



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Fábio Luís Oliveira Ribeiro

**Melhoria do processo de moldação por
injeção de um caso real**

Dissertação de Mestrado

Mestrado em Engenharia de Polímeros

Trabalho efetuado sob a orientação de

Professor Doutor António Cerqueira Brito

Engenheiro Eduardo Rodrigues

Setembro de 2017



Universidade do Minho – Escola de Engenharia
Celoplás S.A.
Mestrado Integrado em Engenharia de Polímeros





Universidade do Minho – Escola de Engenharia
Celoplás S.A.
Mestrado Integrado em Engenharia de Polímeros





Agradecimentos

A execução da presente dissertação de mestrado não seria possível sem a ajuda de várias pessoas, às quais quero expressar a minha gratidão pelas opiniões dadas e pela ajuda prestada, o que possibilitou a conclusão da dissertação.

Ao orientador da dissertação, Professor Doutor António Cerqueira Brito, pelas ideias sugeridas e pelo apoio demonstrado durante a execução da dissertação.

À empresa Celoplás – Plásticos para a Indústria S.A., em concreto ao Sr. Engenheiro João Cortez, pela oportunidade em realizar esta dissertação em ambiente industrial.

Ao Engenheiro Eduardo Rodrigues pela leitura da dissertação e por todo o apoio e ajuda fornecida no decorrer do estudo.

Ao Engenheiro Domingos Pereira pela troca de ideias e pela ajuda fornecida.

Aos meus pais, irmã e namorada pelo apoio e incentivo durante a minha formação, pois sem eles nada disto seria possível.



Universidade do Minho – Escola de Engenharia
Celoplás S.A.
Mestrado Integrado em Engenharia de Polímeros





Resumo

A presente dissertação tem como principal objetivo otimizar o processo de moldação por injeção de um caso real da empresa Celoplás – Plásticos para a Indústria S.A.. O molde em estudo foi projetado numa outra empresa, sendo depois transferido do cliente para a Celoplás. Após algumas produções verificou-se que as peças apresentavam defeitos como empeno das paredes laterais, variação da espessura nominal da peça, arrastamento na zona de ataque e a remoção do gito deixava marcas na zona de ataque da peça. Assim, esta dissertação irá abordar essencialmente o estudo do empeno e, com recurso a simulações *Moldex3D*, solucionar os defeitos.

Através da análise do molde, verificou-se que o empeno e os restantes defeitos resultaram de vários fatores, mas o fator predominante foi o arrefecimento ineficiente, pois o sistema de controlo de temperatura (refrigeração) dimensionado inicialmente não era uniforme e possuía um posicionamento incorreto em relação à peça. De modo a solucionar estes problemas foram projetados novos posições moldantes com um sistema de refrigeração otimizado, para isso recorreu-se às simulações *Moldex3D* em que se verificou se o mesmo levava à correção dos defeitos. Posteriormente foram realizados ensaios, com o objetivo de comparar as peças injetadas com os novos posições e as peças injetadas com os posições antigos. Adicionalmente, também se realizaram simulações de todos os ensaios, e verificou se os resultados teóricos coincidiam com os resultados práticos. Para quantificar os resultados procedeu-se à medição das peças injetadas.

Através dos resultados foi possível concluir que, tal como esperado, o novo sistema de refrigeração reduziu efetivamente o empeno e ainda solucionou outros problemas. As simulações *Moldex3D* revelaram-se demasiado otimistas, demonstrando que os resultados deste recurso deverão ser utilizados com cautela. O conjunto de temperaturas do molde que teve os melhores resultados foi o conjunto 3, sendo que a temperatura ideal para o lado móvel é 75°C e para o lado fixo é 45°C. Quanto ao estudo do material, o material que apresentava maior percentagem de fibra de vidro (*Kingfa*) foi o que se revelou a melhor opção quando se pretender obter o menor empeno.



Universidade do Minho – Escola de Engenharia
Celoplás S.A.
Mestrado Integrado em Engenharia de Polímeros





Abstract

The main objective of the present master thesis is to improve a real injection molding case, which was provided by Celoplás – Plásticos para a Indústria S.A.. The tool in study was designed by another company, and then it was transferred from the client to Celoplás. Some defects appeared, after a few productions of the part as warpage, thickness variation and a dragging effect near the injection point. Essentially, this dissertation, is going to study the warpage phenomenon.

After analyzing the tool, it was noticed that the warpage and the remaining defects, resulted from several factors, which the main factor was the inefficiency of the initial cooling system, as it was non-uniform and it's position wasn't the correct. To solve all the problems, a new cavity and core blocks were designed with an improved cooling system. With the goal of ensuring that all defects were corrected, *Moldex3D* simulations were done. After that, with the purpose of comparing old parts with new parts, the tool was injected and the parts were measured. Additionally, the real process results were compared with the ones from the simulation, to know if they are trustworthy.

As expected the new cooling system reduced the warpage and solved all the remaining problems. The *Moldex3D* simulations revealed to be too much optimistic, showing that the results must be used with caution. The set of mold temperatures that presented the best results was the set 3, with 75°C in the movable half and 45°C in the fixed half. Regarding the material study, the one which had the highest percentage of fiber glass (*Kingfa*) was the material that revealed the lowest warpage.



Universidade do Minho – Escola de Engenharia
Celoplás S.A.
Mestrado Integrado em Engenharia de Polímeros





Índice

Agradecimentos	V
Resumo	VII
Abstract.....	IX
Lista de Símbolos e Abreviaturas	XIX
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Celoplás S.A. – Plásticos para a Indústria	1
1.1.1. Missão.....	2
1.1.2. Visão.....	2
1.1.3. Valores.....	2
1.2. Objetivos e plano de trabalhos	2
1.3. Estrutura da tese	3
2. ESTADO DA ARTE.....	5
2.1. Polímeros na atualidade	5
2.2. Processo de moldação por injeção	5
2.2.1. Molde.....	8
2.3. Ambiente termomecânico	10
2.4. Contração e Empeno	14
2.5. Fatores que influenciam a contração/empeno.....	17
2.5.1. Parâmetros de moldação por injeção	18
2.5.1.1. Temperatura de injeção	18
2.5.1.2. Temperatura do molde	19
2.5.1.3. Tempo de 2ª Pressão	20
2.5.2. Estrutura molecular.....	21
2.6. Modelação numérica do processo de moldação por injeção	30
3. TRABALHO EXPERIMENTAL	35
3.1. Caso em estudo	35
3.1.1. 1ª Fase.....	37
3.1.1.1. Peça e Defeitos	37
3.1.1.2. Materiais.....	40
3.1.1.3. Molde	40
3.1.1.4. Máquina de injeção	42



3.1.1.5.	Parâmetros de processamento	43
3.1.1.6.	Simulação Moldex3D – Dados de entrada.....	43
3.1.2.	2ª Fase.....	46
3.1.2.1.	Materiais.....	46
3.1.2.2.	Molde	47
3.1.2.3.	Máquina de injeção	53
3.1.2.4.	Parâmetros de processamento	53
3.1.2.5.	Simulação Moldex3D - Dados de Entrada.....	54
4.	APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
4.1.	Primeiro ensaio ao molde.....	59
4.2.	Apresentação de Resultados e Discussão	63
4.2.1.	RUN01.....	64
4.2.2.	RUN02.....	68
4.2.3.	RUN03.....	72
4.3.	Discussão de Resultados	75
4.3.1.	Resultados práticos (Injeção) VS Resultados teóricos (Simulação).....	75
4.3.2.	Efeito da temperatura do molde.....	76
4.3.3.	Efeito do material	78
4.3.4.	Efeito do sistema de refrigeração	79
5.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	83
5.1.	Conclusões	83
5.2.	Sugestões para trabalhos futuros.....	85
	REFERÊNCIAS	87
	ANEXOS	93
	Anexo 1 - KINGFA RG301 CZ.30 Datasheet.....	93
	Anexo 2 - CCP 5615F PRETO Datasheet	96
	Anexo 3 - Dados do gráfico de desvio de peso de dez moldações;.....	99
	Anexo 4 – Dados do gráfico da Figura 62	100
	Anexo 5 – Dados dos gráficos da Figura 63	106
	Anexo 6 - Dados dos gráficos da Figura 64.....	107
	Anexo 7 - Dados do gráfico da Figura 65	108
	Anexo 8 - Dados do gráfico da Figura 67	109
	Anexo 9 - Dados do gráfico da Figura 68.....	110



Anexo 10 - Dados dos gráficos da Figura 69..... 111



Universidade do Minho – Escola de Engenharia
Celoplás S.A.
Mestrado Integrado em Engenharia de Polímeros





Índice de Figuras

Figura 1 - Exemplo esquemático de uma máquina de injeção;	7
Figura 2 - Diagrama de fases da moldação por injeção;.....	7
Figura 3 - Ciclo de moldação por injeção;	8
Figura 4 – Componentes de um molde;.....	9
Figura 5 - Extração de uma peça moldada;	10
Figura 6 - Camada de material solidificada quando o fluxo entra em contacto com as paredes frias do molde;.....	11
Figura 7 - Viscosidade, Temperatura e Taxa de Corte ao longo da espessura;.....	11
Figura 8 - Evolução da pressão na zona moldante;	12
Figura 9 - Influência dos parâmetros que definem o ambiente termomecânico na pressão medida na zona moldante;	13
Figura 10 - Perfil de tensões residuais com origem térmica ao longo da espessura;	16
Figura 11 - a) Placa injetada antes da solidificação; b) Placa solidificada sob o perfil de tensões na ausência de equilíbrio mecânico entre as camadas; c) Distribuição final das tensões devido ao equilíbrio mecânico entre as camadas;.....	16
Figura 12 - Fenómeno de aparecimento de empeno em peças por contração não homogênea;.....	18
Figura 13 – Gráfico da contração vs temperatura de injeção;	19
Figura 14 – Gráfico da contração vs temperatura do molde;	20
Figura 15 – Gráfico da Contração vs Segunda Pressão;.....	21
Figura 16 - Curvas pVT para materiais amorfos e semi-cristalinos;.....	24
Figura 17 - Representação esquemática de uma esferulite;.....	25
Figura 18 - Variação da contração com a direção e com a espessura, de um PBT reforçado com 30% de fibra de vidro;	28
Figura 19 - Secção paralela à direção de fluxo de um polipropileno reforçado com fibra de vidro;.....	29
Figura 20 - Secção transversal à direção de fluxo de um polipropileno reforçado com fibra de vidro;.....	29
Figura 21 - Efeito da contração anisotrópica no empeno na injeção de um disco de acetal reforçado com fibra de vidro;	30
Figura 22 - Peça em estudo;	36
Figura 23 - Peça no status anterior;	36
Figura 24 - Representação do empeno das paredes laterais;	37
Figura 25 - Parte do desenho 2D da peça em estudo;.....	38
Figura 26 - Efeito de arrastamento na zona de ataque;.....	38
Figura 27 - Postiço moldante antigo, exemplo de uma cavidade;	39
Figura 28 - Injeção incompleta (o material utilizado na injeção destas peças não é o mesmo que o material em estudo);	39
Figura 29 - Molde em estudo;	40
Figura 30 - Sistema de refrigeração dos postiços moldantes antigos	41
Figura 31 - Máquina de injeção utilizada;	42



Figura 32 - Malha da estrutura do molde, do sistema de refrigeração, do sistema de alimentação e da peça;	44
Figura 33 - Malha da RUN01;	45
Figura 34 - Modelo e dados introduzidos RUN01;	46
Figura 35 - Balanço térmico do molde;	48
Figura 36 - Postiço moldante novo;	51
Figura 37 - Desenho 2D do novo sistema de refrigeração projetado (caminho percorrido pela água representado a azul);	52
Figura 38 - Malha da estrutura do molde, do sistema de refrigeração, do sistema de alimentação e da peça;	54
Figura 39 - Malha da RUN02;	55
Figura 40 - Modelo e dados introduzidos RUN02;	56
Figura 41 - Modelo e dados introduzidos RUN03;	57
Figura 42 - Gráfico de desvio do peso de dez moldações para cada cavidade;	60
Figura 43 - Aplicação de escape de gases aos postiços moldantes;	60
Figura 44 - Aumento do diâmetro de ataque (em mm);	61
Figura 45 - Estado dos extratores do gito;	62
Figura 46 - Arestas em que se realizaram as medições, representadas a amarelo;	63
Figura 47 - Peças injetadas no ensaio correspondente à RUN02;	64
Figura 48 - Deslocamento segundo a direção X, resultante do empeno;	65
Figura 49 - Deslocamento segundo a direção Y, resultante do empeno;	65
Figura 50 - Planicidade nos "pés" da peça, resultante do empeno;	66
Figura 51 - Temperatura média ao longo da espessura RUN01;	67
Figura 52 - Peças injetadas no ensaio correspondente à RUN02;	68
Figura 53 - Deslocamento segundo a direção X, resultante do empeno;	69
Figura 54 - Deslocamento segundo a direção Y, resultante do empeno;	69
Figura 55 - Planicidade nos "pés" da peça, resultante do empeno;	70
Figura 56 - Temperatura média ao longo da espessura RUN02;	71
Figura 57 - Peças injetadas no ensaio correspondente à RUN03;	72
Figura 58 - Deslocamento segundo a direção X, resultante do empeno;	73
Figura 59 - Deslocamento segundo a direção Y, resultante do empeno;	73
Figura 60 - Planicidade nos "pés" da peça, resultante do empeno;	74
Figura 61 - Temperatura média ao longo da espessura RUN03;	75
Figura 62 - Gráfico de comparação de resultados;	76
Figura 63 - Deslocamento máximo medido em cada aresta, para diferentes conjuntos de temperaturas;	77
Figura 64 - Deslocamento máximo medido em cada aresta, para diferentes materiais;	78
Figura 65 - Gráfico da planicidade medida para ambos os materiais;	79
Figura 66 - Comparação da temperatura média ao longo da espessura da RUN01 com a RUN02;	80
Figura 67 - Gráfico da espessura medida para ambas as RUN's;	80
Figura 68 - Gráfico da planicidade medida em ambas as RUN's;	81
Figura 69 - Deslocamento máximo resultante das medições e da simulação, para o sistema de refrigeração velho e novo;	82



Índice de Tabelas

Tabela 1 - Características da máquina ARBURG ALLROUNDER 1000-350;.....	42
Tabela 2 - Parâmetros de injeção utilizados nos ensaios relativos à 1ª fase;.....	43
Tabela 3 - Dados introduzidos na geração da malha RUN01;	45
Tabela 4 - Dados do processo introduzidos RUN01;	46
Tabela 5 - Dados utilizados nos cálculos do comprimento dos canais de refrigeração;	47
Tabela 6 - Parâmetros de injeção utilizados nos ensaios realizados na 2ª fase;	53
Tabela 7 - Tabela de parâmetros introduzidos na simulação Moldex3D;	55
Tabela 8 - Dados introduzidos na geração da malha da RUN02;.....	56
Tabela 9 - Dados do processo introduzidos RUN02;	56
Tabela 10 - Dados do processo introduzidos RUN03;	57
Tabela 11 - Conjuntos de temperaturas testadas;	76



Universidade do Minho – Escola de Engenharia
Celoplás S.A.
Mestrado Integrado em Engenharia de Polímeros





Lista de Símbolos e Abreviaturas

A_f	Área de contacto do molde (m^2)
A_l	Área lateral do molde (m^2)
C_{rad}	Coefficiente de radiação do corpo negro ($W/m^2 \cdot K^4$)
d	Diâmetro (mm)
e	Distância do fluido de refrigeração à superfície moldante (mm)
h_e	Entalpia do material à temperatura de extração (kJ/kg)
h_i	Entalpia do material à temperatura de injeção (kJ/kg)
k	Condutividade térmica do aço ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)
m	Massa de uma injeção (g)
t_c	Tempo de arrefecimento (s)
T_a	Temperatura ambiente ($^\circ C$)
T_m	Temperatura do molde ($^\circ C$)
β	Fator de proporcionalidade ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)
α	Coefficiente de transferência de calor por convecção ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)
ε	Fator de emissividade
θ_a	Temperatura absoluta do ambiente (K)
θ_m	Temperatura absoluta do molde (K)



Universidade do Minho – Escola de Engenharia
Celoplás S.A.
Mestrado Integrado em Engenharia de Polímeros





1. INTRODUÇÃO

No processo de moldação por injeção, ocasionalmente ocorre o aparecimento de defeitos como ratados, chupados, chochos, rebarbas, empenos, entre outros.

O facto de ser comum aparecerem peças moldadas que possuem cotas fora de tolerância, pode não se dever facto do fator de contração aplicado no projeto da ferramenta ser incorreto, mas sim devido às peças empenarem e distorcerem.

Com o objetivo de corrigir problemas como os mencionados nos parágrafos anteriores, a empresa Celoplás S.A. – Plásticos para a Indústria, decidiu acolher um aluno, em que na sua dissertação de mestrado aborda-se a correção de um defeito específico, o empeno. Tendo isto em conta, foram realizadas todas as etapas associadas ao processo de injeção, desde a realização de simulações para auxiliar o projeto do molde, até à injeção e medição das peças.

1.1. Celoplás S.A. – Plásticos para a Indústria

A Celoplás, Plásticos para a Indústria S.A. fundada em 1989 conta hoje com uma área de total de 25 000 m^2 e 11 500 m^2 de área coberta. Dispõe de uma equipa com mais de 160 trabalhadores, laborando 24 horas por dia, 7 dias por semana e um parque com mais de 70 máquinas de injeção.

A Celoplás projeta, desenvolve e fabrica, através do processo de moldação por injeção e micro injeção, mais de 200 milhões de componentes técnicos de elevada precisão por ano, utilizando mais de 200 tipos diferentes de materiais termoplásticos, termoendurecíveis e silicones, para as indústrias automóvel, eletrónica, elétrica, ótica, construção, médica e outras.

A par desta atividade, a Celoplás também desenvolve e produz componentes à escala micro, utilizando as mais recentes tecnologias de micro-maquinação e micro-moldação.

A Celoplás aposta na formação permanente dos seus Recursos Humanos, na qualidade dos seus produtos, na inovação de processos e produtos, reforçando a competitividade, sendo hoje reconhecida como uma referência europeia no



desenvolvimento e na produção de componentes e nos *clusters* de alta tecnologia, utilizando materiais poliméricos (1).

1.1.1. Missão

Maximizar valor e benefício, num posicionamento estratégico de excelência no negócio do desenvolvimento de produtos de alta tecnologia, em parceria com os nossos clientes, utilizando materiais poliméricos (1).

1.1.2. Visão

Crescer, sustentadamente, otimizando o conhecimento e respondendo às solicitações do negócio no mercado global, tendo sempre presente a perspetiva do cliente, da sociedade, da inovação, da aprendizagem e dos acionistas (1).

1.1.3. Valores

Acionistas: compromisso, consenso, honestidade e crescimento sustentado; *Clientes:* parceria, comunicação, confidencialidade, compromisso duradouro, satisfação e confiança; *Fornecedores:* parceria, honestidade, competências, comunicação e desempenho; *Organização e Sociedade:* dedicação e pro-atividade, competências e versatilidade e compromisso social (1).

1.2. Objetivos e plano de trabalhos

O presente trabalho tem como principal objetivo o estudo do empeno em peças plásticas e todos os fenómenos associados, tendo-se recorrido a um caso de estudo que apresenta o mencionado defeito com o propósito de solucioná-lo. Para tal, projetou-se um novo sistema de refrigeração, recorrendo-se às simulações *Moldex3D* para prever o processo. Para além disso, foram estudados todos os parâmetros que influenciam o empeno, como a temperatura do molde, quer do lado fixo quer do lado móvel. Foram realizados ensaios de modo comparar os resultados práticos com os resultados teóricos



do *Moldex3D*, no qual serão realizadas simulações tendo em conta o sistema de refrigeração utilizado, ou seja, utilizando o sistema projetado no presente trabalho e o sistema antigo, os parâmetros, a máquina de injeção e as matérias-primas.

1.3. Estrutura da tese

De modo a cumprir os objetivos propostos, a presente dissertação está organizada em 5 capítulos.

O capítulo 1 incorpora um enquadramento teórico relativo ao tema em estudo, no qual se efetua uma pequena apresentação da empresa onde se realizou o estudo, e são definidos os objetivos e o plano de trabalhos.

Quanto ao capítulo 2, é apresentado o estado da arte no qual explica-se como ocorre o aparecimento do defeito de empeno, para isso é desenvolvido o subtópico da contração. Além disso, são definidos quais os fatores que determinam a contração e o empeno, e ainda é realizado um enquadramento histórico da simulação numérica no processo de moldação por injeção.

Já o capítulo 3 está dividido em duas fases, uma primeira em que se aborda o trabalho relativo ao molde do cliente com os postigos antigos, e uma segunda fase relativa às alterações efetuadas neste estudo, onde se aborda os passos relativos aos postigos novos. Assim, é apresentado o caso de estudo, nomeadamente a peça em estudo, e os materiais utilizados, a máquina utilizada e todos os dados introduzidos nas simulações realizadas para cada fase.

No capítulo 4 apresentam-se os resultados obtidos, e realiza-se a discussão dos mesmos.

Por fim, no capítulo 5 apresentam-se as conclusões a retirar do trabalho desenvolvido.



Universidade do Minho – Escola de Engenharia
Celoplás S.A.
Mestrado Integrado em Engenharia de Polímeros





2. ESTADO DA ARTE

2.1. Polímeros na atualidade

A palavra polímeros vem do grego *polumeres*, que significa “ter muitas partes” (2), estes são constituídos por moléculas muito grandes constituídas pela repetição de pequenas e simples unidades químicas, denominadas de monómeros. Através de reações de polimerização entre as unidades forma-se a macromolécula denominada de polímero.

Atualmente os polímeros desempenham um papel muito importante no nosso quotidiano, mas isto não se limita apenas ao presente pois desde os tempos mais remotos o homem usa polímeros naturais como o amido, a celulose ou a seda, entre outros. Para além disso, cerca de 18% do nosso organismo é constituído por proteínas, que são polímeros naturais em que os monómeros são aminoácidos condensados.

Mas nem todos os polímeros são naturais, visto que desde a descoberta do processo de polimerização pelo Químico alemão *Hermann Staudinger* (1881-1963, pioneiro no estudo da química de polímeros, galardoado com o Prémio Nobel da Química em 1953) o processo deixou de ser apenas um fenómeno natural, levando a que os polímeros sintéticos se desenvolvessem rapidamente. Assim, os polímeros têm uma presença muito ativa na nossa vida, pois grande parte dos bens que nos rodeiam são produzidos a partir de materiais poliméricos nomeadamente em bens resultantes da industria automóvel, de embalagens, de revestimentos e de vestuário. Isto resulta das grandes vantagens da aplicação de materiais poliméricos, porque estes permitem substituir materiais como papel, madeira e metais. Assim, os polímeros revelam-se determinantes na nossa vida.

2.2. Processo de moldação por injeção

O processo de moldação por injeção remonta a 1872, quando foi patenteado pelos irmãos *Hyatt* (EUA) e ao longo do século XX sofreu uma grande evolução, cujos principais marcos foram a descoberta da máquina hidráulica (anos 40), a máquina de fuso alternativo (1951) e a máquina elétrica (1988).



O referido processo foi inicialmente desenvolvido para a transformação de materiais termoendurecíveis.

Atualmente a moldação por injeção é um dos principais processos de transformação de materiais poliméricos com enorme importância em vários mercados consumidores. Cada vez mais a indústria recorre aos materiais poliméricos para substituir materiais como metais, vidro, cerâmicos, etc., devendo-se tal fenómeno à versatilidade, baixa densidade, facilidade de manuseamento, menor custo de produção e liberdade de geometria destes materiais. Então, é possível verificar que nos últimos anos a utilização destes tem vindo a crescer exponencialmente, o que leva a que as técnicas de processamento sejam levadas ao seu limite de modo a obter produtos com requisitos apertadíssimos.

Uma destas técnicas é a moldação por injeção, que permite processar quer materiais poliméricos termoplásticos quer termoendurecíveis, em que os equipamentos envolvidos têm sido cada vez mais desenvolvidos e explorados. Os equipamentos desta técnica são normalmente os seguintes:

- Máquina de injeção;
- Molde;
- Sistema de controlo da temperatura do molde (Termorregulador);
- Granulador;
- Misturador;
- Robot.

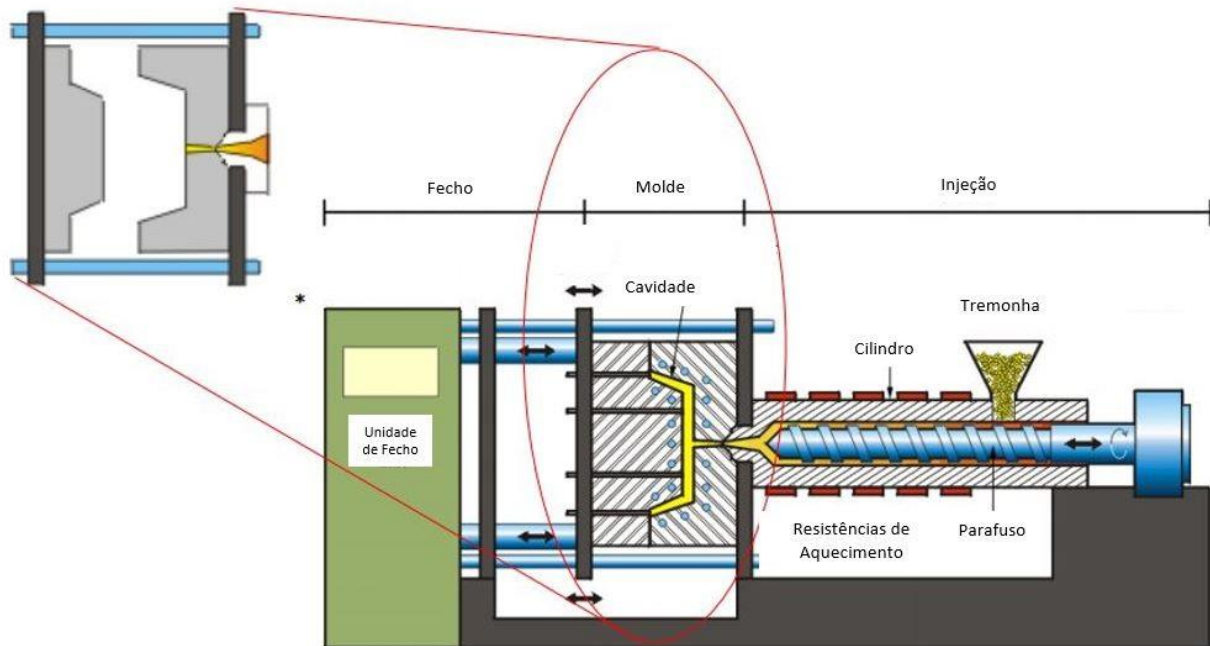


Figura 1 - Exemplo esquemático de uma máquina de injeção;
 (adaptado de (2))

A técnica de moldação por injeção envolve normalmente as seguintes etapas: aquecimento do material até este adquirir uma viscosidade suficientemente baixa; moldação sobre pressão; arrefecimento com conseqüente recuperação da rigidez.

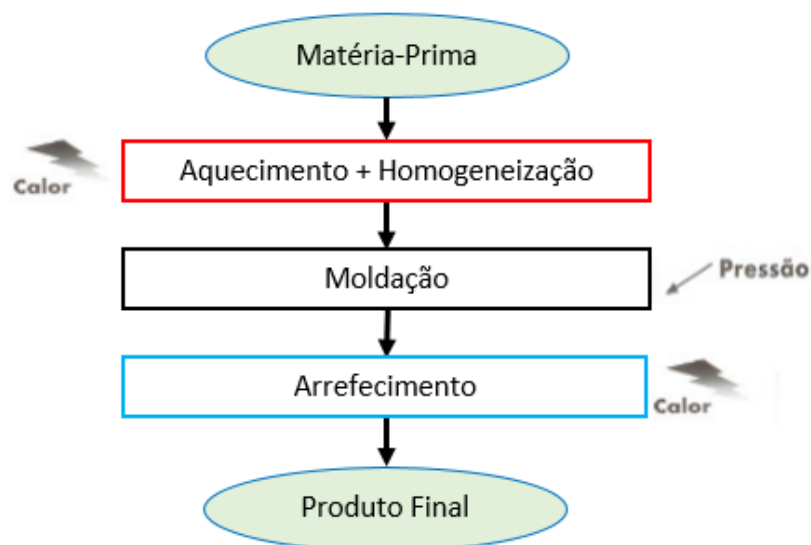


Figura 2 - Diagrama de fases da moldação por injeção;



No ciclo de injeção, representado na Figura 3, em primeiro lugar ocorre o fecho do molde, em seguida a injeção do material para a moldação, e posteriormente a compactação em que o fuso pressuriza o fundido. Em seguida, verifica-se o arrefecimento do material injetado e simultaneamente o doseamento e recuo do fuso, em que se plasticiza o material para a injeção seguinte. Quando a peça arrefecer até à temperatura desejada, atua o sistema de extração que a remove.

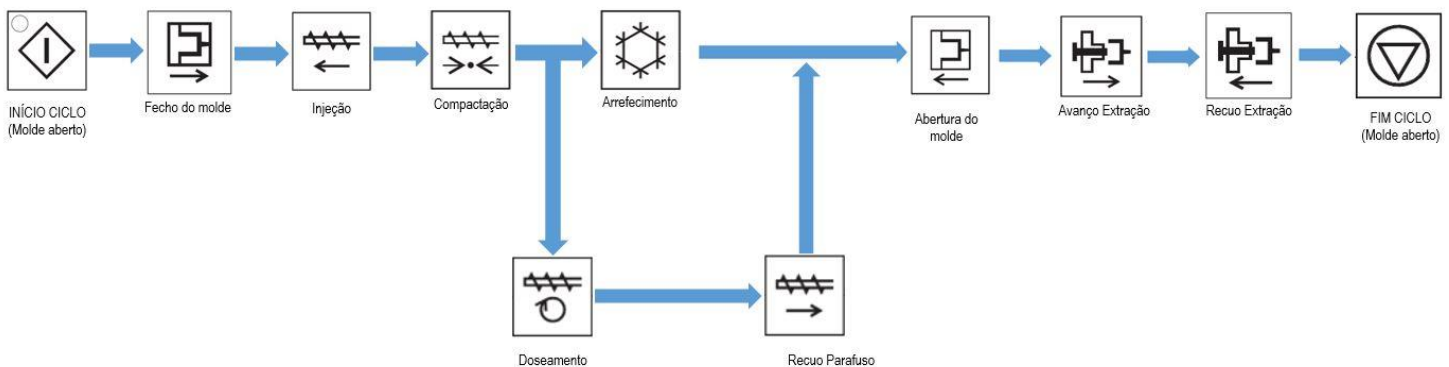


Figura 3 - Ciclo de moldação por injeção;

2.2.1. Molde

Um molde de moldação por injeção consiste num conjunto de placas onde são montados ou maquinados os sistemas funcionais que permitem que um espaço em que a peça vai ser materializada, definido pela cavidade e pela bucha, seja preenchido com o material fundido em condições controladas. A qualidade estrutural e dimensional das peças produzidas é garantida pelos restantes sistemas do molde, sendo estes:

- A **estrutura** que assegura a solidez estrutural do molde;
- O **guiamento** que mantém o perfeito alinhamento da cavidade com a bucha;
- A **alimentação** que permite o percurso do fundido, desde o bico da injetora até à impressão;
- O **escape de gases**;
- O **controlo de temperatura** que assegura que nas superfícies moldantes a temperatura seja tão uniforme quanto possível e que o arrefecimento se faça de forma rápida e eficiente;
- A **extração** que faz com que as moldações sejam retiradas do molde;

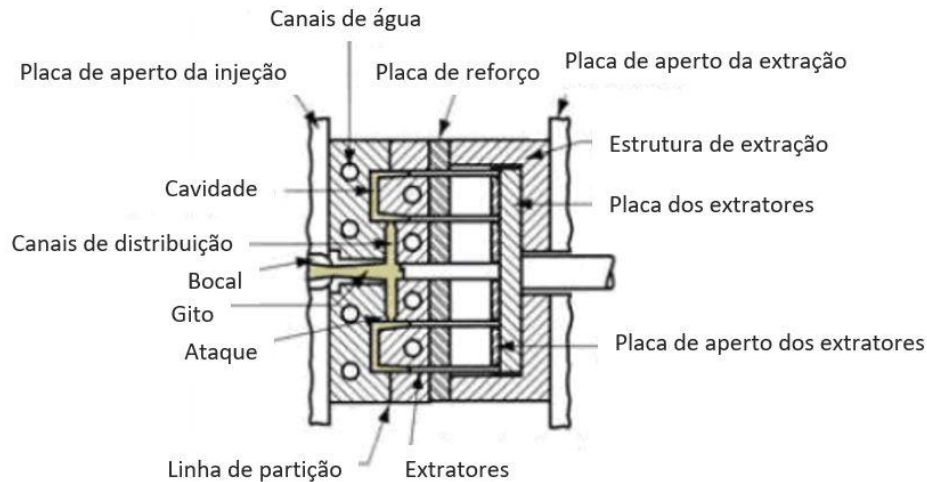


Figura 4 – Componentes de um molde;

(adaptado de (3))

Entre os principais componentes de um molde, encontram-se as cavidades e as buchas, os sistemas de arrefecimento, de alimentação e de extração. A cavidade designa a forma embutida no molde, enquanto a bucha refere-se à forma saliente.

Após o fecho do molde, o espaço compreendido entre a cavidade e a bucha é preenchido com material na altura da injeção, originando a peça final. De modo a garantir o alinhamento entre as diversas partes do molde utilizam-se guias e furos-guia com casquilhos.

De forma a incrementar a produtividade do processo, e nos casos em que a dimensão das peças o permite, alguns moldes possibilitam a realização simultânea de duas ou mais peças iguais. Nestes casos, os moldes utilizam de canais de alimentação principais que, por sua vez estão ligados às cavidades moldantes através de canais secundários, e posteriormente por canais designados por ataques.

O arrefecimento do molde é promovido por um equipamento composto por uma bomba externa ligada aos canais de refrigeração do molde, designado de termorregulador que asseguram a circulação da água ou óleo, e consequentemente, o arrefecimento da peça.

A contração da peça no seu arrefecimento leva a que adira às buchas, dificultando a sua separação do molde. O sistema de extração é então utilizado para facilitar a remoção



e é composto por pinos vulgarmente designados por extratores, montados na parte móvel do molde de forma que quando este abre, os extratores atuam de modo a projetar a peça para o exterior do molde, conforme representado na Figura 5.

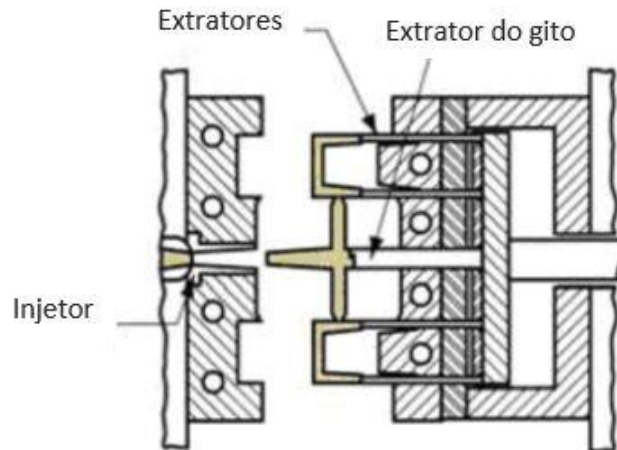


Figura 5 - Extração de uma peça moldada;

(adaptado de (3))

2.3. Ambiente termomecânico

No processo de injeção a fase de enchimento é extremamente importante visto que este determina a qualidade final e as propriedades da peça. Assim, a orientação molecular induzida na peça, a estrutura desenvolvida e a localização das linhas de soldadura vão variar em função do fluxo de material aquando do enchimento.

