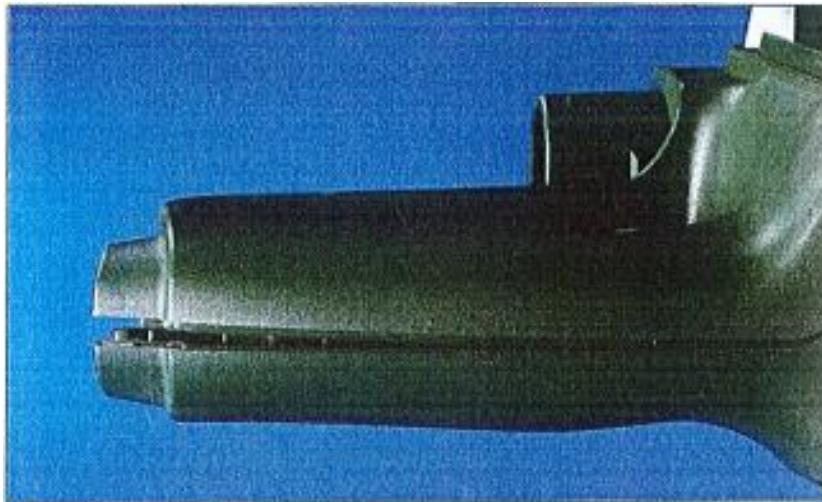
No contexto concreto da indústria dos moldes e plásticos, a questão põe-se da seguinte forma: como podemos reduzir quer o custo quer o *timing* para se obterem peças finais com

qualidade aprovadas pelo cliente? As respostas poderão advir de questões como: redução dos *timings* em todas as fases do molde (projeto, fabricação, aprovação) e diminuindo ao máximo os erros cometidos nestas fases, isto é, “prever, simular e evitar”!

Nesta indústria, uma boa parte dos problemas de não aprovação de peças plásticas nos ensaios está relacionado com problemas térmicos, dos quais se passam a enumerar os principais ou mais comuns:

- Empenos / Deformação

A deformação consiste no desvio dimensional da peça plástica comparativamente com a forma requerida, projetada no modelo 3D e posteriormente construída no molde. As deformações são normalmente resultado de uma contração da peça não homogênea, ou seja, diferentes contrações em diferentes zonas da peça [28].



*Figura 21: Deformação/Empeno: A peça de cima da figura deformou em relação à de baixo[28].*

Estas deformações nas peças (Figura 21), quando são acima daquilo que é aceitável tendo em conta as tolerâncias do projeto, normalmente devem-se a variações térmicas, que posteriormente conduzem a uma peça termicamente mal estabilizada, e conseqüentemente a uma peça deformada.

Esta variação térmica está muitas vezes relacionada com sistema de arrefecimento do molde mal projetados, que conseqüentemente se traduzem em zonas (localizadas nas

cavidades e buchas) com diferenças térmicas muito acentuadas e que assim contribuem para uma peça fora das suas tolerâncias dimensionais.

Outra causa, pode ser a influência do sistema de injeção na peça, através da transferência de calor para a zona da cavidade e da bucha. Esta questão é posta muitas vezes por projetistas e injetadores de plástico, uma vez que muitas vezes tem-se o sistema de injeção com temperaturas de trabalho entre os 100 e os 300° C, bastante perto das zonas moldantes, e essa proximidade pode também contribuir para o surgimento de zonas mais quentes na peça, que conseqüentemente possam afetar a sua qualidade final.

- Queimados

Os queimados ou “Efeito Diesel” é uma marca nas peças, normalmente de cor preta, que se remove parcialmente com a passagem da mão, ou com limpeza posterior (Figura 22).

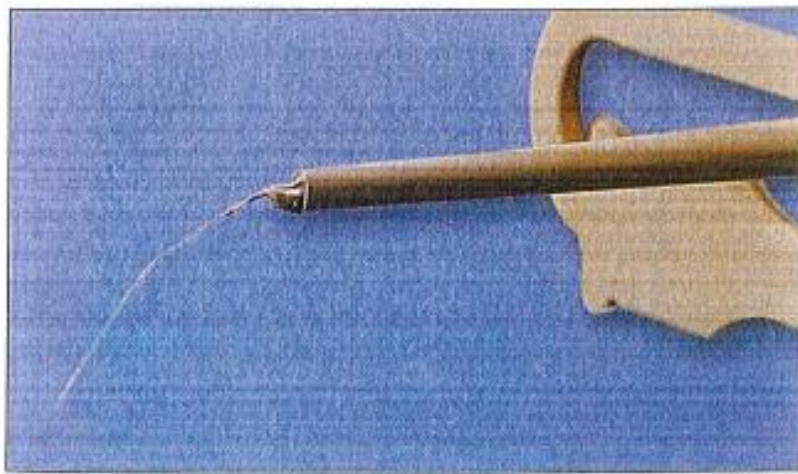


*Figura 22: Queimado.*

Este efeito ocorre normalmente porque, durante decorrer do processo de injeção, os gases dentro da cavidade, entram em degradação por efeito da velocidade e temperatura da frente de injeção. Este fenómeno também pode ser melhorado com um melhor controlo da temperatura do molde e do material, quer nas superfícies moldantes quer no controlo térmico do polímero até chegar à cavidade (câmara da máquina, injetor do molde, carburador e bicos de injeção).

- Fio

O chamado “Fio” ou filamento, é o aparecimento de uma linha de plástico que começa no ponto de injeção da peça ou do gito e prolonga-se, quando o molde abre até ao *gate* do sistema de injeção, como se pode observar na Figura 23. Este fenómeno ocorre quando a relação de temperatura entre o sistema de injeção e a cavidade ou canal onde é feita a injeção, não está corretamente controlada e a refrigeração é feita de forma deficiente. Esta situação leva a um aumento de temperatura na zona do *gate*, o que provoca um aumento de temperatura no material e conseqüente dificuldade na partição *gate* – peça.



*Figura 23: Filamento visível no gito de uma peça [28].*

Esta situação pode ser melhorada ou eliminada, com um melhor controlo da temperatura na zona do *gate*, bem como alterações no perfil de injeção da máquina.

- Degradação de Material

A degradação do material acontece quando se trabalha uma determinada matéria-prima plástica acima das temperaturas recomendadas para esse polímero (Figura 24). Este problema acontece por incorreta definição (muito elevadas) das temperaturas da câmara da máquina, carburador e bicos.



*Figura 24: Exemplo de peça com material degradado[28].*

No caso de sistema de injeção, este é colocado sempre na parte fixa do molde, sendo que é um corpo ou conjunto de corpos a uma temperatura bastante dissonante do meio envolvente, muitas vezes considerado construtivamente e do ponto de vista de projeto uma aberração, dado que está inserida numa zona onde há canais de refrigeração e temperatura controladas, com o propósito de arrefecimento da peça na cavidade, e o sistema de injeção é colocado com o propósito de manter o material fundido até à cavidade.

Sendo o sistema de injeção, um “corpo estranho” dentro do molde, é muitas vezes sobre ele que recai uma boa parte das suspeitas de causas dos problemas acima identificados, pelo que importa perceber qual a sua real influência e em que medida a sua posição e condições de funcionamento poderão mitigar ou eliminar os problemas mencionados.



## 5. Materiais e Procedimento Experimental

---

### 5.1. Escolha do *software*

---

Existem no mercado várias soluções de *software* de simulação térmica, sendo alguns dos mais conhecidos e utilizados neste tipo de aplicações o *software* Ansys, NX e Moldex 3D.

Inicialmente, pensou-se em fazer a análise em *software* Ansys, uma vez que pareceu ser o simulador mais apropriado para este efeito. Contudo, devido às limitações de utilização, nomeadamente devido à limitação de nós e malhas da versão “*Student*” do referido *software*, foi abandonado o plano inicial.

A escolha recaiu então sobre o *software* NX Siemens, fornecido à Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria pela empresa CadFlow, Lda. Este *software*, na licença disponibilizada à escola, não tem nenhum tipo de limitação a nível quer de projeto 3D, quer a nível de simulação térmica ou estrutural, pelo que foi o *software* selecionado.

### 5.2. *Software* NX Siemens 11

---

O *software* NX é um programa bastante poderoso e completo.

A sua gama de aplicação vai deste o projeto e engenharia assistida em 3D, passando pelo controlo dimensional e simulação estrutural, térmica, acústica, mecânica, entre outras.

Na Figura 25, pode observar-se o ambiente de trabalho inicial do *software* NX 11.

Neste ecrã podemos selecionar o tipo de ficheiro que queremos criar. Para a construção do ficheiro a analisar, inicialmente procedeu-se à construção do modelo “.prt”, ou seja o modelo 3D que depois deu origem ao modelo de elementos finitos.

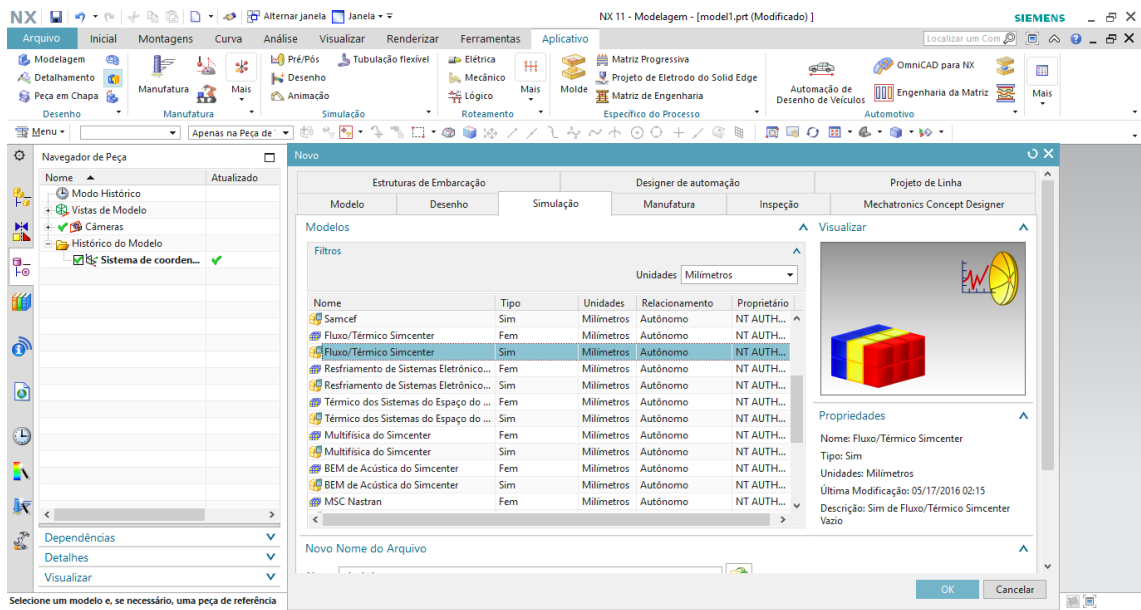


Figura 25: Ecrã Inicial NX 11.

## 5.3. Construção do modelo CAD

### 5.3.1. Sistema de injeção

Como anteriormente referido, o projeto começa com a definição e construção de um modelo em 3D, que serve de base à análise numérica. Este modelo CAD, começa por ter apenas um sistema de injeção, gentilmente fornecido pela empresa YUDO, especializada no projeto, fabricação e comercialização de sistema de canal quente.

O sistema de injeção que serve de base ao trabalho, é o que se encontra apresentado na Figura 26:

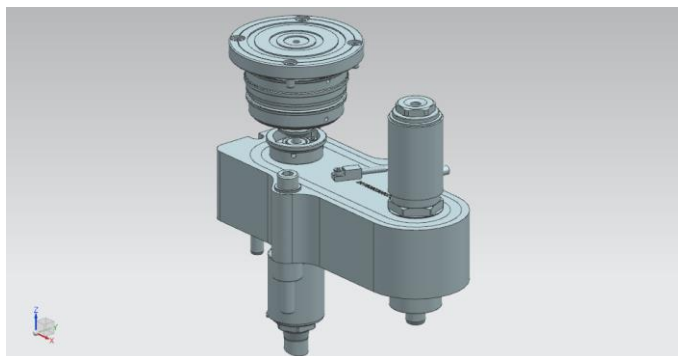


Figura 26: Sistema de Injeção utilizado - Isometric View.

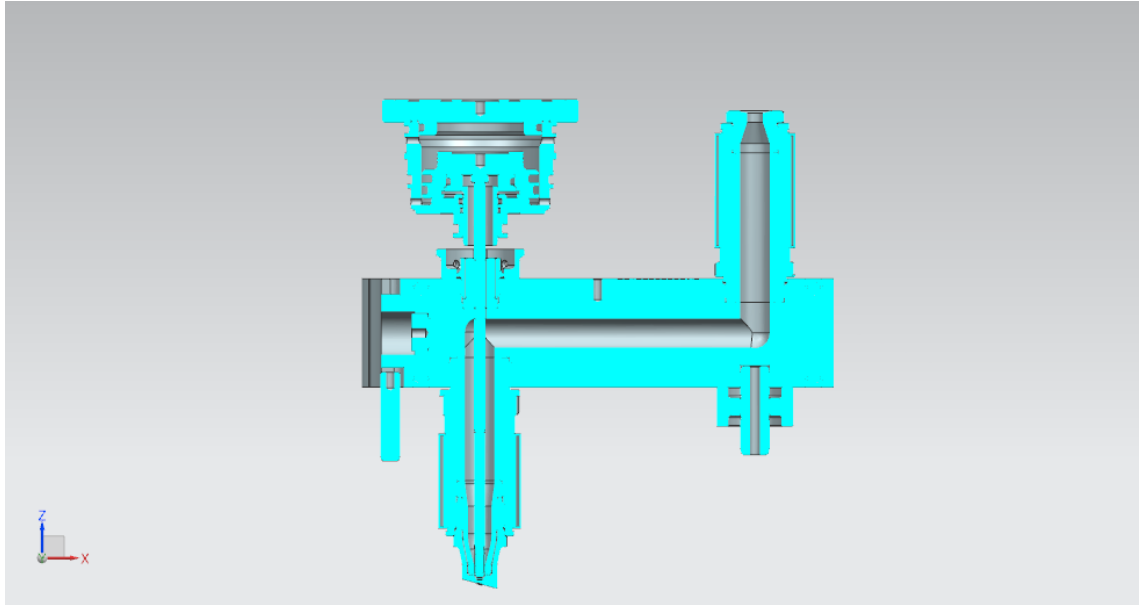
No caso, este sistema é um sistema valvulado, em que os principais constituintes são:

- Bico de injeção, onde se inclui a ponteira;
- *Manifold* ou carburador;
- Resistências;
- Injetor ou *Nozzle Locator*;
- Cilindro e válvula;
- Apoios, sondas e outros acessórios.

Este sistema foi desenhado e projetado para ser aplicado num projeto real. Nesse sentido, conclui-se que havia alguns acessórios, maioritariamente de ação mecânica que pouco ou nada poderiam influenciar esta análise unicamente de natureza térmica. Assim para efeitos de simplificação, foram retirados alguns acessórios, do sistema original, nomeadamente freios, alguns apoios, e alguns acessórios presentes no mecanismo de abertura e fecho da válvula.