O fluxo de material fundido para o interior da impressão pode ser caracterizado como um fluxo tridimensional, instável e não uniforme de um fluido compressível e viscoelástico.

Durante o decorrer deste processo, cada partícula é sujeita a diferentes condições mecânicas e térmicas. Inicialmente forma-se uma camada de material solidificado junto às paredes do canal como resultado destas se encontrarem a uma baixa temperatura, e também do fenómeno conhecido como *Fountain Flow*, em que o perfil de velocidades torna-se parabólico, quando o fluxo se encontra completamente desenvolvido, levando a

que a frente de fluxo seja obrigada a fluir para as paredes frias do canal, e solidifique, tal como demonstrado na Figura 6.

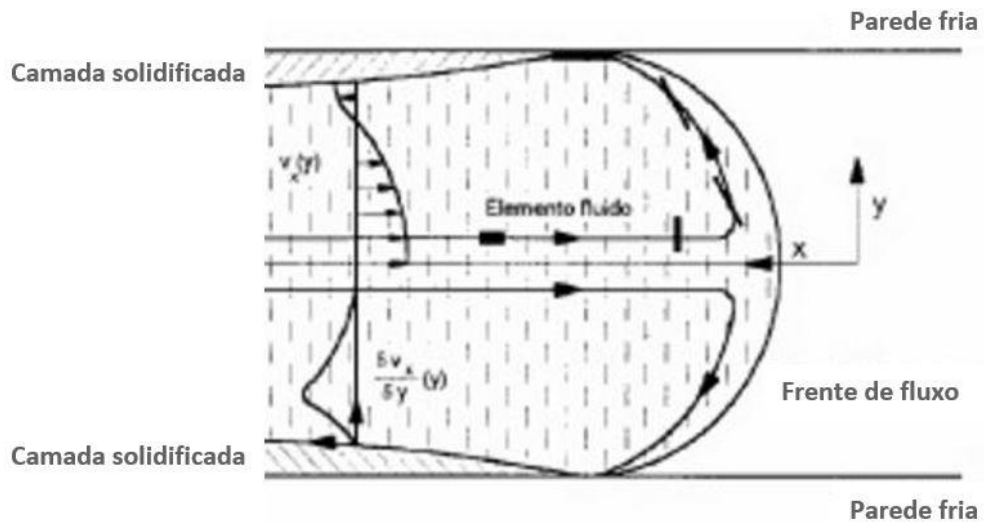


Figura 6 - Camada de material solidificada quando o fluxo entra em contacto com as paredes frias do molde;

(adaptado de (4))

Isto leva a que diferentes partículas sejam sujeitas a diferentes condições de temperatura e de taxas de corte, o que irá afetar a sua viscosidade.

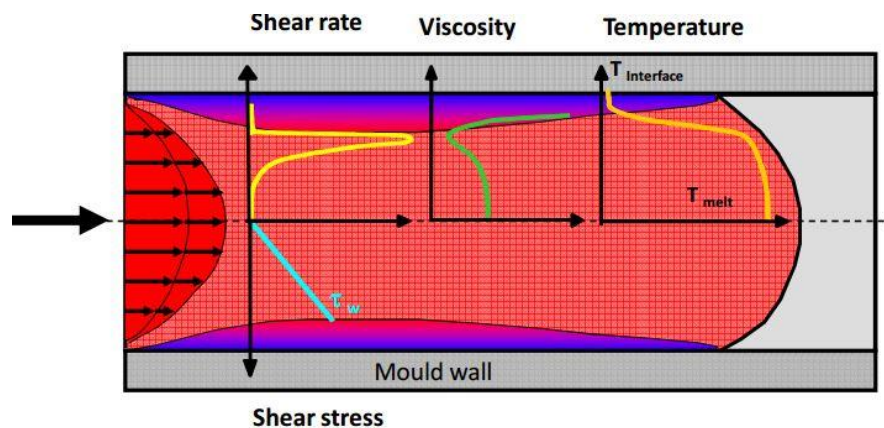


Figura 7 - Viscosidade, Temperatura e Taxa de Corte ao longo da espessura;

(adaptado de (5))

Como representado na Figura 7 as taxas de corte são máximas na interface da camada solidificada e do material fundido, e nulas no centro. Relativamente à temperatura



é máxima no centro e à medida a que o material se aproxima da parede esta diminui, ou seja, a taxa de arrefecimento é mínima no centro e máxima junto á parede do molde, onde as tensões induzidas pelo fluxo não vão ter tempo para relaxar. O perfil de temperaturas representado na Figura 7 resulta do calor gerado pelos fenómenos de condução, convecção e dissipação viscosa. A estrutura desenvolvida leva a que a contração na direção transversal à do fluxo seja constringida e a combinação com o gradiente de temperaturas introduz tensões residuais nas moldações.

Estas variáveis combinadas com a evolução da pressão no interior da impressão definem o ambiente termomecânico do processo, determinando a morfologia obtida e as propriedades do produto. As mesmas podem ser previstas se for possível monitorizar os parâmetros que definem o ambiente termomecânico na zona moldante.

A pressão verificada na moldação pode ser definida como a mais importante visto que é considerada a impressão digital do processo. A Figura 8 demonstra a evolução típica da pressão no interior da zona moldante.

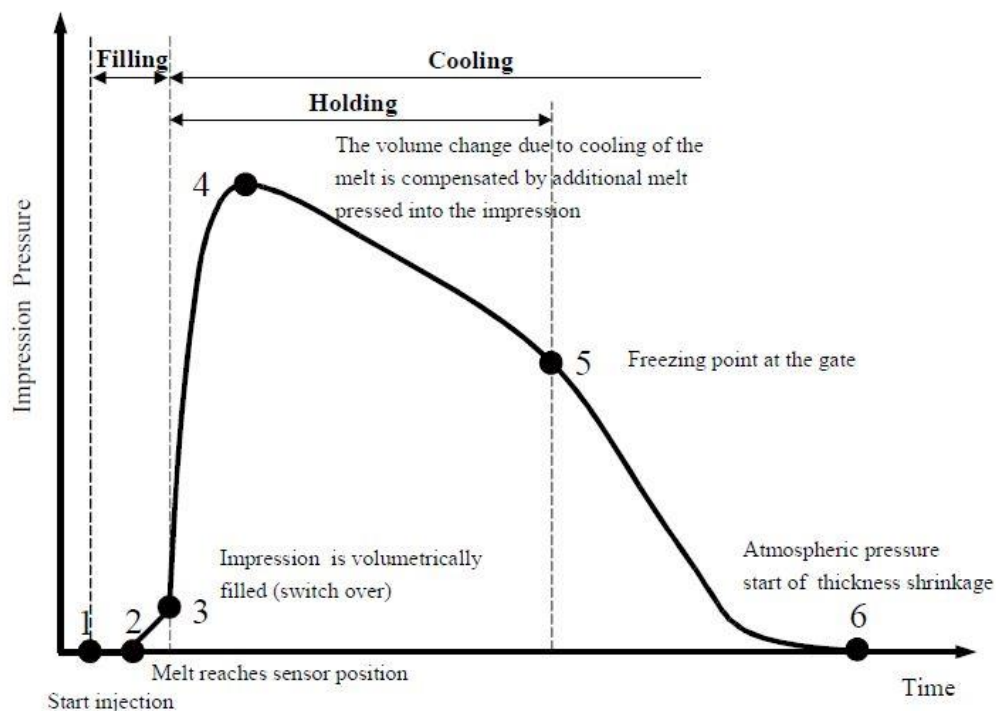


Figura 8 - Evolução da pressão na zona moldante;

(adaptado de (6))



Consequentemente qualquer alteração em parâmetros como a temperatura, taxas de corte, segunda pressão e tempo de segunda pressão levam a alterações no perfil de pressão representado na Figura 8. Na Figura 9 são apresentadas as alterações que se verificam no perfil de pressão quando se aumenta a segunda pressão, o tempo de segunda pressão, a velocidade de injeção e a temperatura do molde.

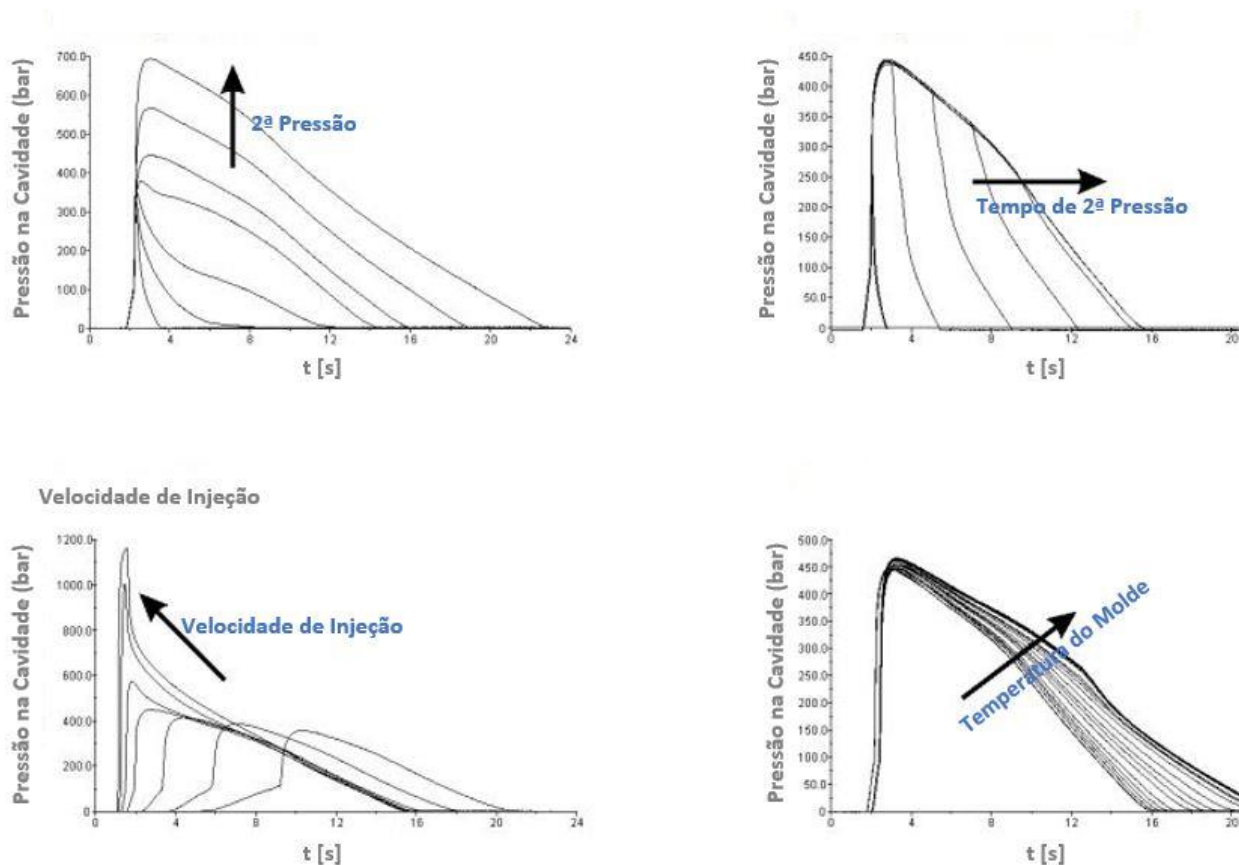


Figura 9 - Influência dos parâmetros que definem o ambiente termomecânico na pressão medida na zona moldante;

(adaptado de (6))

Todos estes parâmetros influenciam a qualidade da peça, e consequentemente o aparecimento de defeitos, então para solucioná-los deverá compreender-se a influência de cada um dos parâmetros no enchimento.



2.4. Contração e Empeno

Contração e empeno são dois fenómenos que estão intrinsecamente relacionados. A contração pode ser definida como um fenómeno volumétrico que se refere à diferença entre uma dimensão linear da zona moldante e da peça moldada à temperatura ambiente até quarenta e oito horas após a extração. Quanto ao empeno, pode ser descrito como a distorção da forma da peça, resultante de uma contração diferencial, ou seja, da contração variar de zona da peça para zona da peça. Este fenómeno aparece normalmente em peças grandes e com elevada planicidade (7) (8).

Assim, para corrigir o empeno, é necessário perceber o fenómeno da contração, que pode ser descrito como o fenómeno que leva a que as dimensões da peça injetada sejam reduzidas em relação às dimensões da zona moldante. Uma contração uniforme não causa a deformação da peça e a mudança da sua geometria.

$$\text{Contração} = \frac{D_i - D_P}{D_i} \quad (1)$$

Onde:

- D_i é a dimensão na zona moldante na direção i , ou seja, consiste na dimensão do postigo moldante na direção i ;
- D_P é a dimensão da peça injetada;

A contração ao longo da espessura e a contração ao longo do fluxo são dois fenómenos independentes com causas diferentes. A contração ao longo da espessura deve-se ao perfil de temperaturas desenvolvido e a contração na direção do fluxo deve-se à restrição realizada pelas camadas já solidificadas nas regiões próximas das paredes, tal como comprovado por *Titomanlio, G. et al* (9).

O arrefecimento efetuado sobre as camadas próximas das paredes é muito mais eficaz do que o efetuado nas camadas do núcleo (interiores), visto isto a orientação induzida nas camadas exteriores pelas tensões resultantes do fluxo não vai poder relaxar, em oposição as camadas do núcleo que vão arrefecer mais lentamente, dando-se a



relaxação das tensões. Estas diferenças nas tensões desenvolvidas vão originar tensões residuais na moldação.

Nos estudos desenvolvidos por *Himasekhar, K. et al* (10), *Wu, Scott S. et al.* (11) e por *Kikuchi, Hiroyuki et al.* (12) foi comprovado que o empeno resulta de uma contração diferencial, ou seja, em diferentes zonas da peça desenvolvem-se contrações diferentes. Assim a peça vai contrair em diferentes proporções em vários locais ao longo da espessura e ao longo do plano, desta forma originam-se tensões que caso superem a resistência mecânica da peça, vão originar o empeno desta.

As tensões residuais persistem ao longo da vida da peça e resultam do perfil de temperaturas ao longo da espessura não ser uniforme, embora estas balanceiem-se, pois, as tensões compressivas e distensivas cancelam-se mutuamente.

A espessura de uma peça em plástico com geometria de uma placa pode ser considerada como um número de camadas em diferentes solicitações mecânicas. Caso as camadas fossem “libertadas” algumas iriam expandir e outras contrair, o que resulta das tensões compressivas e distensivas existentes. Considerando a totalidade das camadas, estas tensões vão se anular mutuamente, originando um autobalanceamento, isto se a peça não apresentar problemas. Se por ventura, como resultado do processo, ocorrer o aparecimento de tensões numa dada zona da peça, este autobalanceamento não vai ocorrer e vão permanecer tensões na peça ao longo da sua vida, daí estas tensões serem denominadas de tensões residuais.

A formação de tensões residuais pode ser proveniente de tensões térmicas ou de tensões induzidas pela pressão. O primeiro caso deve-se ao facto de o material ter um arrefecimento não uniforme ou de uma taxa de arrefecimento demasiado alta que leve a que a solidificação decorra rapidamente e não ocorra a relaxação. Considerando as camadas exteriores e interiores separadamente, a parte exterior vai arrefecer em primeiro lugar, contraindo livremente sem originar tensões nas camadas interiores. Por outro lado, como o núcleo arrefece mais lentamente, a contração do núcleo vai ser dificultada pelas camadas exteriores solidificadas, originando um perfil de tensões parabólico com tensões compressivas nas camadas superficiais e tensões distensivas no núcleo como demonstrado na Figura 10.

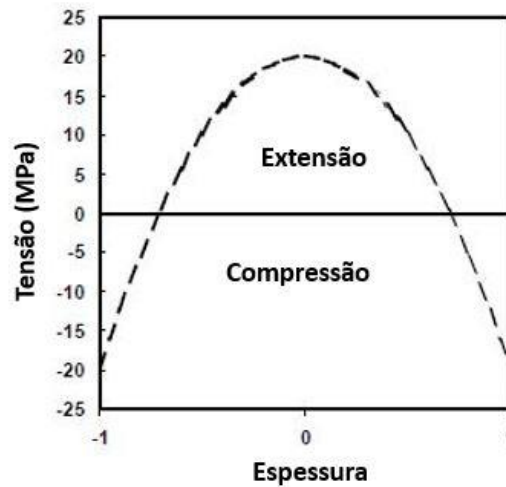


Figura 10 - Perfil de tensões residuais com origem térmica ao longo da espessura;

(adaptado de (13))

As tensões originadas pela pressão têm como fundamento que camadas arrefecidas a elevadas pressões têm tendência para expandir quando saem do molde. Como no processo de injeção a pressão varia durante a solidificação, diferentes camadas solidificam sob diferentes pressões e sob diferentes temperaturas. Então, tal como esquematizado na Figura 11, as camadas superficiais vão ser sujeitas a uma maior pressão, o que leva a que estas expandam, apesar de esta expansão ser revertida com o balanceamento das tensões.

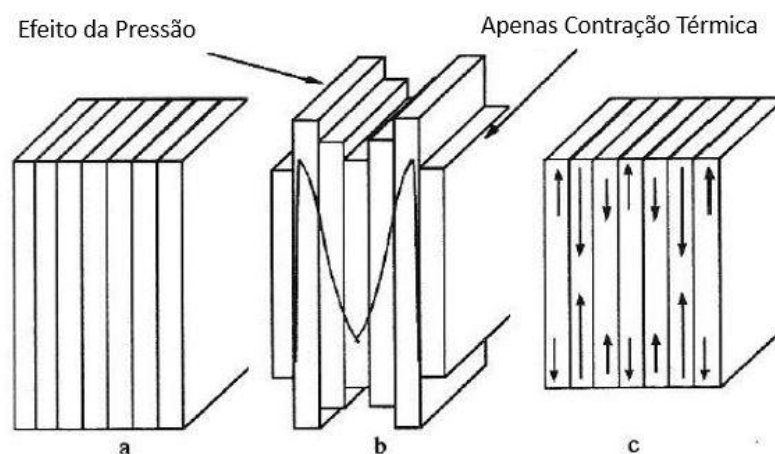


Figura 11 - a) Placa injetada antes da solidificação; b) Placa solidificada sob o perfil de tensões na ausência de equilíbrio mecânico entre as camadas; c) Distribuição final das tensões devido ao equilíbrio mecânico entre as camadas;

(adaptado de (13))



No estudo desenvolvido por *Titomanlio, G. et al.* (9) foi utilizado um modelo elástico simples para estudar o efeito da contração no interior do molde nas dimensões finais da peça e nas respetivas tensões residuais. Os resultados deste estudo demonstram que, a contração na direção do fluxo tem influência na distribuição das tensões residuais e no comprimento final da peça.

Uma peça não pode contrair uniformemente em todas as direções, a única direção onde a contração não é restringida é ao longo da espessura. Assim, mesmo que o molde não impeça a contração, as camadas exteriores que arrefecem rapidamente vão obstruir a contração ao longo do comprimento e da largura da peça, o que origina tensões internas e conseqüentemente levará ao empeno.

2.5. Fatores que influenciam a contração/empeno

Quer a contração quer o empeno são influenciados pelas ações tomadas em cada um dos passos do projeto da peça, da seleção do material, do projeto do molde e no processamento. Assim estes fatores devem ser estudados de modo a manter a contração estável durante ciclos de processamento longos. A contração e o arrefecimento de uma peça podem dar-se até 30 dias após a extração, embora seja sabido que 95 % do arrefecimento e da contração decorre nos primeiros minutos após a extração da peça. A alteração do volume, fenómeno característico da contração, tem como origem a alteração da temperatura ou a alteração da pressão na zona moldante (14) (15).

Normalmente, o empeno é associado a uma inadequada aplicação de pressão ou a um arrefecimento incorreto ou não uniforme, o que resulta em diferenças locais de contração. Assim uma contração não homogênea ao longo da peça irá originar tensões internas o que se irá traduzir em mudanças na forma da peça após a extração.

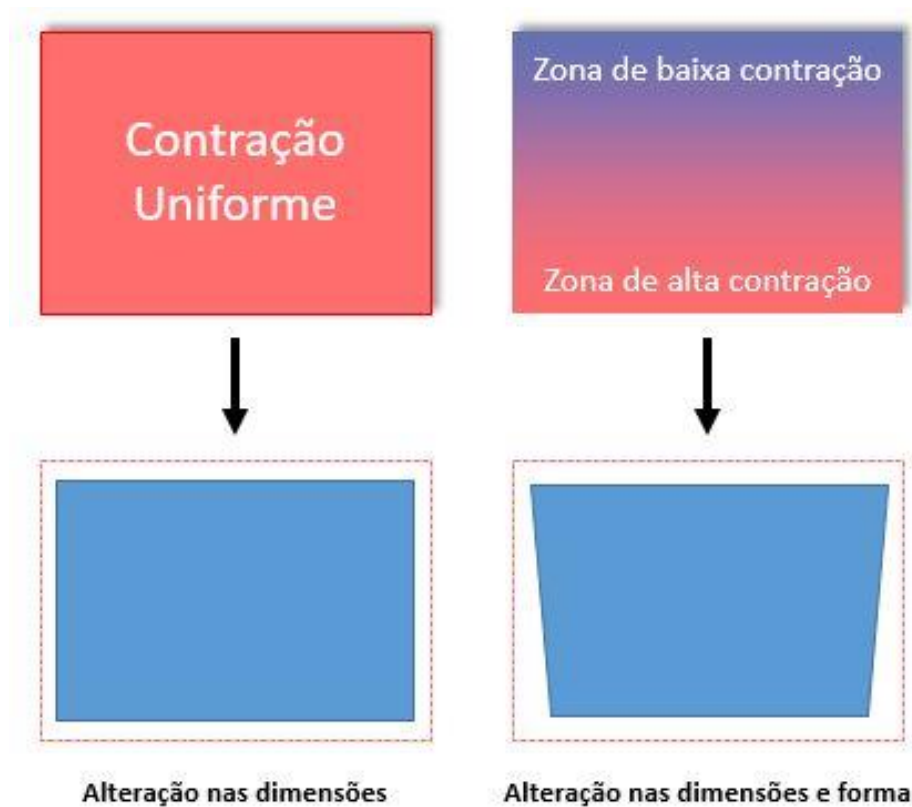


Figura 12 - Fenómeno de aparecimento de empeno em peças por contração não homogênea;

2.5.1. Parâmetros de moldação por injeção

2.5.1.1. Temperatura de injeção

Relativamente ao processo de moldação por injeção, existem duas temperaturas associadas a temperatura de injeção e a temperatura do molde; A temperatura de injeção tem essencialmente como função aquecer e fundir o material antes de este ser injetado. A variação deste parâmetro tem influência na viscosidade do material, e consequentemente também influencia a segunda pressão aplicada. Quanto maior for a temperatura de injeção maior será o potencial de contração com origem térmica, este efeito é representado pela linha tracejada na Figura 13. Por outro lado, com o aumento da temperatura de injeção menor será a viscosidade do fundido e melhor será a compactação das moléculas, e como tal existirá uma redução da contração, este efeito é representado na Figura 13 pela linha contínua.

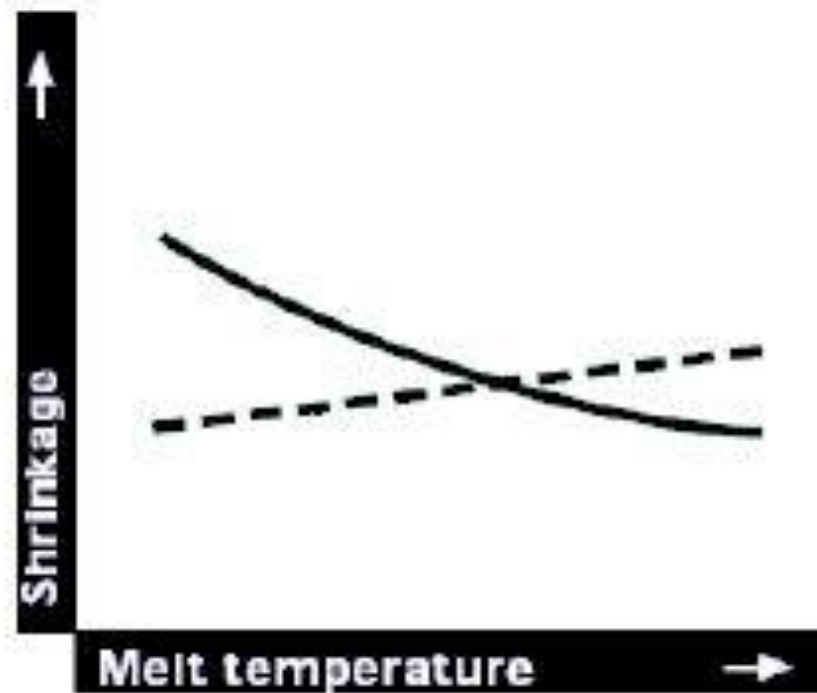


Figura 13 – Gráfico da contração vs temperatura de injeção;
(adaptado de (16))

2.5.1.2. Temperatura do molde

Quanto à temperatura do molde, esta tem como função arrefecer o material fundido até à sua solidificação. O arrefecimento é um fenómeno muito importante visto que afeta as propriedades finais da peça, e acima de tudo afeta o nível de tensões internas e, no caso dos materiais semi-cristalinos, a cristalização desenvolvida. Quanto maior for a temperatura a que se encontra o molde, maior será a contração visto que o material vai arrefecer lentamente levando a que as moléculas relaxem e o desenvolvimento de tensões seja reduzido, embora a cristalização seja maior o que leva um ligeiro aumento da contração. Então, com o aumento da temperatura nem sempre é garantida uma redução da contração, e consequentemente do empeno, especialmente se o material em uso for um termoplástico semi-cristalino, tal como será explicado mais à frente no capítulo 2.5.2.

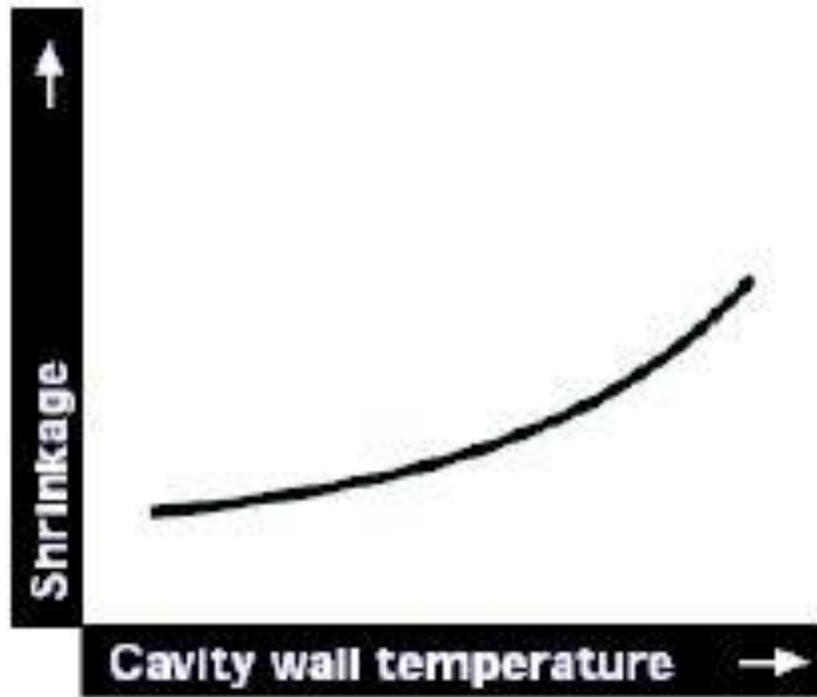


Figura 14 – Gráfico da contração vs temperatura do molde;
(adaptado de (16))

2.5.1.3. Tempo de 2ª Pressão

O tempo de 2ª pressão tem uma grande influência na contração, pois quanto maior for, mais próximas estarão as moléculas visto que serão compactadas durante mais tempo, impedindo assim o movimento destas enquanto não ocorre a solidificação, desta forma a contração originada será menor. Caso o tempo de 2ª pressão seja reduzido, as moléculas acabariam por ter liberdade para se movimentar e a contração seria elevada, o que revela a importância do parâmetro em estudo (17).



Figura 15 – Gráfico da Contração vs Segunda Pressão;
(adaptado de (16))

2.5.2. Estrutura molecular

Os materiais termoplásticos podem ser classificados consoante cristalizem ou não cristalizem quando arrefecem, o que depende de muitos fatores. Os termoplásticos cristalinos, contudo, só cristalizam parcialmente devendo preferencialmente designar-se por semi-cristalinos.

Materiais amorfos

Polímeros amorfos com taxas de relaxação geralmente rápidas produzem peças com contração isotrópica, que pode ser definida como uma contração igual na direção do fluxo e na direção transversal. Estes materiais apresentam uma zona de transição entre o estado sólido e líquido, sendo que a temperatura que define esta passagem é a temperatura de transição vítrea, T_g . Quando aquecido a uma temperatura superior à T_g , a viscosidade vai diminuir até ser suficiente para o material fluir. O processo de fornecimento de energia a



uma massa molecular aumenta o movimento das moléculas de tal modo que as cadeias de polímero ocupam mais volume localmente, aumentando o volume específico. Quanto maior for a energia fornecida, maior será a facilidade de escoamento do material, e consequentemente será preciso uma maior quantidade de energia para arrefecer o material até à T_g . O tempo necessário para arrefecer permite uma maior relaxação molecular e uma contração isotrópica.

Os parâmetros de processamento desempenham um papel importante na contração verificada num material amorfo, assim é necessário ter em conta alguns efeitos quando se processa este tipo de materiais:

- Quanto maior for a temperatura a que se encontra a peça quando é extraída, maior será o tempo de arrefecimento sem o constrangimento realizado pela impressão. Esta contração livre é maior do que a contração desenvolvida dentro do molde, porque as paredes frias tendem a arrefecer a peça num volume constrangido;
- Aumentando a espessura de uma peça, o seu tempo de arrefecimento vai aumentar e por consequência o tempo para contrair também vai ser maior. Para além disso, uma maior espessura também leva a uma maior diferença de temperaturas entre a zona das camadas solidificadas pelo contacto com a parede fria, e a zona do centro que arrefece lentamente, o que origina tensões residuais ao longo da espessura da peça;
- O tempo de segunda pressão deve ser suficientemente longo para permitir a solidificação do ataque. Caso o tempo de segunda pressão seja reduzido, o material pode refluir da impressão aumentando a contração;
- A segunda pressão é utilizada para pressionar o fundido durante a solidificação, devendo sempre ser constante para manter o volume constante na cavidade. À medida que a peça arrefece, o volume específico diminui com a pressão constante e algum material fundido pode entrar para a cavidade antes do ataque solidificar. O fundido adicionado vai diminuir a contração geral da peça, no entanto,



uma segunda pressão excessiva vai compactar em excesso a peça e dificultar a extração;

- Aumentar a temperatura de injeção resulta num aumento do tempo necessário para a solidificação do ataque. Uma temperatura maior irá aumentar o tempo de arrefecimento e irá ter o efeito descrito no parágrafo anterior.

Materiais semi-cristalinos

Os materiais amorfos têm menos tendência para empenar do que os materiais semi-cristalinos, pois um semi-cristalino possui uma maior contração. Isto acontece porque os cristais formados durante o arrefecimento ocupam menos volume do que as moléculas não-orientadas de um material amorfo. No entanto, o empeno não resulta apenas de uma contração elevada, ou seja, uma contração elevada apenas aumenta a probabilidade de empeno.

Estes materiais possuem uma estrutura molecular altamente organizada, com um ponto de fusão definido, deste modo com o aumento da temperatura não amolecem lentamente, pois mantêm-se rígidos até ser absorvida uma determinada quantidade de energia, e posteriormente transformam-se em um fluido de baixa viscosidade. Por oposição aos materiais amorfos, os semi-cristalinos contraem menos na direção do fluxo quando comparado com a contração ao longo da espessura, sendo por essa razão anisotrópicos. O processo de cristalização é determinado pela temperatura e pelo tempo de arrefecimento, ambos definem a taxa de arrefecimento que tem uma grande influência na nucleação e no crescimento dos núcleos, e por consequência na estrutura cristalina desenvolvida. Quanto menor for a taxa de arrefecimento, ou seja, quanto mais lento for o arrefecimento maior será a cristalização desenvolvida e maior será a contração.

Outro facto que comprova que os materiais semi-cristalinos têm uma maior contração do que os materiais amorfos, é a transformação da estrutura cristalina com a temperatura o que leva a que exista uma maior diferença de volume específico entre a fase solidificada (cristalina) e a fase fundida, tal como representado na Figura 16.

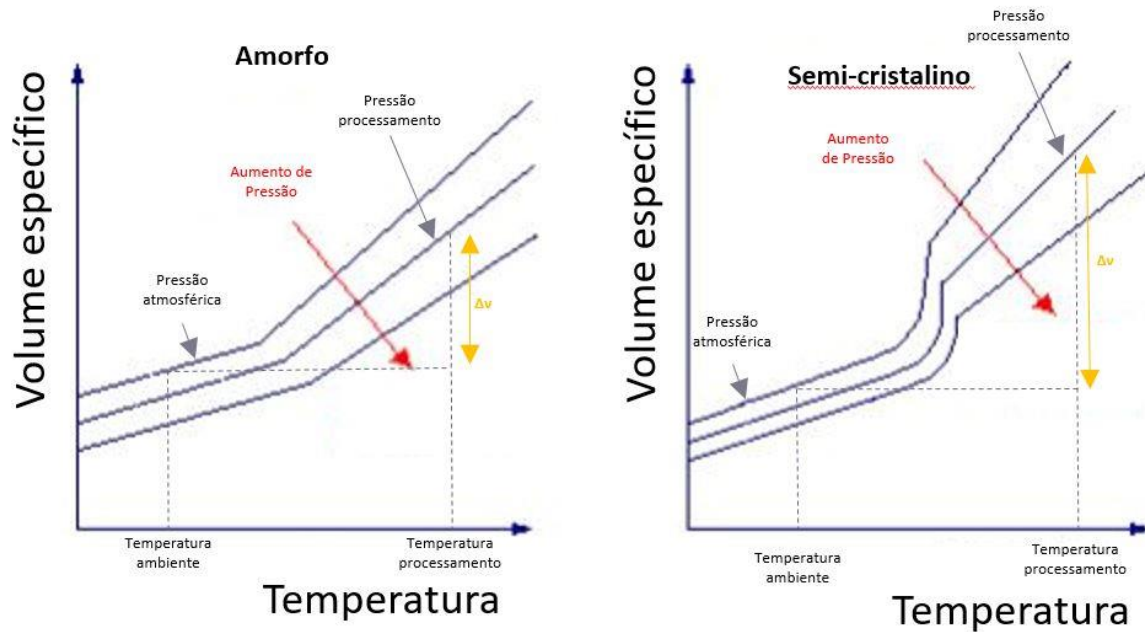


Figura 16 - Curvas pVT para materiais amorfos e semi-cristalinos;

(adaptado de (4))

Em oposição aos materiais amorfos, os materiais semi-cristalinos apresentam uma temperatura de fusão, T_f , bem definida que está associado ao próprio processo de fusão das zonas cristalinas. Assim abaixo do ponto de fusão o polímero é sólido, enquanto que acima a estrutura cristalina é dissolvida e o polímero flui facilmente.

A cristalização envolve a organização local de cadeias curtas adjacentes, que depois de nucleadas, crescem. No arrefecimento decorre a nucleação no fundido, a estrutura cristalina cresce radialmente em cada ponto de nucleação, isto durante a fase primária da cristalização. Através deste fenómeno desenvolve-se uma estrutura esférica à volta do ponto de nucleação, que é denominada de esferulite. Na Figura 17 apresenta-se uma representação esquemática de uma esferulite.

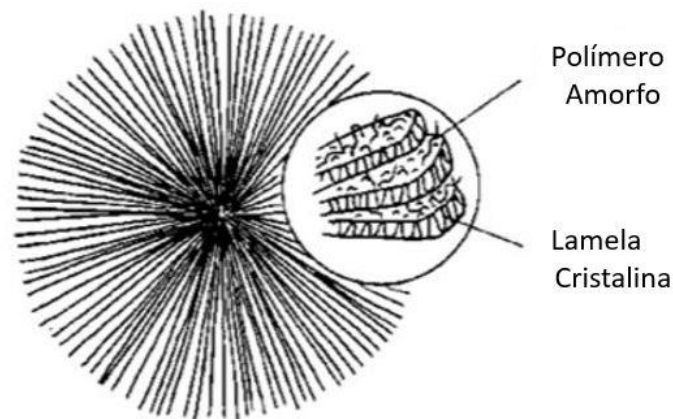


Figura 17 - Representação esquemática de uma esferulite;

(adaptado de (18))

No interior da esferulite encontram-se camadas de lamelas cristalinas separadas por regiões não cristalinas ou amorfas.

A cristalização secundária consiste no processo de incorporação adicional de segmentos de moléculas nos cristais. O fenómeno de cristalização mencionado anteriormente, é caracterizado por ser lento o que origina uma contração adicional quando o material é aquecido a uma temperatura superior à temperatura de transição vítrea.

Na rede cristalina, as cadeias encontram-se muito compactadas, o que resulta numa maior densidade. Quanto maior for a densidade de estruturas cristalinas maior será a densidade geral. Mecanicamente, um polímero semi-cristalino apresenta uma rigidez elevada, devido aos cristais que interligam a estrutura do polímero, para além de que a cristalização é um processo que envolve a redução de volume. Então um polímero cristalizado apresenta uma contração superior, quando comparado com o mesmo sem cristalização.

Uma taxa de cristalização baixa reduz a contração, e conseqüentemente reduz o empeno desenvolvido em polímeros semi-cristalinos. Em contraste, um material nucleado apresenta uma maior contração, e proporcionalmente um maior empeno.

O peso molecular também pode influenciar a contração, pois quanto maior for o mesmo, maior será a viscosidade e assim a queda de pressão no enchimento será maior.



Para compensar este fenómeno deverá utilizar-se uma segunda pressão maior, caso não se utilize esta última verificar-se-á uma contração acentuada na peça final.

Polímeros ramificados cristalizam de forma diferente dos polímeros lineares, a presença de cadeias laterais leva a que estas não se consigam incorporar numa estrutura cristalina em desenvolvimento. Quanto maior for o comprimento das cadeias laterais menor será a cristalinidade resultante. Para além disso, os polímeros ramificados apresentam um maior número de interligações que também inibem uma cristalização rápida.

Materiais reforçados

Atualmente, os materiais reforçados são cada vez mais utilizados na indústria, existindo vários reforços como fibra de vidro, fibra de carbono, fibra aramida, etc. No caso da moldação por injeção o reforço mais utilizado é a fibra de vidro, assim a utilização deste tipo de fibra origina outra variável que determina o fenómeno de contração e o empeno de peças. Em função do tipo e do nível de reforço, a contração desenvolvida irá variar.

Pós, flocos e fibras são normalmente incorporados para seletivamente modificarem as propriedades mecânicas do material.

Um efeito secundário da utilização deste tipo de reforços, é que o reforço utilizado e o polímero vão ter contrações com diferentes proporções, para além de que quando se utilizarem fibras a contração será diferencial, pois a contração verificada na direção do fluxo e na direção transversal a esta, será diferente.

A maior parte dos reforços e cargas são inorgânicos e possuem um coeficiente de expansão térmica relativamente baixo. Assim, quando a peça moldada é arrefecida, os reforços e as cargas vão contrair menos do que a matriz polimérica. Reforços em flocos tendem a reduzir a contração geral, e quando adicionados a polímeros amorfos ou semi-cristalinos, esta redução é aproximadamente proporcional à sua concentração. Pós e flocos são geometricamente mais uniformes que as fibras. A sua adição não origina problemas de contração anisotrópica, pois a contração em todas as direções é reduzida proporcionalmente em relação à percentagem incorporada. Isto deve-se ao facto de que



estes possuem o mesmo comprimento em todas as direções, o que leva a que não sejam orientados pelo fluxo, ocupem volume e reduzam a contração.

Em oposição, as fibras não possuem o mesmo comprimento em todas as direções, sendo caracterizadas pela sua esbelteza. As fibras inorgânicas, como a fibra de vidro, são normalmente utilizadas como agentes de reforço na matriz, de maneira a melhorar certas propriedades do produto final. Por outro lado, a utilização de fibras pode originar problemas relacionados com o processo, nomeadamente problemas como a contração diferencial entre direções, o que poderá originar o empeno da peça final.

A contração anisotrópica de materiais reforçados com fibras deve-se ao fato das fibras ficarem orientadas durante o fluxo do fundido. Pois, contrariamente às moléculas de polímero que podem orientar e relaxar durante o enchimento e o arrefecimento, as fibras possuem uma tendência para reorientar durante o arrefecimento. Quer o fluxo de corte quer o fluxo elongacional vão influenciar a orientação das fibras, tal como os parâmetros de processamento mencionados em seguida: velocidade de injeção, espessura da moldação, viscosidade do fundido e o sistema de alimentação. Assim, quando se pretende processar um material reforçado com fibras deve-se proceder com precaução ao escolher a localização do ponto de ataque.

O fenómeno de contração anisotrópica em materiais não reforçados pode resultar da orientação e relaxação molecular desenvolvida durante o enchimento e arrefecimento. O material tem tendência para orientar na direção de fluxo durante o enchimento e para relaxar durante o arrefecimento o que origina uma maior contração na direção do fluxo do que na direção transversal. Caso se utilize um material reforçado, o efeito é oposto, as fibras ficam orientadas na direção do fluxo durante o enchimento e ficam congeladas com essa orientação durante o arrefecimento. Como as fibras contraem menos que o material base, a contração é reduzida na direção de fluxo. Embora, a contração na direção transversal à de fluxo seja maior, pois o volume da peça é conservado durante o arrefecimento, a contração de um material reforçado pode mesmo exceder a contração de um material não reforçado nesta direção. Então, a utilização de fibras como reforços vai originar uma contração diferencial, que produz tensões internas, que se manifestam na peça final como empeno.

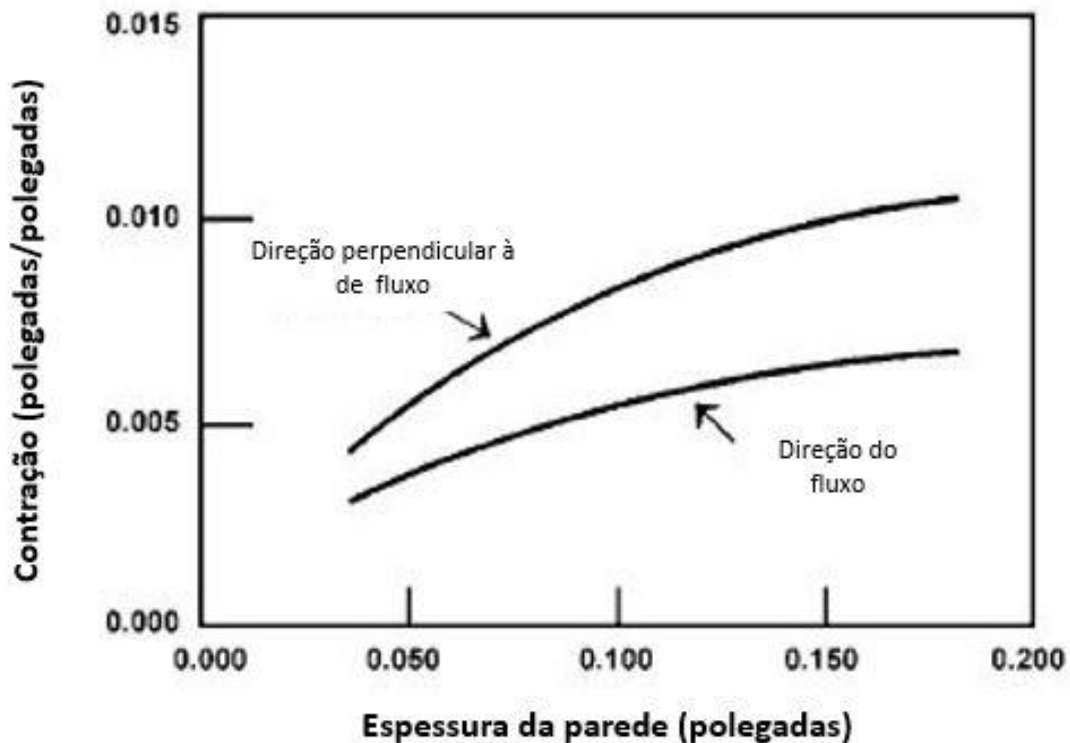


Figura 18 - Variação da contração com a direção e com a espessura, de um PBT reforçado com 30% de fibra de vidro;

(adaptado de (19))

Na Figura 19 e na Figura 20 são representados os resultados da microscopia de um polipropileno reforçado com fibra de vidro. Na Figura 19 é apresentada a secção paralela ao fluxo, onde é possível verificar na zona superior e inferior uma camada de baixa espessura, na qual as fibras encontram-se orientadas aleatoriamente, o que advém do arrefecimento rápido resultante do fundido entrar em contacto com as paredes frias do molde, devido ao fenómeno de *fountain flow*. Abaixo das zonas mencionadas anteriormente encontra-se uma camada de material com uma elevada orientação das fibras, visto que estas são orientadas pelo perfil de taxas de corte originado pela frente de fluxo. Quanto mais próximas estiverem as cavidades do centro, maior será a aleatoriedade da orientação das fibras, sendo obviamente máxima no centro.

Relativamente à Figura 20, na zona central verifica-se uma tendência para se alinharem na direção transversal à do fluxo, embora, em geral, as fibras apresentem uma baixa orientação.

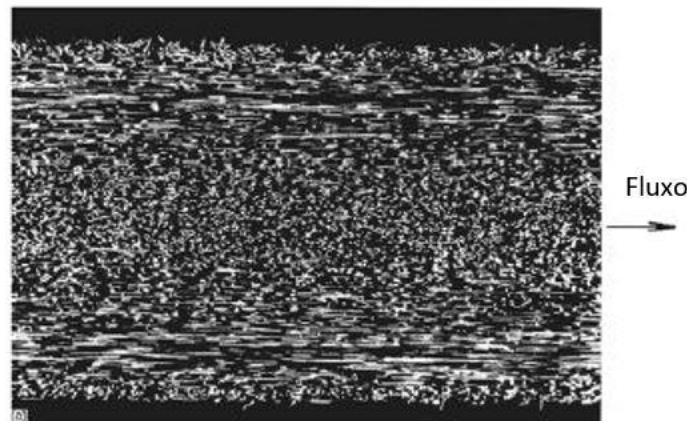


Figura 19 - Secção paralela à direção de fluxo de um polipropileno reforçado com fibra de vidro;
(adaptado de (19))

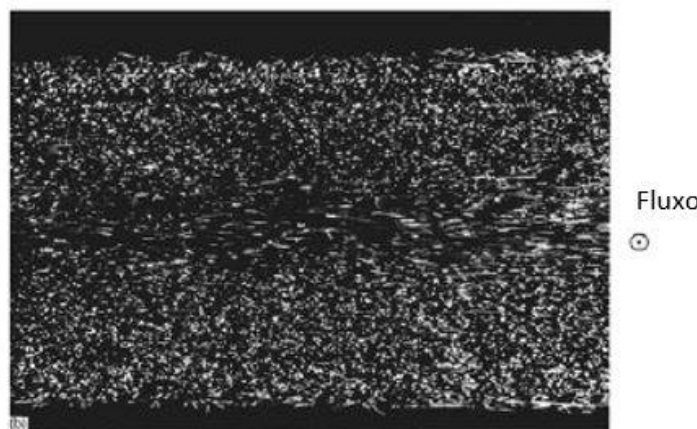


Figura 20 - Secção transversal à direção de fluxo de um polipropileno reforçado com fibra de vidro;
(adaptado de (19))

Por outro lado, diferentes percentagens de fibra vão influenciar acentuadamente a contração desenvolvida. Tal como é possível perceber na Figura 21, onde é representado o comportamento da contração de um polímero semi-cristalino reforçado com fibra de vidro. Para um polímero semi-cristalino não reforçado, quer a contração na direção de fluxo quer na direção transversal são elevadas, sendo um pouco maior na direção de fluxo. À medida que a percentagem de fibra incluída aumenta a contração na direção do fluxo diminui drasticamente, enquanto que na direção transversal diminui ligeiramente.

Em suma, quanto maior for a percentagem de fibra de vidro maior será a diferença entre a contração na direção do fluxo e na direção transversal. De outra forma, se o



material for semi-cristalino esta diferença ainda será mais pronunciada devido á contração do polímero durante a cristalização.

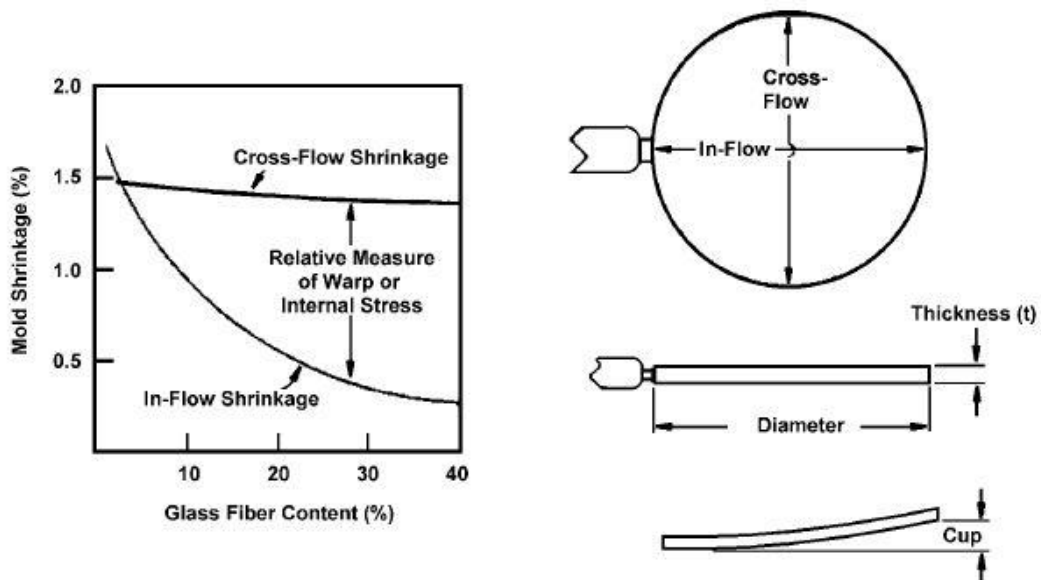


Figura 21 - Efeito da contração anisotrópica no empeno na injeção de um disco de acetalo reforçado com fibra de vidro;

(adaptado de (19))

2.6. Modelação numérica do processo de moldação por injeção

Hoje em dia, a indústria dos plásticos necessita de prever as propriedades do material e do processo de moldação por injeção, de maneira a cumprir especificações minuciosas quer em termos de propriedades quer em termos de dimensões finais. Para tal, recorre-se a simulações numéricas que usam modelos numéricos e matemáticos para analisar todas as fases do processo.

Os primeiros estudos desenvolvidos sobre simulação remontam ao final de 1950, em que *Toor et al.* (20) introduziram um esquema que permitia calcular a velocidade média de enchimento de polímero numa cavidade fria retangular, sendo possível obter o



comprimento máximo de fluxo, e para além disso também era possível deduzir o tempo de enchimento.

Durante os anos 70, o interesse na modelação matemática do processo de moldação por injeção aumentou, pois, a exigência ao nível da qualidade das peças também cresceu. Durante muitos anos, nas simulações apenas se tinha em consideração a fase de enchimento, até que *Kamal* e *Kenig* (21) tiveram em consideração a fase de enchimento, a fase de compactação e a fase de arrefecimento, em que utilizaram o método das diferenças finitas para solucionar os campos de pressão e temperaturas.

Na Universidade de Cornell desenvolveu-se um programa denominado de *Cornell Injection Molding Program (CIMP)* em 1974, que se focou nos princípios científicos do processo, nomeadamente na fase de enchimento. Este consorcio teve um efeito significativo na simulação da moldação por injeção.

Os estudos mencionados anteriormente basearam-se em geometrias simples, pois os mesmos tinham interesse académico, apesar da sua simplicidade, providenciaram a base para o desenvolvimento de ferramentas comerciais de simulação.

Em termos comerciais, a primeira empresa dedicada à simulação da moldação por injeção foi fundada na Austrália em 1978, e chama-se *Moldflow*, apesar de ter sido comprada pela *Autodesk* em 2008.

Nos anos 80, deu-se a introdução dos sistemas *CAD* de modelos em superfícies ou em *Whireframe*, ou seja, a geometria era representada por superfícies sem espessura e depois aquando da criação da malha atribuía-se a informação da espessura aos elementos. Durante o mesmo período, deu-se a introdução do método dos elementos finitos e da aproximação 2.5D o que permitiu um avanço nos *softwares* de simulação comerciais e académicos. O interesse comercial e académico estendeu-se às restantes fases do processo nesta década, o que também resultou no aumento significativo do número de empresas envolvidas na simulação.

A análise do empeno também surgiu neste período e a abordagem a este defeito pode ser dividida em duas partes – previsão da contração isotrópica e previsão dos efeitos anisotrópicos. A primeira é influenciada pelo campo de pressões e temperaturas, sendo



determinada pela fase de compactação. E a segunda é relacionada com o desenvolvimento da estrutura aquando da solidificação. *Isayev et al.* (22) tiveram em conta as tensões residuais em um polímero amorfo, para além disso *Titomanlio et al.* (23) relacionou a segunda pressão com o desenvolvimento de tensões residuais.

Posteriormente, na década de 90, deu-se o desenvolvimento de *softwares CAD 3D*, o que se revelou um avanço enorme em termos de desenvolvimento de produto, embora a simulação se focasse na aproximação de *Hele-Shaw* e requeria representações do plano médio da geometria 3D. No início dos anos 90, não era possível realizar simulações de geometrias 3D, devido aos recursos de computação existentes, apesar disso este período pode ser descrito como o início do domínio da geometria 3D na indústria de simulação da injeção por moldação. Um efeito desta mudança para 3D, foi a possibilidade de realizar análises a produtos por pessoas não especializadas, o que permitiu aos desenhadore de produto começarem a realizar estas análises. Através disto, reconheceu-se que a realização da análise era muito mais benéfica quando realizada na fase inicial do desenvolvimento do produto.

A partir de 2000, ocorreu um grande avanço ao nível de simulações pois tornou-se possível analisar *over-moldings* e até incorporar insertos, para além de a maior parte dos fornecedores deste tipo de *softwares* oferecerem códigos 3D, com diferentes níveis de cálculo (24).

Atualmente a simulação revela-se de extrema importância na indústria, pois permite prever diversos defeitos e perceber diversos fenómenos. Através destes *softwares* é possível analisar-se as fases de enchimento, compactação e arrefecimento, em termos de:

- Progressão da frente de fundido de forma a ver o enchimento do molde;
- Tempo de enchimento;
- Pressão;
- Temperatura;
- Taxas de corte;
- Velocidades em X, Y, Z;
- Núcleo fundido;
- Força de fecho em X, Y, Z;



- Linhas de Soldadura;
- Prisões de ar;

Para além disso, também é possível prever empenos após a moldação, isto em termos de:

- Forma final da peça;
- Contração Volumétrica;
- Contração Linear;
- Deslocamento resultante do empeno em X, Y, Z;
- Influência da orientação molecular e/ou das fibras no empeno;

Em conclusão, estes programas revelam-se uma arma muito poderosa que é utilizada diariamente na indústria, sendo que a presente dissertação serve também para demonstrar como este tipo de análise é utilizado na indústria e se as suas previsões coincidem com os resultados práticos (24).





3. TRABALHO EXPERIMENTAL

De forma a estudar a contração e empeno, foi utilizado um caso real proposto pela empresa, que se focou num molde transferido pelo cliente que originava alguns defeitos, como por exemplo, o empeno das paredes laterais da peça. Assim com a execução do presente trabalho, a empresa solucionou um problema e forneceu um caso que permitirá auxiliar o estudo realizado.

O presente capítulo divide-se em duas fases, uma primeira na qual se apresenta o trabalho relativo ao molde com os posições antigos, e uma segunda fase em que se expõe o trabalho relativo ao molde com o novo sistema de refrigeração e todas as alterações associadas. Esta divisão deve-se ao fato de o novo sistema de refrigeração resultar da sua simulação *Moldex3D* e da comparação com os mesmos resultados da primeira fase, de modo a garantir que os defeitos são corrigidos.

3.1. Caso em estudo

A peça utilizada no caso de estudo consiste num copo utilizado no fabrico de condensadores, tal como representado na Figura 22.

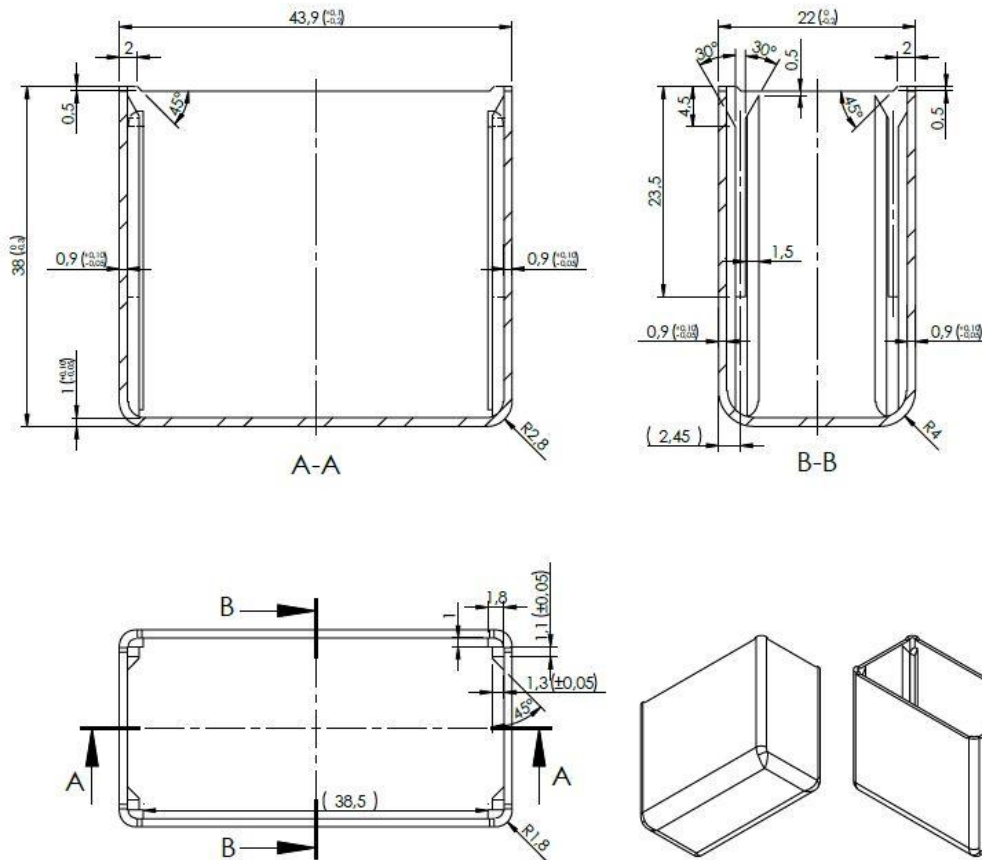


Figura 22 - Peça em estudo;

A peça em análise já se encontrava em produção quando se iniciou o presente trabalho, e conseqüentemente já existia um molde projetado, sendo este constituído por quatro cavidades. No decorrer da produção, surgiram vários defeitos, que vão ser solucionados neste estudo.

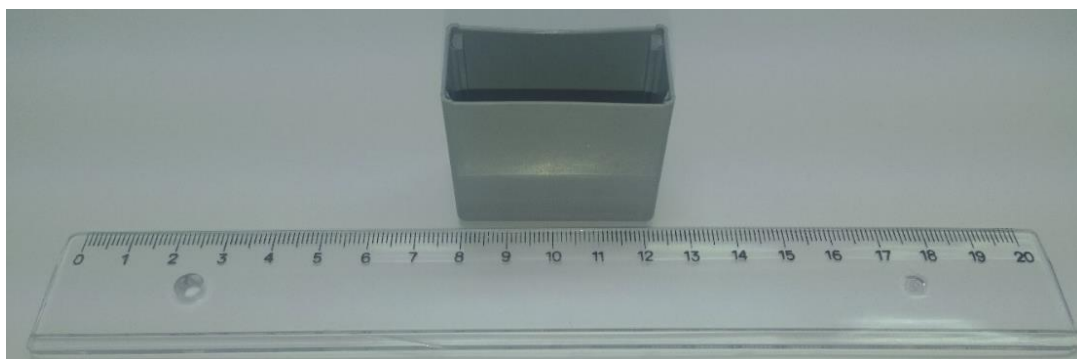


Figura 23 - Peça no *status* anterior;



3.1.1. 1ª Fase

Na 1ª fase, serão abordados todos os passos do procedimento experimental relativos ao molde com os postigos antigos.

3.1.1.1. Peça e Defeitos

Nos ensaios realizados com os postigos antigos, como já foi referido, surgiram vários defeitos, nomeadamente o empeno das paredes laterais, tal como é possível observar na Figura 24.



Figura 24 - Representação do empeno das paredes laterais;

Por outro lado, os pés da peça não assentam numa superfície plana, ou seja, a cota evidenciada na Figura 25 não é cumprida pois cada um dos quatro pés tem cotas diferentes e não assentam numa superfície plana.

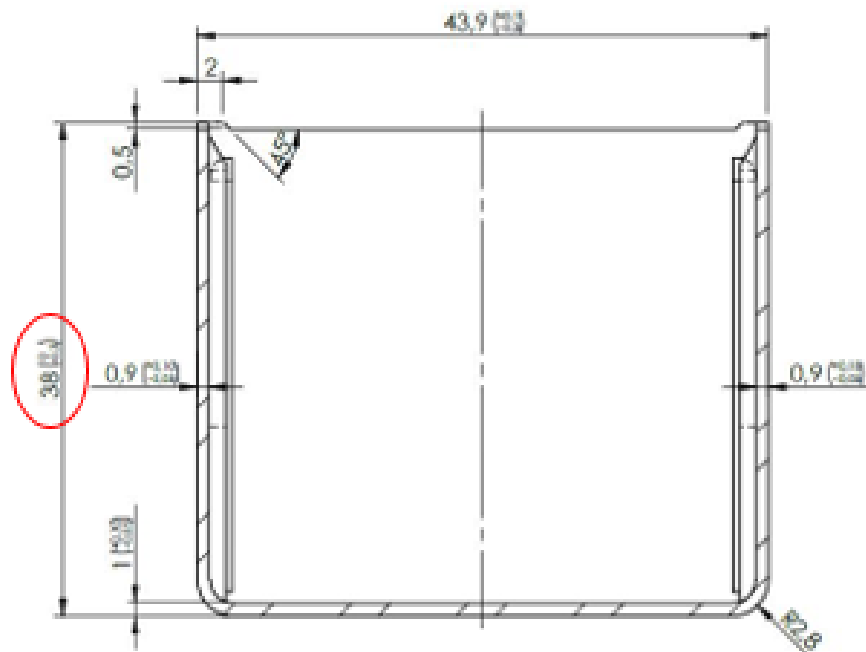


Figura 25 - Parte do desenho 2D da peça em estudo;

Para além disso, quando se analisa uma moldação é possível observar um arrastamento na zona do ataque como se pode verificar na Figura 26.

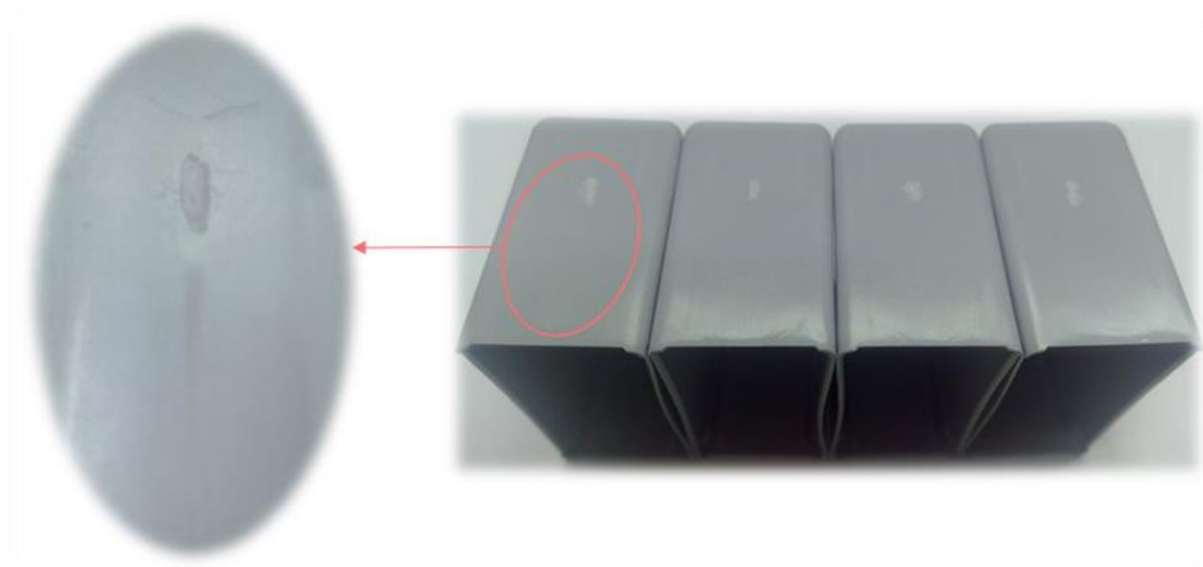


Figura 26 - Efeito de arrastamento na zona de ataque;



Através da análise da Figura 27 é possível verificar que o ataque em cada um dos posições encontra-se completamente gasto, o que origina um enchimento não balanceado tal como demonstrado na Figura 28.

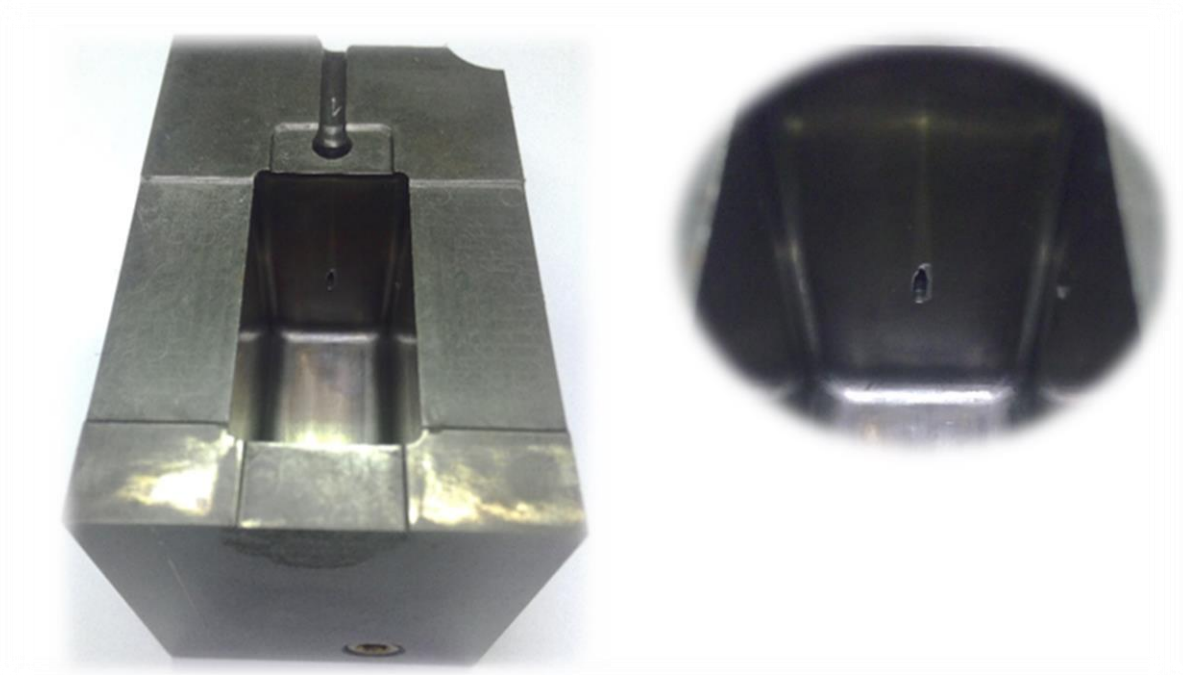


Figura 27 - Posição moldante antigo, exemplo de uma cavidade;



Figura 28 - Injeção incompleta (o material utilizado na injeção destas peças não é o mesmo que o material em estudo);



3.1.1.2. Materiais

O material utilizado nos ensaios, foi um PBT reforçado com fibra de vidro, cujo seu nome comercial é *KINGFA RG301 CZ.30*, que apresenta uma percentagem de fibra de 30%. O seu *datasheet* encontra-se no anexo 1.

3.1.1.3. Molde

O molde projetado para esta peça é um molde de quatro cavidades de canais frios, e com as dimensões gerais de 246 x 296 x 313 mm.