De referir que, apesar de se ter utilizado um sistema do tipo valvulado, esse facto é considerado do ponto de vista térmico irrelevante. Neste caso poder-se-ia inclusivé ter utilizado uma simplificação do sistema ou um sistema *open*, contudo, entendeu-se também que o sistema valvulado é cada vez mais utilizado, ultrapassando já claramente o sistema aberto, pelo que se conclui que a utilização de um sistema valvulado seria uma situação ainda mais aproximada da realidade do que o contrário.

Na Figura 27 pode observar-se a versão simplificada do sistema de injeção utilizado na análise. Pode ver-se a configuração dos canais, a orientação da válvula, a configuração de entrada do material, bem como toda a estrutura do cilindro. O critério utilizado para a simplificação do sistema, foi a importância de determinado componente, do ponto de vista de uma análise térmica. Ou seja, todos os acessórios que por condução, radiação ou convecção poderiam adicionar ou retirar calor das partes ou peças mais próximas. No caso concreto da agulha de vedação (*valve pin*), optou-se por manter dado o contacto que esta tem quer com a peça, quer com várias outras superfícies dentro do sistema.



*Figura 27: Corte sistema de injeção simplificado.*

Outro aspeto tido em atenção foram os apoios do carburador e bicos. Na realidade dos sistemas de injeção, muitos dos pontos de apoio, funcionam também como uma espécie de ponte ou de barreira térmica. Isto é, muitas vezes o material é definido em função da taxa de transferência de calor que se pretende ter em determinado ponto. Por essa razão, foram mantidos os apoios principais.

### **5.3.2. A peça**

---

A peça, e nomeadamente a sua geometria e posição no molde, foram pontos de decisão bastante importante neste projeto de análise térmica.

Pensou-se numa geometria regular, plano com vista à simplificação da análise. A figura apresenta a configuração da peça bem como a sua posição relativa ao sistema de injeção.

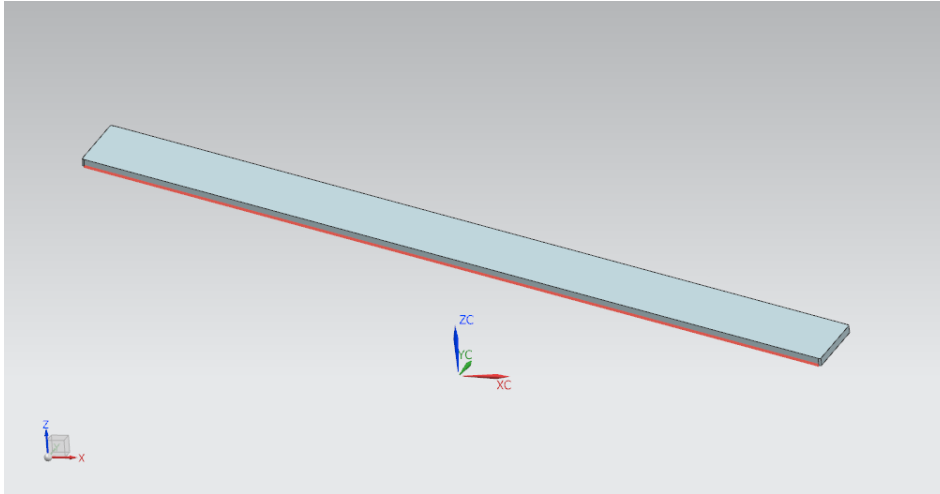


Figura 28: Peça com dimensões 335 x 50 x 3,15 [mm].

A peça utilizada é de geometria de um paralelepípedo, pelo que não há variações de espessura ao longo do corpo da mesma. As dimensões aproximadas do sólido são de 335 x 50 x 3,15 mm, Figura 28, e a posição da peça na cavidade foi escolhida no sentido de se afastar progressivamente do sistema de injeção, Figura 29.

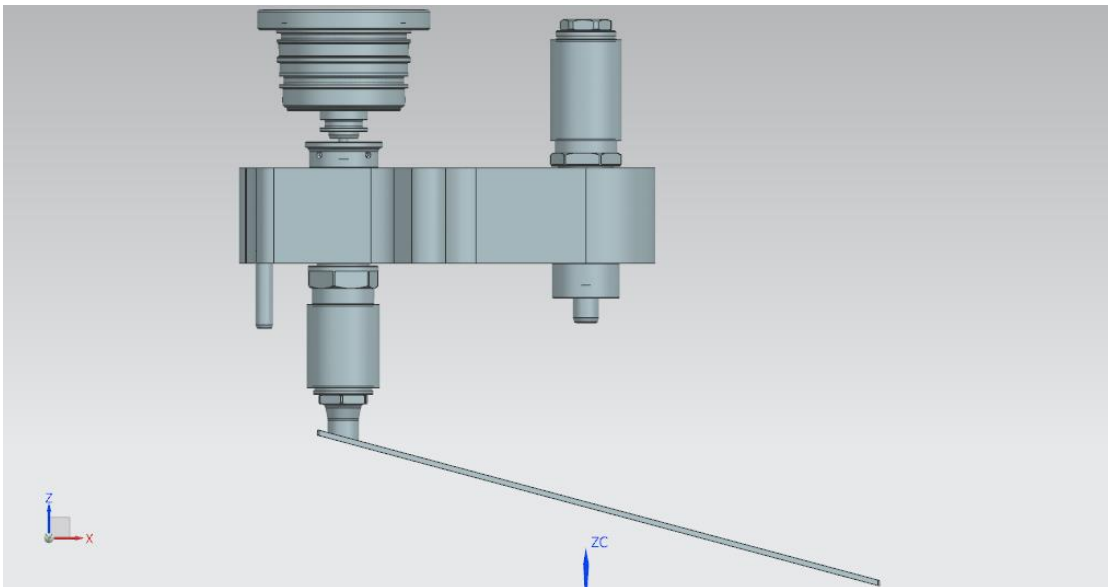


Figura 29: Vista lateral da peça com o sistema de injeção.

Ao adotar-se esta posição no molde tentou-se que a leitura dos resultados fosse mais evidente, no sentido de se conseguir ver a propagação ou dissipação de calor na peça à medida que esta se vai afastando da fonte de calor.

Considerando que todo o bloco quente gera calor, e que esse calor vai sendo transmitido à peça, quer pelo contacto direto da ponteira, quer pelo contacto da chapa da cavidade, ao garantir-se um afastamento progressivo em relação a toda essa massa térmica, pensa-se que será mais evidente a ação da temperatura do sistema de injeção ao longo da peça plástica injetada, se se tiver em conta que, o calor também se vai dissipando ao longo do seu percurso, nomeadamente por perdas para o exterior por convecção e radiação.

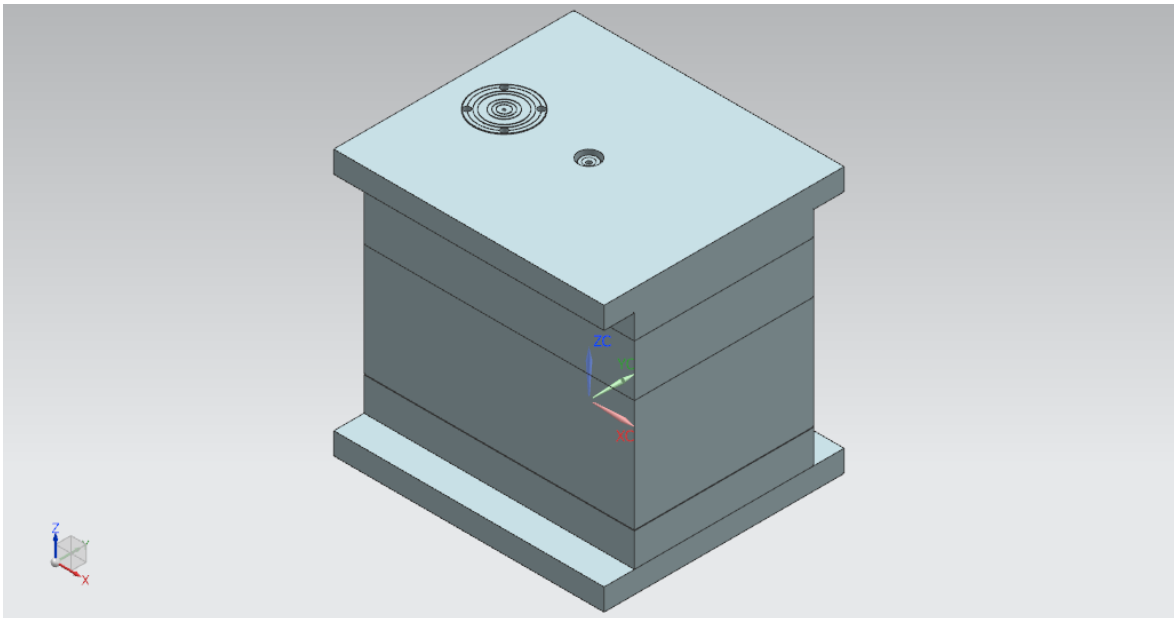
### 5.3.3. O Molde

---

O modelo CAD ou 3D do molde, à semelhança da peça, foi também modelado de raiz, a partir do software.

O que se pretendeu com este trabalho foi construir uma estrutura de molde com cinco chapas, de forma a alojar o sistema de injeção e as respetivas zonas moldantes, de forma a aproximar o mais possível de uma situação real.

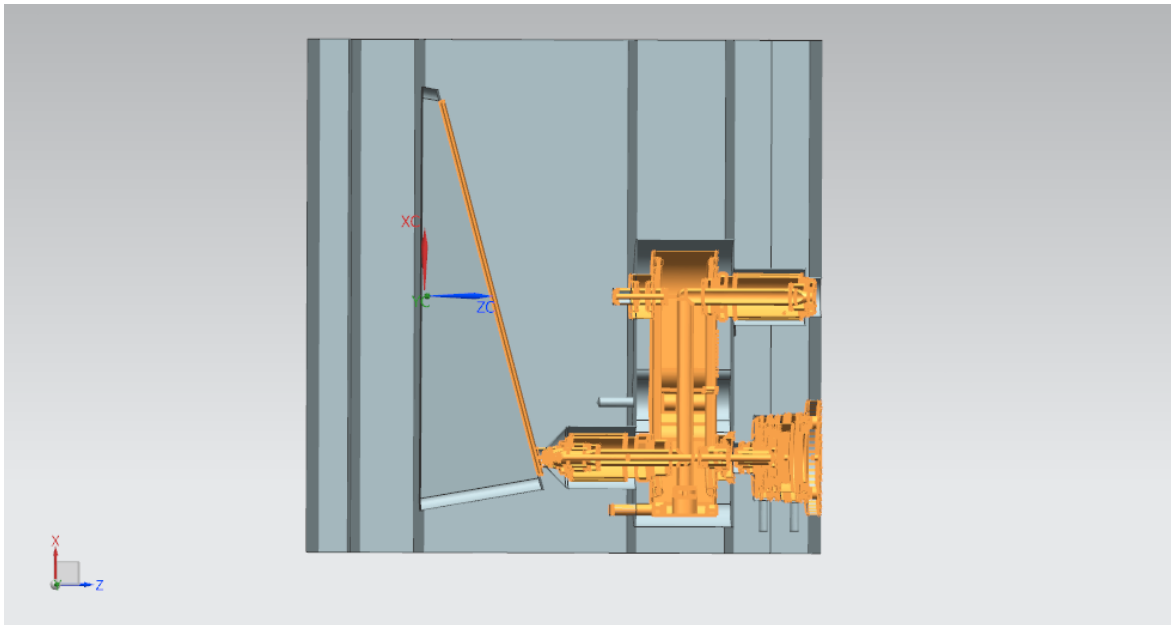
O aspeto exterior do molde modelado é o que se pode observar na Figura 30.



*Figura 30: Molde vista exterior.*

As dimensões do molde são de 446 x 396 x 438 mm, e trata-se de um molde convencional de 2 placas, ou seja uma cavidade e uma bucha, concebido para injeção horizontal.

Mais uma vez, foi modelada uma arquitetura de molde o mais aproximado possível da realidade da indústria, e também se optou pela geometria mais comum na indústria dos moldes, Figura 31.



*Figura 31: Molde Corte Lado operador*

Nesta análise não foi introduzido nenhum tipo de refrigeração no molde, uma vez que é uma análise em estado estacionário. Para esta decisão, também se leva em linha de conta o facto de também não se introduzir o escoamento do fluído dentro da cavidade, e assim a opção da não introdução do fator de refrigeração.

## 5.4. O Modelo FEM

---

O modelo FEM, - *do inglês Finite Element Method*, constroi-se a partir do modelo CAD tridimensional.

O modelo de malhas consiste em atribuir uma malha a cada corpo, superfície, vértice ou aresta do modelo 3D. Este procedimento é o procedimento base de qualquer análise de

elementos finitos e é a partir daqui e das opções aqui tomadas que se define uma grande parte do rigor e da precisão do resultado final.

Ao criar as malhas de elementos finitos dos vários corpos constituintes do modelo cada, foram também definidos os materiais constituintes dessas mesmas malhas, uma vez que, pelo *software*, essas duas operações serão realizadas no mesmo procedimento. Os materiais selecionados serão analisados seguidamente, pelo que neste subcapítulo serão analisados os pontos referentes à malha de elementos finitos.

De entre as principais opções presentes no *software* ao criar-se a malha, pode elencar-se as seguintes como sendo as mais importantes:

- Geometria

A geometria da malha foi um dos fatores escolhido. No caso optou-se por uma malha tetraédrica, Figura 32:

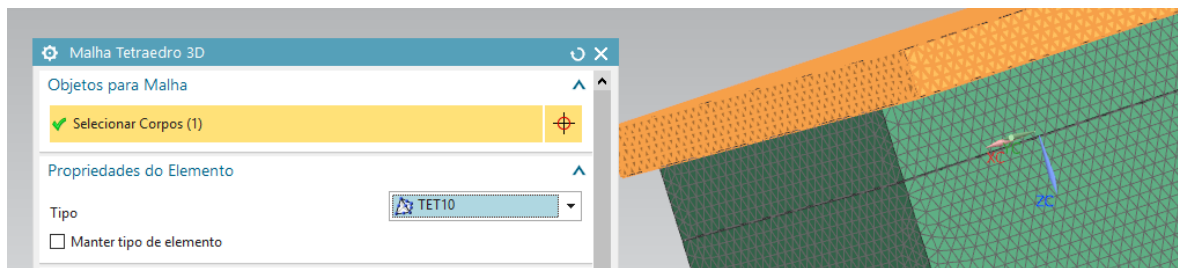


Figura 32: Malha Tetraédrica 10.

- Tamanho

O tamanho da malha é o fator mais importante na definição da qualidade final e no rigor da análise. Quanto mais pequeno ou mais fino o tamanho da malha, mais aproximado do real será a análise. Neste trabalho optou-se por utilizar dois tamanhos de malha:

- 5 mm, Figura 33, para as peças e corpos de menores dimensões e também de maior relevância para a análise, quer seja pela sua proximidade às fontes de calor, quer pela sua influência direta na cavidade e na peça.