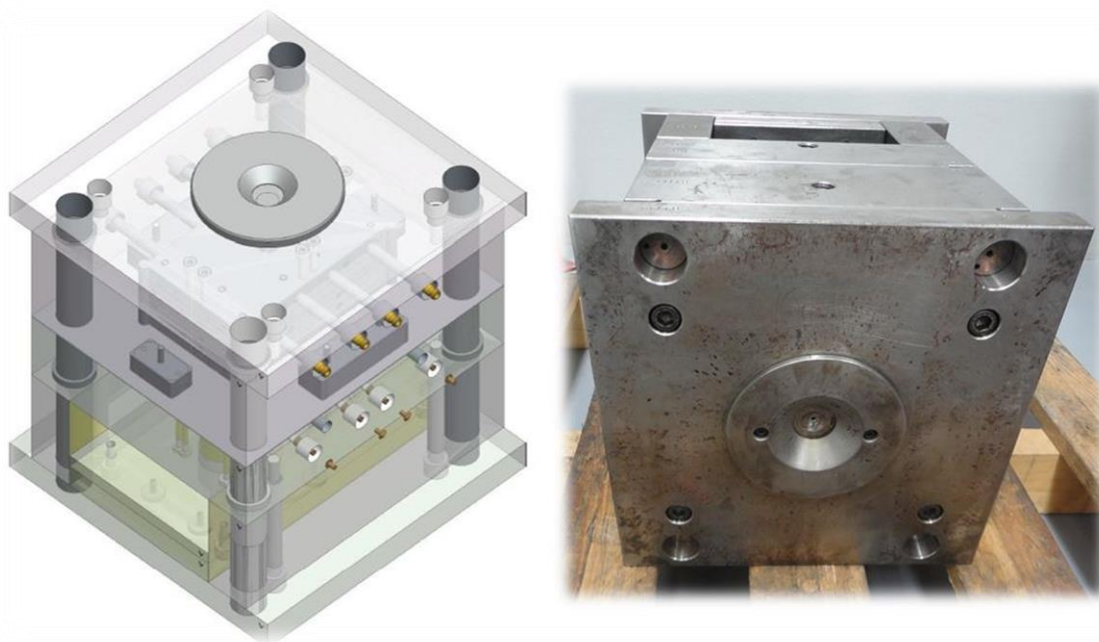


Figura 29 - Molde em estudo;

No molde do cliente, os postigos moldantes antigos possuíam uma refrigeração ineficiente e não uniforme, como é possível observar na Figura 30. Ou seja, o sistema de refrigeração para além de não se encontrar centrado relativamente à peça, não era eficaz pois na sua constituição apenas existiam dois canais, o que se traduz num comprimento de fluxo de 25.1 cm/cavidade, e em 39.0 cm²/cavidade em termos de área de transferência, não se revelando suficiente para a dimensão do postigo. Além disso, a

centragem dos postiços (lado fixo e lado móvel) não era a melhor, o que potenciava os desequilíbrios referidos. Estes factos tinham um peso considerável no aparecimento dos defeitos mencionados.

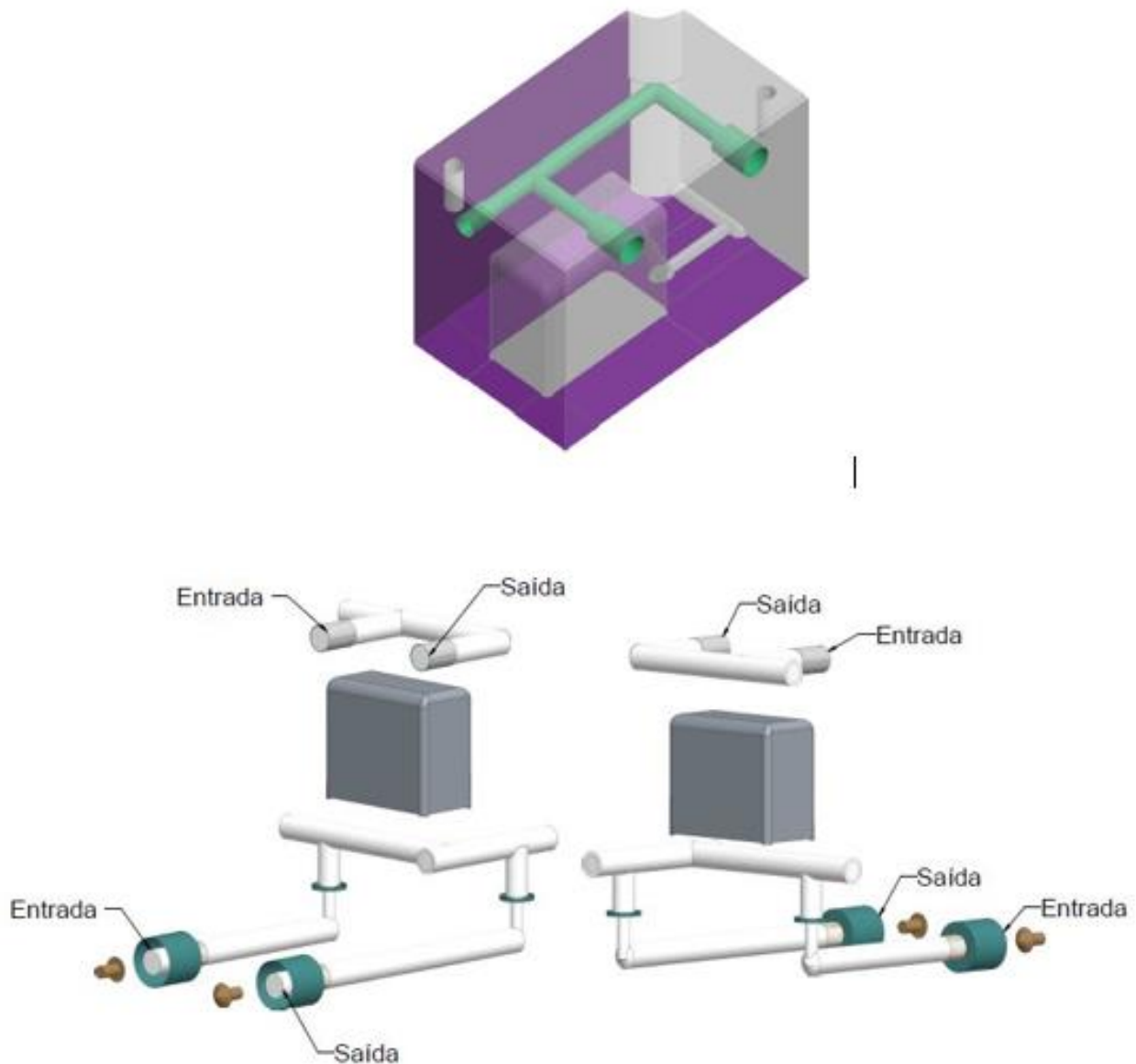


Figura 30 - Sistema de refrigeração dos postiços moldantes antigos



3.1.1.4. Máquina de injeção

Nos ensaios realizados foi utilizada uma máquina *ARBURG ALLROUNDER 1000-350*, cujas características são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Características da máquina *ARBURG ALLROUNDER 1000-350*;

Largura/Colunas (mm)	420
Força de Fecho (ton)	100
Parafuso (mm)	40
Volume máximo de injeção (cm ³)	182
Pressão máxima de injeção (MPa)	212
Altura mínima do molde (mm)	250
Abertura máxima (mm)	750



Figura 31 - Máquina de injeção utilizada;



3.1.1.5. Parâmetros de processamento

O conjunto de parâmetros de processamento utilizado no ensaio realizado com o molde do cliente é apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros de injeção utilizados nos ensaios relativos à 1ª fase;

	Conjunto 1
Temperatura de injeção (°C)	Zona 1 Zona 2 Zona 3 Zona 4 Bico 260 265 280 300 345
Temperatura lado móvel do molde (°C)	60
Temperatura lado fixo do molde (°C)	55
Pressão de injeção (MPa)	140
2ª Pressão (MPa)	88 + 77
Tempo 2ª Pressão (s)	0.4 + 0.3
Tempo arrefecimento (s)	5

3.1.1.6. Simulação *Moldex3D* – Dados de entrada

De forma a comparar as peças injetadas nos ensaios com resultados teóricos, procedeu-se à simulação numérica no *software Moldex3D*, em que inicialmente foram realizadas simulações com o sistema de refrigeração antigo.

Neste tipo de análises, o volume da peça é representado por um conjunto de elementos de pequena dimensão que podem ter várias geometrias, assim o conjunto define a geometria da peça, sendo normalmente denominado de “malha”. Usualmente, só se aplica malha à peça e ao sistema de alimentação, mas neste estudo as linhas de água e a própria estrutura do molde também foram malhadas, de forma a obter resultados o mais

próximos possível da realidade. Com o mesmo objetivo, também foi tido em conta, a máquina de injeção utilizada nos ensaios.

As malhas geradas são apresentadas na Figura 32.

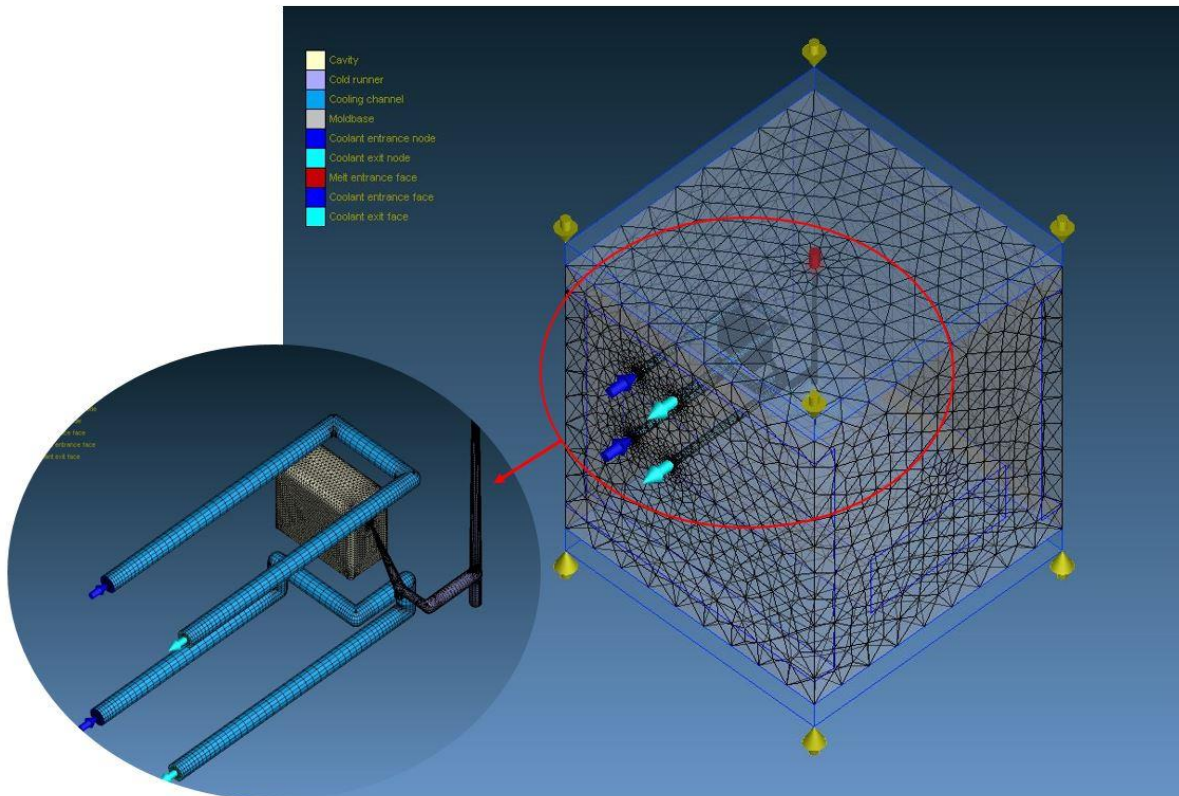


Figura 32 - Malha da estrutura do molde, do sistema de refrigeração, do sistema de alimentação e da peça;

Nos estudos realizados, foram efetuadas várias iterações denominadas de *RUN*'s, nas quais se representou os ensaios realizados. A *RUN* estudada nesta fase, ou seja, a *RUN* relativa ao ensaio realizado com o postigo antigo do molde do cliente corresponde à *RUN01*. Assim, serão apresentados todos os dados introduzidos desde a geração da malha até à obtenção de resultados.



- **RUN01**

A malha gerada para a presente *RUN* é apresentada na Figura 33.

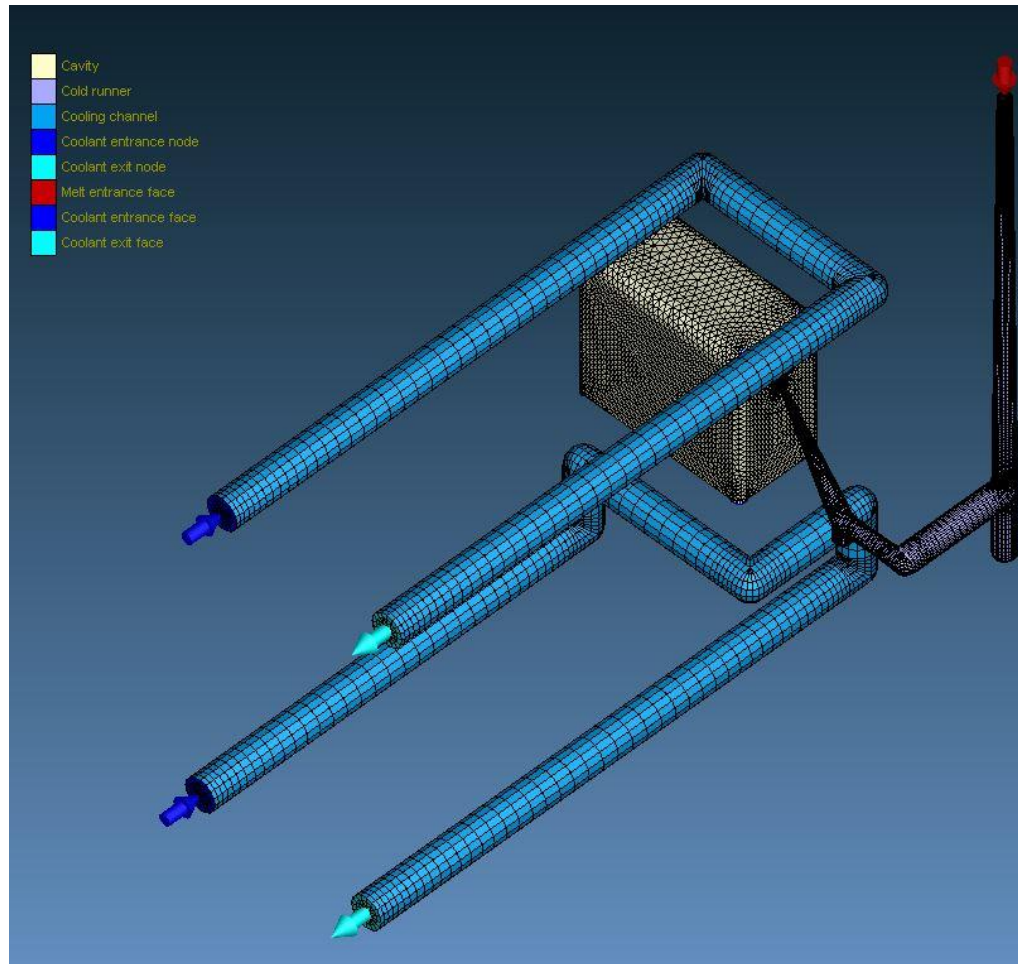


Figura 33 - Malha da *RUN01*;

Tabela 3 - Dados introduzidos na geração da malha *RUN01*;

<i>RUN</i>	ESPAÇAMENTO NA MALHA (mm)
01	1.5

Quanto ao processo os dados são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Dados do processo introduzidos *RUN01*;

<i>RUN</i>	POSTIÇOS	MÁQUINA	PARÂMETROS	MATERIAL
01	Velhos	ARBURG Allrounder 420 A 1000-350	Conjunto 1 *	KINGFA RG301 CZ.30

* Os parâmetros que constituem o conjunto 1 são apresentados na Tabela 2.

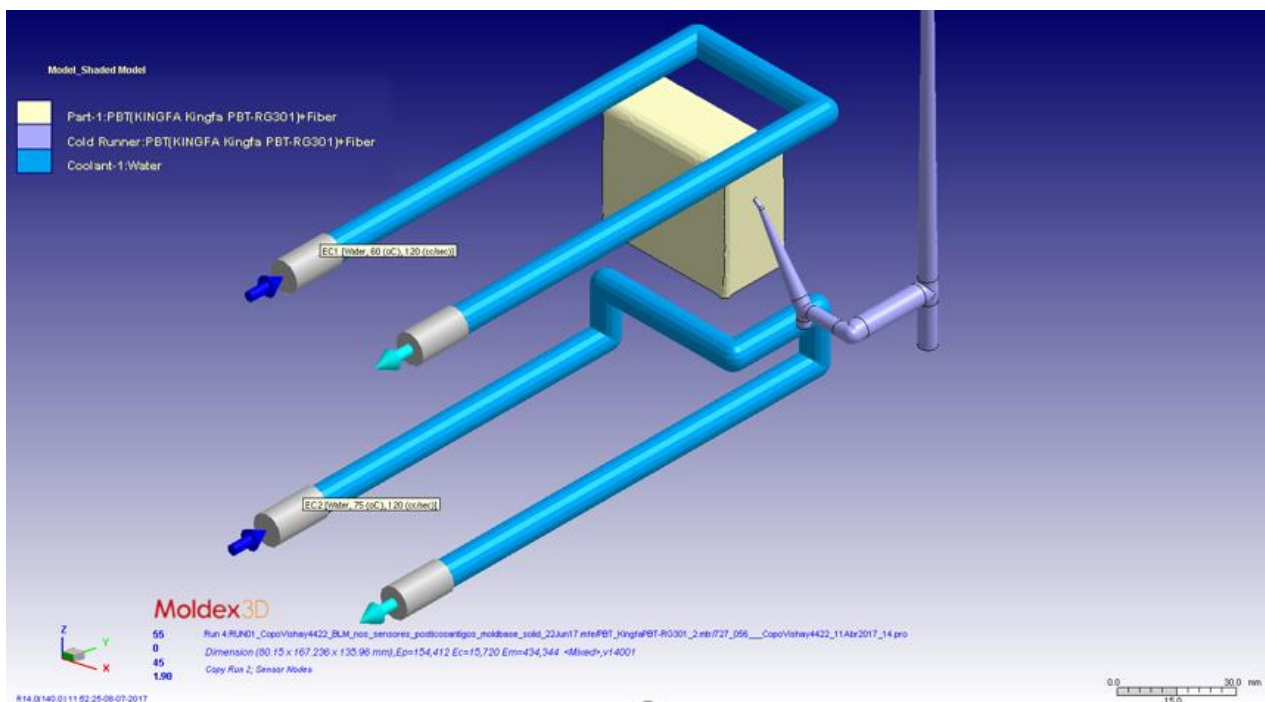


Figura 34 - Modelo e dados introduzidos *RUN01*;

3.1.2. 2ª Fase

Na 2ª fase serão abordados todos os passos relativos ao molde com os novos postigos moldantes.

3.1.2.1. Materiais

Os materiais utilizados para injetar a peça são dois PBT's reforçados com fibra de vidro, cujos nomes comerciais são *KINGFA RG301 CZ.30* e *PBT CCP 5615F PRETO* em que os seus *datasheet's* encontram-se no anexo 1 e 2, respetivamente. O material



enunciado em primeiro lugar apresenta uma percentagem de fibra de 30% e o segundo uma percentagem de 15%.

3.1.2.2. Molde

Com o objetivo de corrigir os defeitos mencionados, foram numa primeira etapa projetados e só depois produzidos os novos posições moldantes com um sistema de refrigeração otimizado, que é representado na Figura 36. Inicialmente, foi calculado o comprimento mínimo dos canais de refrigeração para assegurar uma refrigeração eficaz. Posteriormente, o novo sistema de refrigeração foi dimensionado e foi realizada uma simulação em *Moldex3D* para verificar se efetivamente os defeitos em estudo são corrigidos.

- **Cálculo do comprimento mínimo dos canais de refrigeração**

Os dados utilizados nos cálculos são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Dados utilizados nos cálculos do comprimento dos canais de refrigeração;

Massa peça + alimentação	0.043 kg
Entalpia do material à temperatura de injeção	436 kJ/kg
Entalpia do material à temperatura de extração	87 kJ/kg
Tempo de arrefecimento	5 s
Área lateral do molde	0.371 m ²
Área de contacto do molde	0.175 m ²
Fator de proporcionalidade	80 W/m ² . °C
Temperatura ambiente	23 °C
Temperatura do molde	65 °C
Coefficiente de transferência de calor por convecção	15 W/m ² . °C
Fator de emissividade (aço)	0.25



Coefficiente de radiação de um corpo negro	5.77 W/m ² .k ⁴
Temperatura ambiente	296.15 K
Temperatura absoluta do molde	338.15 K
Calor específico do fluido (água)	4186 J/kg.°C

Para proceder a estes cálculos é necessário realizar um balanço térmico do molde quando colocado na máquina de injeção, este balanço é apresentado esquematicamente na Figura 35.

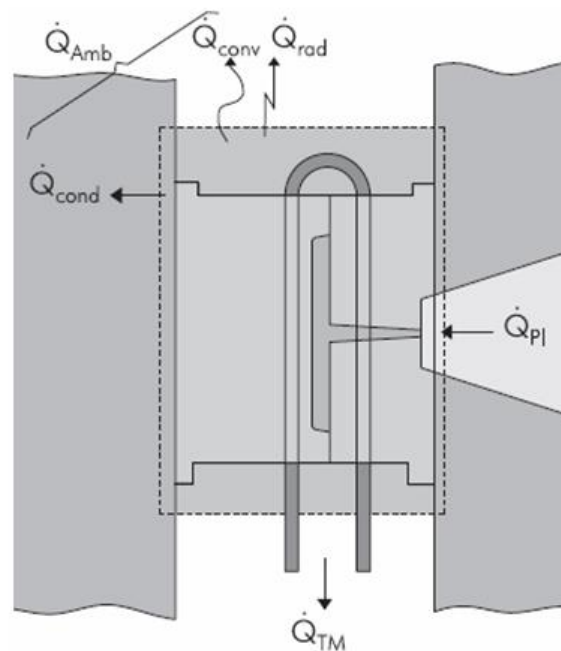


Figura 35 - Balanço térmico do molde;

(Adaptado de (25))

$$\sum \dot{Q}_i = \dot{Q}_{TM} + \dot{Q}_{Amb} + \dot{Q}_{Pol} = 0 \quad (2)$$

Onde:

\dot{Q}_{TM} = Calor transferido pelo fluido de arrefecimento

\dot{Q}_{Amb} = Calor transferido para o ambiente

\dot{Q}_{Pol} = Calor originado pelo polímero



→ Calor originado pelo polímero

$$\dot{Q}_{\text{Pol}} = \frac{m(h_i - h_e)}{t_c} \quad (3)$$

$$\dot{Q}_{\text{Pol}} = 3011.17 \text{ W}$$

→ Calor transferido pelo ambiente

$$\sum \dot{Q}_{\text{Amb}} = \dot{Q}_{\text{Cond}} + \dot{Q}_{\text{Conv}} + \dot{Q}_{\text{Rad}}$$

Onde:

$$\dot{Q}_{\text{Cond}} = A_f \times \beta \times (T_a - T_m) \quad (4)$$

$$\dot{Q}_{\text{Cond}} = -588.70 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{\text{Conv}} = A_l \times \alpha \times (T_a - T_m) \quad (5)$$

$$\dot{Q}_{\text{Conv}} = -233.73 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{\text{Rad}} = A_l \times \varepsilon \times C_{\text{rad}} \times \left(\left(\frac{\theta_a}{100} \right)^4 - \left(\frac{\theta_m}{100} \right)^4 \right) \quad (6)$$

$$\dot{Q}_{\text{Rad}} = -28.81 \text{ W}$$

Então:

$$\dot{Q}_{\text{Amb}} = (-588.70) + (-233.73) + (-28.81) = -851.24 \text{ W}$$

→ Calor transferido pelo fluido de arrefecimento

$$\dot{Q}_{\text{Tm}} = -\dot{Q}_{\text{Pol}} - \dot{Q}_{\text{Amb}} \quad (7)$$

$$\dot{Q}_{\text{Tm}} = (-3011.17) - (-851.24) = -2159.9 \text{ W}$$

→ Comprimento mínimo de refrigeração

$$L = \frac{2 \times |\dot{Q}_{\text{Tm}}| \times e}{k \times \pi \times d \times \Delta T} \quad (8)$$

$$L = \frac{2 \times |2159.9| \times 6 \times 10^{-3}}{26 \times \pi \times 5 \times 10^{-3} \times 25} = 2.53 \text{ m} = 253 \text{ cm}$$



Tendo estes cálculos em conta foi dimensionado o novo sistema de refrigeração que compreende 119.7 cm/cavidade de comprimento de fluxo, este valor não é superior ao comprimento mínimo de refrigeração calculado, pois corresponde ao comprimento de fluxo máximo tendo em conta a dimensão do postigo, visto que não era possível adicionar mais canais de refrigeração.

O comprimento de fluxo efetivo, dos postigos novos, traduz-se numa área de transferência de 188.0 cm²/cavidade, enquanto que os postigos antigos apenas apresentavam uma área de 39.0 cm²/cavidade.

Para estimar a transferência de calor, tendo em conta o comprimento dos canais de refrigeração, recorreu-se à equação 8 tal como representado em seguida.

$$|\dot{Q}_{Tm}| = \frac{\pi \times L \times k \times d \times \Delta T}{2 \times e}$$

$$|\dot{Q}_{Tm (P.Velhos)}| = \frac{\pi \times 0.251 \times 26 \times 5 \times 10^{-3} \times 25}{2 \times 6 \times 10^{-3}} = 213.6 \text{ W}$$

$$|\dot{Q}_{Tm (P.Novos)}| = \frac{\pi \times 1.197 \times 26 \times 5 \times 10^{-3} \times 25}{2 \times 6 \times 10^{-3}} = 1018.5 \text{ W}$$

Com base na quantidade de calor transferida na primeira e segunda fase, é possível dizer que existiu um aumento de aproximadamente 79%.

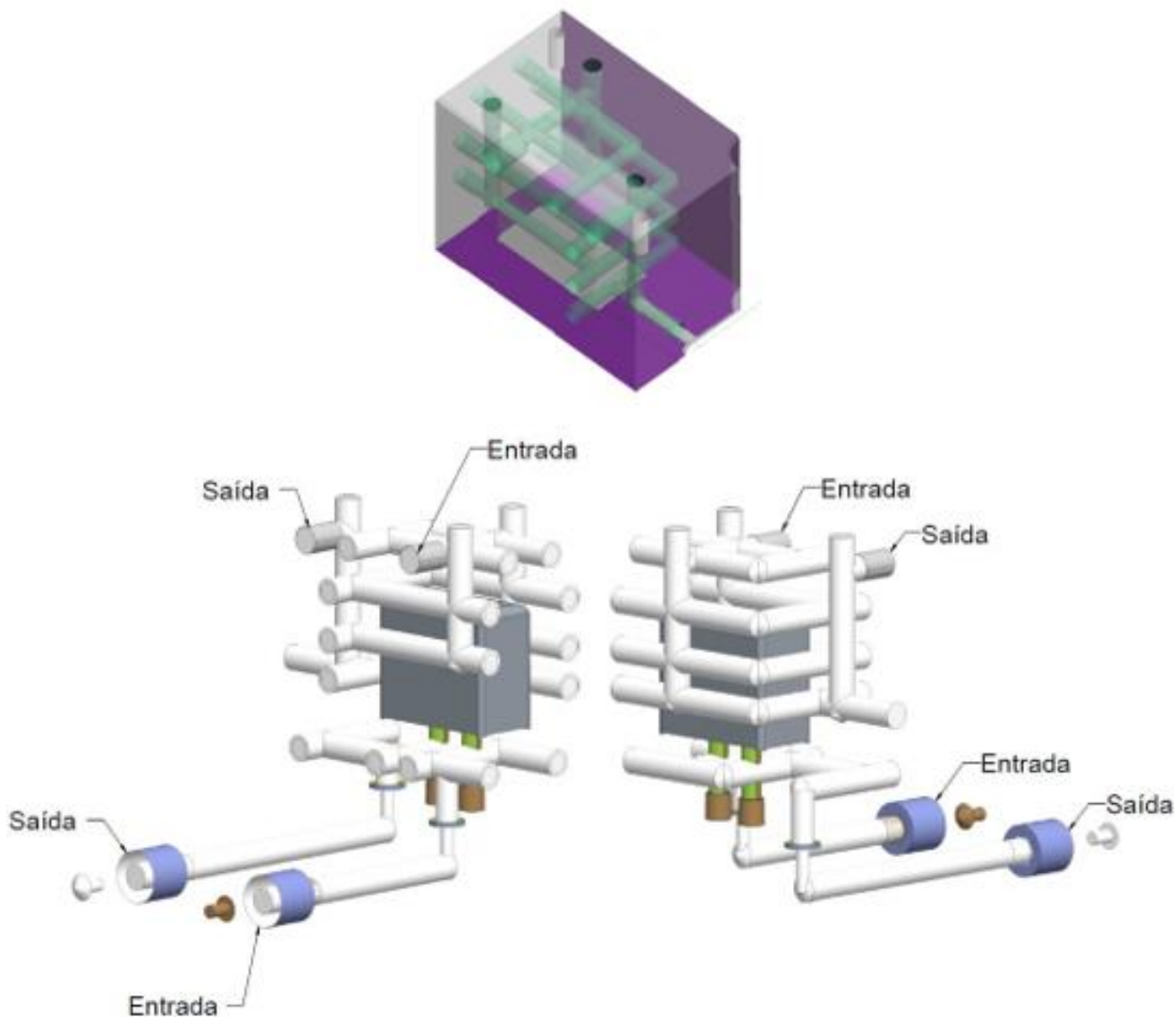


Figura 36 - Postiço moldante novo;

O sistema de refrigeração projetado é apresentado na Figura 37, cujos canais utilizados possuem um diâmetro de 5 mm.

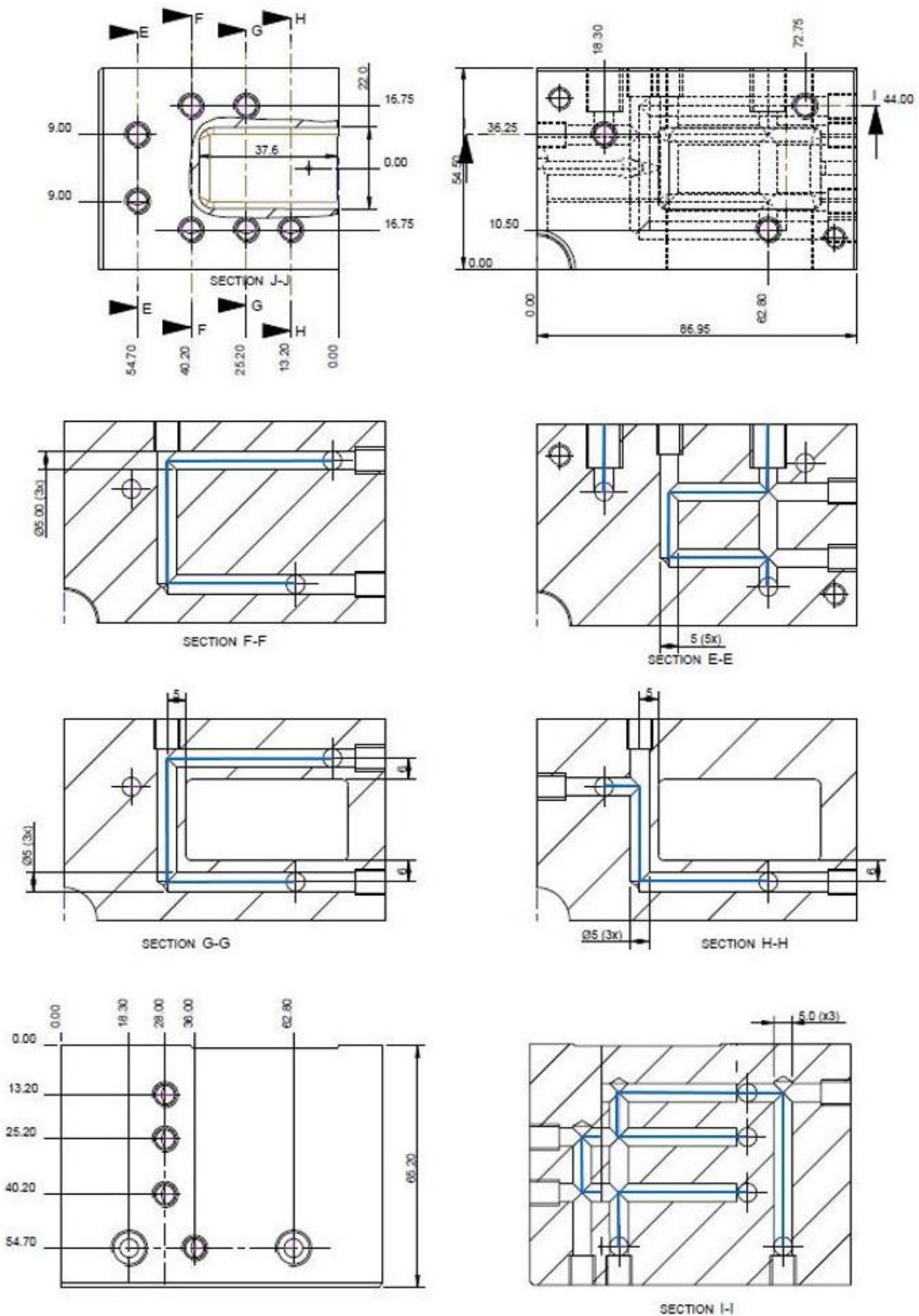


Figura 37 - Desenho 2D do novo sistema de refrigeração projetado (caminho percorrido pela água representado a azul);



3.1.2.3. Máquina de injeção

Nos ensaios realizados foi utilizada uma máquina *ARBURG ALLROUNDER 1000-350* cujas características já foram apresentadas na Tabela 1, sendo que, como é perceptível, em ambas as fases foi utilizada a mesma máquina.

3.1.2.4. Parâmetros de processamento

Os parâmetros de processamento utilizados nos ensaios realizados nesta fase são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Parâmetros de injeção utilizados nos ensaios realizados na 2ª fase;

	Conjunto 2	Conjunto 3
Temperatura de injeção (°C)	Zona 1 Zona 2 Zona 3 Zona4 Bico 265 270 280 295 325	Zona 1 Zona 2 Zona 3 Zona4 Bico 265 270 275 285 325
Temperatura lado móvel do molde (°C)	45	55
Temperatura lado fixo do molde (°C)	75	85
Pressão de injeção (MPa)	140	130
2ª Pressão (MPa)	63 +63	63+63
Tempo 2ª Pressão (s)	1.5 + 0.2	1.3+0.2
Tempo arrefecimento (s)	6	6



3.1.2.5. Simulação *Moldex3D* - Dados de Entrada

De forma a comparar as peças injetadas nos ensaios com resultados teóricos e a verificar se o novo sistema de refrigeração solucionava os defeitos em estudo, procedeu-se à simulação no *software Moldex3D*, no qual se realizaram simulações com o sistema de refrigeração atual.

As malhas geradas são apresentadas na Figura 38.