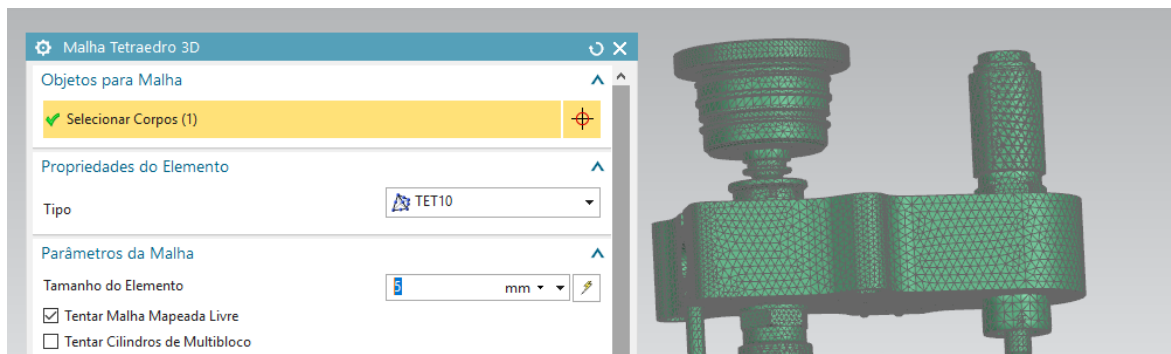


Figura 33: Malha tamanho 5mm.

Assim, os sólidos selecionados para esta dimensão de malha foram os do carburador, bicos, NL, resistências, cobres, apoios, cilindros e válvulas, bem como a peça de plástico presente na cavidade.

- 10 mm, Figura 34, para todas as chapas principais e restantes constituintes do molde. Este tamanho, sendo uma medida mais grosseira, pareceu ser adequado para estas regiões não tão fundamentais na análise. Uma malha de 5mm causaria um esforço adicional das máquinas utilizadas na análise, e inclusive uma maior probabilidade de o algoritmo entrar em colapso, Figura 34:

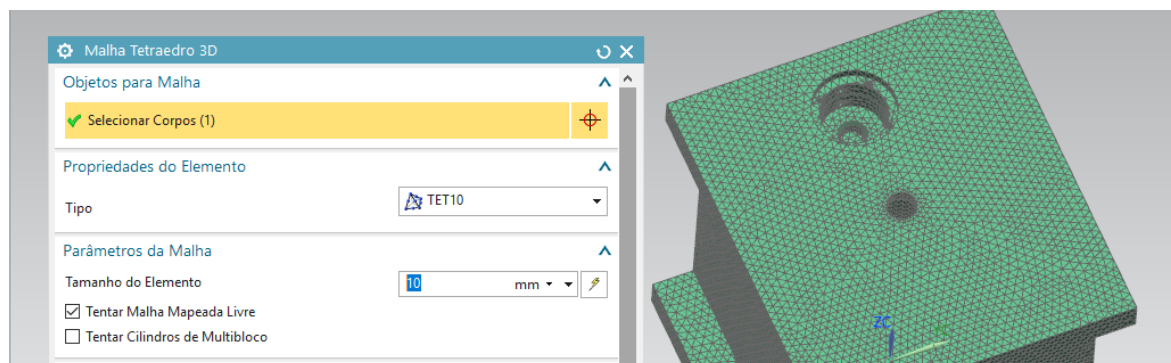


Figura 34: Malha Tamanho 10mm.

Neste projeto optou-se por trabalhar sempre com malha tridimensional, na medida em que não se pretende analisar comportamentos térmicos de superfícies isoladas, mas sim através de sólidos tridimensionais. Ou seja, o que se pretende observar e concluir, é de certa forma a penetração de calor proveniente do sistema de injeção, na peça plástica e zonas limítrofes. Ness sentido, é irrelevante concentração de calor no plano 2D da peça ou das

áreas adjacentes, pelo que se entendeu como não necessário a criação de malhas bidimensionais.

## 5.5. O Modelo SIM

A criação do modelo SIM (ficheiro de simulação) consiste na finalização do ficheiro de simulação. Neste módulo, que no NX 11 se tem o nome de *Simcenter*, o *software* dá acesso à interface de simulação.

Esta plataforma dá a possibilidade de definir todos os pontos e parâmetros que interferem com a simulação térmica efetuada.

Todas as opções tomadas e seleccionadas neste menu são depois memorizadas no menu lateral presente na Figura 35:

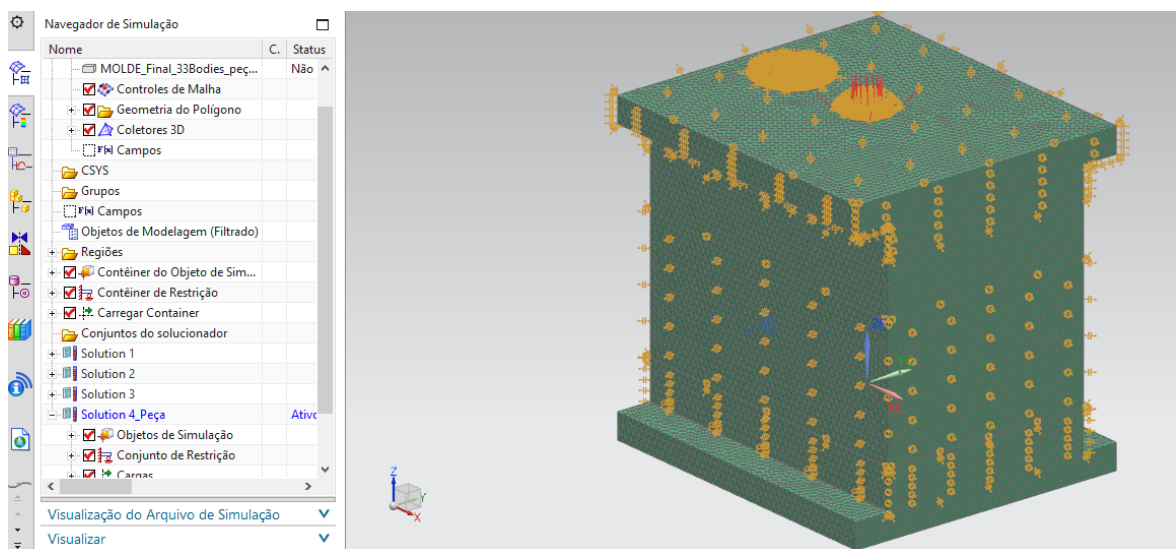


Figura 35: Menu lateral Simcenter.

Neste módulo do *NX*, todos os parâmetros da simulação têm de ser definidos, pelo que é nesta fase que se dá todos os *inputs* à simulação em função dos resultados que se pretende obter. No submenu “Cargas e Condições” definiram-se os valores, tipos e quantidade dos vários pontos de análise.

Os principais comandos utilizados nesta simulação foram os seguintes:

- **Tipo de carga**

No caso de uma simulação térmica selecionou-se o submenu “Cargas Térmicas” e aqui foram definidas 4 cargas diferentes, correspondentes às resistências diferentes:

- **Resistência do *Manifold Lado Bico*:** Esta é a resistência que está colocada na face do *manifold* ou carburador que o bico de injeção. Foi definida uma potência de 1000 Watts. Em condições reais, este valor oscila entre 930 e 1115 Watts, dependendo da aplicação.
- **Resistência *Manifold Lado NL*:** Esta é a resistência que está colocada na face do *manifold* do lado do NL ou injetor do molde. Foi definida uma potência de 1000 Watts. Em condições reais, este valor oscila entre 930 e 1115 Watts, dependendo da aplicação.
- **Resistência NL:** Esta é a resistência que envolve o NL. Esta é a resistência que envolve o NL. Neste caso foi definida uma potência inferior, correspondente a 600 Watts. Em condições reais, este valor oscila entre 210 e 1070 Watts, consoante comprimento do NL.
- **Resistência Bico:** Esta é a resistência que envolve o bico de injeção. Foi também definida uma potência de 600 Watts. Em condições reais, este valor oscila entre 210 e 1070 Watts, consoante o comprimento e aplicação do bico.

Na Figura 36, podemos ver as quatro fontes de calor ou cargas acima descritas:

Solution 4_Peça		Ativo
<input checked="" type="checkbox"/>	Objetos de Simulação	
<input checked="" type="checkbox"/>	Conjunto de Restrição	
<input checked="" type="checkbox"/>	Cargas	
<input checked="" type="checkbox"/>	RESISTÊNCIA MANIFOLD LADO BICO	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	RESISTÊNCIA MANIFOLD LADO NL	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	Bico	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	NL	<input checked="" type="checkbox"/>

Figura 36: Conjunto de Cargas aplicadas.

Convém também referir que, ao aplicar-se uma carga, define-se apenas a sua potência. Ou seja, à semelhança do que acontece na realidade, em que são aplicadas resistências com uma constante fixa de potência por massa, no valor de 250 Watts/kg, nesta simulação aplicou-se uma carga dentro dos valores normais. A temperatura efetiva é depois controlada através de um termostato também definido. A temperatura testada e pedida foi de 300°C, pelo que o intervalo pedido foi de + ou - 5 ° C (Figura 38).

Na Figura 37 podem verificar-se os vários termopares utilizados bem como as suas alocações por resistência correspondendo ao nome:

Nome	Etique...	Tipo	
Manifold Lado NL	1	Thermostat	
NL	4	Thermostat	
Bico	5	Thermostat	
Manifold Lado Bico	6	Thermostat	

Figura 37: Lista de controladores utilizados.

Seguidamente, pode ver-se também em pormenor o menu do termopar correspondente à resistência do carburador do lado do bico.

The screenshot shows a software interface for configuring a temperature sensor. The window title is 'Manifold Lado NL'. It is divided into several sections:

- Objeto de Modelagem:**
  - Nome: Manifold Lado NL
  - Etiqueta: 1
- Propriedades:**
  - Descrição: (empty field)
  - Sensor:**
    - Sensor de Temperatura: Seleccionado
    - Referência de Grupo
    - Seleccionar Objeto (1) (highlighted in yellow)
    - Excluído: (dropdown menu)
- Controle:**
  - Temperatura de Ativação: 295 °C
  - Temperatura de Desativação: 305 °C

Buttons for 'OK' and 'Cancelar' are at the bottom.

Figura 38: Pormenor termopar.

## • Restrições

No que diz respeito às limitações e também a todo o tipo de perdas impostas ao sistema, estas são definidas no menu “Tipo de Restrição”. Neste menu são possíveis selecionar várias condições limitadoras do sistema, sendo que algumas não se enquadram no tipo de análise pretendida.

As restrições definidas para este estudo foram as seguintes:

- **Convecção para o meio ambiente:** foi definida uma convecção livre para o ambiente envolvente, de todas as superfícies exteriores do molde. A temperatura ambiente convencionou-se ser de 10°C.
- **Radiação para o meio ambiente:** foi definida uma perda de calor por radiação para o meio ambiente. Definiu-se o corpo como um emissor *GBVF* (*Gray Body View Factor*), com uma emissividade definida com valor de 1.
- **Condições iniciais:** Definiu-se que as condições iniciais de todo o sistema eram 20°C.
- **Temperatura da peça:** Definiu-se uma temperatura de todo o corpo da peça constante e igual a 300° C.

Na Figura 39 pode observar-se graficamente o conjunto de restrições aplicadas a esta simulação:



Figura 39: Restrições Aplicadas.

- **Contactos**

Os contactos entre peças bem como as taxas de transferência de calor são definidos no menu “Tipo de Objeto de Simulação”. Neste campo, aplicou-se contacto perfeito entre todas as superfícies. No total fez-se 45 contactos, na sua maioria definidos como contactos perfeitos de superfície, para simplificação do teor da análise.

## **5.6. Materiais Seleccionados**

---

Para a análise numérica produzir um conjunto de resultados fiáveis e realistas, as decisões de escolha de materiais são de extrema importância, uma vez que cada material tem características térmicas e mecânicas particulares e conseqüentemente resultados de análise também diferentes.

A principal premissa desta análise no que a decisão sobre materiais diz respeito prende-se com a necessidade de seleccionar os mesmos materiais e componentes utilizados na indústria em questão. Ou seja, procurou-se fazer uma pesquisa sobre os principais materiais utilizados pela indústria de moldes e também pelo fabricante de sistema de injeção YUDO.

Para a análise escolheram-se vários tipos de aço, tendo em conta o tipo de aplicação a que se destinava esse material. Houve também necessidade de seleccionar materiais mais condutores, em concordância com as práticas comuns na indústria.

Para a definição da malha da peça presente na cavidade, houve também a necessidade de se seleccionar um material polimérico.

### **5.6.1. Aços**

---

Na indústria dos moldes, é utilizada uma larga gama de aços, sendo que os diferentes tipos de aços são muitas vezes seleccionados em função quer da aplicação do molde, quer da zona do molde que vão integrar. Por exemplo, é comum, para moldes de aplicação no fabrico de peças para área automóvel, serem utilizados aços com uma maior tenacidade, resistência ao desgaste e à corrosão, comparativamente com outras áreas de aplicações domésticas ou decoração [28]. Outras especificidades de cada projeto, tais como, a condutividade térmica

e a pureza do material, o número de ciclos do molde, acabamento superficial, condições de trabalho e a dimensão do próprio molde, são levados em conta na seleção do tipo de aço.

Paralelamente, como referido anteriormente, são também definidos os tipos de aços em função da zona do molde que cada geometria de aço irá ocupar. Ou seja, para zonas moldantes, consideradas as mais importantes do molde, são aplicados aços mais nobres, mais resistentes e mais condutores. Contrariamente, nas zonas periféricas – chapas exteriores e acessórios não moldantes - são utilizados aços economicamente mais viáveis.

Na indústria de fabricação de sistemas de câmara quente ou *Hot Runners*, genericamente, utilizam-se os mesmos principais de decisão para selecionar as diferentes ligas de aço: zonas em contacto com a matéria prima, são as zonas de maior enfoque na qualidade e escolha de materiais. No caso dos sistemas de injeção há ainda outro tipo de critérios que se levam em conta na seleção, nomeadamente a existência de aditivos no material, nomeadamente, fibra de vidro, fibra de carbono, fibra de metal, talco, carbonato de cálcio, entre outras. Todos estes componentes que são associados à matéria prima, para as mais variadas finalidades, provocam um desgaste maior em todas as superfícies de contacto, o que obriga os fabricantes a selecionar materiais de maior resistência à abrasão.

Na análise efetuada, pretendeu-se fazer uma análise exclusivamente do ponto de vista térmico, pelo que foram definidas apenas características físicas, térmicas e mássicas dos materiais. Na Figura 40 apresenta-se a lista de aços utilizada para efeito da simulação:

#### Lista de Materiais

Materiais Locais			
Materiais			
Nome	Usado	Categoria ▲	Tipo
AÇO 2083 - AISI 420	✓	Aço Carburador	Isotrópico
AÇO 2344 - AISI H13 PREMIUM	✓	Chapas Cavidades	Isotrópico
AÇO 1730 - AISI 1045	✓	Chapas de Fora	Isotrópico

Figura 40: Lista de aços e local de utilização.

Na Tabela 3 pode consultar-se as propriedades térmicas e mecânicas dos aços utilizados:

Tabela 3: Propriedades dos aços utilizados[29].

Nome Genérico	Referência Fabricante (Ramada Aços)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Condutividade Térmica (W/mK)	Calor específico (J/kg.K)
Aço 1.2083	Uddeholm Mirrax 40	7.70	20	480
Aço 1.2344	MG50 - Uddehplm Orvar Supreme	7.80	25	480
Aço 1.1730	F10	7.84	15.1	480

## 5.6.2. Ligas não ferrosas

Para além das ligas de aço, foi também necessário utilizar nesta simulação um conjunto de matérias, normalmente utilizados nesta indústria, com propósito maioritariamente térmicos, ou seja, de elevada taxa de transferência ou taxa de resistência à transmissão de calor.

Estes materiais, são selecionados em função da utilização que terão no molde ou no sistema de injeção, e muitas vezes a sua seleção está intimamente ligado com o tipo de processo ou peça plástica que se via injetar. Da Tabela 1, (ver página 31) poderia retirar-se alguns dos materiais mais condutores, como o ouro, a prata ou o cobre. Outros há, menos condutores como por exemplo o Titânio. Na Figura 41, podem observar-se os materiais de ligas não ferrosas utilizadas na simulação, enquanto que na Tabela 4, pode consultar-se as propriedades consideradas na análise.

### Lista de Materiais

Materiais Locais			
Materiais			
Nome	Usado	Categoria	Tipo
Tungsten	✓	METAL	Isotrópico
Titanium_Ti-6Al-4V	✓	METAL	Isotrópico
Cobre 2.1247 / EN CW101C	✓	Cobre Tip IN e END Plug	Isotrópico
Cobre 2.0857 / EN CW111C	✓	Revestimento Resistências	Isotrópico

Figura 41: Ligas não ferrosas utilizadas.

Tabela 4: Propriedades das ligas não ferrosas. Fonte: YUDO

Nome Genérico	Referência Fabricante (Ramada Aços)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Condutividade Térmica (W/mK)	Calor específico (J/kg.K)
Tungstênio	Utilizado material de biblioteca	19.3	178	128
Titanium_Ti-6Al-4V	Utilizado material de biblioteca	4.43	7.5	580
Cobre 2.1247	Moldmax LH	8.36	155	376
Cobre 2.0857	Moldtherm	8.90	225	376

### 5.6.3. Polímero

Para efeitos desta simulação, o polímero selecionado foi o ABS (*Acrylonitrile – Butadiene -Styrene*). Este polímero de estrutura molecular amorfa, é talvez um dos polímeros mais utilizados, em aplicações de média e alta complexidade. Dada a sua relativa facilidade de preparação e processamento, é comum ser utilizado em áreas tão distintas como a indústria automóvel, aeroespacial, elétrica, brinquedos, entre outras.

O ABS, para ser transformado pelo processo de injeção, necessita ser previamente desumidificado, em desumidificador apropriado, durante um período de 2 a 4 horas, e uma temperatura constante de 80 a 90° C. Este tratamento, permite que o polímero liberte as moléculas de água naturalmente presentes, e que as suas propriedades mecânicas não sejam diminuídas.

Mecânicas	Valor Típico	Unidade	Método
Módulo de Tensão	7000	MPa	ISO 527-2
Esforço de tensão (Na Ruptura)	90,0	MPa	ISO 527-2
Deformação por tensão (Limite de elasticidade)	1,5	%	ISO 527-2
Módulo de Flexão	6000	MPa	ISO 178
Resistência à flexão	130	MPa	ISO 178
Flexural Strain at Flexural Strength	1,9	%	ISO 178

Figura 42: Propriedades mecânicas do ABS [30].

Na Figura 42 podemos observar algumas propriedades mecânicas do ABS, enquanto que na Tabela 5 se faz referência aos principais parâmetros de máquinas no que diz respeito à transformação de ABS pelo processo de injeção. Todos os conceitos que dizem respeito ao processo, são explicados no capítulo glossário.

Tabela 5: Propriedades de transformação do ABS. Fonte: YUDO.

ABS (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene)				
Regulação Standard da IMM, sujeita a ajustes em função do grade do material				
	Bico	Frente	Centro	Atrás
Temperatura da Câmara	225-250°C	225-250°C	210-225°C	195-205°C
Temperatura da Descarga	230-260°C	Medida com termómetro externo após descarga livre pelo bico da máquina		
Temperatura do canal quente	235-260°C			
Temperatura do molde	50-95°C	O aumento de temperatura melhora o acabamento superficial		

Velocidade de injeção	Baixa a média
Pressão específica de injeção	700-1400 Bar
Contra pressão	3-5 Bar
Velocidade de plastificação	30-60 rpm

Estrutura	Amorfa	
Densidade	1,05	
Viscosidade	Média	
Comprimento de fluxo	90 mm / 1 mm	370 mm / 2 mm
Susceptibilidade ao cisalhamento	Média	Podem ser usados gates médios
Janela de Processamento	Média	Necessita de temperatura bem controlada e estável
Tempo de Residência	Médio	Visar um tempo de residência curto

Pela tabela podemos observar por exemplo a temperatura exigida do canal quente (235 a 260°C) e também a temperatura exigida no molde, ou seja, na superfície da cavidade e da bucha (50 – 95°C).

Estas condições de processamento permitiram ter o *input* de temperaturas que necessitamos para introduzir no simulador, bem como enquadram assim os resultados, num contexto real de processamento do polímero.

## 6. Descrição e interpretação de resultados

### 6.1. Condições de análise

Na presente simulação, optou-se por uma peça de geometria simples, como anteriormente referido neste relatório, com o objetivo de minimizar as variáveis em análise.

Na simulação, procurou testar-se vários cenários de temperatura, potências aplicadas sob a forma de cargas, e tipos de limitações à normal propagação de calor nos sólidos analisados. Nesse sentido, obtiveram-se, dois conjuntos distintos de resultados, que se passam a descrever de seguida.

### 6.2. Limitação da temperatura na peça

A primeira fase de simulação, consistiu em criar uma limitação de temperatura na zona da peça, ou seja, assumir que a zona moldada estava sempre a uma temperatura constante, e que todo o conjunto de corpos atuaria com essa limitação. De salientar que esta condição entra na análise em forma de limitação / restrição ao processo. Nesse sentido, e no ponto de vista puramente teórico, não haverá variação de temperatura nesse corpo. A Figura 43 ilustra o ponto de partida para o primeiro conjunto de análise:

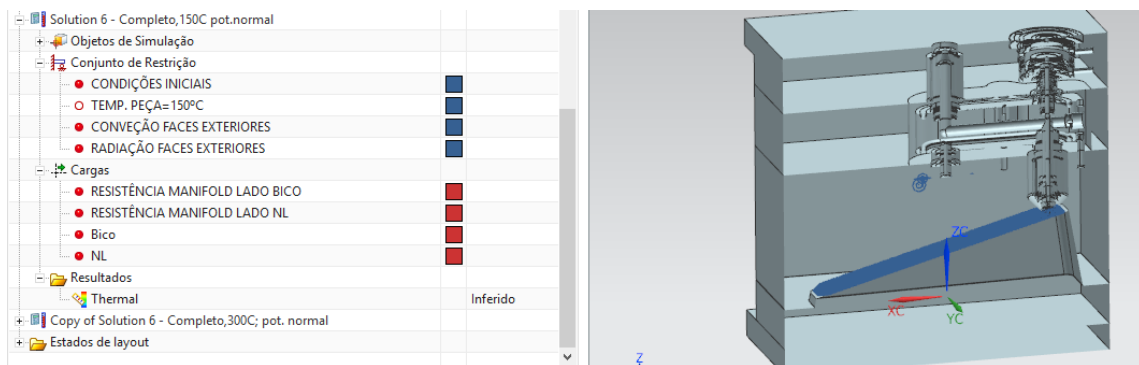


Figura 43: Limitação da temperatura de peça a 150°C.

Na primeira análise, definiu-se a temperatura igual a 150° C, simulando uma situação de temperatura bastante acima da temperatura normal de desmoldagem de uma peça em ABS.

Posteriormente, foram também efetuadas outras simulações, com temperaturas superiores e inferiores, como ilustra a Figura 44.

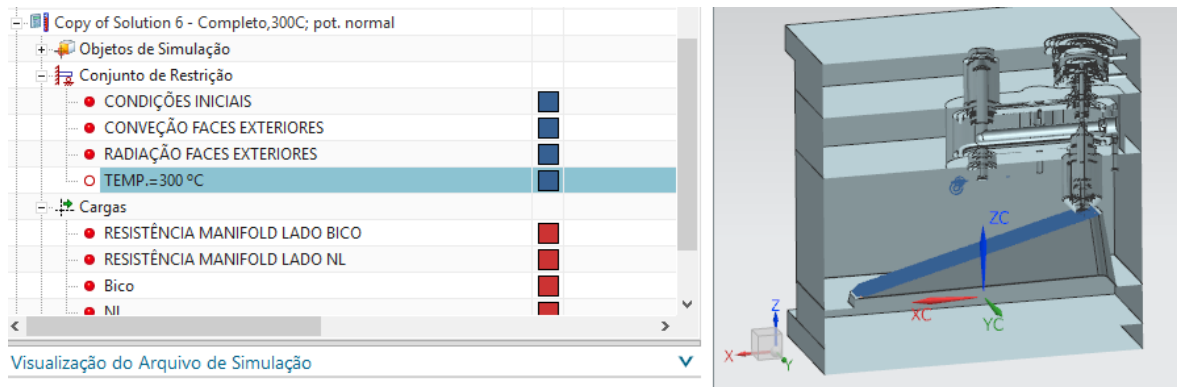


Figura 44: Limitação da Temperatura de peça a 300°C.

Ao longo de todo o processo de simulação, foram feitos vários testes e combinações de critérios de entrada, para que o resultado final fosse o mais aproximado possível.

Nesse sentido, fizeram-se correr simulações desde a temperatura de 100°C, temperatura que se convencionou ser a mais baixa adequada à simulação, passando por temperaturas intermédias de 150°C, 200°C, e 250°C, com o objetivo de se ir medido e acompanhado a evolução dos resultados. Com este perfil, conseguiu observar-se exatamente o comportamento e evolução da distribuição, nos diferentes estágios de temperatura. Como último patamar de análise neste ponto, definiu-se uma temperatura de peça limitado a 300°C, ou seja, igual à temperatura pedida para todo o sistema de injeção, de forma a analisar-se o comportamento da distribuição.

O último estágio de análise, consistiu na não limitação da temperatura da peça, ou seja, na possibilidade de aquecimento livre da zona da peça, não considerando nenhum tipo de entrave ao seu normal aquecimento pelos mecanismos de transferência de calor conhecidos.

## 6.3. Resultados

Na análise de resultados, começou-se por analisar as variantes, partindo de uma temperatura próxima da temperatura de desmoldação de uma peça em ABS, conforme apresentado na Figura 45:

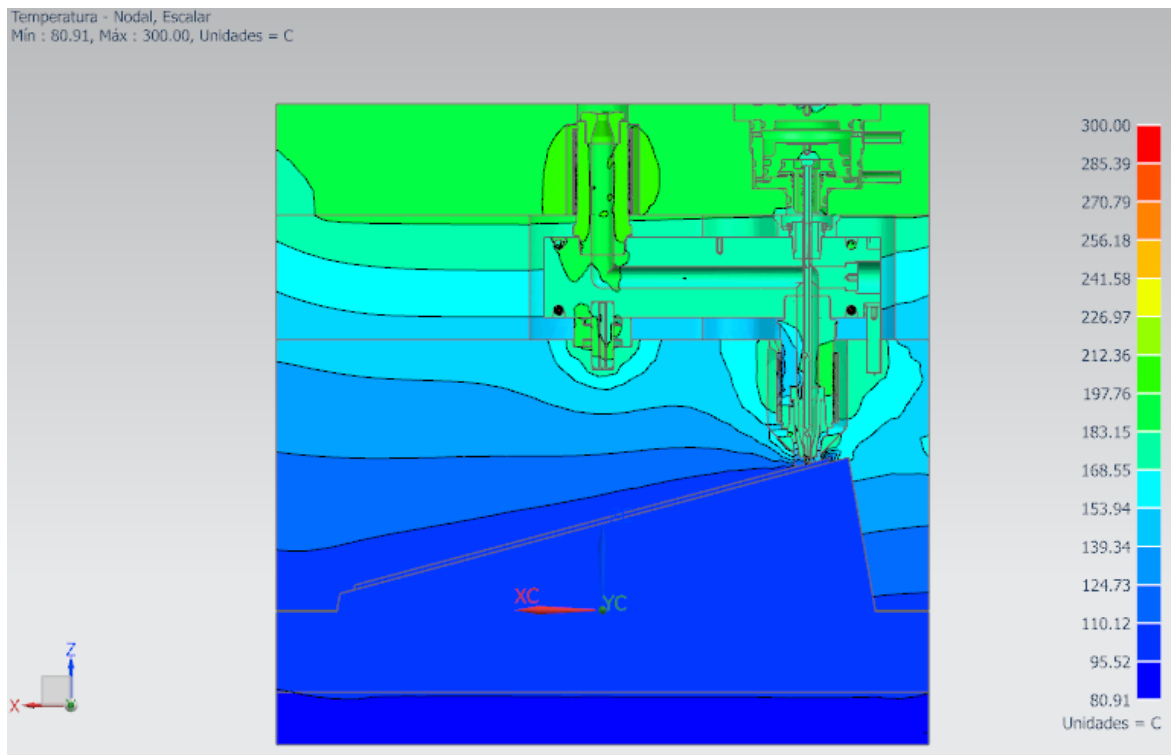
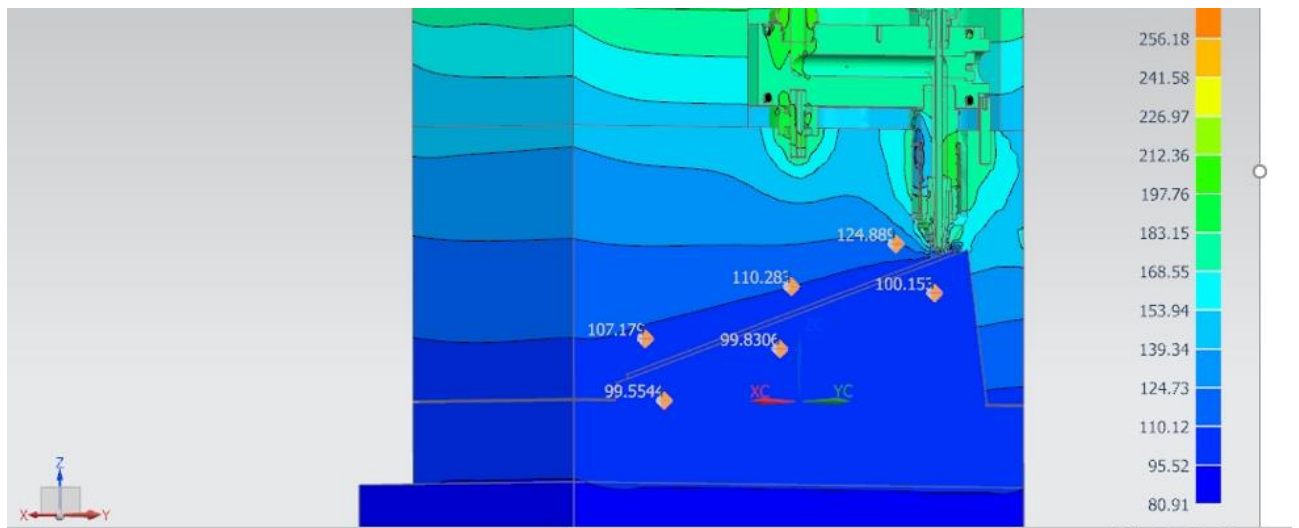


Figura 45: Temperatura de peça limitada a 100°C.