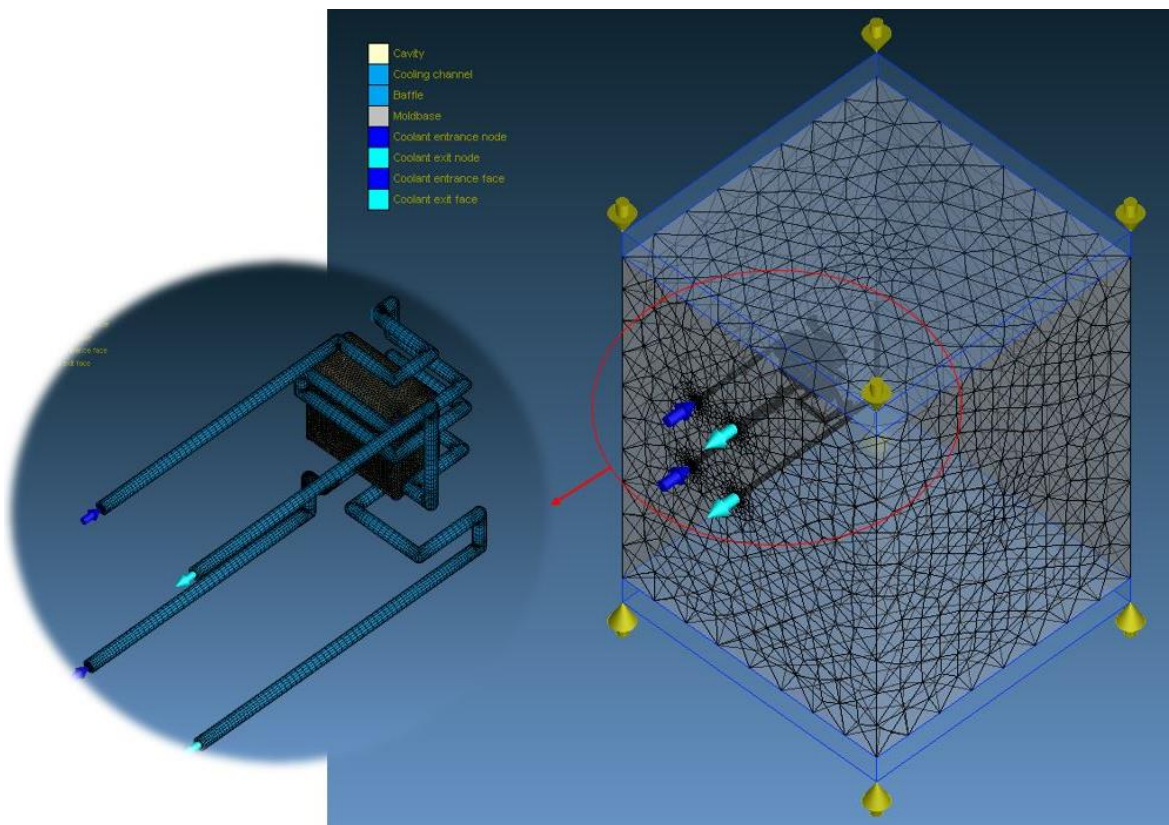


Figura 38 - Malha da estrutura do molde, do sistema de refrigeração, do sistema de alimentação e da peça;

As *RUN*'s estudadas, nesta fase, são representadas na Tabela 7, que correspondem à *RUN02* e à *RUN03*.



Tabela 7 - Tabela de parâmetros introduzidos na simulação Moldex3D;

RUN	POSTIÇOS	MÁQUINA	PARÂMETROS	MATERIAL
02	Novos	<i>ARBURG Allrounder 420 A 1000-350</i>	Conjunto 2 *	<i>KINGFA RG301 CZ.30</i>
03	Novos	<i>ARBURG Allrounder 420 A 1000-350</i>	Conjunto 3 *	<i>PBT CCP 5615F PRETO</i>

* Os parâmetros que constituem o conjunto 2 e 3 são apresentados na Tabela 6.

Para cada uma das *RUN*'s realizadas serão apresentados todos os dados introduzidos desde a geração da malha até à obtenção de resultados.

- **RUN02**

A malha gerada para a presente *RUN* é apresentada na Figura 39.

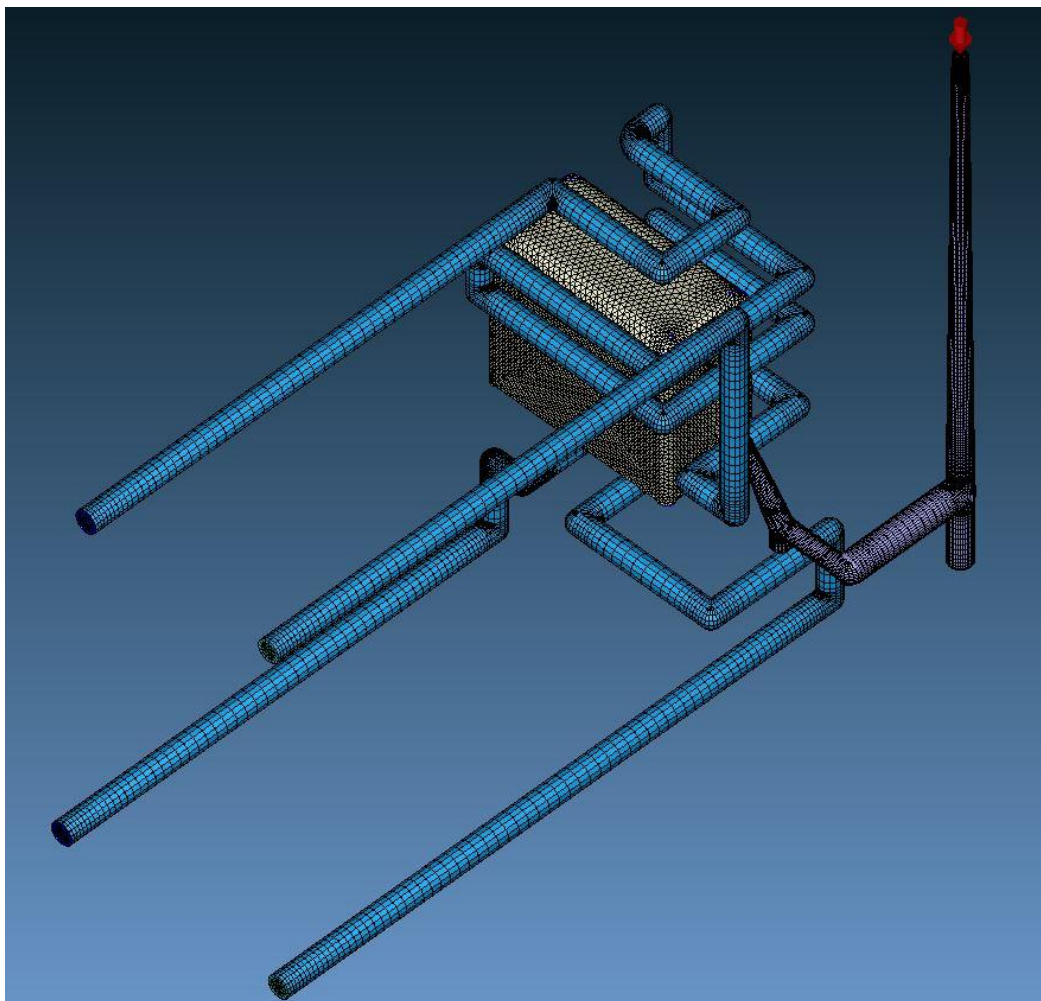


Figura 39 - Malha da *RUN02*;



Tabela 8 - Dados introduzidos na geração da malha da *RUN02*;

<i>RUN</i>	ESPAÇAMENTO NA MALHA (mm)
02	1.5

Tabela 9 - Dados do processo introduzidos *RUN02*;

<i>RUN</i>	POSTIÇOS	MÁQUINA	PARÂMETROS	MATERIAL
02	Novos	ARBURG <i>Allrounder 420</i> <i>A 1000-350</i>	Conjunto 2	<i>KINGFA</i> <i>RG301</i> <i>CZ.30</i>

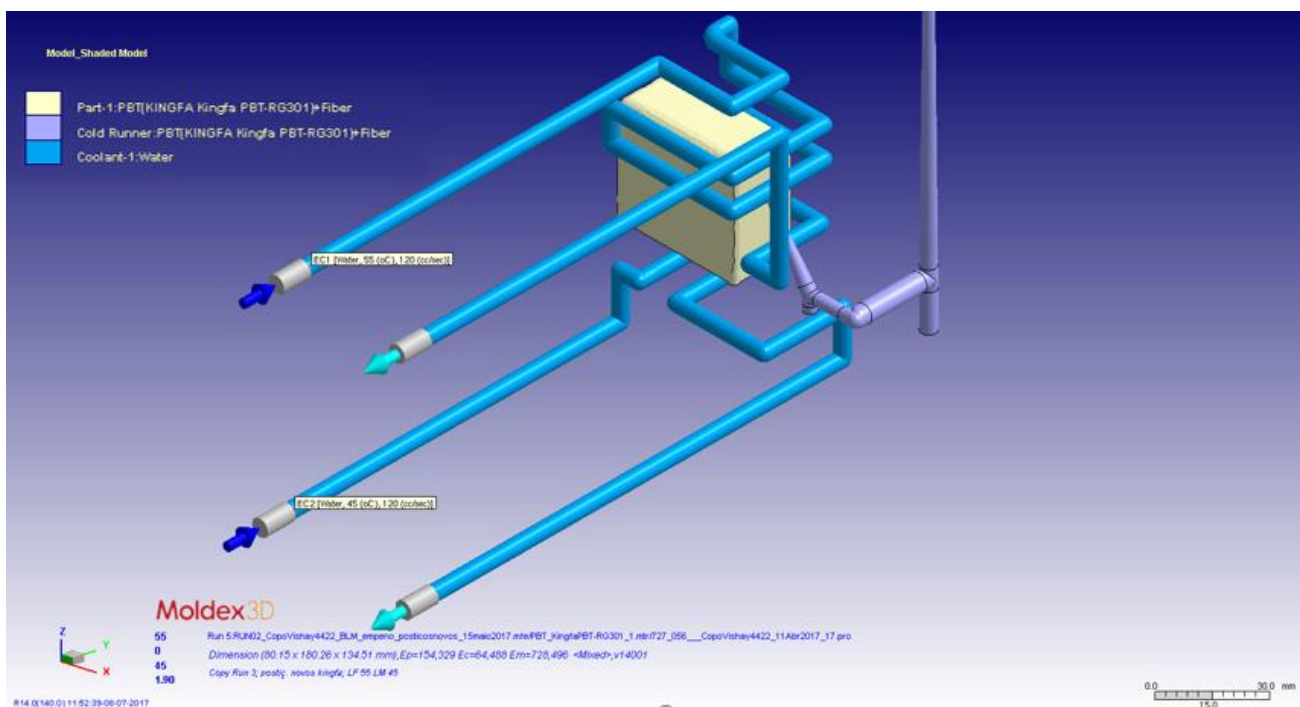


Figura 40 - Modelo e dados introduzidos *RUN02*;

- **RUN03**

A malha gerada para a presente *RUN* é igual à representada na Figura 39.

Quanto aos dados do processo são apresentados na Tabela 10. Assim, o modelo e os dados desta *RUN* são iguais ao da *RUN02*, exceto o material, a máquina e os parâmetros do processo.



Tabela 10 - Dados do processo introduzidos *RUN03*;

<i>RUN</i>	<i>POSTIÇOS</i>	<i>MÁQUINA</i>	<i>PARÂMETROS</i>	<i>MATERIAL</i>
03	Novos	<i>ARBURG</i> <i>Allrounder 420</i> <i>A 1000-350</i>	Conjunto 3	<i>PBT CCP</i> <i>3015 *</i>

*Como na base de dados de materiais do *Moldex3D* não existia o *PBT CCP 5615F*, utilizou-se o material indicado na tabela.

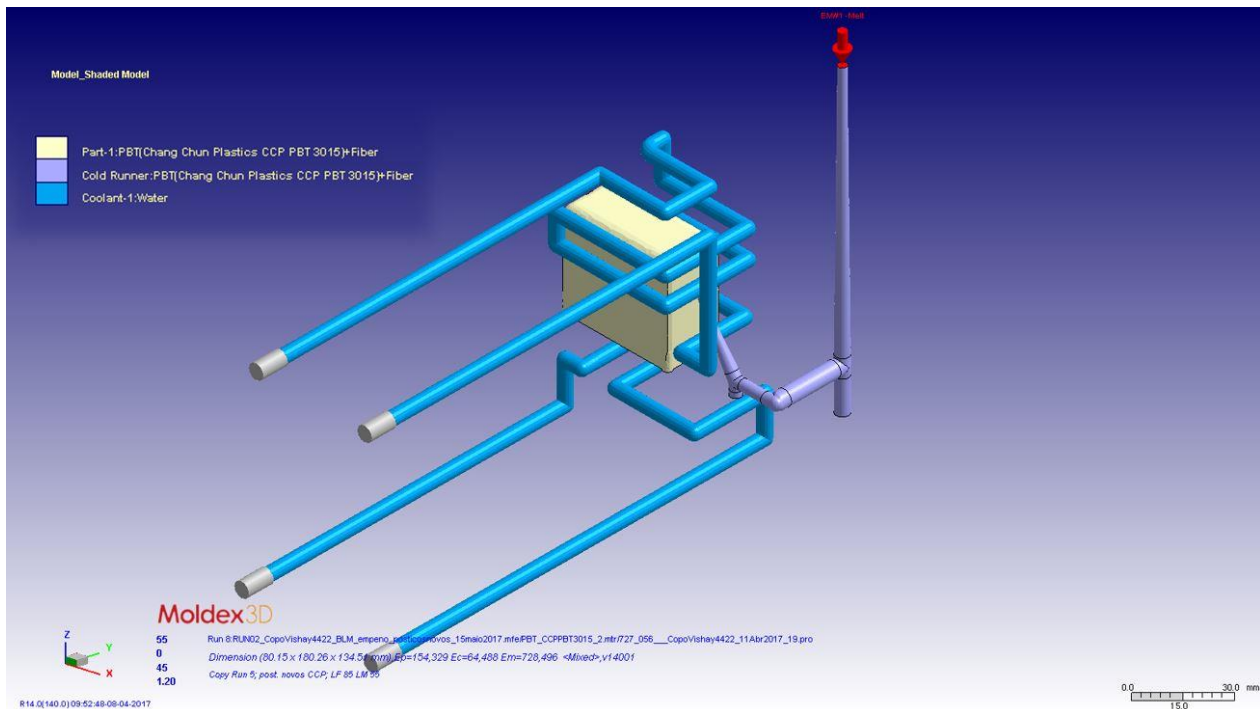


Figura 41 - Modelo e dados introduzidos *RUN03*;





4. APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Primeiro ensaio ao molde

Ao realizar o primeiro ensaio ao molde com os novos postigos, observaram-se alguns defeitos:

- Queimados;
- Obstrução temporária do ponto de ataque;
- Prisão das peças no lado fixo;
- Desequilíbrio no enchimento, a cavidade 2 encontrava-se mais avançada que as restantes;
- Dificuldade na extração do gito;

Estes problemas levaram à realização das seguintes otimizações no molde:

- Aplicação de zonas de escape de gases nos postigos moldantes do lado fixo, através da criação de dois patamares rebaixados em relação ao plano de partição na zona de fim do enchimento, de modo a facilitar o enchimento e minimizar o desbalanceamento existente entre as cavidades 2 e 3, que enchiam mais rapidamente que a cavidade 1 e 4, o que pode ser comprovado nos gráficos da Figura 42. Aqui foram pesadas dez moldações, e verificou-se o desvio em relação à média do peso de cada cavidade. Os dados utilizados para criar os presentes gráficos são apresentados no Anexo 3. Assim, é possível concluir que, no enchimento, as cavidades 2 e 3 encontram-se adiantadas em relação às restantes;

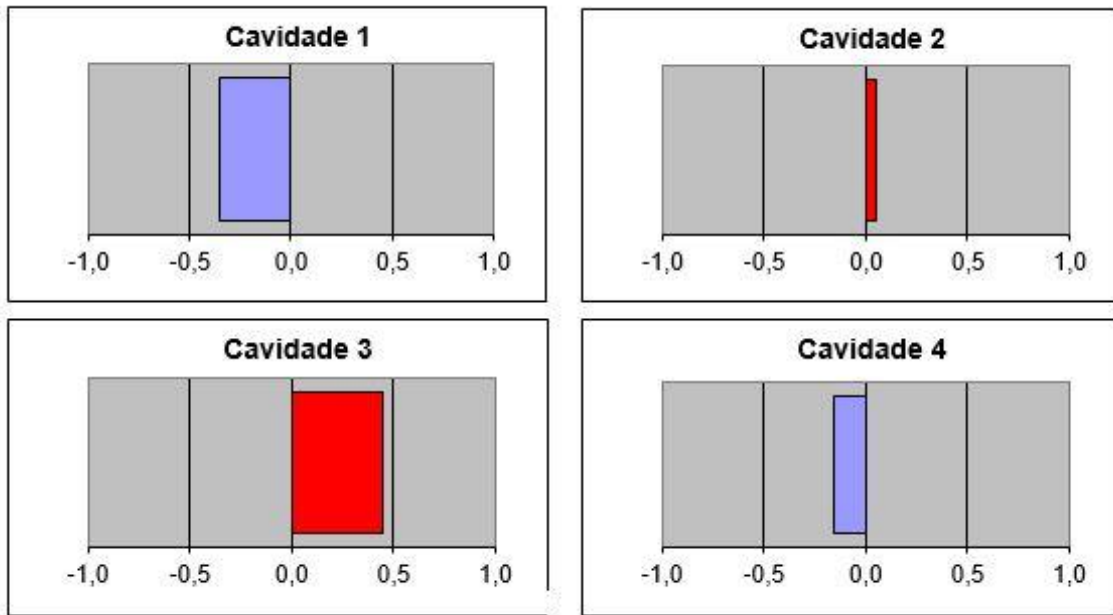


Figura 42 - Gráfico de desvio do peso de dez moldações para cada cavidade;

A alteração efetuada é apresentada na Figura 43;

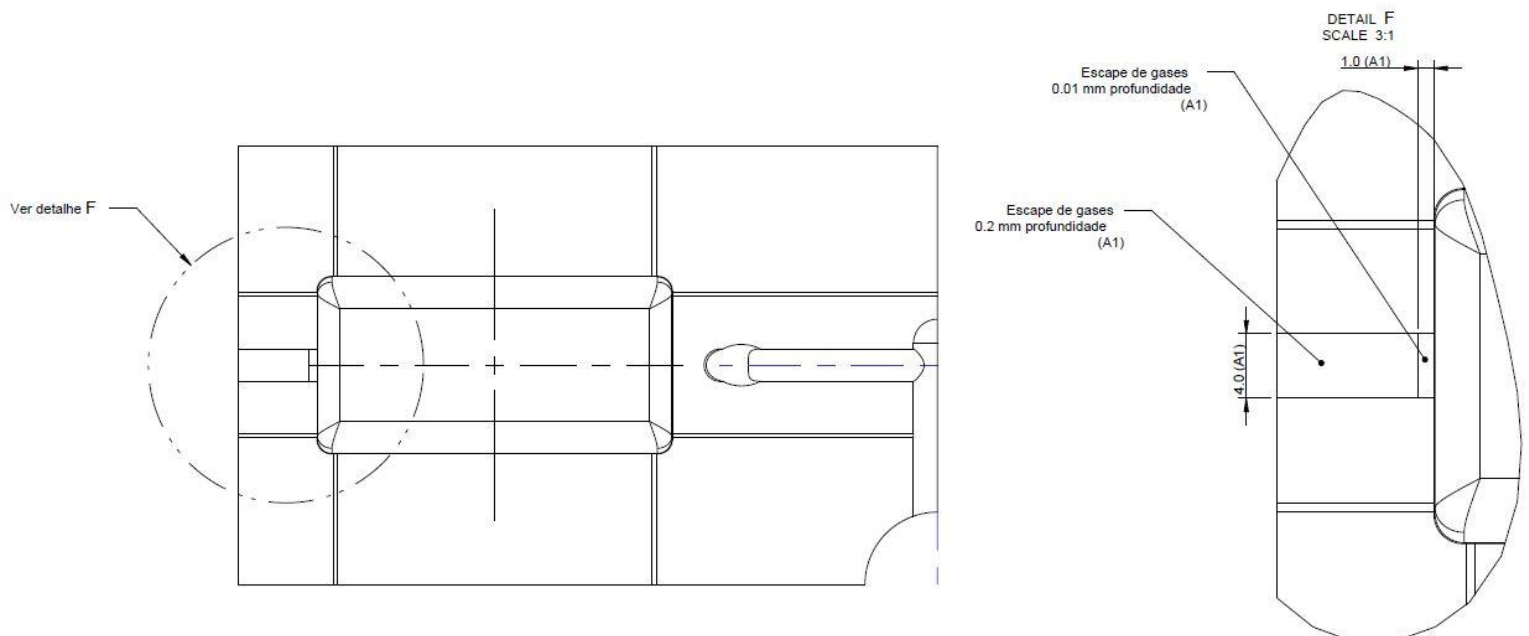


Figura 43 - Aplicação de escape de gases aos postigos moldantes;



- Aumento do diâmetro do ataque em uma décima de milímetro, tal como representado na Figura 44 de modo a evitar o entupimento dos pontos de ataque;

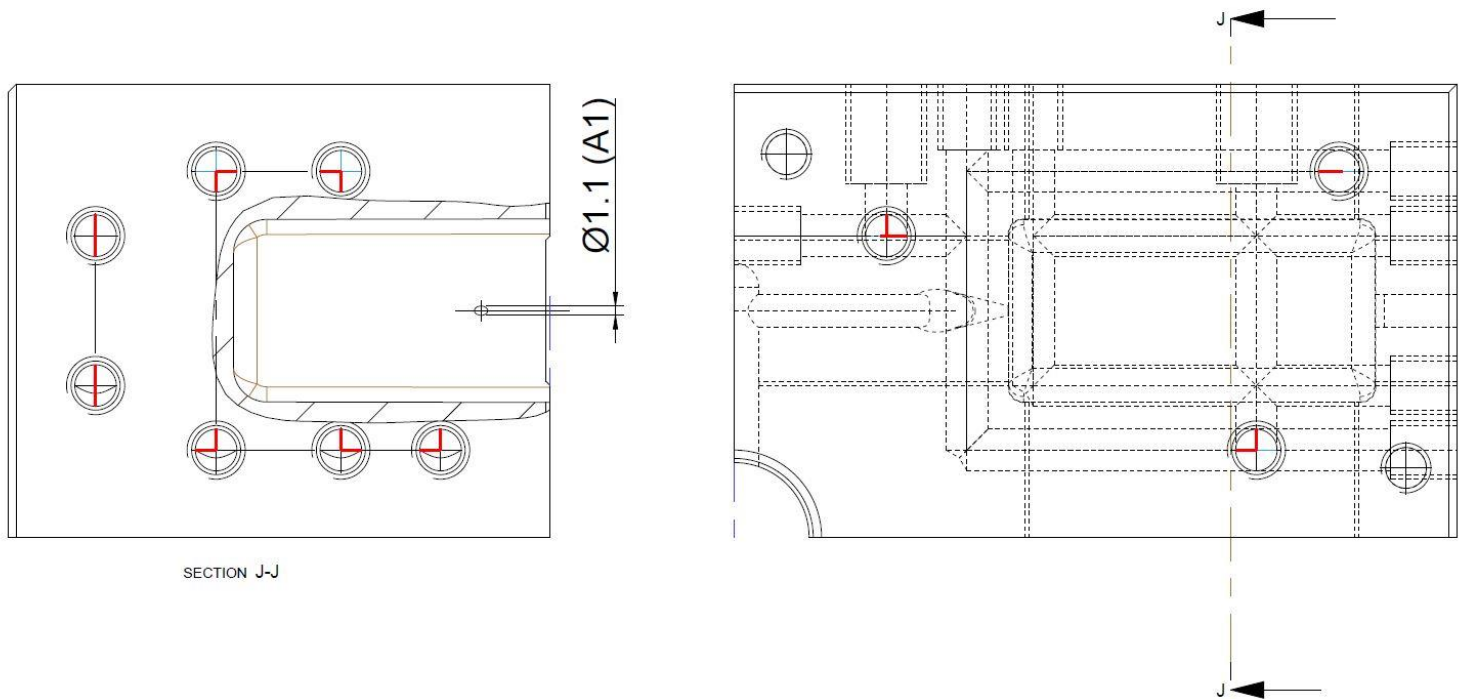


Figura 44 - Aumento do diâmetro de ataque (em mm);

- Introdução de novos extratores do gito, pois os existentes já se encontravam gastos e não extraíam eficientemente. O estado dos extratores é apresentado na Figura 45;

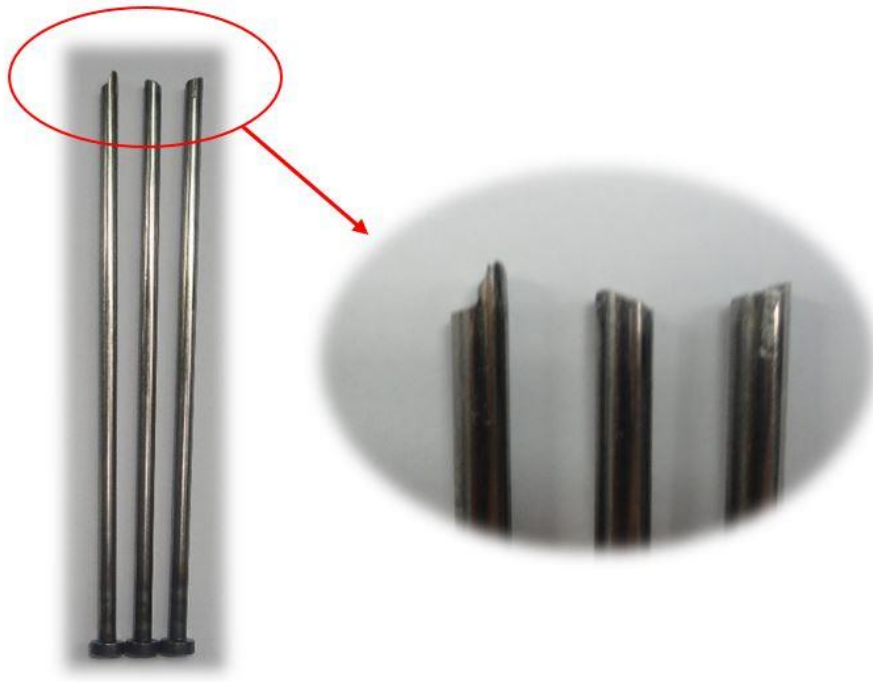


Figura 45 - Estado dos extratores do gito;

- Durante o ensaio verificou-se que existia um efeito de arrastamento na zona do ataque, então com o objetivo de corrigir este problema poliu-se os ataques e suavizou-se a zona de corte;
- Peças com tendência para ficarem presas do lado fixo, de modo a evitar este fenómeno foscou-se os machos;
- A temperatura medida no postigo moldante da cavidade 2 era superior à temperatura medida nos restantes postigos, assim procedeu-se à medição dos caudais de fluxo de água e igualou-se os mesmos.



4.2. Apresentação de Resultados e Discussão

Os resultados do estudo desenvolvido são apresentados em quatro diferentes formas:

- Através de fotos das peças injetadas nos ensaios, onde é possível compreender o empeno resultante;
- Através dos resultados da simulação *Moldex3D* em que é analisado o empeno em termos de deslocamento segundo a direção x e y, e em termos de planicidade. Além disso também é analisada a temperatura ao longo da espessura da peça;
- Através de medições das peças injetadas, na qual se mediu em vários pontos nas paredes laterais o deslocamento segundo as mesmas direções, adicionalmente também foi medida a planicidade da zona colorida a vermelho na Figura 46. As arestas onde foram efetuadas as medições são representadas na Figura 46, em que os pontos de máximo deslocamento são representados pelos pontos pretos;

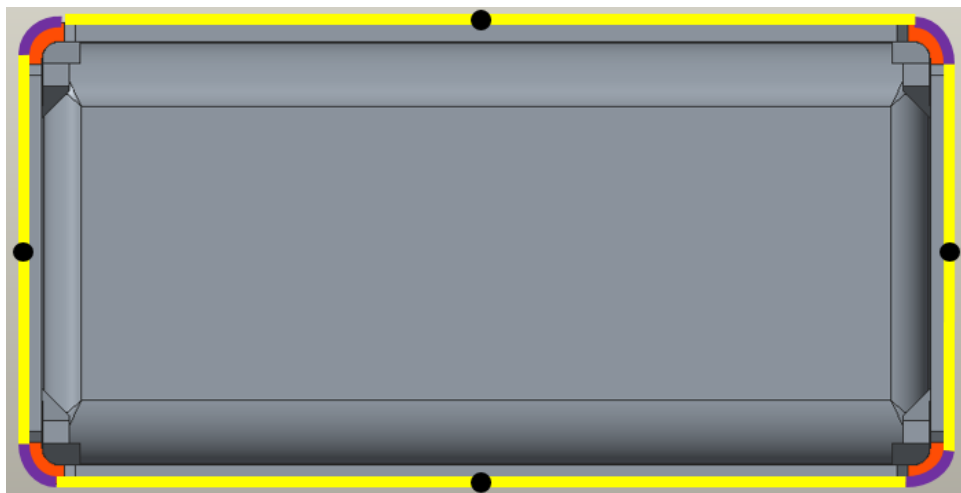


Figura 46 - Arestas em que se realizaram as medições, representadas a amarelo;

- Para comparar os resultados teóricos e práticos elaborou-se um gráfico no qual para os mesmos pontos das arestas onde se efetuaram as medições, é apresentado o deslocamento;



- Adicionalmente, elaborou-se um gráfico de barras do deslocamento máximo, que se verifica nos pontos a preto da Figura 46, de forma a comparar os resultados das várias *RUN*'s.

4.2.1. *RUN01*

Com os dados já mencionados foi realizado um ensaio onde se injetou a peça em estudo e obteve-se o empeno mostrado na Figura 47.

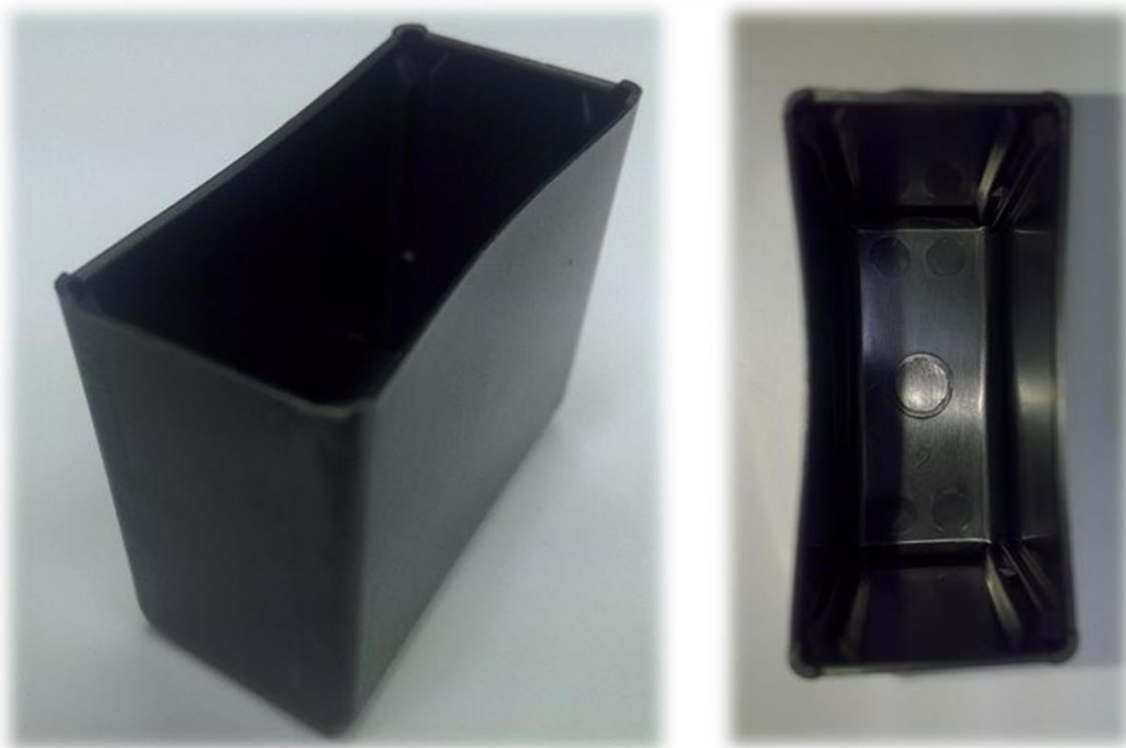


Figura 47 - Peças injetadas no ensaio correspondente à *RUN02*;

Os resultados de empeno, da simulação *Moldex3D*, em termos de deslocamento, são apresentados na Figura 48 e na Figura 49.