Ao observar-se esta primeira imagem de simulação, é curioso observar que a temperatura da peça funciona como uma espécie de barreira térmica, ou mesmo como absorvente de calor. Pela imagem, e pelo pormenor apresentado na Figura 46, percebe-se que a temperatura se distribui, formando linhas isotérmicas, com menores espaçamentos na parte superior da peça, e no prolongamento da chapa da cavidade. Podemos também verificar as temperaturas máximas, que são muito superiores na parte superior, crescendo gradualmente com a aproximação às fontes de calor, e nessas zonas, aproximando-se das temperaturas solicitadas.



*Figura 46: Pormenor das temperaturas limítrofes da peça.*

É também oportuno observar o comportamento da distribuição de calor na zona direita da imagem, no prolongamento da chapa da cavidade. Nessa zona o calor segue o mesmo padrão de transferência da parte superior do molde, sofrendo o efeito “barreira” da peça, acima referenciado.

Na Figura 47 apresentam-se resultados da simulação para uma temperatura de peça limitado a 150°C. Nesta nova simulação, o padrão de distribuição mantém-se similar à simulação anterior.

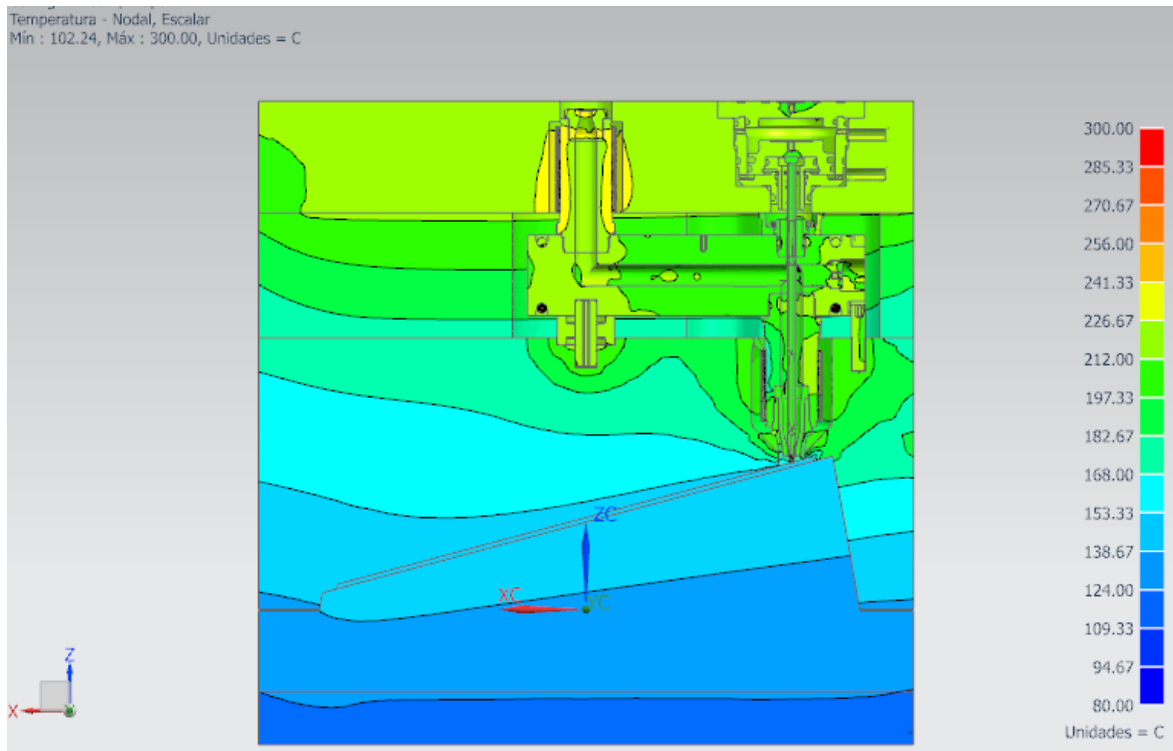


Figura 47: Temperatura na Peça = 150°C.

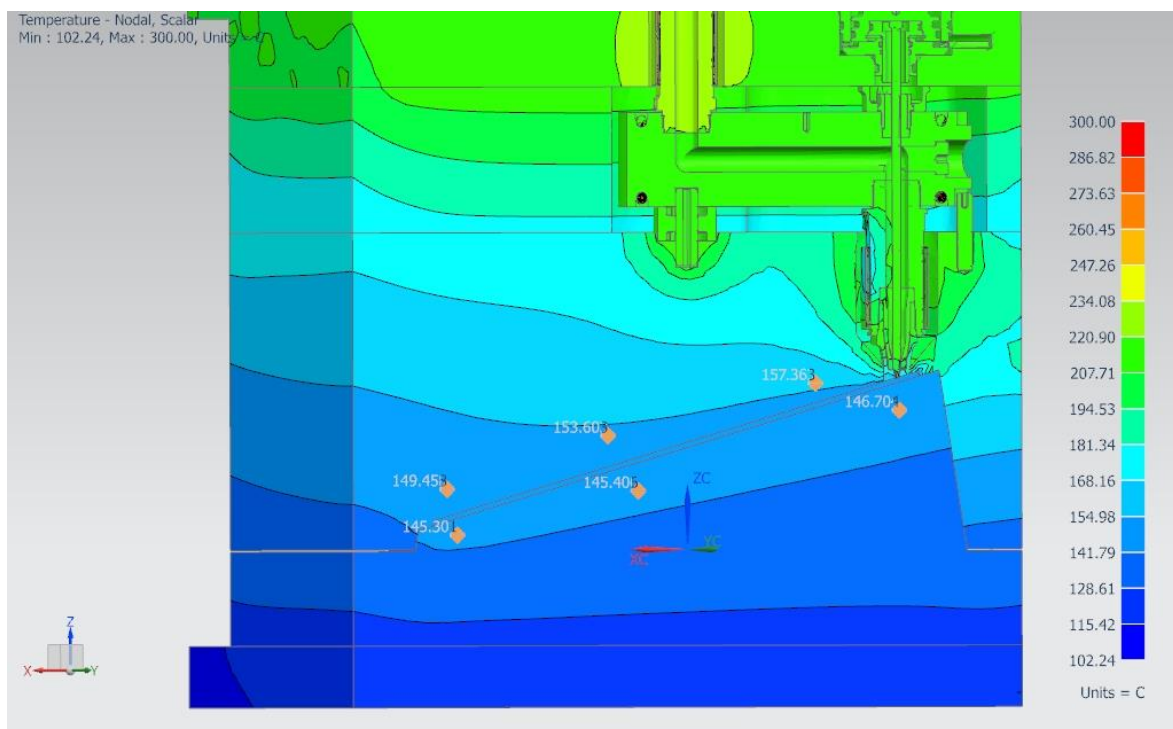


Figura 48: Temperatura nas zonas limítrofes da peça.

Continuando com a sequência, na Figura 49 e Figura 50 temos o resultado da limitação da temperatura a 200° C:

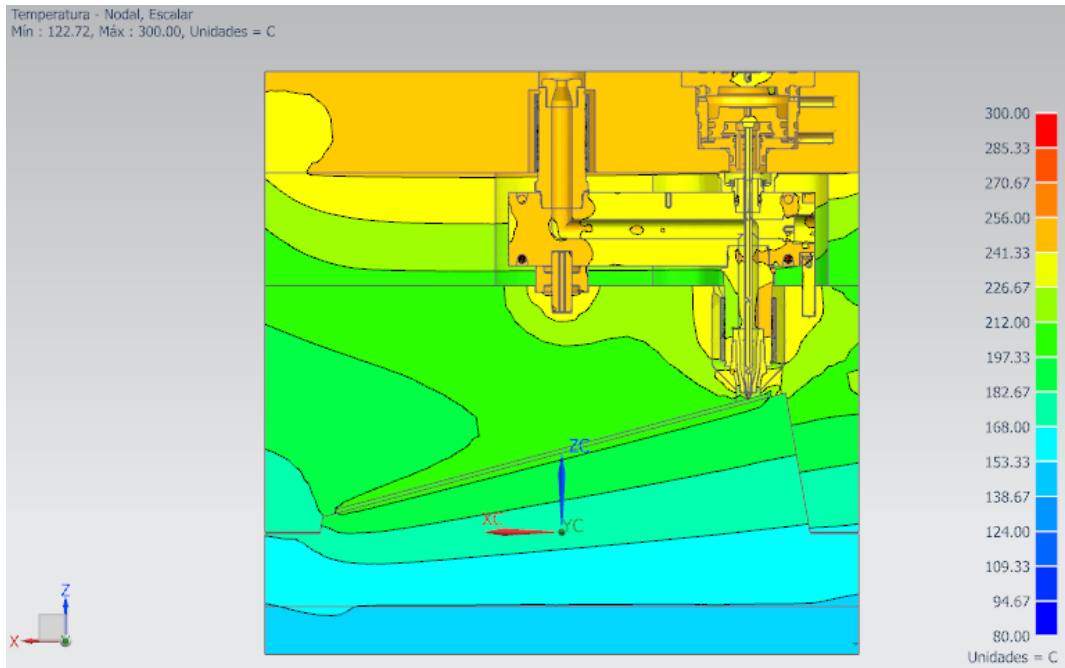


Figura 49: Temperatura da peça limitada a 200°C.

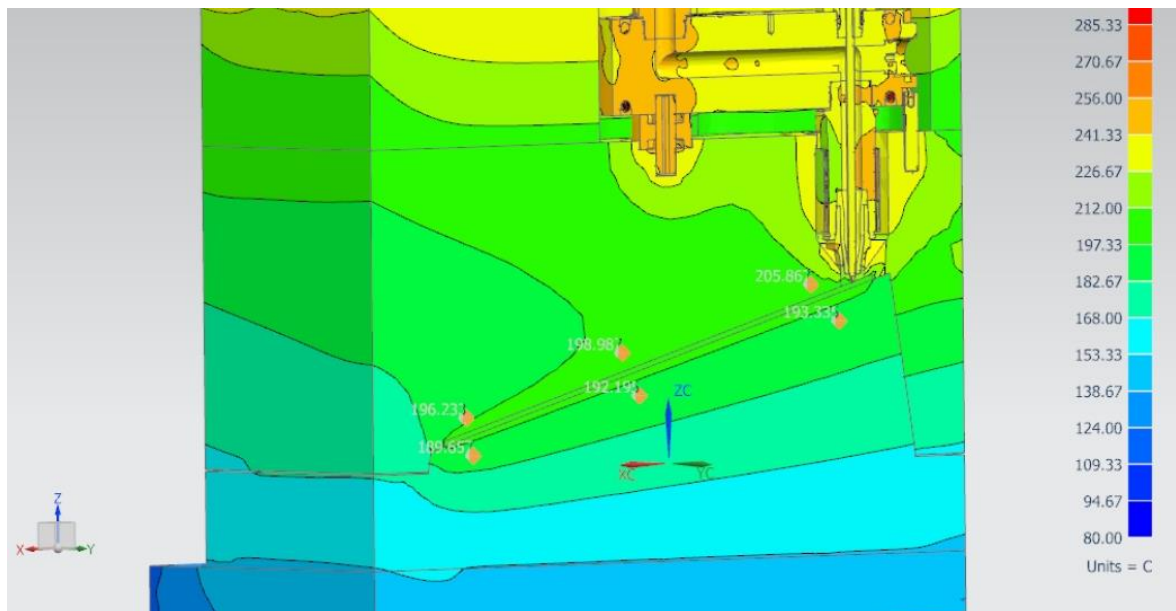
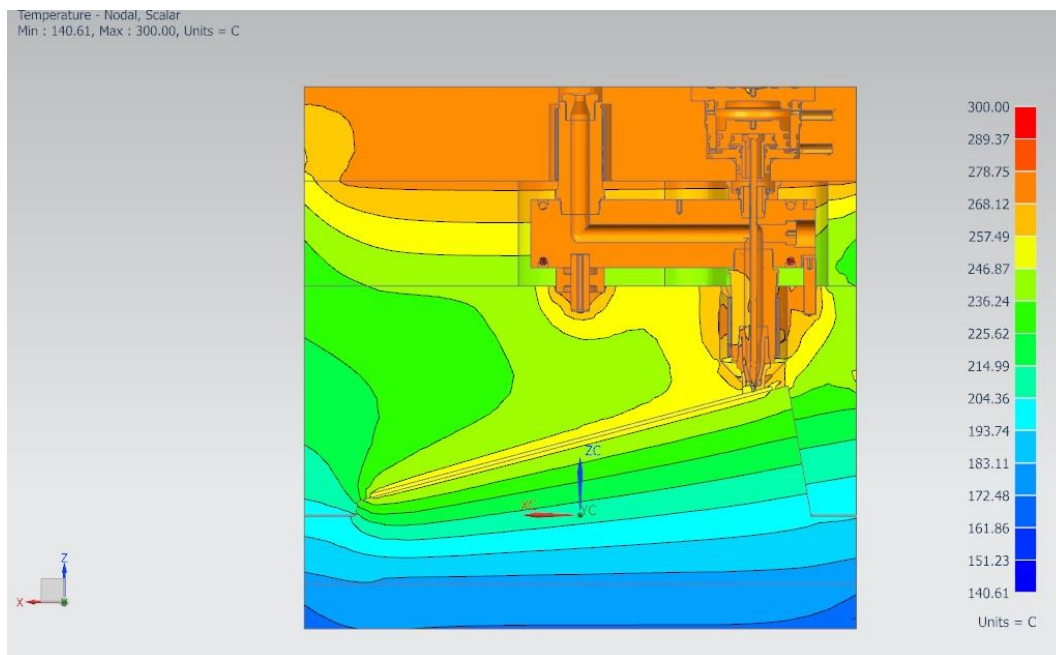


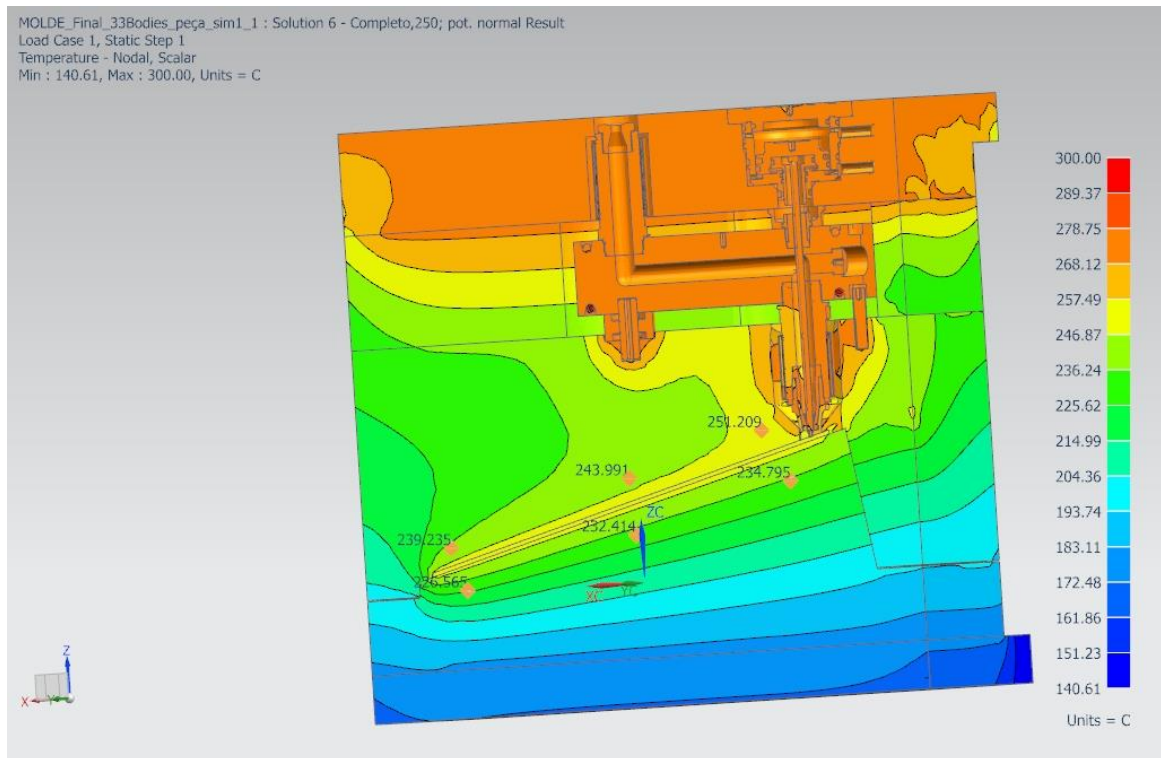
Figura 50: Pormenor das temperaturas limítrofes da peça.

Na Figura 51, podemos observar o resultado da temperatura da peça limitada a 250°C:



*Figura 51: Temperatura da peça limitada a 250 °C.*

Neste estado, e com o aproximar da temperatura a que limitamos a peça com a temperatura que se pode no sistema de injeção, nota-se uma convergência das duas temperaturas, e uma diminuição do efeito de arrefecimento provocado na zona anterior da peça (na parte inferior da imagem).



*Figura 52: Pormenor das temperaturas limítrofes da peça.*

Na Figura 53, dá-se o encontro entre a temperatura limitada na peça e a temperatura pedida no sistema de injeção. O aquecimento é distribuído sob a forma de linhas isotérmicas na parte superior do molde. Temperatura de peça  $T = 300^{\circ}\text{C}$ . Na Figura 54, podemos observar o pormenor da distribuição de temperaturas.

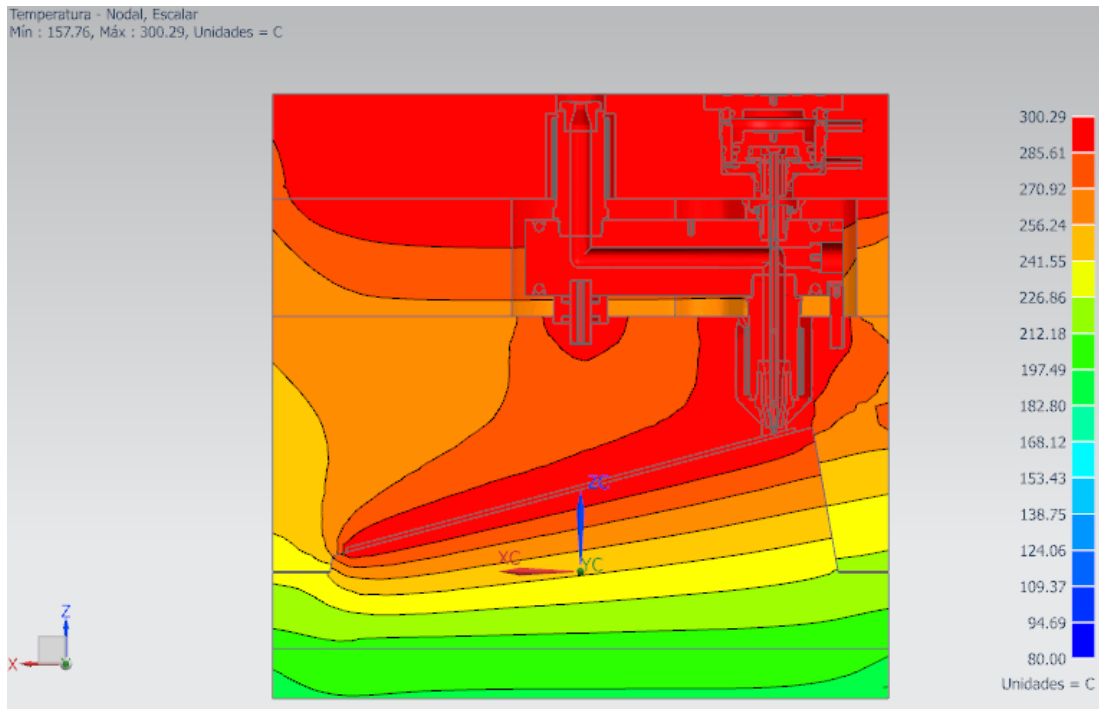


Figura 53: Temperatura na peça limitada a 300°C.

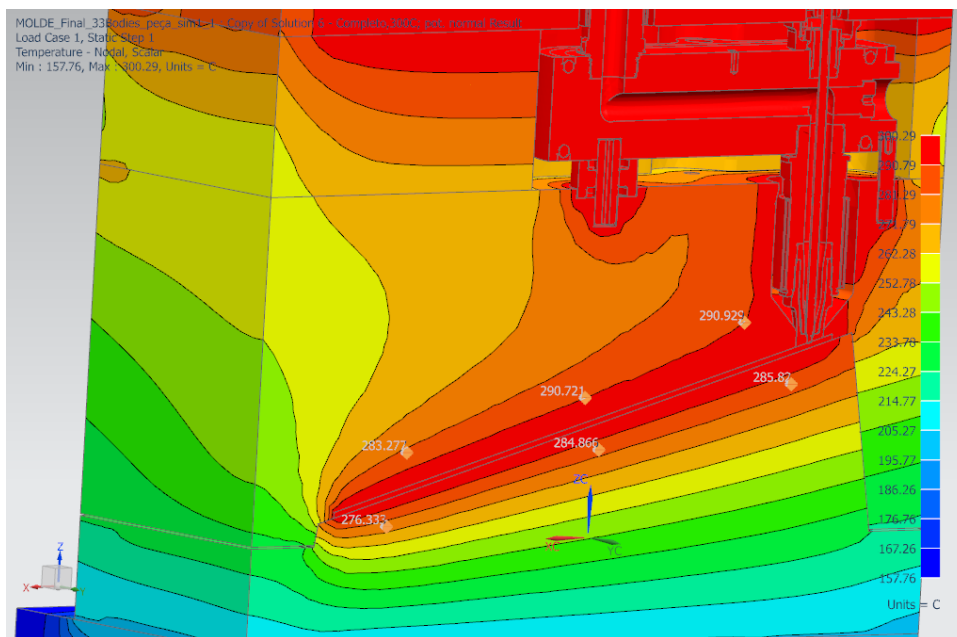


Figura 54: Pormenor da temperatura nas zonas limítrofes da peça.

Nas figuras seguintes (Figura 55 e Figura 56), são apresentadas imagens, sendo que a temperatura na zona da peça não tem nenhum tipo de limitação ao seu aquecimento:

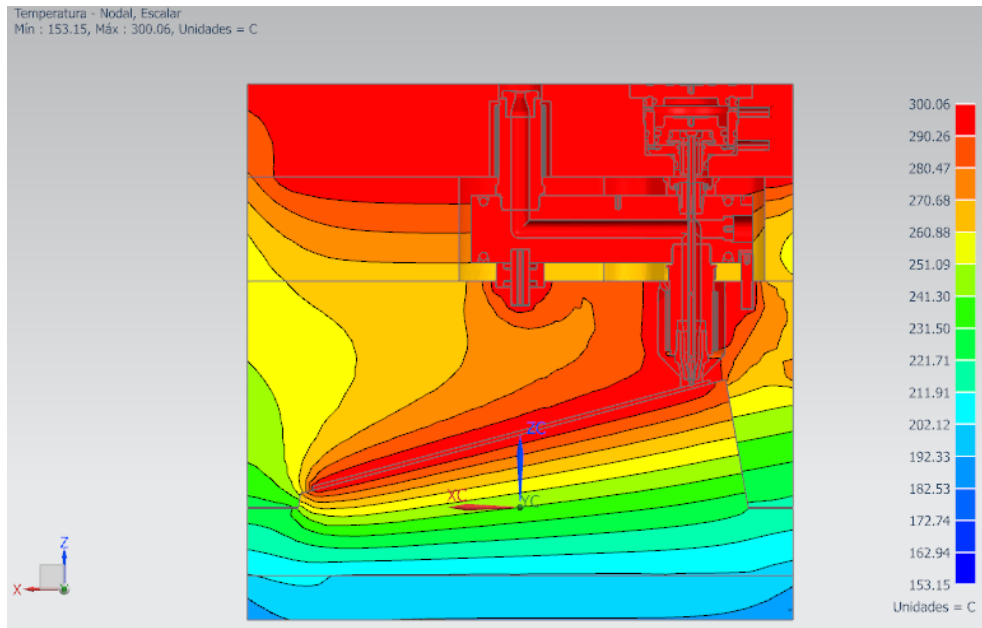


Figura 55: Sem temperatura na peça com temperatura do sistema definida para 300°C.

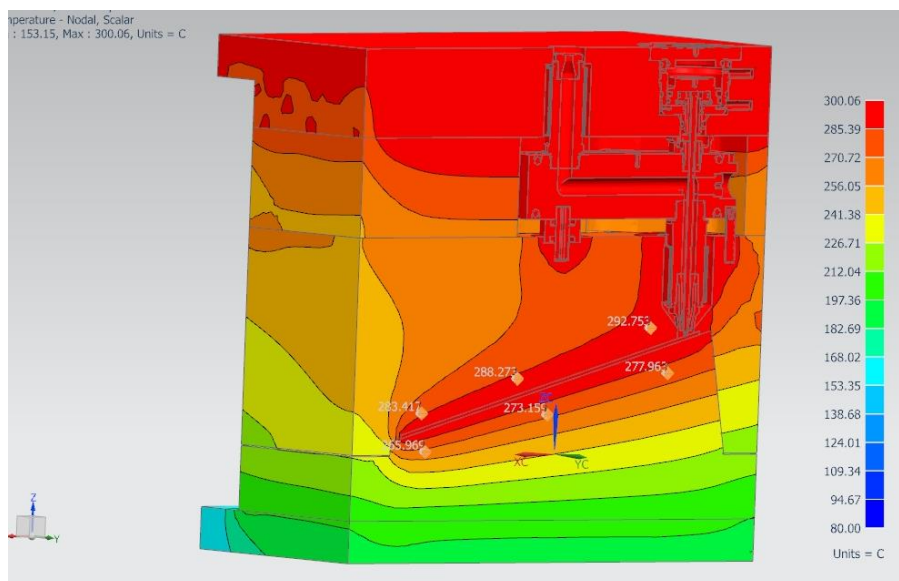


Figura 56: Pormenor das temperaturas, sem limitação na peça.

Como se pode verificar pela observação das duas últimas figuras, quando não há nenhum tipo de limitação de temperatura na peça, o resultado tende a ser semelhante ao resultado da temperatura de peça limitada a 300°C.

Seguidamente, serão apresentadas sequências de imagens, divididas em amostragem por cada um dos eixos cartesianos. O objetivo desta análise é perceber como se propaga o calor ao longo de cada um, e assinalar as diferenças existentes entre cada plano.

### 6.3.1. Análise no eixo X

Na sequência de imagens abaixo, evidencia-se a propagação de calor segundo o eixo do X. Como se pode verificar, existe uma zona de temperatura na zona da cavilha do carburador ( Figura 57, imagem 1), que é também uma zona de contacto com a chapa da cavidade e logo uma zona de transmissão de calor.

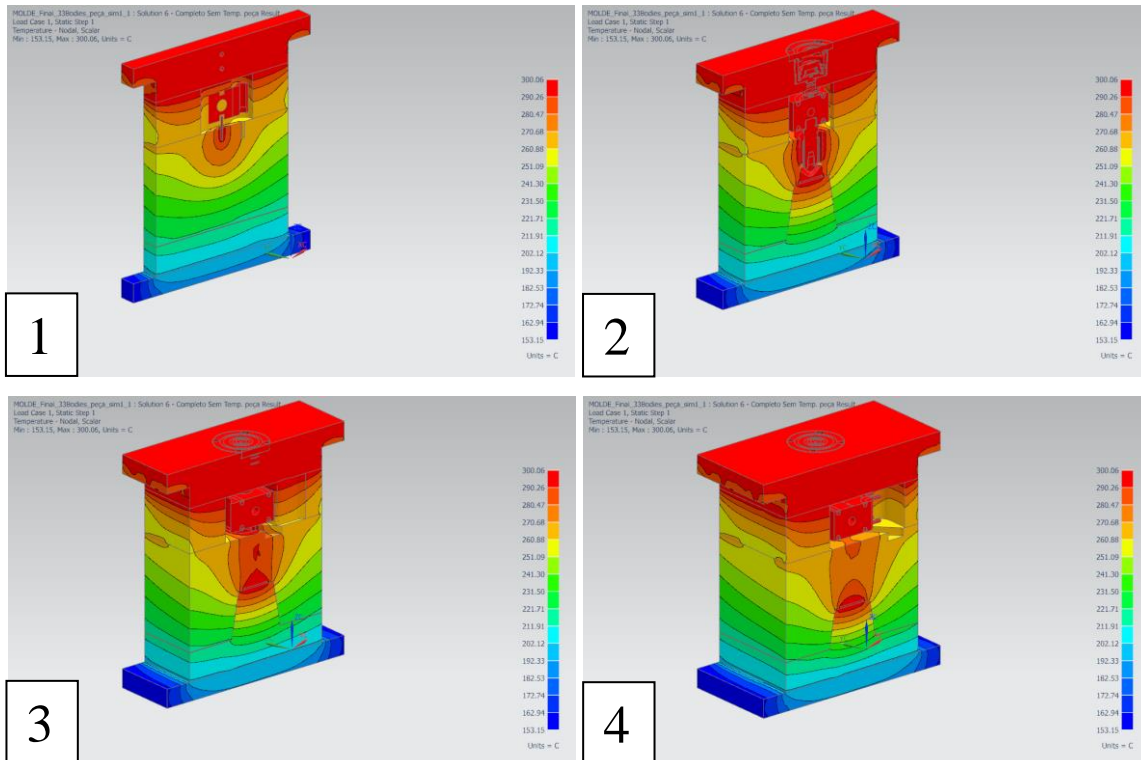


Figura 57: Evolução da temperatura nas zonas limítrofes da peça, no plano X (-190 a -40).