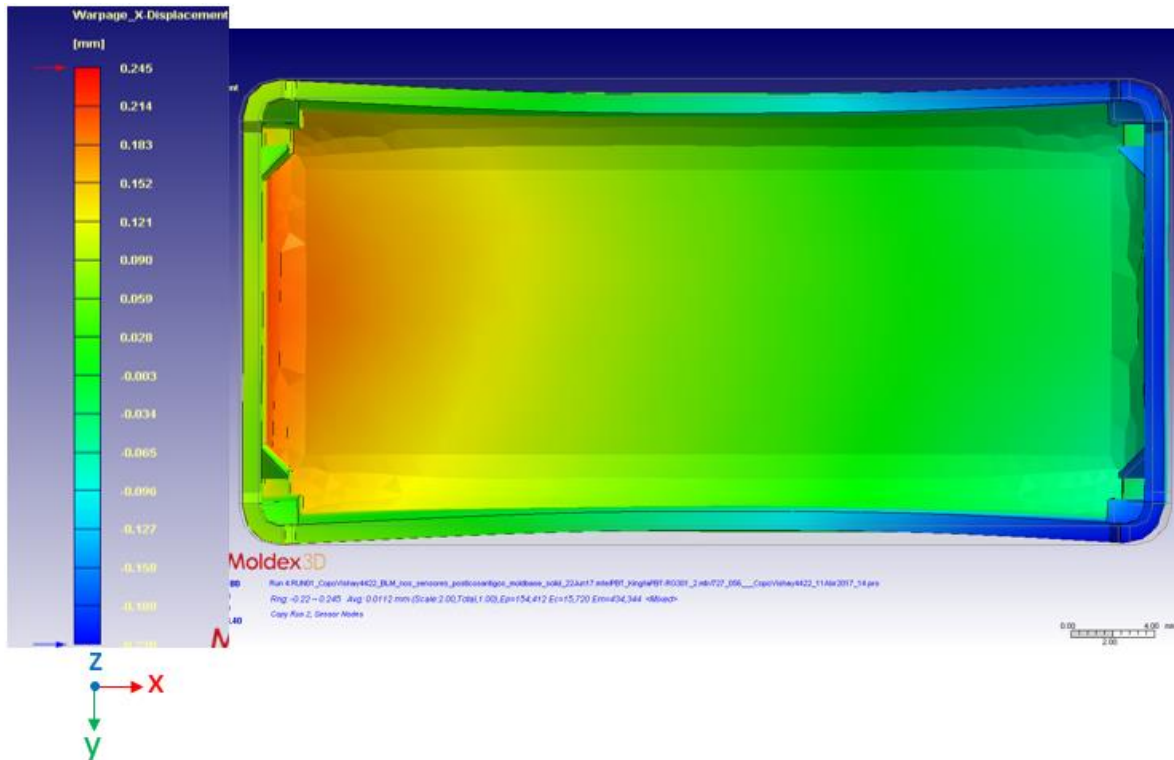


Figura 48 - Deslocamento segundo a direção X, resultante do empeno;

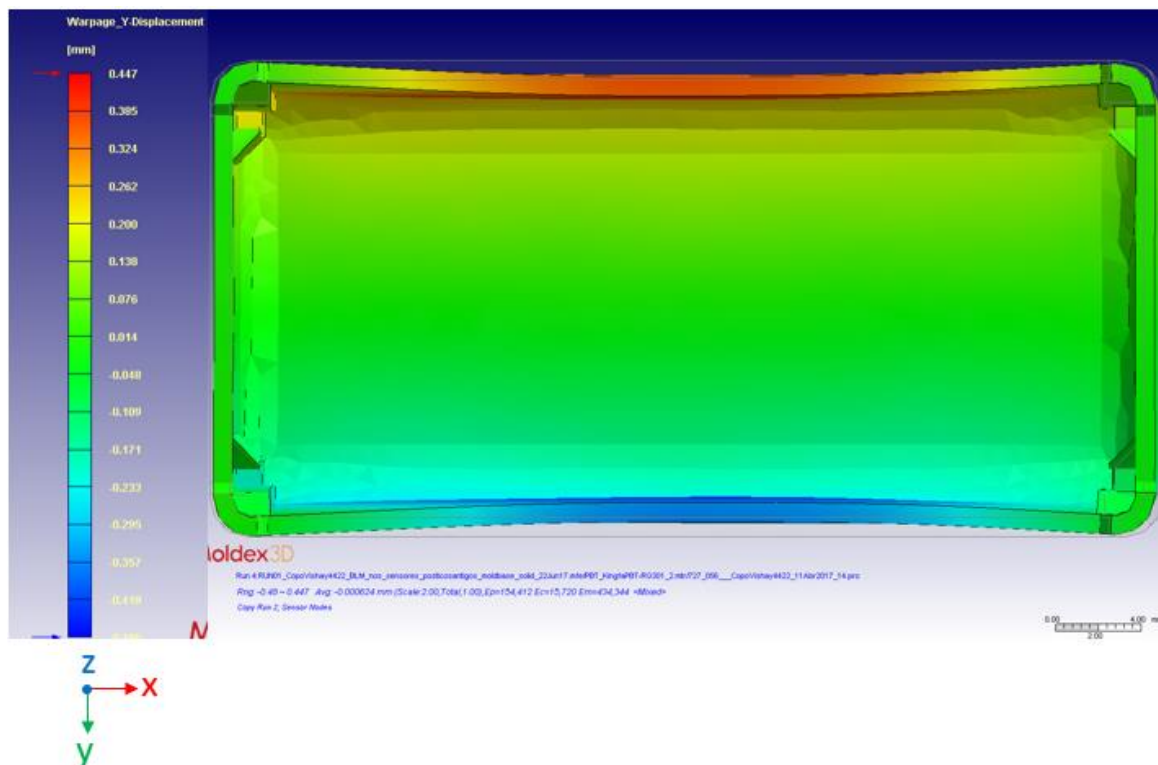


Figura 49 - Deslocamento segundo a direção Y, resultante do empeno;



Através da simulação também é possível estimar a planicidade. Neste caso, foi analisada a superfície da zona dos “pés” da peça, em que se obteve uma planicidade de 0.094 mm.

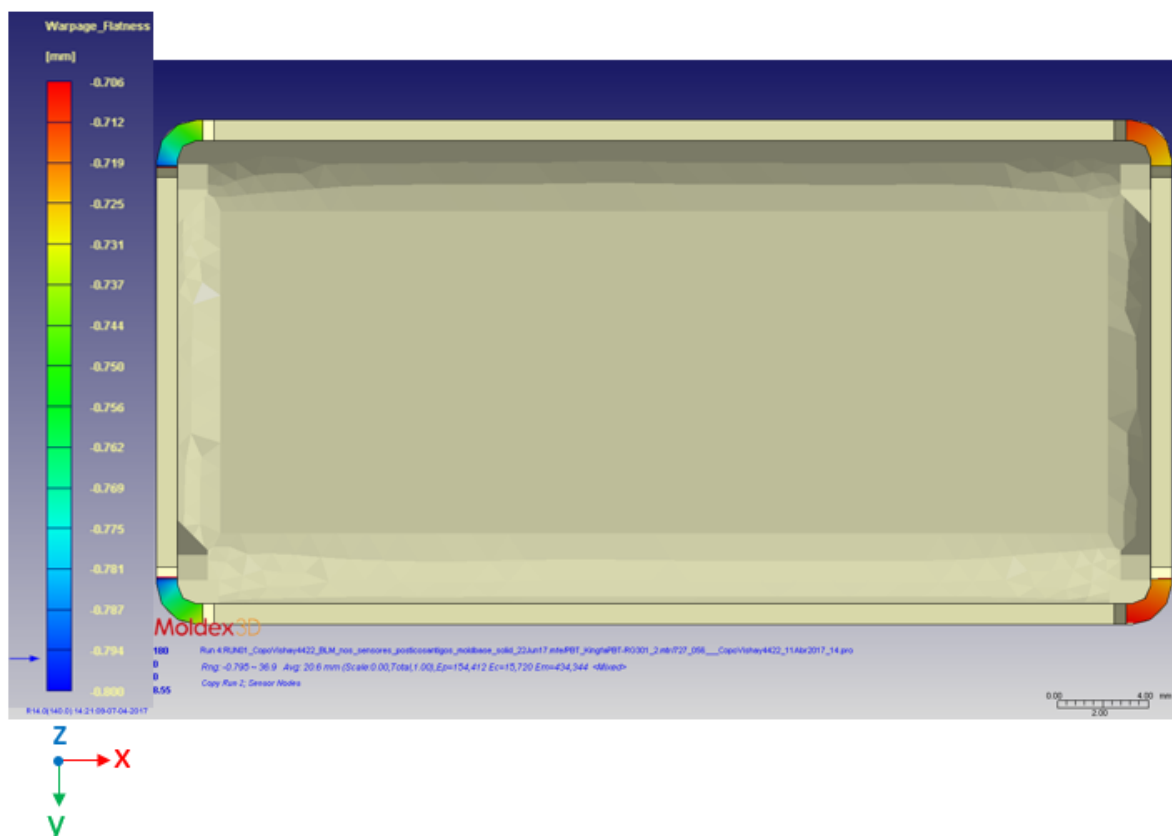


Figura 50 - Planicidade nos "pés" da peça, resultante do empeno;

Outro dado fornecido pelo *Moldex3D*, que se revela importante para este estudo, é a temperatura média ao longo da espessura no fim do arrefecimento, sendo esta apresentada na Figura 51.

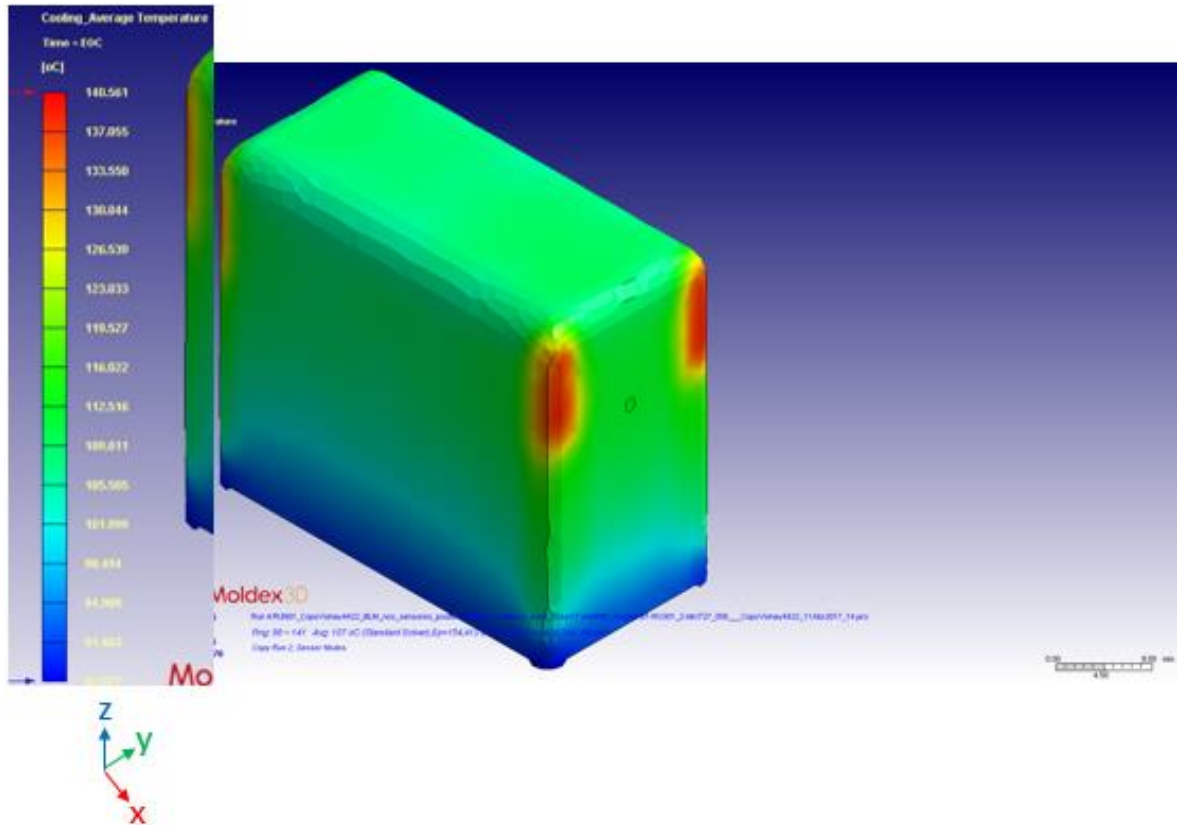


Figura 51 - Temperatura média ao longo da espessura *RUN01*;



4.2.2. *RUN02*

Com os novos posições colocados no molde, realizou-se o ensaio e obteve-se o empeno demonstrado na Figura 52.

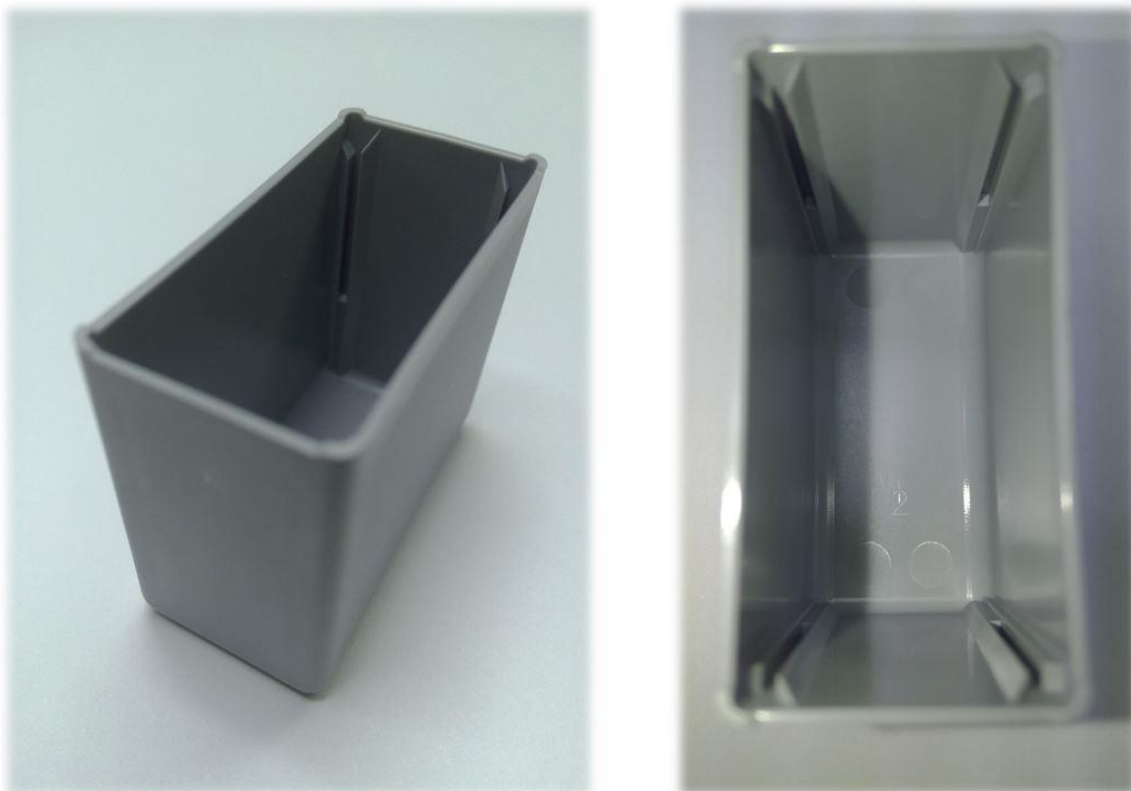


Figura 52 - Peças injetadas no ensaio correspondente à *RUN02*;

O deslocamento na direção x e y é apresentado na Figura 53 e na Figura 54.

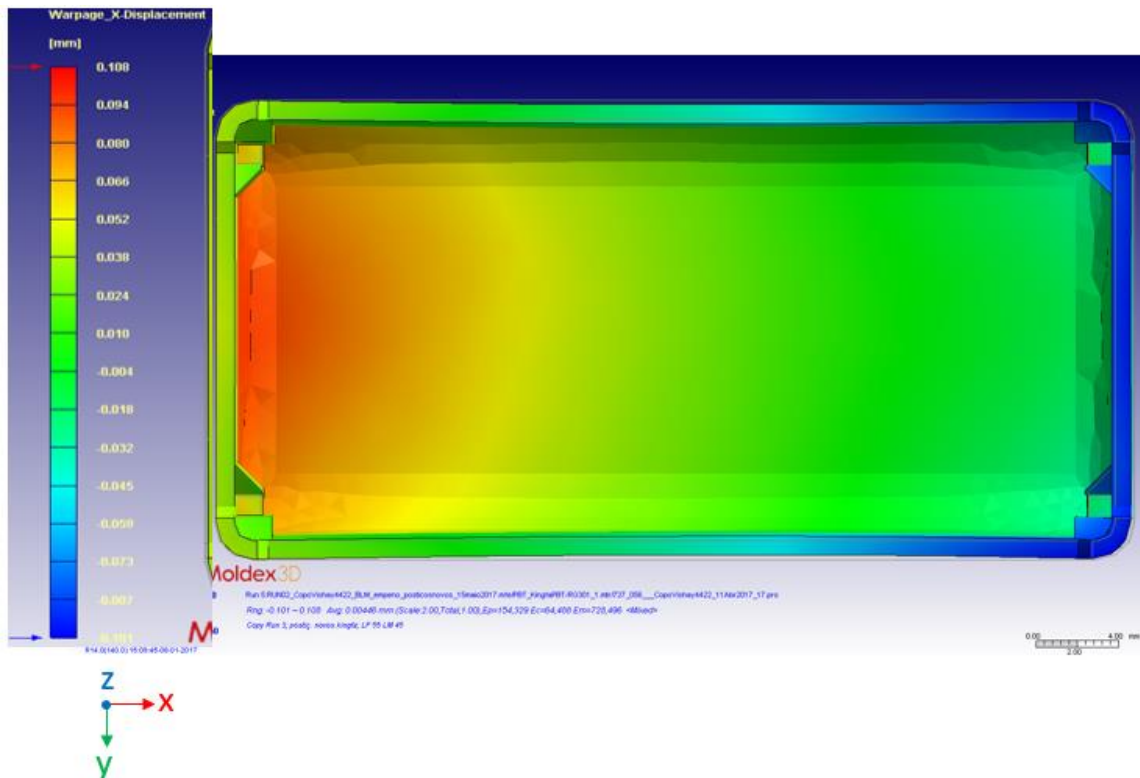


Figura 53 - Deslocamento segundo a direção X, resultante do empeno;

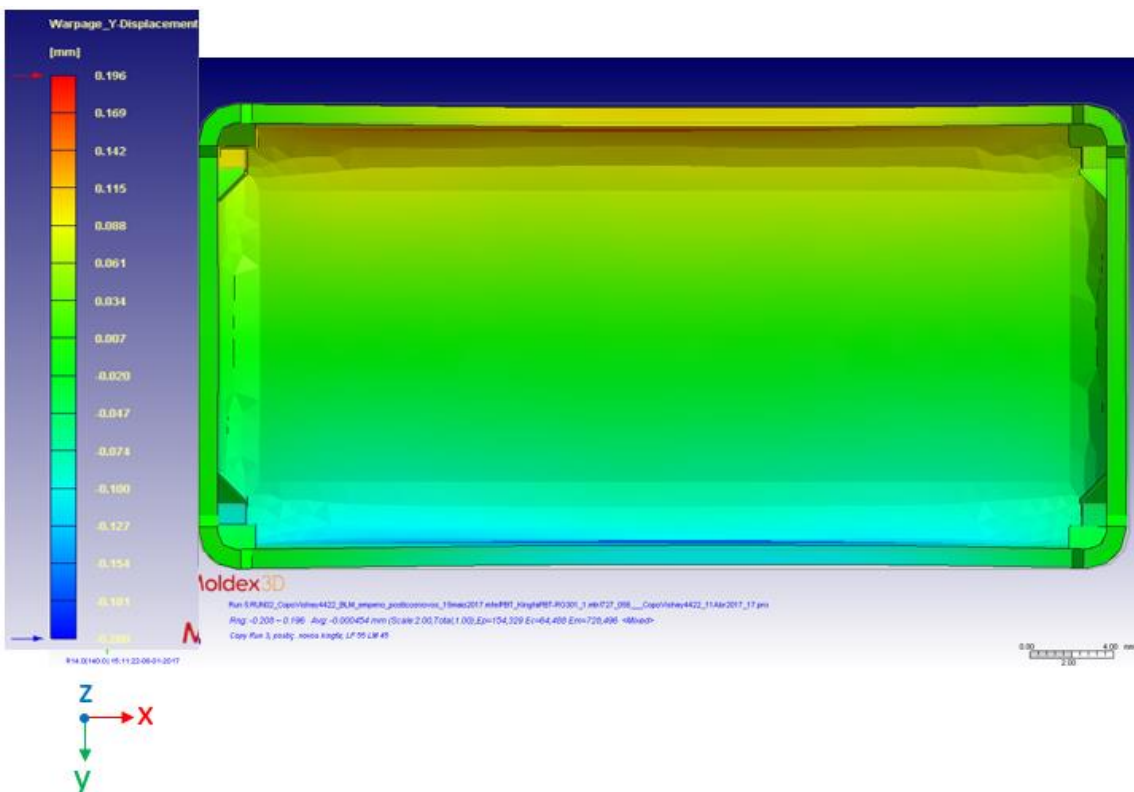


Figura 54 - Deslocamento segundo a direção Y, resultante do empeno;



Quanto à planicidade, esta é apresentada na Figura 55, através da qual se obteve o valor de 0.042 mm.

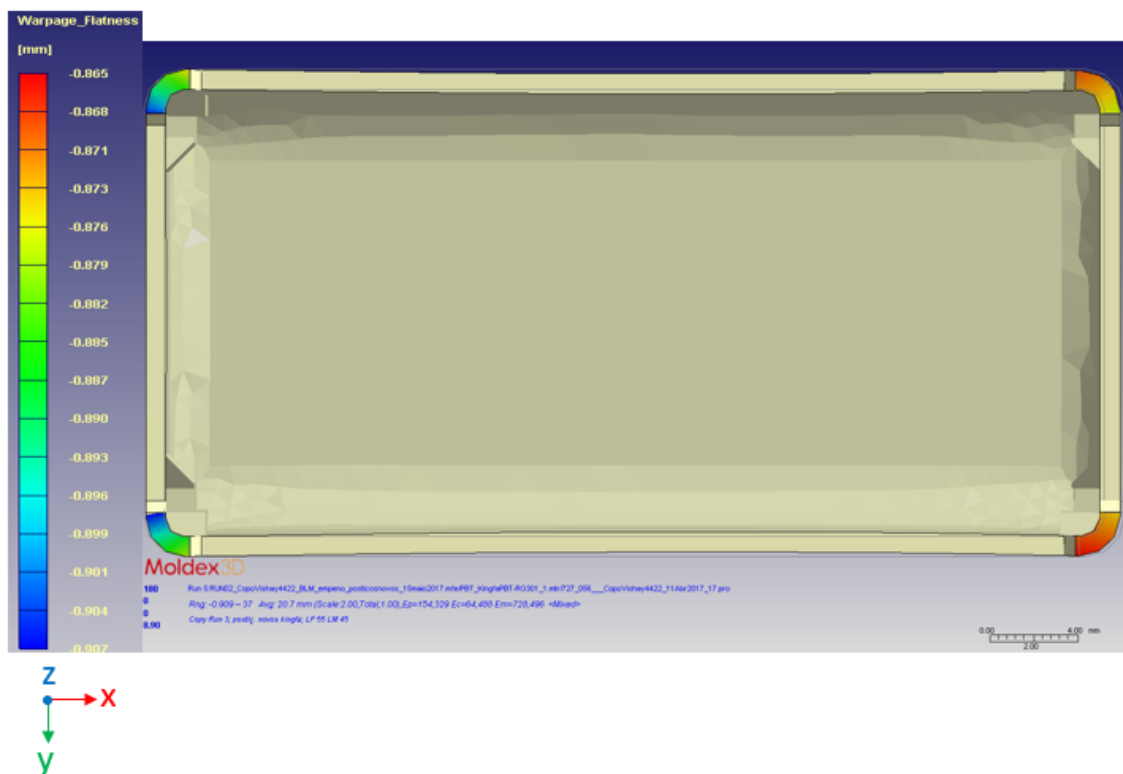


Figura 55 - Planicidade nos "pés" da peça, resultante do empeno;

A temperatura média ao longo da espessura no fim do arrefecimento é apresentada na Figura 56.

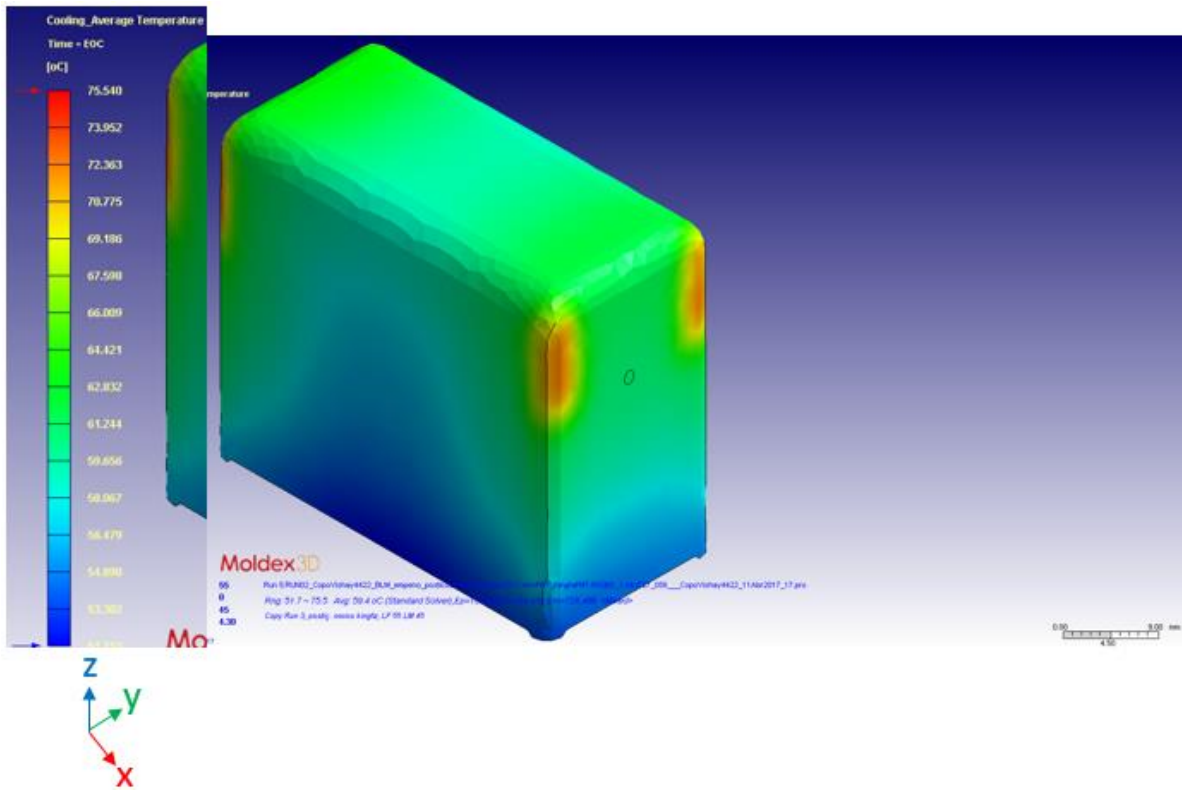


Figura 56 - Temperatura média ao longo da espessura RUN02;

4.2.3. *RUN03*

O empeno obtido no terceiro ensaio é apresentado na Figura 57.

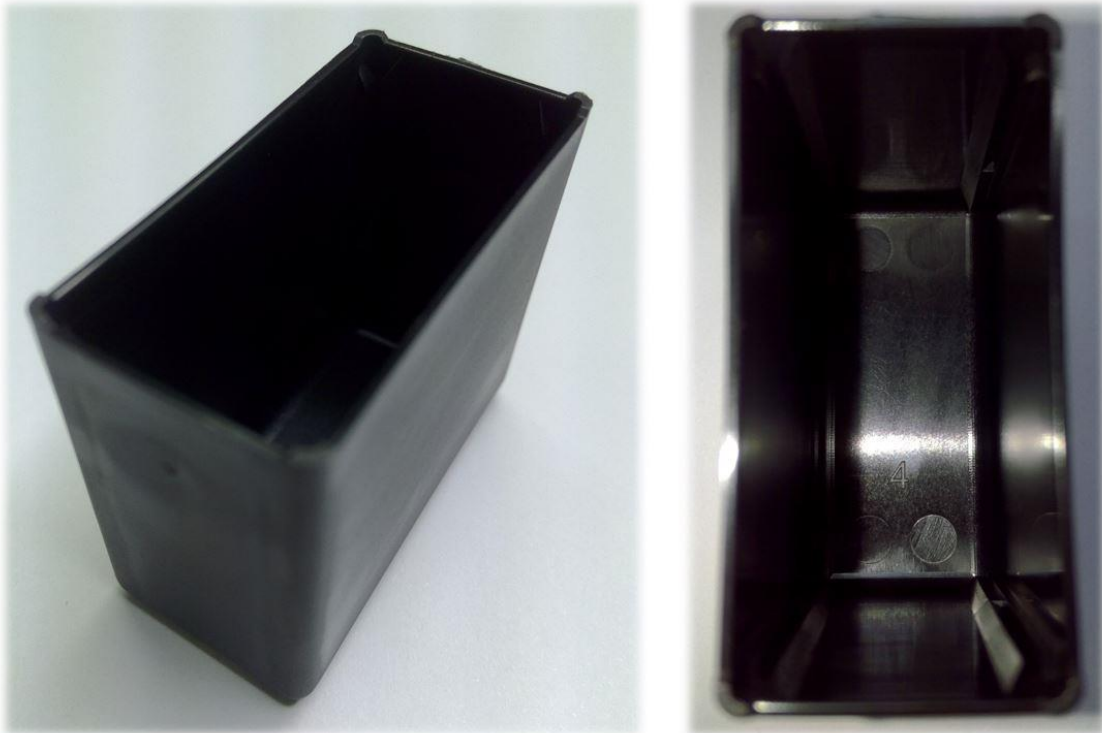


Figura 57 - Peças injetadas no ensaio correspondente à *RUN03*;

Na Figura 58 e na Figura 59 é apresentado o deslocamento segundo x e y respetivamente.

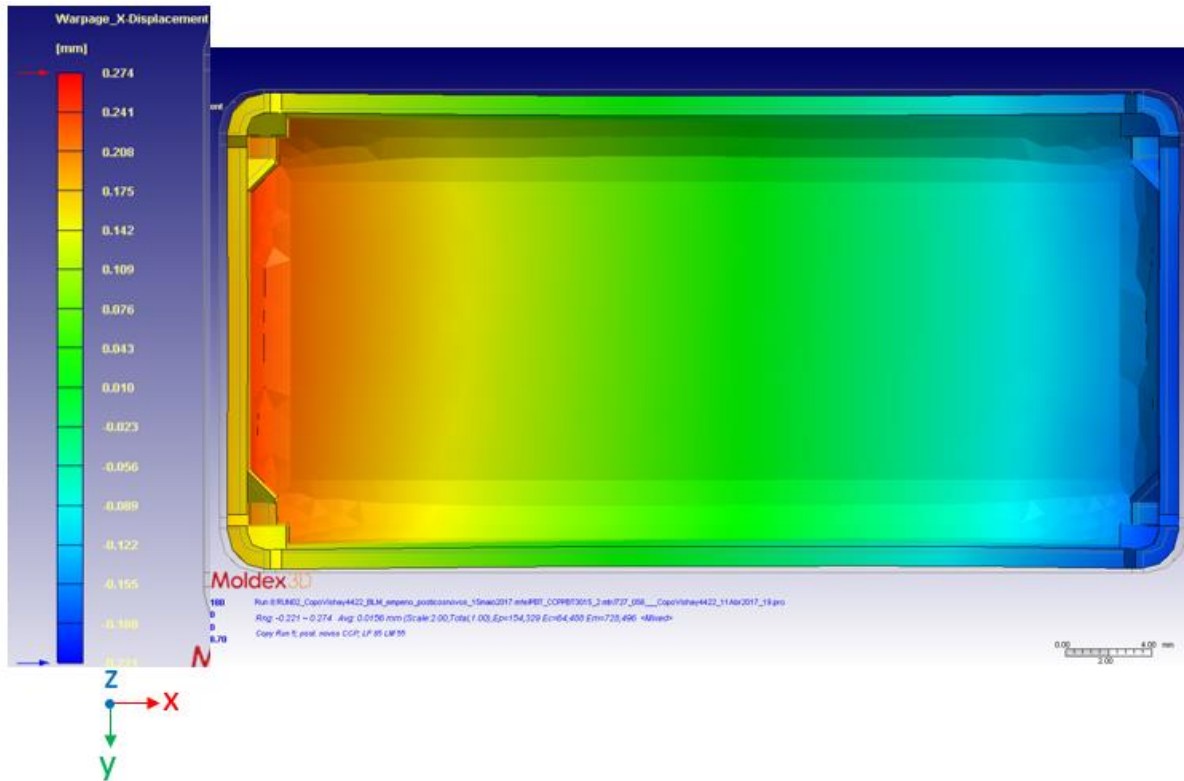


Figura 58 - Deslocamento segundo a direção X, resultante do empeno;

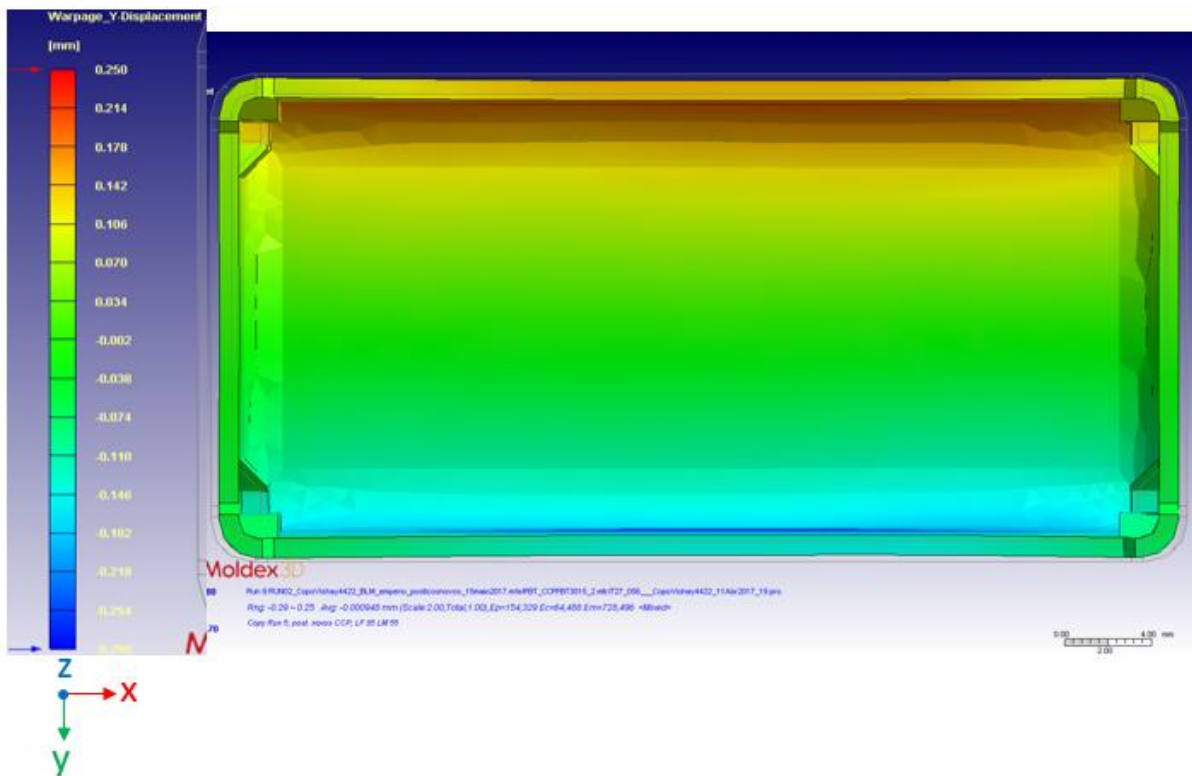


Figura 59 - Deslocamento segundo a direção Y, resultante do empeno;



Para a presente *RUN* obteve-se uma planicidade de 0.072 mm, na qual obteve-se os resultados expostos na Figura 60.

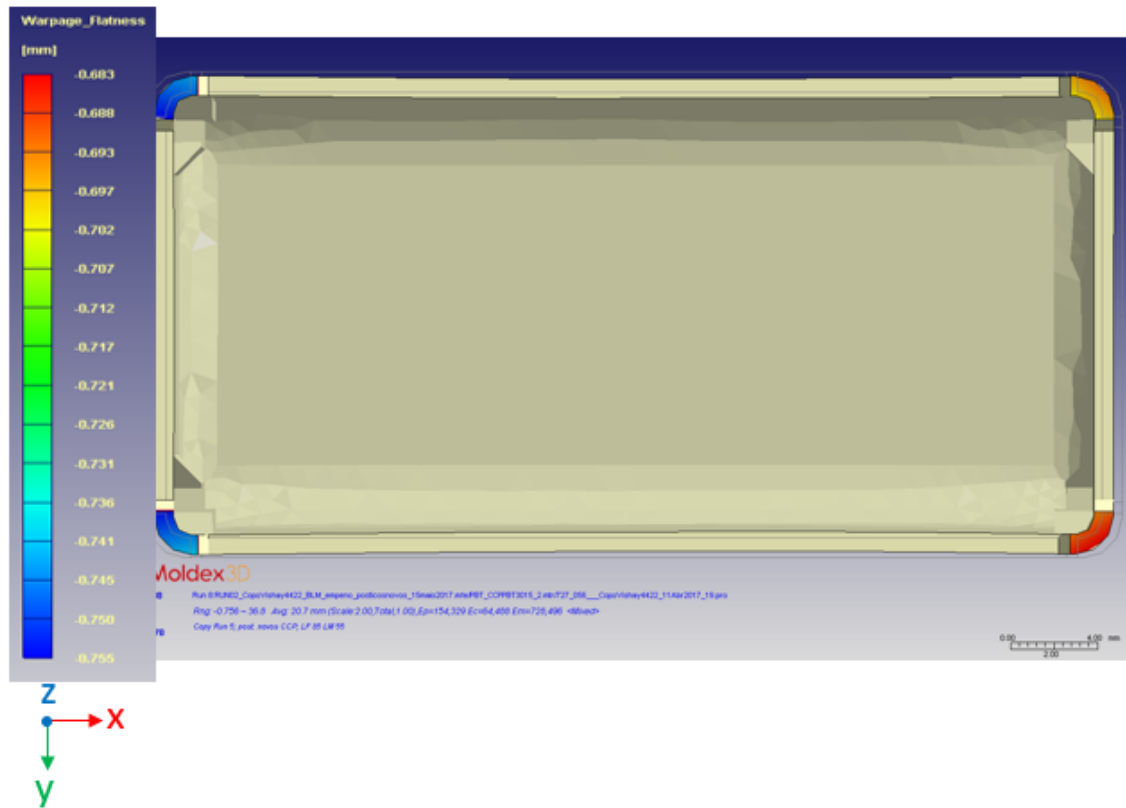


Figura 60 - Planicidade nos "pés" da peça, resultante do empeno;

Relativamente à temperatura média ao longo da espessura no fim do arrefecimento, é apresentada na Figura 61.

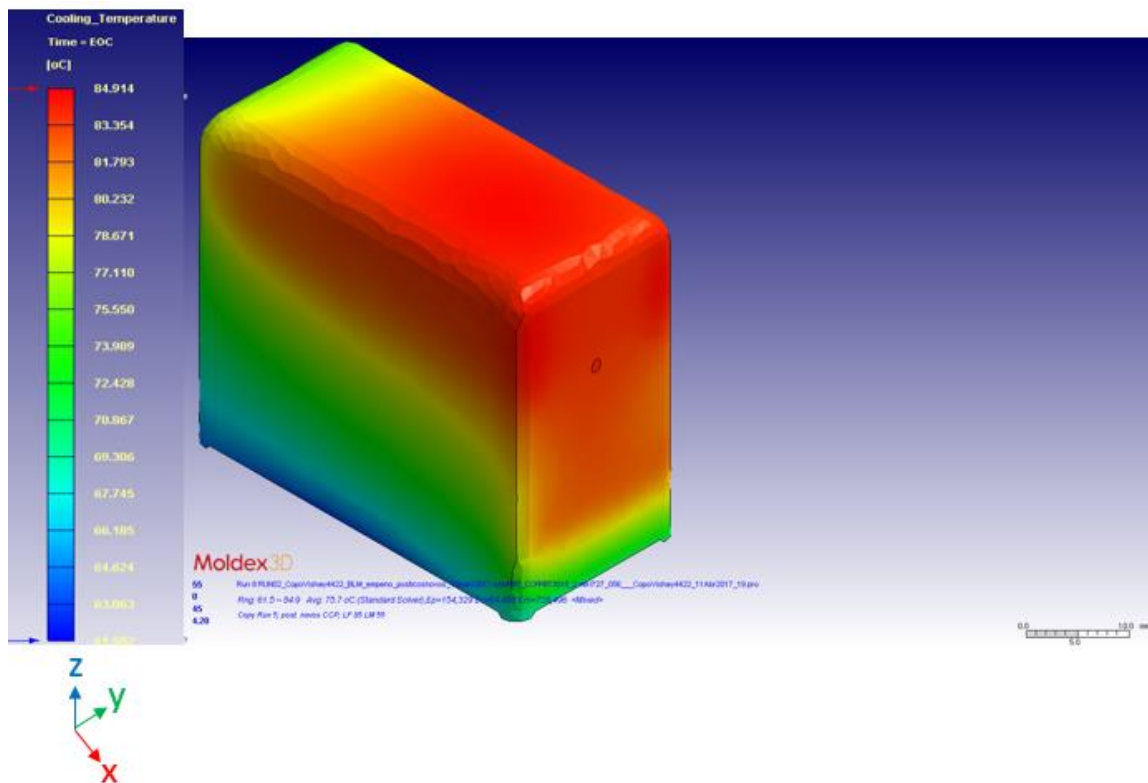


Figura 61 - Temperatura média ao longo da espessura *RUN03*;

4.3. Discussão de Resultados

4.3.1. Resultados práticos (Injeção) VS Resultados teóricos (Simulação)

Com o objetivo de perceber até que ponto o projeto da ferramenta pode ser baseado nos resultados da simulação *Moldex3D*, as medições efetuadas às peças injetadas da *RUN02* serão comparadas com estes.

Na Figura 62 é apresentado o gráfico elaborado para comparar os resultados. No mesmo, a secção destacada a amarelo e roxo na Figura 46 é representada pela curva azul, ou seja, esta curva representa a geometria teórica, requerida pelo cliente, que a peça deveria ter. A laranja estão apresentados os resultados da simulação, ou seja, o modelo deformado. A verde estão apresentadas as medições efetuadas.

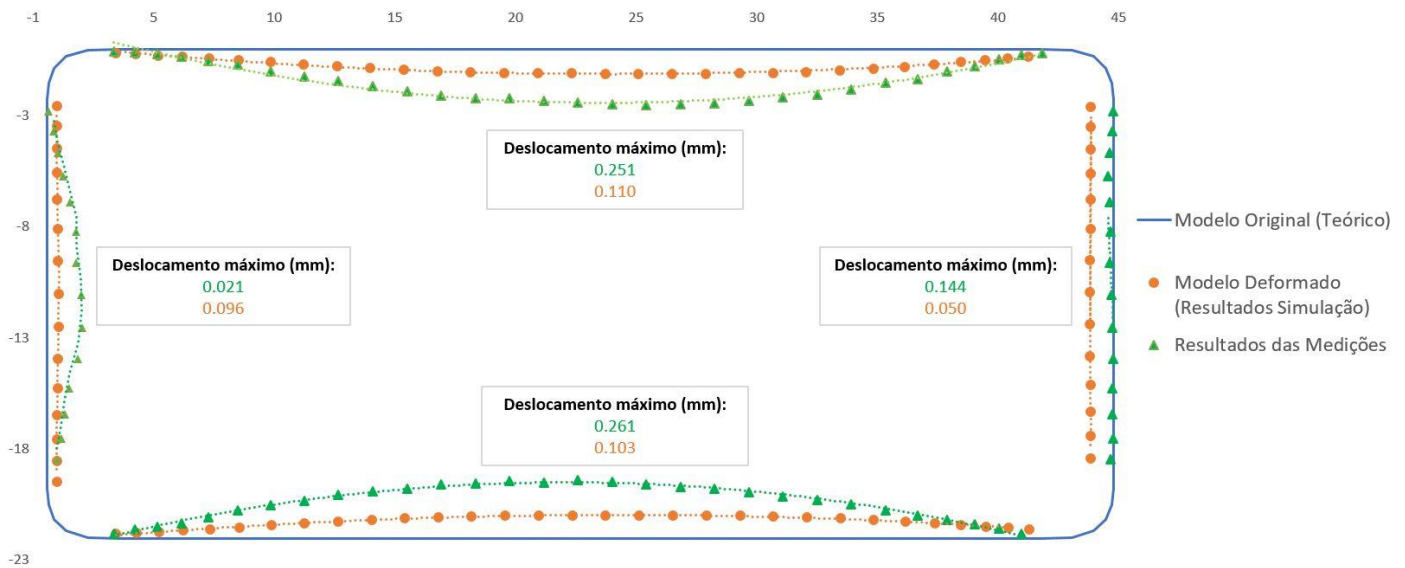


Figura 62 - Gráfico de comparação de resultados;

Com base na Figura 62, é possível perceber que em todas as arestas exceto a aresta direita, as peças injetadas apresentam um deslocamento superior ao sugerido pela simulação tendo como provável origem as simplificações associadas à simulação. Assim, o empeno apresentado pelas peças injetadas é superior ao sugerido pela simulação.

4.3.2. Efeito da temperatura do molde

A temperatura do molde é um parâmetro determinante no empeno. De forma a perceber quais as temperaturas que permitem obter o menor empeno, durante o ensaio correspondente à *RUN02*, decidiu-se injetar peças com diferentes temperaturas.

As temperaturas do molde testadas são apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 - Conjuntos de temperaturas testadas;

	TEMPERATURA LADO FIXO (°C)	TEMPERATURA LADO MÓVEL (°C)
TEMPERATURAS 1	45	55
TEMPERATURAS 2	75	45
TEMPERATURAS 3	45	75



Na Figura 63 para cada conjunto de temperaturas e para cada aresta, é apresentado o desvio em relação à geometria teórica dos pontos onde a deformação é máxima, pontos esses que se encontram representado a preto na Figura 46. Por exemplo, no gráfico 1 o conjunto de temperaturas 3, barra a verde, apresenta um deslocamento de 0.187 mm em relação à geometria teórica, representada pela curva azul.

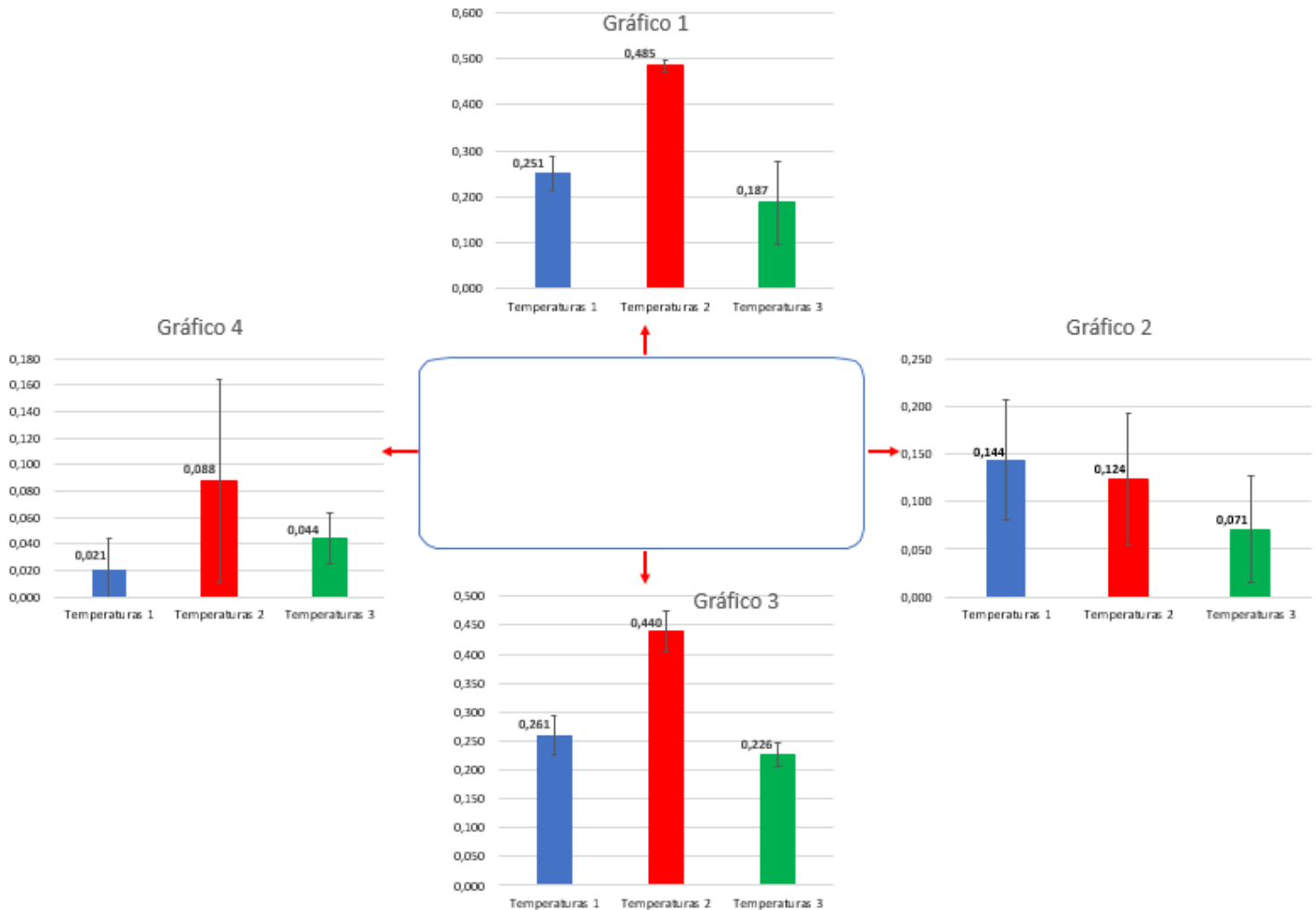


Figura 63 - Deslocamento máximo medido em cada aresta, para diferentes conjuntos de temperaturas;

Ao analisar os gráficos é possível concluir que o conjunto de temperaturas que apresenta o menor desvio e consequentemente o menor empeno, é o terceiro conjunto. No entanto, no gráfico 4 o conjunto de temperaturas 1 apresenta um menor desvio, mas como não existe uma grande diferença entre este conjunto e o conjunto 3, os melhores resultados encontram-se representados no conjunto de temperaturas 3.



4.3.3. Efeito do material

De forma a perceber qual o material que apresenta os melhores resultados em termos de empeno, serão, de seguida, analisadas as medições efetuadas às peças resultantes dos ensaios da *RUN02* e *RUN03*. Na *RUN02* foi utilizado o material *Kingfa* e na *RUN03* o material *CCP*.

As medições efetuadas às peças de cada ensaio são apresentadas na Figura 64.

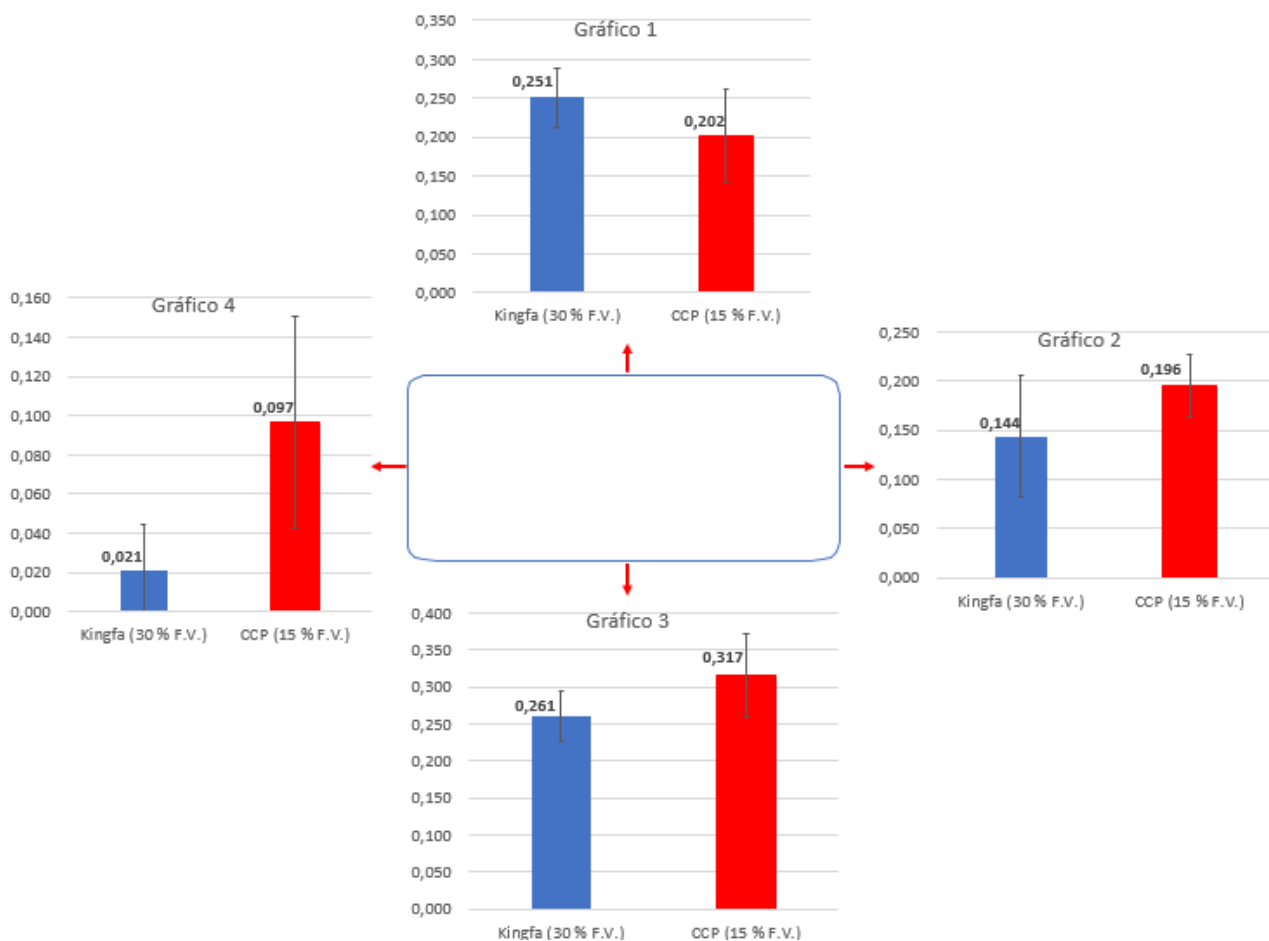


Figura 64 - Deslocamento máximo medido em cada aresta, para diferentes materiais;

Em geral, é possível verificar que o material que apresenta o menor deslocamento é o *Kingfa*, o que não era espectável, visto que apresenta uma maior percentagem de fibra de vidro, tal como enunciado na secção 2.5.2.. Por outro lado, uma maior percentagem de fibra pode aumentar a resistência ao empeno, pois a resistência mecânica do material é maior.

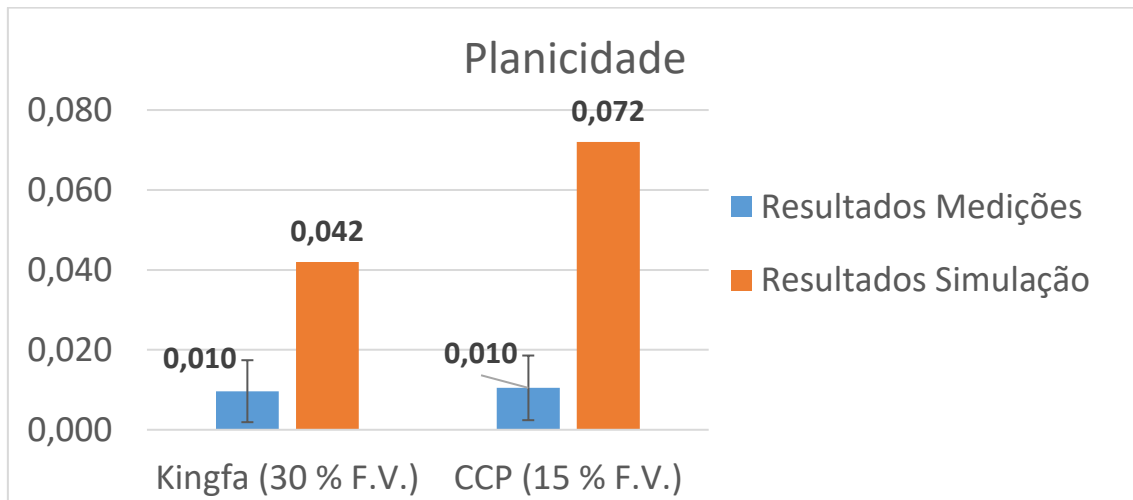


Figura 65 - Gráfico da planicidade medida para ambos os materiais;

A planicidade também foi medida para ambos os materiais, como representado na Figura 65. A simulação previa uma menor planicidade em valor absoluto para o *Kingfa*, embora as medições revelem que a planicidade é semelhante para os dois materiais.

4.3.4. Efeito do sistema de refrigeração

O sistema de refrigeração determina o processo de arrefecimento da peça, sendo que este último está correlacionado com o empeno. Tendo isto em conta, serão analisadas as medições das peças dos ensaios correspondentes à *RUN01* e *RUN02*, tal como, da mesma forma, serão analisados os resultados da simulação.

A distribuição de temperaturas ao longo da espessura da peça permite prever o empeno desenvolvido, assim na Figura 66 será comparada a temperatura em ambas as *RUN's*.

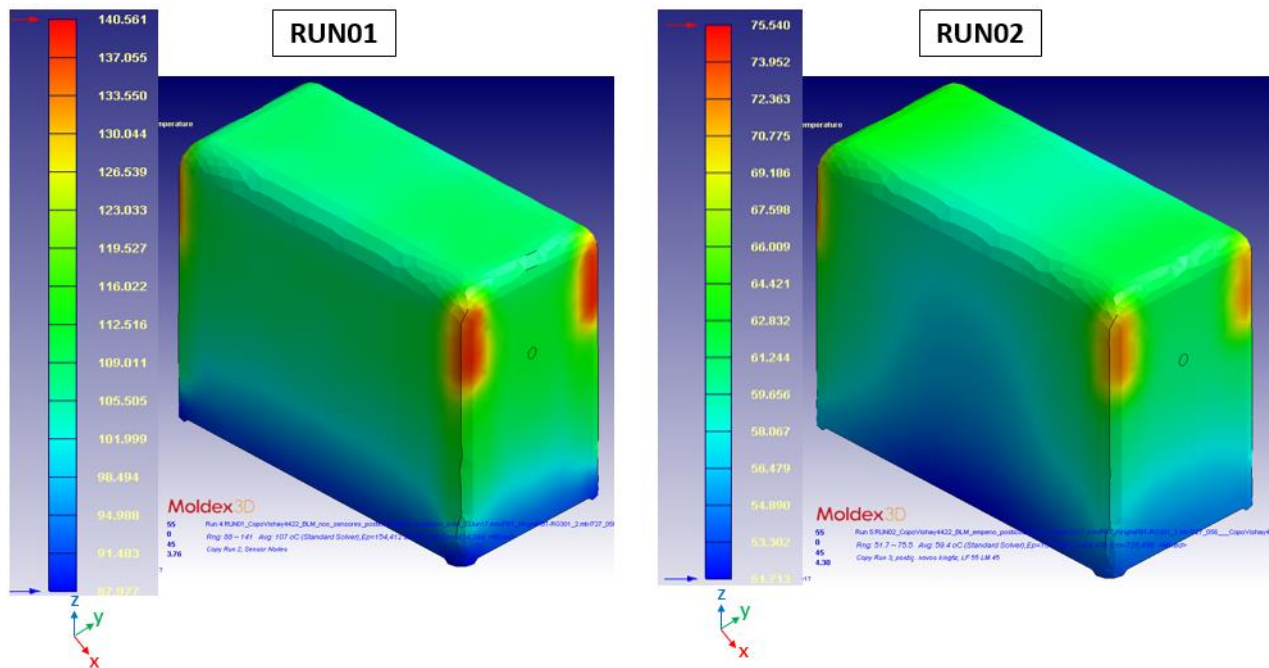


Figura 66 - Comparação da temperatura média ao longo da espessura da *RUN01* com a *RUN02*;

Observando a Figura 66 é possível concluir que o novo sistema de refrigeração diminuiu consideravelmente a temperatura ao longo da espessura, o que se traduz numa menor distribuição de temperaturas ao longo da peça, e, por conseguinte, numa menor probabilidade de empeno.

A espessura medida é apresentada na Figura 67, para as *RUN*'s em estudo.

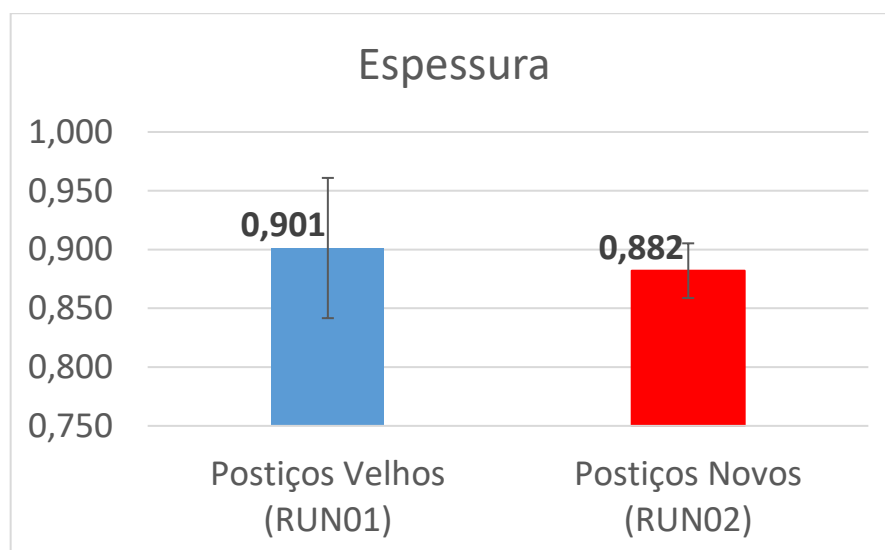


Figura 67 - Gráfico da espessura medida para ambas as *RUN*'s;



Através da Figura 67 é possível concluir que em ambas as *RUN*'s a espessura cumpre a cota requerida, estando a mesma apresentada na Figura 22. Relembrando que um dos defeitos verificados na primeira fase foi a variação da espessura, era expectável que o desvio padrão da *RUN01* fosse superior ao da *RUN02*, tal como se verifica. Assim, o sistema de refrigeração otimizado diminuiu o desvio padrão da espessura, o que demonstra que o defeito foi solucionado.

Relativamente à planicidade, os resultados são demonstrados na Figura 68.

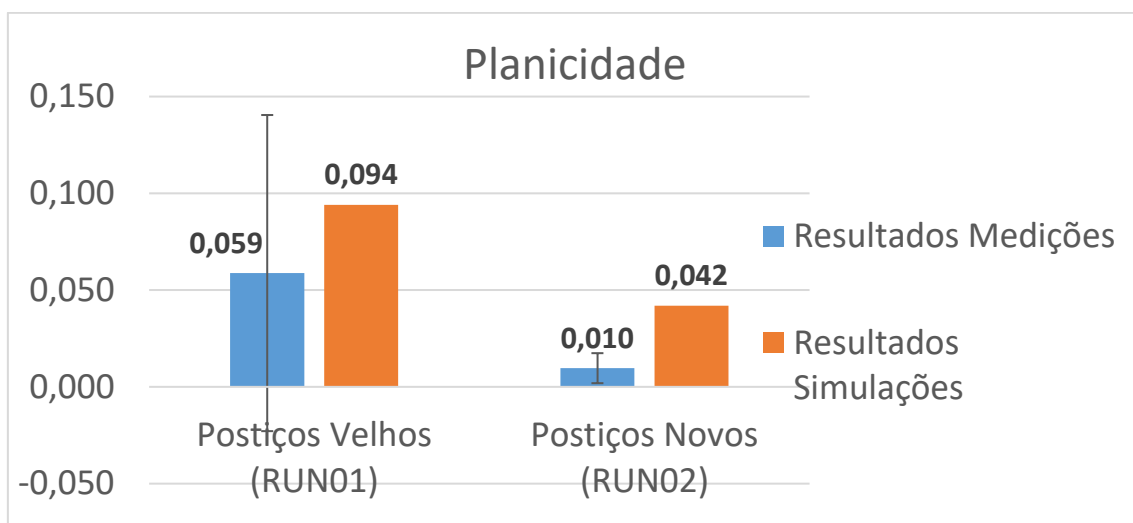


Figura 68 - Gráfico da planicidade medida em ambas as *RUN*'s;

Ao interpretar a Figura 68, deduz-se que existe uma grande diferença entre a situação anterior e a atual, visto que para além do valor absoluto ter diminuído, o desvio padrão também diminuiu acentuadamente, tal como demonstrado pelas barras de erro.

Na Figura 69 é apresentado o deslocamento máximo resultante das medições e da simulação para os postiços novos e para os postiços antigos.

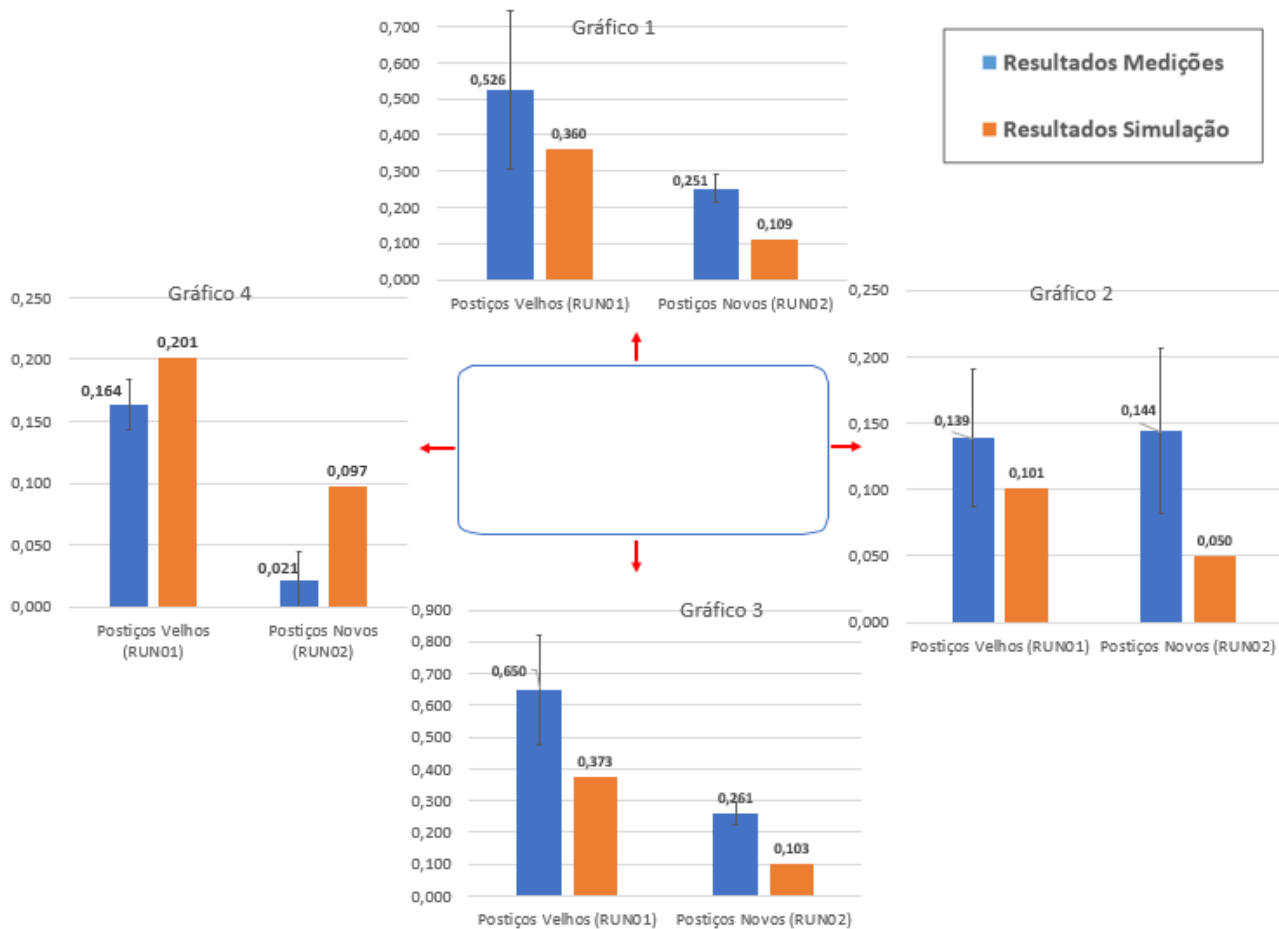


Figura 69 - Deslocamento máximo resultante das medições e da simulação, para o sistema de refrigeração velho e novo;

Quanto aos resultados das medições, tal como esperado, existiu uma redução acentuada do deslocamento em todas as arestas, exceto na aresta à direita. Nos resultados da simulação verifica-se também uma redução acentuada, mas neste caso constata-se esta redução em todas as arestas. Por intermédio destes resultados é possível concluir que com o novo sistema de refrigeração o empeno foi reduzido, tal como previsto.

Comparando os resultados das medições com os resultados da simulação, expostos na Figura 68 e na Figura 69, é possível afirmar que a simulação se revelou demasiado otimista, como evidenciado na secção 4.3.1.



5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1. Conclusões

O trabalho desenvolvido teve como principal objetivo a correção do empeno verificado no caso real em estudo, através do projeto de um novo sistema de refrigeração.

Para além disso, realizaram-se outros estudos que abordaram parâmetros ou características que determinaram o empeno, o que também se revelou importante para este estudo.

A simulação do processo de moldação por injeção é uma ferramenta muito importante atualmente, mas deve ser utilizada com cautela, pois como demonstra este estudo, por vezes os *softwares* podem ser demasiado otimistas. Assim, o deslocamento previsto pela simulação revelou-se inferior ao deslocamento real proveniente das medições das peças. Conclui-se neste estudo que o empeno calculado na simulação foi inferior ao apresentado na peça real.

Em relação à temperatura do molde o conjunto que originou o menor empeno foi o conjunto 3. Ou seja, depreende-se que a temperatura deve ser relativamente baixa no lado fixo (cavidade), de modo a que o arrefecimento seja rápido e a contração seja reduzida, diminuindo a probabilidade de empeno. A temperatura no lado móvel (bucha) deve ser elevada, pois uma maior temperatura origina uma maior relaxação das tensões.

Quanto ao material, o que possui uma maior percentagem de fibra de vidro apresenta um menor deslocamento, podendo este facto ser justificado através da maior resistência mecânica resultante da maior percentagem de fibra. Conclui-se que, quando se pretender reduzir o empeno da peça, este material deverá ser o eleito.

O novo sistema de refrigeração originou uma redução no deslocamento medido, e por consequência no empeno, comprovando-se este facto pelas medições, pela temperatura média ao longo da espessura e pelo deslocamento resultante da simulação. Além disso, foi possível comprovar que este sistema de refrigeração reduziu a variação



da espessura na peça, assim como melhorou a planicidade que se revelava problemática na primeira fase.

Após a realização deste estudo concluiu-se que todos os defeitos existentes na primeira fase foram solucionados, e, portanto, o objetivo foi cumprido.