Pela análise às temperaturas da Figura 57 observamos que a distribuição segundo o eixo das abcissas é de certa forma equilibrado, havendo apenas episódios mais intensos nas zonas de contacto com as chapas das cavidades. Nota-se também uma acentuada diminuição da influência da temperatura na peça à medida que o afastamento é consumido, e que se caminha para a cota máxima segundo o eixo X, Figura 58.

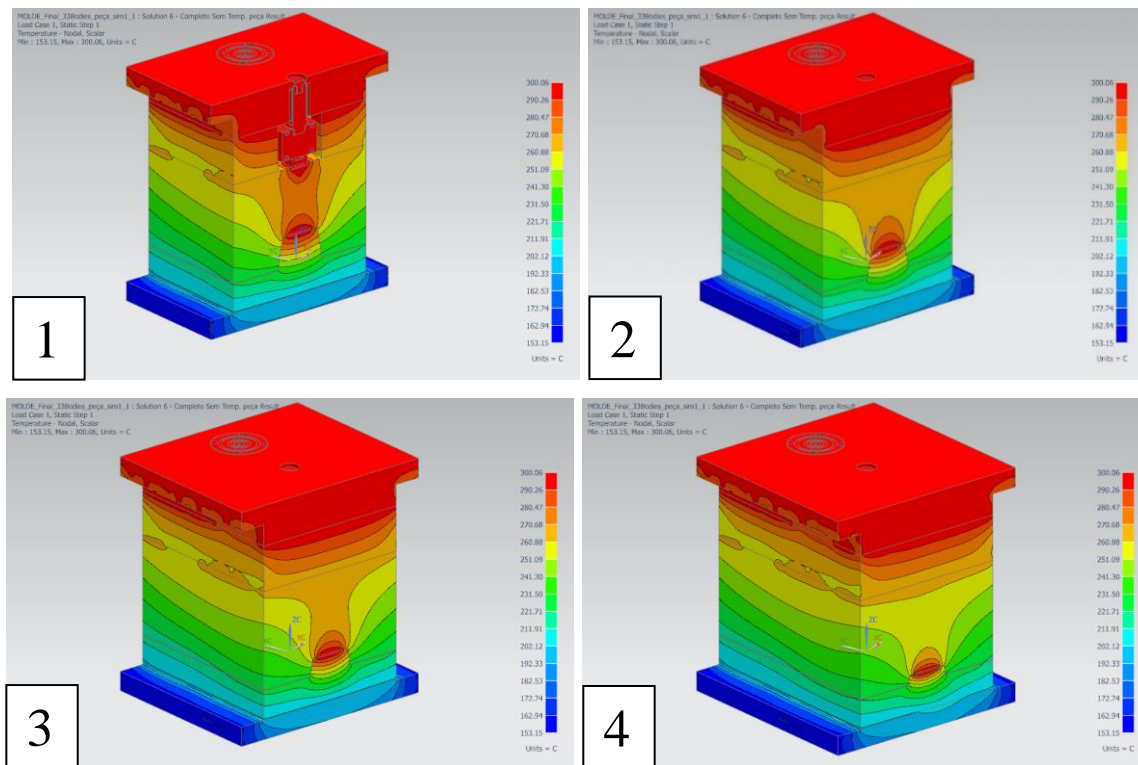


Figura 58: Evolução da temperatura nas zonas limítrofes da peça, no plano X (10 a 165).

### 6.3.2. Análise no eixo Y

Pela análise das imagens da Figura 59, pode acompanhar-se a evolução das zonas de concentração de temperatura, no sentido crescente do plano Y.

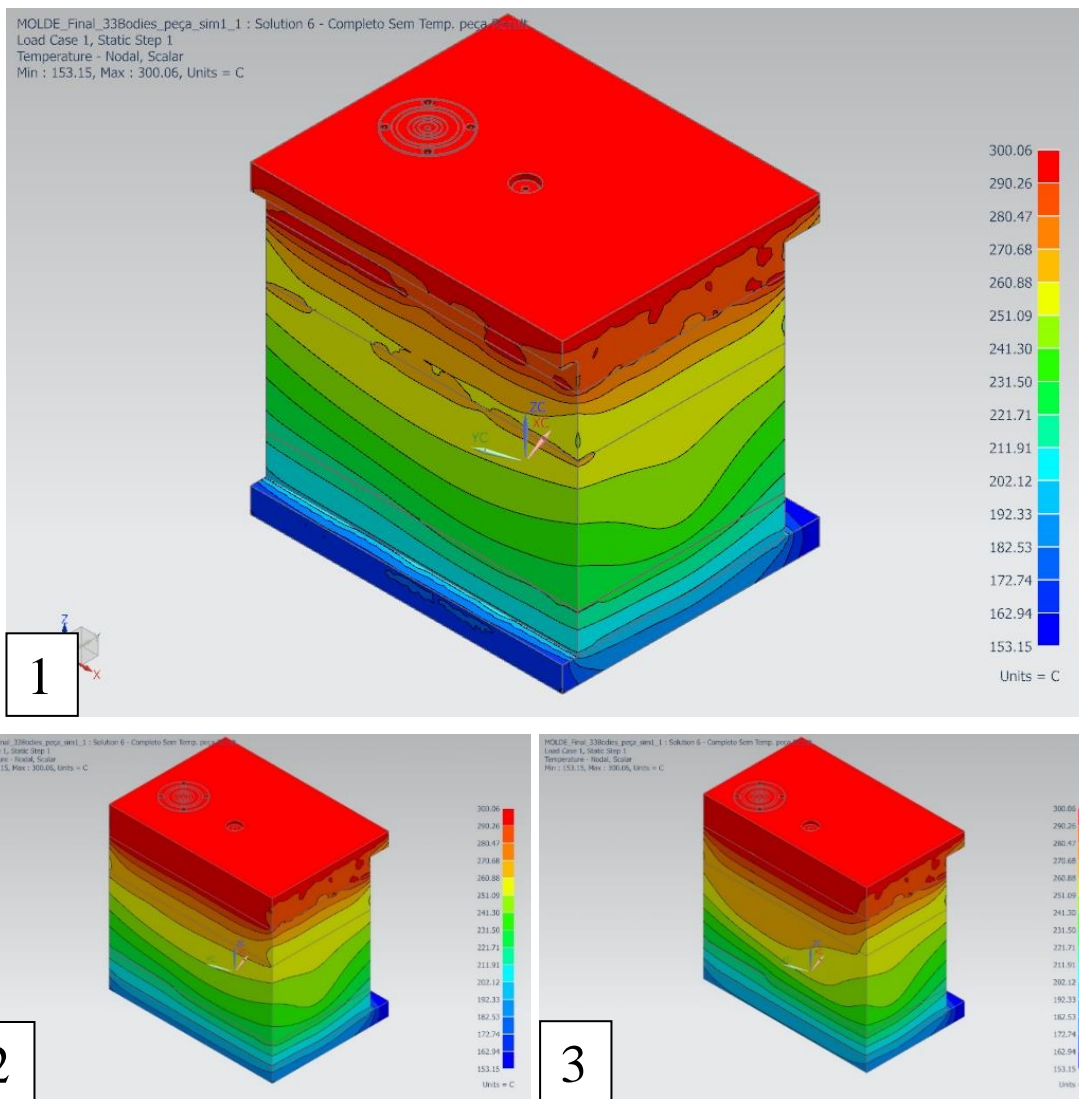


Figura 59: Evolução da temperatura nas zonas limítrofes da peça, no plano Y (-170 a -70).

Nestas imagens ainda é difícil perceber alguma diferença significativa com os diferentes cortes no plano Y.

Na Figura 60, é possível perceber a diferença de influência a partir do corte em que já não temos o sistema de injeção. Neste caso pode-se evidenciar que a distribuição de calor segundo o eixo Y é bastante menos efetiva, tratando-se de um fenómeno localizado apenas nas cotas onde o sistema é montado.

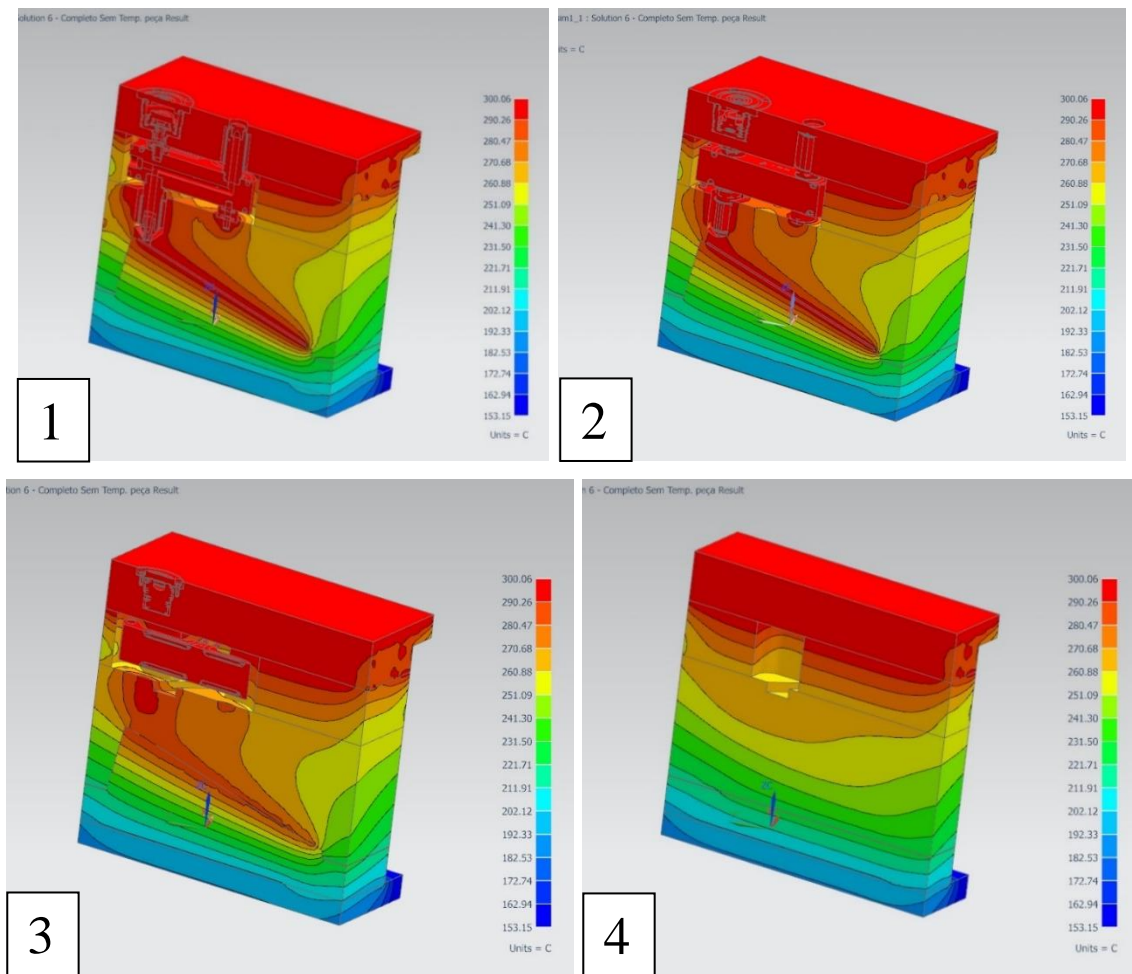


Figura 60: Evolução da temperatura nas zonas limítrofes da peça, no plano Y (-50 a 80).

### 6.3.3. Análise no eixo Z

Segundo o eixo Z, no sentido decrescente, a distribuição da temperatura ao longo de todo o molde tem o padrão que se segue (Figura 61):

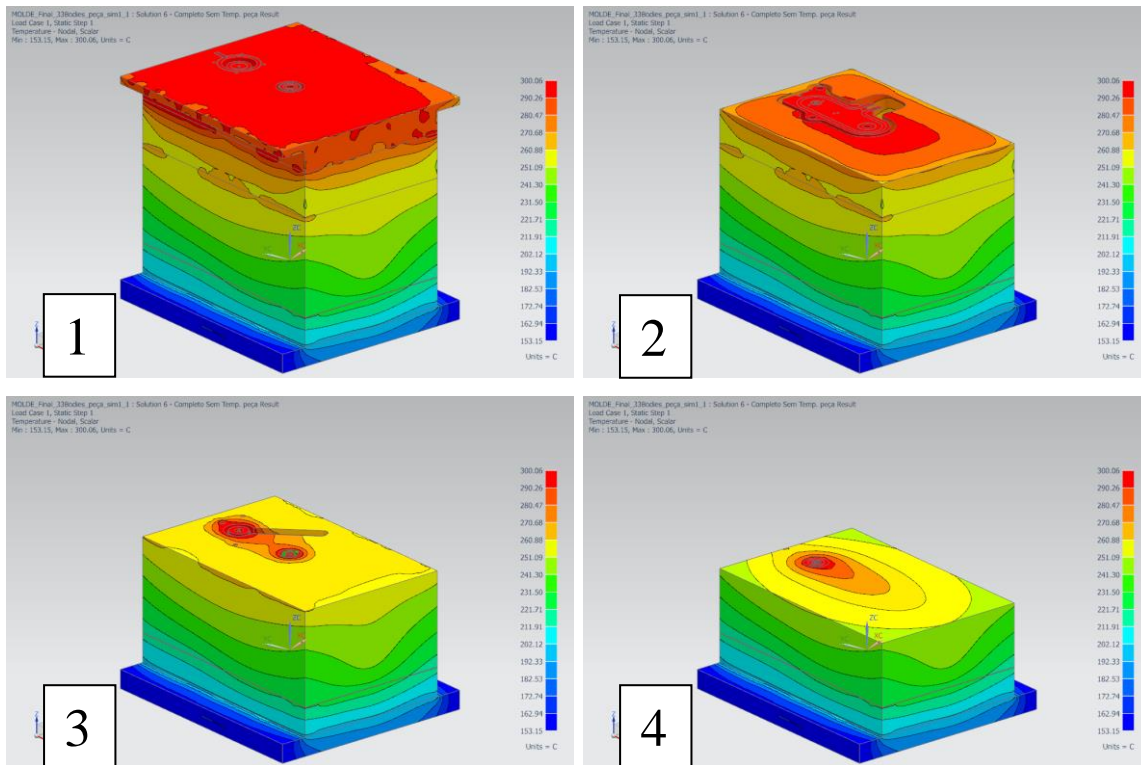


Figura 61: Evolução da temperatura nas zonas limitrofes da peça, no plano Z (234 a 120).

Pela análise das figuras desta primeira sequência, podemos concluir que na zona do bico, quer na zona de contacto da cavilha de apoio do carburador, a concentração de calor é bastante superior (Figura 61, imagem 3). Isto evidencia a grande taxa de transmissão de calor por condução através das superfícies. A partir da cota que esse contacto desaparece, a concentração térmica e taxa de transferência de calor é bastante inferior (Figura 61, imagem 4).

Nesta última sequência de imagens, (Figura 62) pode observar-se o comportamento térmico dos elementos até ao fim da peça/ cavidade. Podemos aqui verificar a grande importância da massa de plástico que preenche a peça. Nessa massa, a concentração térmica é bastante superior, pelo que nas chapas de aço circundantes a se notam zonas bastante mais frias.

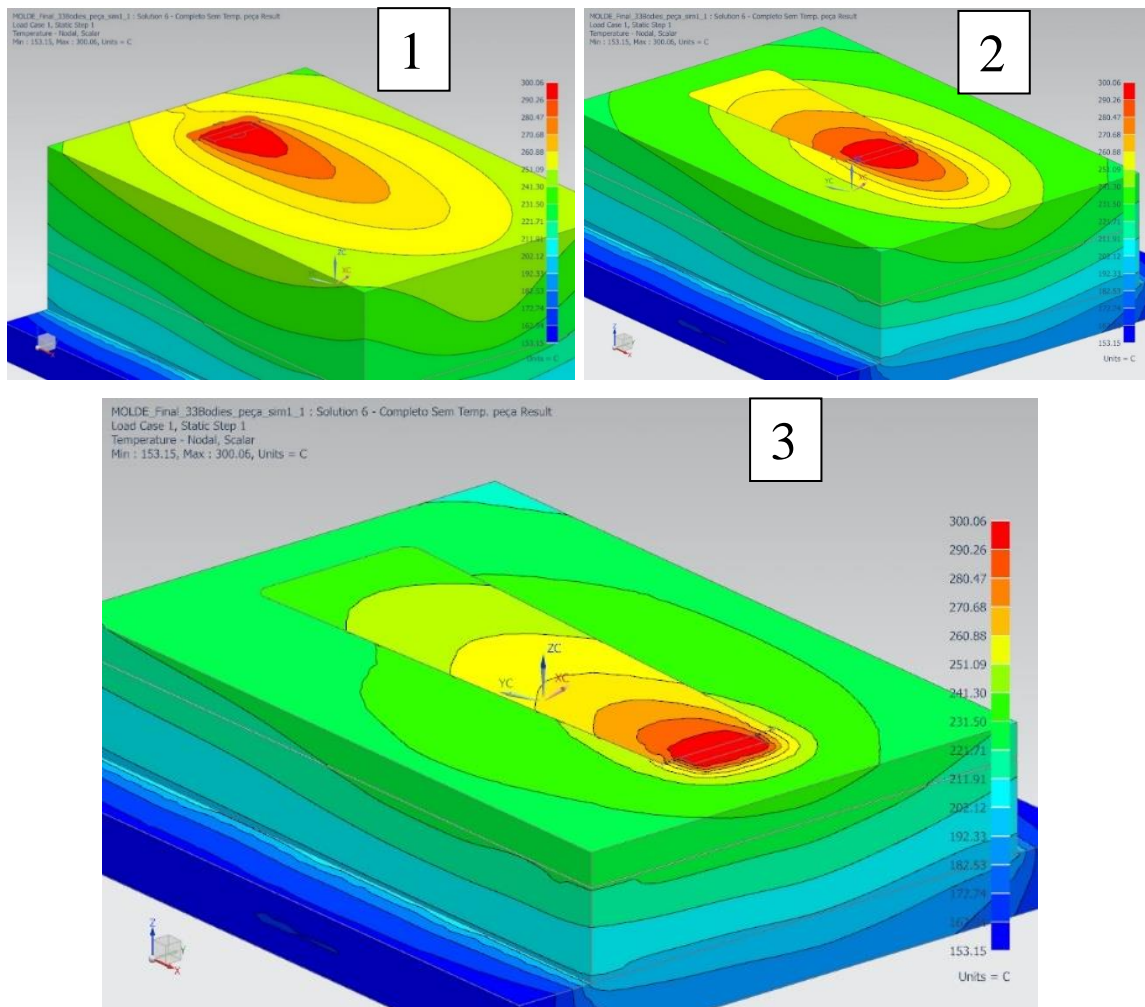


Figura 62: Evolução da temperatura nas zonas limítrofes da peça, no plano Z (100 a 20).

Pela observação da Figura 62, nota-se que mesmo no final da peça, a zona mais quente é a zona preenchida com o material polimérico, sendo que as zonas envolventes se apresentam bastante mais frias. Ou seja, existe acentuada condução de calor durante o comprimento da peça, condução essa que se desacentua nas zonas circundantes da mesma.

## 7. Conclusões e Trabalhos Futuros

---

Pela exposição dos resultados obtidos, e consequente análise crítica das imagens pode concluir-se que:

- A influência da temperatura do sistema de injeção na peça plástica injetada é bastante diminuta, na medida em que a maior influência é proveniente da zona do *gate*, e não do calor proveniente do carburador.
- A concentração de temperatura é maior na zona do *gate*, pelo que é essa a zona onde deverão concentrar-se também os mecanismos de extração de calor, nomeadamente canais, postiços / circuitos de refrigeração.
- A maior taxa de transferência de calor efetua-se por condução, do bico para a peça, e ao longo de todo o comprimento da peça, sendo que há perdas ao longo desse mesmo comprimento, e para as zonas limítrofes (chapas envolventes).
- A influência da temperatura na peça é tanto menor quanto o afastamento em X da peça em relação à principal fonte de calor, como se verifica na análise em X.
- A disposição ou colocação da peça no molde deve ser, tanto quanto possível colocada na posição de afastamento contínuo da peça em relação ao *gate*/sistema de injeção. Nesse modo conseguir-se-á uma influência ainda menor da temperatura do sistema de injeção na peça, e consequente poupança na construção de canais de refrigeração do molde.
- Todo o molde deverá ser revestido de modo a diminuir as perdas por convecção natural e radiação natural.

Como trabalhos futuros podemos elencar os seguintes pontos:

- Desenvolvimento de todo o trabalho prático experimental, de forma a consolidar e confirmar os resultados teóricos agora obtidos.
- Desenvolvimento da análise reológica e sua integração na análise térmica.

- Desenvolvimento da análise de empenos e sua integração na análise térmica.
- Contabilização das cargas de convecção e radiação existentes em determinadas zonas do molde e sistema de injeção.
- Validação experimental de todos os estudos com testes do sistema em máquina de injeção.

# Bibliografia

---

- [1] I. S. Ferreira, “Caracterização da indústria de moldes na região da Marinha Grande, na óptica da Qualidade,” Universidade do Porto, 2001.
- [2] Cefamol, “CEFAMOL - História.” [Online]. Available: [http://www.cefamol.pt/cefamol/pt/Cefamol\\_IndustriaMoldes/Historia](http://www.cefamol.pt/cefamol/pt/Cefamol_IndustriaMoldes/Historia). [Accessed: 20-Nov-2016].
- [3] Célia Marques, “Moldes E Plásticos,” *Jornal de Leiria*, Leiria, p. 7, Sep-2016.
- [4] M. F. N. Tavares, “Moldes de injeção com desenroscamento automático: casos de estudo,” 2016.
- [5] Plastics Technology, “No. 21 - Hot runners : Plastics Technology,” *No. 21 - Hot runners*, 2005. [Online]. Available: <http://www.ptonline.com/articles/no-21---hot-runners>. [Accessed: 20-Nov-2016].
- [6] S. Teklehaimanot, “Simulation and Design of a plastic injection Mold A Joint mold for credit card and USB holder,” 2011.
- [7] R. Pinto, “Trabalho apresentado para a obtenção do grau de Mestre em Equipamentos e Sistemas Mecânicos,” p. 5, 2012.
- [8] M. Hermann and T. Pentek, “Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review,” Dortmund, 2015.
- [9] *Glossary of Plastic Injection Molding Terms*. .
- [10] “Injection Molding Process, Defects, Plastic.” [Online]. Available: <http://www.custompartnet.com/wu/InjectionMolding>. [Accessed: 26-Nov-2016].
- [11] “Plasdan | Rotary Equipment.” [Online]. Available: <http://www.plasdan.pt/rotary-equipment/>. [Accessed: 13-Feb-2017].
- [12] “9 Benefits of Plastic Injection Molding.” [Online]. Available: <http://www.fastenercomponents.com/news/9-benefits-plastic-injection-molding/>. [Accessed: 30-Jan-2017].
- [13] “injectionmold.jpg (592×290).” [Online]. Available: <http://www.multi-mold.com.hk01.51cdngo.com/UploadFiles/injectionmold.jpg>. [Accessed: 30-Jan-2017].

- [14] “But who checks the check? As in check valve.” [Online]. Available: <http://www.plasticert.com/2014/04/but-who-checks-the-check-3/>. [Accessed: 06-Feb-2017].
- [15] C. Porter, “Cold Runner | Injection Molding - Plastopia,” *PlastiCert, Inc*, 2014. [Online]. Available: <http://www.plastopialtd.com/cold-runner/>. [Accessed: 16-Jan-2017].
- [16] Plastics Technology, “No. 21 - Hot runners : Plastics Technology,” *Plast. Technol.*, 2005.
- [17] M. Design, I. Moulding, and M. Feeding, “Hot Runner Systems.” [Online]. Available: <https://pt.scribd.com/document/319169215/Mould-Hot-Runner-Systems>. [Accessed: 16-Jan-2017].
- [18] Yudo, “TINA AM-User manual\_EN\_040110.” 2015.
- [19] Yudo, “TINA EP-catalogue\_160504,” 2016.
- [20] M. BAUMANN, “Why Choose a Valve-Gated Hot Runner?: MoldMaking Technology,” *MoldMaking Technology*, 2001. [Online]. Available: <http://www.moldmakingtechnology.com/articles/why-choose-a-valve-gated-hot-runner>. [Accessed: 23-Feb-2017].
- [21] Manufacturing Terms, “Análise de Elementos Finitos (FEA) Termo Definição.” [Online]. Available: [http://www.manufacturingterms.com/Portuguese/Finite-Element-Analysis-\(FEA\).html](http://www.manufacturingterms.com/Portuguese/Finite-Element-Analysis-(FEA).html). [Accessed: 20-Mar-2017].
- [22] “Tipos de viscosímetros: (capilar/ cone e prato/ rotativo),” *UL*. [Online]. Available: [https://elearning03.ul.pt/pluginfile.php/39487/mod\\_resource/content/4/REOLOG.aula.pdf](https://elearning03.ul.pt/pluginfile.php/39487/mod_resource/content/4/REOLOG.aula.pdf). [Accessed: 23-Mar-2017].
- [23] “Chapter Six Thermal Analysis. - ppt download.” [Online]. Available: <http://slideplayer.com/slide/4915336/>. [Accessed: 21-Mar-2018].
- [24] N. Pinheiro, “transferência de energia de um meio quente para um meio frio,” pp. 1–13, 2009.
- [25] “Heat Transfer: International site for Spirax Sarco.” [Online]. Available: <http://pointing.spiraxsarco.com/resources/steam-engineering-tutorials/steam-engineering-principles-and-heat-transfer/heat-transfer.asp>. [Accessed: 10-Jan-2018].

- [26] “Portal de Engenharia Quimica - Transferência de Calor.” [Online]. Available: [http://labvirtual.eq.uc.pt/siteJoomla/index.php?option=com\\_content&task=view&id=248&Itemid=](http://labvirtual.eq.uc.pt/siteJoomla/index.php?option=com_content&task=view&id=248&Itemid=). [Accessed: 12-Jan-2018].
- [27] P. J. Oliveira, “Transmissão de Calor – Radiação,” Covilhã, 2014.
- [28] “KIMW | Kunststoffinstitut Lüdenscheid.” [Online]. Available: <http://kunststoffinstitut-luedenscheid.de/>. [Accessed: 13-Mar-2018].
- [29] “AÇOS PARA MOLDES DE INJEÇÃO DE PLÁSTICO,” *Ramada Aços*, 2018. [Online]. Available: <http://www.ramada.pt/pt/produutos/acos/acos-para-moldes.html>. [Accessed: 16-May-2018].
- [30] “LUVOCOM® 1200-7116-1 | UL Prospector.” [Online]. Available: <https://materials.ulprospector.com/pt/profile/default?e=147527>. [Accessed: 20-Mar-2018].



# Glossário

---

**Gate:** Ponto de ataque do bico de injeção à peça

**Valve gate:** Sistema de injeção por canal quente com possibilidade de vedar o canal ou ponto de ataque à peça

**Leakege:** Fuga ou escape de material

**Shear Rate:** Também conhecido por taxa de corte, mede a fricção entre si das várias “camadas” de plástico, durante o processo de injeção. Neste sentido, um elevado *Shear Rate*, provoca aumento de temperatura, e uma elevada pressão provoca aumento do *Shear Rate*

**Balanceamento da injeção:** Conceito que está associado ao preenchimento das várias cavidades de um molde, durante a injeção, no mesmo intervalo de tempo.

**Peso de injeção:** Quantidade material em gramas, que se introduz em cada ciclo dentro do molde

**Almofada de Injeção:** Quantidade de material que sobra no fuso da máquina, após cada ciclo de injeção. Normalmente ronda os 10-15% do peso da injeção.

**Temperatura de Câmara:** Temperatura definida para o processo de injeção na câmara de plasticização da máquina de injeção

**Temperatura de descarga:** Temperatura real da descarga medida com pirómetro exterior.

**Temperatura de canal Quente:** Temperatura definida no canal quente para processar determinado polímero

**Temperatura do molde:** Temperaturas definidas para cavidade e bucha do molde.

**Velocidade de injeção:** Velocidade que o polímero entra na cavidade.

**Pressão específica de injeção:** Pressão que o polímero é sujeito no momento da injeção.

**Contra Pressão:** Força que se opõe ao recuo do fuso da máquina de injeção.

**Velocidade de plasticização:** Velocidade que o polímero é plasticizado dentro da câmara de plasticização, que é uma função da velocidade de rotação do fuso.

**Estrutura do Polímero:** Arranjo da cadeia polimérica

**Comprimento de fluxo:** Distância que o material tem de percorrer desde que sai do gate ou entra no ponto de injeção até ao ponto mais distante a encher na peça.

**Cisalhamento de material:** Quebra/ degradação do material.

**Janela de processamento:** Intervalo / *range* de temperatura e pressões que o material pode ser processado.

**Tempo de residência do material:** Tempo que o material pode permanecer na camara de plasticização antes de começar a degradar as suas propriedades.