5.2. Sugestões para trabalhos futuros

Nesta secção estão apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Estudar o efeito de elementos em ligas *AMPCO*, como posições moldantes, na refrigeração e conseqüentemente no empeno resultante;
- Estudar o efeito de posições em *CONTURA*, de forma a melhorar a eficácia do sistema de refrigeração;





REFERÊNCIAS

1. **Indústria, Celoplás S.A. - Plásticos para a.** Celoplás S.A. - Plásticos para a Indústria. *Celoplás S.A. - Plásticos para a Indústria*. [Online] [Citação: 22 de 06 de 2017.] <http://celoplas.pt/>.
2. **Mishra, Siba Prasad.** *Fibre Structure*. Daryaganj, New Dheli - 110002, India : Woodhead Publishing India Pvt. Ltd, 2016.
3. **Viana, Júlio C.** *Processamento de Polímeros II Moldação por Injeção - Introdução - Ciclo de Moldação e Variáveis*. 4800-058 Guimarães, Portugal : s.n.
4. **Martinho, Rui Pedro Cardoso da Silva.** *Revestimentos PVD mono e multicamada para moldes utilizados na injeção de plásticos reforçados*. Porto : Universidade do Porto, 2009.
5. **Nishimoto, Akiko Rocha.** *Simulação numérica da injeção de termoplásticos em moldes - estudo comparativo de alguns modelos computacionais*. Florianópolis : s.n., 2001.
6. **Júlio C. Viana, Carla I. Martins.** *Physical phenomena and thermomechanical environment*. Guimarães : Departamento de Engenharia de polímeros - Universidade do Minho.
7. **Viana, Júlio C.** *Pressão na Cavidade* . Guimarães : Departamento de Engenharia de Polímeros - Universidade do Minho.
8. **Plastics, SABIC Innovative.** *Understanding shrinkage and warpage of reinforced and filled thermoplastics*. s.l. : SABIC Innovative Plastics, 2007.
9. **SOLVAY.** *Design and Processing for Lowest Warpage*. s.l. : SOLVAY Speciality Polymers, 2002.
10. **Titomanlio, G. e Jansen, K. M. B.** *Effect of pressure history on shrinkage and residual stresses*. s.l. : Polymer Engineering and science, 1996. pp. 2029-2039. Vol. 36.
11. **Himasekhar, K., et al.** *Assessment of shrinkage and warpage using an integrated analysis of moulding dynamics*. Montreal : Proceedings of 49 annual meeting of the society of engineers, 1991. pp. 242-249.
12. **Wu e Scott, S.** *CAE Application: Shrinkage and Warpage of an Injection Moulded Part*. Toronto : Proceeding of the 55 annual meeting of the society of plastics polymer engineering and science, 1997.
13. **Kikuchi, et al.** *Generalized Warpage Parameter*. s.l. : Polymer Engineering and science, 1996. Vol. 36.



14. **Pontes, José António Vilela.** *Shrinkage and Ejection Forces in injection Moulded Products.* Guimarães : Departamento de Engenharia de Polímeros - Universidade do Minho, 2002.
15. **Ahrens, Carlos H., et al.** *Efeitos da pressão de recalque na injeção de poliacetal em moldes de fabricação rápida por estereolitografia.* Florianópolis : Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica.
16. **Machado, Ana Filipa Salgado.** *Estudo do empeno e contração de peças moldadas por injeção em compósitos de PP com pigmentos metálicos.* s.l. : Universidade do Minho - Departamento de Engenharia de Polímeros, 2013.
17. **Zollner, Olaf.** *The fundamentals of shrinkage of thermoplastics .* s.l. : Bayer, 2001.
18. **Bryce, Douglas.** *Plastic Injection Molding: Material Selection and Product Design Fundamentals.* s.l. : SME, 2001.
19. **Cambridge, University of.** Spherulites and optical properties. [Online] [Citação: 03 de 03 de 2017.] <https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/polymers/spherulites.php>.
20. **Fischer, Jerry M.** *Handbook of Molded Part Shrinkage and Warpage.* Norwich, NY : Plastics Design Library / William Andrew, Inc., 2003.
21. **H.L. Toor, R.L. Ballman, and L. Cooper.** *Predicting moldflow by electronic computer.* s.l. : Modern Plastics, 1960.
22. **S.Kenig, M.R. Kamal and.** *The injection molding of thermoplastics, Part II: Experimental test of the model.* s.l. : Polym.Eng.Sci., 1972. pp. 12: 302 - 308.
23. **A.I. Isayev, C.A. Hieber, and D.L.Crouthamel.** *Residual Stress in the injection molding of amorphous polymers.* s.l. : Soc.Plast.Eng.Proc.Annual Tec. Conf. (ANTEC), 1981. pp. 110-113. Vol. 27.
24. **G. Titomanlio, V. Brucato, and M.R. Kamal.** *Mechanism of cooling stress-buildin injection molding of thermoplastic polymers.* s.l. : Int. Polym. Process., 1987. pp. 1: 55-59.
25. **Kennedy, Peter K. e Zheng, Rong.** *Flow Analysis of Injection Molds.* Munich : Hanser, 2013.
26. **Brito, A. M.** *Mould Design - Injection Moulds for Thermoplastics - Cooling System - 08.* Guimarães : s.n.
27. **Marques, Luísa.** *O que são polímeros e porque são interessantes?* Évora : s.n.
28. **PONT, DU.** *TOP TEN DESIGN TIPS.* São Paulo, Brasil : s.n.
29. **Cunha, António.** *Manual do projetista - capítulo 2 - Moldação por injeção e materiais plásticos.* s.l. : Centimfe - Centro tecnológico da Indústria dos Moldes Ferramentas Especiais e Plásticos.



30. **Milacron, Ferromatik.** Plasteurope. [Online] Ferromatik Milacron. [Citação: 25 de 9 de 2016.] https://www.plasteurope.com/news/FERROMATIK_MILACRON_t213900/.
31. **Viana, Júlio C.** Processamento de polímeros II - Moldação po rinjeção. Departamento de Engenharia de Polímeros : s.n.
32. **António M. Cunha, António M. Brtio e Arnaldo Matos.** *Manual do projetista - Capítulo 3 - Tipificação de moldes.*
33. **Martinho, Rui Pedro Cardoso da Silva.** Revestimentos PVD mono e multicamada para moldes utilizados na injeção de plásticos reforçados. Universidade do Porto : s.n., 2009.
34. **S.A., DuPont do Brasil.** *Top Ten Design Tips.* São Paulo - Barueri : DuPont Brasil.
35. **Cunha, António.** *Manual do Projetista - Capítulo 2 Moldação por injeção e Materiais Plásticos.* s.l. : Centimfe - Centro Tecnológico da Indústria de Moldes Ferramentas Especiais e Plásticos, 2003.
36. **Viana, J. C.** *Processamento de polímeros II - Moldação por injeção.* Guimarães : Departamento de Engenharia de Polimeros - Universidade do Minho.
37. **Kamal, M.R. e Kenig, S.** *The injection molding of thermoplastics, Part I: Theoretical Model.* s.l. : Polym. Eng. Sci., 1972. pp. 294-301.
38. —. *The injection molding of thermoplastics, Part II: Experimental Test of the model.* s.l. : Polym. Eng. Sci., 1972. pp. 302-308.
39. **Williams, G. e Lord, H.A.** *Mold-filling studies for the injection molding thermoplastics materials Part I.* s.l. : Polym. Eng. Sci., 1975. pp. 553-568. Vol. 15.
40. **Lord, H.A. e Williams, G.** *Mold-filling studies fot he injection molding of thermopalstis materials Part II.* s.l. : Polym. Eng. Sci., 1975. pp. 569-582. Vol. 15.
41. **Broyer, E., Gutfinger, C. e Tadmor, Z.** *Flow analysis network (FAN) - Method for solving flow probelms in polymer processing.* s.l. : Polym. Eng. Sci., 1974. pp. 660-. Vol. 14.
42. **Ryan, M.E. e Chung, T.S. .** *Conformal mapping analysis of injection mold filling.* s.l. : Polym. Eng. Sci., 1980. pp. 642-. Vol. 20.
43. **Hieber, C.A. e Shen, S.F.** *A finite-element/finite-difference simulation of the injection molding filling process.* s.l. : J. of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 1980. pp. 1-32. Vol. 7.
44. **Wang, V.W., Hieber, C.A. e Wang, K.K.** *Dynamic simulation and graphics for the injection molding of three-dimensional thin parts.* s.l. : J. of Polym. Eng., 1986. pp. 21-45. Vol. 7.



45. **Isayev, A.I. e Hieber, C.A.** *Toward a viscoelastic modelling of the injection molding of polymers.* s.l. : Rheol. Acta, 1980. pp. 168-182. Vol. 19.
46. **Kamal, M.R., et al.** *Computer simulation of injection mold filling for viscoelastic melts with fountain flow.* s.l. : Polym. Eng. Sci., 1986. pp. 190-196. Vol. 26.
47. **Mavridis, H., Hrymak, A.N. e Vlachopoulos, J.** *Finite element simulation of fountain flow in injection molding.* s.l. : Polym. Eng. Sci., 1986. pp. 449-454. Vol. 26.
48. **Mavridis, H., Hrymak, A.N. e Vlachopoulos, A.N.** *The effect of fountain flow on molecular orientation in injection molding.* s.l. : J. of Rheology, 1988. pp. 639-663. Vol. 32.
49. **Kuo, Y. e M.R. Kamal.** *Flows of thermoplastics in the filling and packing stages of injection molding.* Massachussets : Proceedings of Int. Conf. Polym. Processing , 1977.
50. **Titomanlio, G., Acierno, D. e La Mantia, F.P.** *Modelling of the packing step in the injection moulding of thermoplastic materials.* s.l. : Ing. Chim. It., 1980. pp. 110-.
51. **Titomanlio, G., Piccarolo, S. e Levati, G.** *On the packing holding flow in the injection moulding of thermoplastics polymers.* s.l. : J. Appl. Polym. Sci., 1988. pp. 1483-.
52. **Nguyen, K.T. e Kamal, M.R.** *Analysis of the packing stage of a viscoelastic melt.* s.l. : Polym. Eng. Sci., 1993. pp. 665-674. Vol. 33.
53. **Chiang, H.H., Hieber, C.A. e Wang, K.K.** *A unified simulation of the filling and post-filling stages in injection molding Part I: Formulation.* s.l. : Polym. Eng. Sci., 1993. pp. 116-124. Vol. 31.
54. —. *A unified simulation of the filling and post-filling stages in injection molding Part II: Experimental work.* s.l. : 125-139, 1993. pp. 125-139.
55. **Hieber, C.A.** *Injection and compression molding fundamentals.* New York : s.n., 1987. p. 703.
56. **Hetu, J.F., et al.** *3D finite element method for the simulation of the filling stage in injection molding.* s.l. : Polym. Eng. Sci., 1998. pp. 223-236. Vol. 38.
57. **Ilinca, F. e Héту, J.F.** *Three-dimensional filling and post-filling simulation of polymer injection molding.* s.l. : Intern. Polym. Process., 2001. pp. 291-301. Vol. 16.
58. **Coupez, T. e Pichelin, E.** *Finite element solution of the 3D mold filling problem for viscous incompressible fluid.* s.l. : Comp. Methods Appl. Mech. Eng, 1998. pp. 359-371.
59. **Plastics, BASF.** *Warping characteristics of fiber-reinforced injection-molded parts.* s.l. : BASF Plastics.



60. **Center, Santa Clara University Engineering Design.** Santa Clara University Engineering Design Center. [Online] [Citação: 15 de 02 de 2017.] http://www.dc.engr.scu.edu/cmdoc/dg_doc/develop/process/physics/b3500001.htm.

61. **Europe, Fanuc.** Fanuc Roboshot Alpha S100iA Datasheet.





ANEXOS

Anexo 1 - KINGFA RG301 CZ.30 Datasheet

Kingfa PBT RG301

Polybutylene Terephthalate

Kingfa

PROSPECTOR®

www.ulprospector.com

Technical Data

Product Description

Kingfa PBT RG301 is a Polybutylene Terephthalate (PBT) material filled with 30% glass fiber. It is available in Asia Pacific or North America for injection molding.

Important attributes of Kingfa PBT RG301 are:

- Flame Rated
- Flame Retardant
- Heat Resistant
- High Strength

Typical applications include:

- Appliances
- Household Applications
- Lighting Applications

General

Material Status	• Commercial: Active		
UL Yellow Card ¹	• E171666-100139764 • E171666-225737 • E171666-101329546		
Search for UL Yellow Card	• Kingfa		
Availability	• Asia Pacific	• North America	
Filler / Reinforcement	• Glass Fiber, 30% Filler by Weight		
Features	• Flame Retardant	• High Heat Resistance	• Non-Blooming
	• Good Electrical Properties	• High Strength	
Uses	• Appliance Components	• Household Goods	• Lighting Fixtures
Forms	• Pellets		
Processing Method	• Injection Molding		

Physical	Nominal Value	Unit	Test Method
Specific Gravity	1.64	g/cm ³	ASTM D792
Molding Shrinkage			ASTM D955
Flow : 23°C	0.30	%	
Across Flow : 23°C	0.90	%	
Water Absorption (23°C, 24 hr)	0.070	%	ASTM D570
Mechanical	Nominal Value	Unit	Test Method
Tensile Strength ³	120	MPa	ASTM D638
Tensile Elongation ³ (Break)	2.6	%	ASTM D638
Flexural Modulus ⁴	9000	MPa	ASTM D790
Flexural Strength ⁴	190	MPa	ASTM D790
Impact	Nominal Value	Unit	Test Method
Notched Izod Impact (23°C, 3.20 mm)	80	J/m	ASTM D256
Hardness	Nominal Value	Unit	Test Method
Rockwell Hardness (R-Scale)	12D		ASTM D785
Thermal	Nominal Value	Unit	Test Method
Deflection Temperature Under Load			ASTM D648
0.45 MPa, Unannealed, 6.40 mm	220	°C	
1.8 MPa, Unannealed, 6.40 mm	210	°C	
Electrical	Nominal Value	Unit	Test Method
Volume Resistivity	1.0E+16	ohms-cm	ASTM D257

1 of 3



UL and the UL logo are trademarks of UL, LLC © 2017. All Rights Reserved.
UL Prospector | 800-798-6998 or 307-742-9227 | www.ulprospector.com

The information presented on this datasheet was acquired by UL Prospector from the producer of the material. UL Prospector makes substantial efforts to assure the accuracy of this data. However, UL Prospector assumes no responsibility for the data values and strongly encourages that upon final material selection, data points are validated with the material supplier.

Form No. TDS-54854-en
Document Created: Tuesday, January 17, 2017
Added to Prospector: June 2005
Last Updated: 10/25/2012



Kingfa PBT RG301
Polybutylene Terephthalate
Kingfa

PROSPECTOR[®]
www.ulprospector.com

Flammability	Nominal Value Unit	Test Method
Flame Rating		UL 94
0.75 mm	V-0	
3.0 mm	V-0	

Injection	Nominal Value Unit
Drying Temperature	120 to 140 °C
Drying Time	4.0 to 6.0 hr
Rear Temperature	220 to 240 °C
Middle Temperature	235 to 255 °C
Front Temperature	240 to 265 °C
Processing (Melt) Temp	240 to 260 °C
Mold Temperature	50 to 70 °C
Injection Rate	Moderate-Fast

Injection Notes

Processing Temperature Limit: 265°C

Notes

¹ A UL Yellow Card contains UL-verified flammability and electrical characteristics. UL Prospector continually works to link Yellow Cards to individual plastic materials in Prospector, however this list may not include all of the appropriate links. It is important that you verify the association between these Yellow Cards and the plastic material found in Prospector. For a complete listing of Yellow Cards, visit the UL Yellow Card Search.

² Typical properties; these are not to be construed as specifications.

³ 10 mm/min

⁴ 2.0 mm/min





Kingfa PBT RG301
Polybutylene Terephthalate
Kingfa

PROSPECTOR®
www.ulprospector.com

Where to Buy

Supplier

Kingfa
China
Telephone: +86-20-8703-7818
Web: <http://www.kingfa.com/>

Distributor

EnCom, Inc.
Telephone: 866-481-7700
Web: <http://www.encompolymers.com/>
Availability: North America

Southland Polymers
Southland Polymers - Full Service Engineering and Commodity Resin Distribution Since 1979
Telephone: 562-921-0444
Web: <http://www.southlandpolymers.com/>
Availability: Central America, North America, South America

3 of 3



UL and the UL logo are trademarks of UL LLC © 2017. All Rights Reserved.
UL Prospector | (800-798-4998 or 307-743-8227) | www.ulprospector.com

The information presented on this datasheet was acquired by UL Prospector from the producer of the material. UL Prospector makes substantial efforts to assure the accuracy of this data. However, UL Prospector assumes no responsibility for the data values and strongly encourages that upon final material selection, data points are validated with the material supplier.

Form No. TDS-64254-en
Document Created: Tuesday, January 17, 2017
Added to Prospector: June 2005
Last Updated: 10/25/2012



Anexo 2 - CCP 5615F PRETO Datasheet

CHANG CHUN PLASTICS CO., LTD.

NO. 301, SONGKIANG ROAD, 7TH FL., TAIPEI, 10477 TAIWAN

TEL : 886-2-2503-8131 (REF) FAX : 886-2- 2501-8018

LONGLITE[®]

Polybutylene Terephthalate

PBT 5615F-104BL

>PBT-GF15 FR(30+40)<



CHANG CHUN PLASTICS CO., LTD.

NO. 301, SONGKIANG ROAD, 7TH FL., TAIPEI, 10477 TAIWAN
TEL : 886-2-2503-8131 (REF) FAX : 886-2- 2501-8018

Halogen Free PBT 5615F-104BL Technical Data

Engineering Plastics Polybutylene Terephthalate

CCP PBT 5615F-104BL

PBT 5615F-104BL is a 15% glass fiber reinforced halogen free flame retarded injection molding grade.

Characteristics

- 1) halogen-free
- 2) excellent electrical property
- 3) excellent temperature resistance, high heat distortion temperature.
- 4) excellent mechanic and chemical property
- 5) excellent weatherability
- 6) excellent wear property
- 7) excellent moldability
- 8) High resistance to fuels, oil, fats and many solvents

Injection Moulding Condition

Cylinder temperatures	: 230-260°C
Nozzle temperature	: 240-260°C
Mould temperature	: 40-120°C, suitable temperature 60-80°C
Injection rate	: middle - fast
Screw speed	: 60-120 rpm, to be chosen in such a way that plasticizing time is just within cooling time.
Pressure	Injection pressure : 500-1200 kg/cm ²
	Holding pressure : 300-800 kg/cm ²
	Back pressure : 0-3 kg/cm ²
Mould shrinkage	Mould shrinkage 1.6 mm thickness horizon is 0.2-0.6% and vertical is 0.9-1.3% under the test method ISO 527.

Packaging

25 kg/ paper bag .

Material handling

Moisture pick-up from ambient air should be avoided. Keep hopper properly closed.



CHANG CHUN PLASTICS CO., LTD.

NO. 301, SONGKIANG ROAD, 7TH FL., TAIPEI, 10477 TAIWAN
TEL : 886-2-2503-8131 (REF) FAX : 886-2- 2501-8018

Engineering Plastics Polybutylene Terephthalate

CCP PBT 5615F-104BL

Property	Value	Unit	Test method
ISO quality of the material display :	>PBT-GF15 FR(30+40)<		ISO 11469
Glass Fiber Content	15	%	
Density	1.45	g/cm ³	ISO 1183
Melting point	225	°C	DSC
Heat deflection temperature under load			
— 18.6 Mpa	195	°C	ISO 75
— 4.6 Mpa	210	°C	ISO 75
Flammability acc. to UL94, 1.6 mm thickness	V-0	-	UL94
Tensile stress	80	MPa	ISO 527
Tensile strain	2.3	%	ISO 527
Tensile modulus	7000	MPa	ISO 527
Flexural stress	120	MPa	ISO 178
Flexural modulus	5000	MPa	ISO 178
Charpy impact strength-notched, 23°C	5.0	KJ/m ²	ISO 179
Dielectric strength, 2 mm thickness	20	KV/mm	IEC 243
Volume resistivity	10 ¹⁵	Ω-cm	IEC 60093
Surface resistivity	10 ¹³	Ω	IEC 60093
Comparative Tracking Index	400	Volts	UL 746A
Arc resistance	100	SEC	UL 746A

(1) For reference only

(2) All data in the table are the typical values of the material and not the minimum values of the material specifications.



Anexo 3 - Dados do gráfico de desvio de peso de dez moldações;

Shot #	Cavity									total	Deviation	
	1	2	3	4	5	6	7	8	Sprue			
1	8,130	8,170	8,190	8,140						32,630	0,74	%
2	8,140	8,170	8,190	8,160						32,660	0,61	%
3	8,140	8,170	8,200	8,150						32,660	0,73	%
4	8,130	8,160	8,210	8,140						32,640	0,98	%
5	8,140	8,180	8,200	8,140						32,660	0,73	%
6	8,130	8,170	8,210	8,150						32,660	0,98	%
7	8,140	8,170	8,200	8,160						32,670	0,73	%
8	8,130	8,160	8,200	8,160						32,650	0,86	%
9	8,140	8,180	8,210	8,170						32,700	0,86	%
10	8,170	8,190	8,230	8,180						32,770	0,73	%
										Deviation	0,429	%



Anexo 4 – Dados do gráfico da Figura 62

Modelo Original			Modelo Deformado			Resultados Medições	
			NodeID	X-Cord(Deformed) [mm]	Y-Cord(Deformed) [mm]		
1,000	22,099	-0,001				-0,085	2,781
2,000	22,420	-0,001	134674	40,6886	-0,31849	-0,154	3,632
3,000	22,741	-0,001	134709	39,8333	-0,39964	-0,233	4,559
4,000	23,064	-0,001	134750	38,9055	-0,4866	-0,316	5,579
5,000	23,388	-0,001	134749	37,8898	-0,58271	-0,523	6,696
6,000	23,714	-0,001	134714	36,7825	-0,68332	-0,678	7,923
7,000	24,043	-0,001	134788	35,5679	-0,7837	-0,999	9,260
8,000	24,375	-0,001	134848	34,2501	-0,87746	-1,239	10,667
9,000	24,712	-0,001	134671	32,8721	-0,96281	-1,440	12,085
10,000	25,053	-0,001	134725	31,4844	-1,02355	-1,650	13,504
11,000	25,399	-0,001	134800	30,0961	-1,06268	-1,905	14,922
12,000	25,752	-0,001	134757	28,7069	-1,08398	-2,091	16,340
13,000	26,111	-0,001	134756	27,3156	-1,09375	-2,199	17,758
14,000	26,478	-0,001	134717	25,9225	-1,0971	-2,207	19,176
15,000	26,854	-0,001	134742	24,5281	-1,09709	-2,305	20,594
16,000	27,239	-0,001	134722	23,1335	-1,09443	-2,417	22,012
17,000	27,635	-0,001	134817	21,7393	-1,08834	-2,477	23,430
18,000	28,043	-0,001	134774	20,347	-1,07662	-2,514	24,847
19,000	28,463	-0,001	134855	18,9571	-1,05625	-2,498	26,264
20,000	28,898	-0,001	134826	17,5695	-1,02397	-2,438	27,681
21,000	29,349	-0,001	134884	16,1836	-0,97766	-2,323	29,097
22,000	29,818	-0,001	134842	14,7984	-0,91719	-2,178	30,513
23,000	30,306	-0,001	134838	13,4128	-0,84399	-2,033	31,929
24,000	30,815	-0,001	134744	12,0258	-0,76181	-1,810	33,345
25,000	31,349	-0,001	134803	10,637	-0,67214	-1,510	34,752
26,000	31,909	-0,001	134919	9,25732	-0,57865	-1,330	36,095
27,000	32,499	-0,001	134882	7,9422	-0,48892	-1,014	37,330
28,000	33,122	-0,001	134881	6,73373	-0,40702	-0,772	38,453
29,000	33,783	-0,001	134815	5,63076	-0,33578	-0,444	39,477
30,000	34,486	-0,001	134814	4,61933	-0,2745	-0,273	40,408
31,000	35,236	-0,001	134827	3,69674	-0,22456	-0,165	41,260
32,000	36,040	-0,001	134625	2,8482	-0,18066	0,042	-2,798
33,000	36,906	-0,001	130950	0,405542	-2,57179	0,278	-3,684
34,000	37,842	-0,001	130946	0,402799	-3,47275	0,441	-4,654
35,000	38,859	-0,001	130945	0,401203	-4,462	0,678	-5,726
36,000	39,971	-0,001	130937	0,410841	-5,5542	0,939	-6,903
37,000	41,192	-0,001	130984	0,430968	-6,75779	1,207	-8,205



38,000	42,495	-0,027	130922	0,45282	-8,09455	1,207	-9,615
39,000	43,393	-0,330	130966	0,468582	-9,54071	1,412	-11,074
40,000	43,907	-0,855	131058	0,494819	-11,0191	1,441	-12,534
41,000	44,125	-1,523	131141	0,479518	-12,5049	1,289	-13,953
42,000	44,197	-2,245	131140	0,469273	-13,9509	0,921	-15,264
43,000	44,197	-2,981	131142	0,443433	-15,2877	0,740	-16,452
44,000	44,197	-3,702	131106	0,420353	-16,4922	0,581	-17,529
45,000	44,197	-4,408	131067	0,409518	-17,5853	0,404	-18,503
46,000	44,197	-5,103	131036	0,409725	-18,5765	0,347	-19,390
47,000	44,197	-5,787	131035	0,416415	-19,4817	-21,837	2,781
48,000	44,197	-6,461	134626	2,8601	-21,8607	-21,659	3,632
49,000	44,197	-7,128	136715	3,71106	-21,8097	-21,540	4,559
50,000	44,197	-7,787	136805	4,63629	-21,7577	-21,377	5,579
51,000	44,197	-8,441	136793	5,65246	-21,6975	-21,086	6,696
52,000	44,197	-9,091	136697	6,76273	-21,6286	-20,805	7,923
53,000	44,197	-9,737	136607	7,98128	-21,5504	-20,545	9,260
54,000	44,197	-10,381	136824	9,30203	-21,4653	-20,363	10,667
55,000	44,197	-11,024	136720	10,6824	-21,3754	-20,094	12,085
56,000	44,197	-11,667	136640	12,071	-21,2914	-19,920	13,504
57,000	44,197	-12,311	136830	13,4576	-21,2164	-19,831	14,922
58,000	44,197	-12,958	136815	14,8422	-21,1514	-19,630	16,340
59,000	44,197	-13,607	136709	16,2256	-21,097	-19,585	17,758
60,000	44,197	-14,261	136647	17,6089	-21,057	-19,442	19,176
61,000	44,197	-14,921	136646	18,9933	-21,0322	-19,526	20,594
62,000	44,197	-15,587	136756	20,3801	-21,0198	-19,432	22,012
63,000	44,197	-16,262	136568	21,7694	-21,0163	-19,491	23,430
64,000	44,197	-16,945	136567	23,1609	-21,0178	-19,613	24,847
65,000	44,197	-17,640	136758	24,5534	-21,021	-19,717	26,264
66,000	44,197	-18,347	136819	25,9457	-21,0246	-19,794	27,681
67,000	44,197	-19,067	136821	27,3368	-21,0294	-19,958	29,097
68,000	44,197	-19,803	136644	28,7261	-21,0383	-20,177	30,513
69,000	44,126	-20,526	136643	30,1134	-21,0561	-20,325	31,929
70,000	43,907	-21,193	136658	31,4997	-21,0889	-20,518	33,345
71,000	43,392	-21,718	136750	32,8858	-21,1391	-20,804	34,752
72,000	42,494	-22,021	136851	34,2629	-21,2083	-21,028	36,095
73,000	41,192	-22,047	136727	35,5798	-21,2825	-21,227	37,330
74,000	39,970	-22,047	136729	36,7931	-21,3619	-21,420	38,453
75,000	38,859	-22,047	136623	37,8996	-21,4409	-21,589	39,477
76,000	37,842	-22,047	136650	38,9152	-21,5163	-21,823	40,408
77,000	36,906	-22,047	136649	39,8449	-21,5845	-21,878	41,260
78,000	36,040	-22,047	131332	40,7014	-21,6514	44,212	-2,798
79,000	35,236	-22,047	131356	43,2485	-2,60743	44,147	-3,684



80,000	34,486	-22,047	131357	43,2688	-3,51081	44,067	-4,654
81,000	33,783	-22,047	131371	43,281	-4,50371	43,987	-5,726
82,000	33,122	-22,047	131373	43,2757	-5,59722	44,062	-6,903
83,000	32,499	-22,047	131370	43,2633	-6,78972	44,077	-8,205
84,000	31,909	-22,047	131360	43,2511	-8,09908	44,067	-9,615
85,000	31,349	-22,047	131354	43,2386	-9,51172	44,121	-11,074
86,000	30,815	-22,047	131352	43,2337	-10,9613	44,177	-12,534
87,000	30,306	-22,047	131367	43,2322	-12,407	44,191	-13,953
88,000	29,818	-22,047	131375	43,2384	-13,8272	44,144	-15,264
89,000	29,349	-22,047	131363	43,2477	-15,1453	44,154	-16,452
90,000	28,898	-22,047	131361	43,2588	-16,3477	44,185	-17,529
91,000	28,463	-22,047	131368	43,2648	-17,4465	44,075	-18,503
92,000	28,043	-22,047	131351	43,2565	-18,4417	44,035	-19,390
93,000	27,635	-22,047		43,2403	-19,3459		
94,000	27,239	-22,047					
95,000	26,854	-22,047					
96,000	26,478	-22,047					
97,000	26,111	-22,047					
98,000	25,752	-22,047					
99,000	25,399	-22,047					
100,000	25,053	-22,047					
101,000	24,712	-22,047					
102,000	24,375	-22,047					
103,000	24,043	-22,047					
104,000	23,714	-22,047					
105,000	23,388	-22,047					
106,000	23,064	-22,047					
107,000	22,741	-22,047					
108,000	22,420	-22,047					
109,000	21,778	-22,047					
110,000	21,457	-22,047					
111,000	21,135	-22,047					
112,000	20,811	-22,047					
113,000	20,484	-22,047					
114,000	20,155	-22,047					
115,000	19,823	-22,047					
116,000	19,487	-22,047					
117,000	19,145	-22,047					
118,000	18,799	-22,047					
119,000	18,446	-22,047					
120,000	18,087	-22,047					
121,000	17,720	-22,047					



122,000	17,344	-22,047					
123,000	16,959	-22,047					
124,000	16,563	-22,047					
125,000	16,156	-22,047					
126,000	15,735	-22,047					
127,000	15,300	-22,047					
128,000	14,849	-22,047					
129,000	14,381	-22,047					
130,000	13,893	-22,047					
131,000	13,383	-22,047					
132,000	12,850	-22,047					
133,000	12,289	-22,047					
134,000	11,699	-22,047					
135,000	11,076	-22,047					
136,000	10,415	-22,047					
137,000	9,713	-22,047					
138,000	8,962	-22,047					
139,000	8,158	-22,047					
140,000	7,293	-22,047					
141,000	6,357	-22,047					
142,000	5,339	-22,047					
143,000	4,228	-22,047					
144,000	3,007	-22,047					
145,000	1,704	-22,021					
146,000	0,808	-21,717					
147,000	0,293	-21,193					
148,000	0,073	-20,525					
149,000	0,001	-19,803					
150,000	0,001	-19,067					
151,000	0,001	-18,347					
152,000	0,001	-17,640					
153,000	0,001	-16,945					
154,000	0,001	-16,262					
155,000	0,001	-15,587					
156,000	0,001	-14,921					
157,000	0,001	-14,261					
158,000	0,001	-13,607					
159,000	0,001	-12,958					
160,000	0,001	-12,311					
161,000	0,001	-11,667					
162,000	0,001	-11,024					
163,000	0,001	-10,381					



164,000	0,001	-9,737					
165,000	0,001	-9,091					
166,000	0,001	-8,441					
167,000	0,001	-7,787					
168,000	0,001	-7,128					
169,000	0,001	-6,461					
170,000	0,001	-5,787					
171,000	0,001	-5,103					
172,000	0,001	-4,408					
173,000	0,001	-3,702					
174,000	0,001	-2,981					
175,000	0,001	-2,245					
176,000	0,072	-1,523					
177,000	0,291	-0,855					
178,000	0,805	-0,330					
179,000	1,704	-0,027					
180,000	3,006	-0,001					
181,000	4,228	-0,001					
182,000	5,339	-0,001					
183,000	6,356	-0,001					
184,000	7,292	-0,001					
185,000	8,158	-0,001					
186,000	8,962	-0,001					
187,000	9,712	-0,001					
188,000	10,415	-0,001					
189,000	11,076	-0,001					
190,000	11,699	-0,001					
191,000	12,289	-0,001					
192,000	12,849	-0,001					
193,000	13,383	-0,001					
194,000	13,893	-0,001					
195,000	14,380	-0,001					
196,000	14,849	-0,001					
197,000	15,300	-0,001					
198,000	15,735	-0,001					
199,000	16,155	-0,001					
200,000	16,563	-0,001					
201,000	16,959	-0,001					
202,000	17,344	-0,001					
203,000	17,720	-0,001					
204,000	18,087	-0,001					
205,000	18,446	-0,001					



206,000	18,799	-0,001					
207,000	19,145	-0,001					
208,000	19,487	-0,001					
209,000	19,823	-0,001					
210,000	20,155	-0,001					
211,000	20,484	-0,001					
212,000	20,811	-0,001					
213,000	21,135	-0,001					
214,000	21,457	-0,001					
215,000	21,778	-0,001					
1,000	22,099	-0,001					



Anexo 5 – Dados dos gráficos da Figura 63

Gráfico 1		
	Deslocamento	Desvio-Padrão
Temperaturas 1	0,251	0,038
Temperaturas 2	0,485	0,013
Temperaturas 3	0,187	0,091
Gráfico 2		
	Deslocamento	Desvio-Padrão
Temperaturas 1	0,144	0,062
Temperaturas 2	0,124	0,069
Temperaturas 3	0,071	0,055
Gráfico 3		
	Deslocamento	Desvio-Padrão
Temperaturas 1	0,261	0,034
Temperaturas 2	0,440	0,036
Temperaturas 3	0,226	0,020
Gráfico 4		
	Deslocamento	Desvio-Padrão
Temperaturas 1	0,021	0,024
Temperaturas 2	0,088	0,076
Temperaturas 3	0,044	0,019



Anexo 6 - Dados dos gráficos da Figura 64

Gráfico 1		
	Deslocamento	Desvio-Padrão
Kingfa (30 % F.V.)	0,251	0,038
CCP (15 % F.V.)	0,202	0,060
Gráfico 2		
	Deslocamento	Desvio-Padrão
Kingfa (30 % F.V.)	0,144	0,062
CCP (15 % F.V.)	0,196	0,032
Gráfico 3		
	Deslocamento	Desvio-Padrão
Kingfa (30 % F.V.)	0,261	0,034
CCP (15 % F.V.)	0,317	0,056
Gráfico 4		
	Deslocamento	Desvio-Padrão
Kingfa (30 % F.V.)	0,021	0,024
CCP (15 % F.V.)	0,097	0,054



Anexo 7 - Dados do gráfico da Figura 65

Panicidade			
	Resultados Medições	Desvio-Padrão	Resultados Simulação
Kingfa (30 % F.V.)	0,010	0,008	0,042
CCP (15 % F.V.)	0,010	0,008	0,072



Anexo 8 - Dados do gráfico da Figura 67

	Espessura	
	Medições	Desvio-Padrão
Postiços Velhos (RUN01)	0,901	0,060
Postiços Novos (RUN02)	0,882	0,023



Anexo 9 - Dados do gráfico da Figura 68

Planicidade			
	Resultados Medições		Resultados Simulação
Postiços Velhos (<i>RUN01</i>)	0,059	0,082	0,094
Postiços Novos (<i>RUN02</i>)	0,010	0,008	0,042



Anexo 10 - Dados dos gráficos da Figura 69

Gráfico 1			
	Resultados Medições		Resultados Simulação
	Deslocamento	Desvio-Padrão	
Postiços Velhos (RUN01)	0,526	0,219	0,360
Postiços Novos (RUN02)	0,251	0,038	0,109

Gráfico 2			
	Resultados Medições		Resultados Simulação
	Deslocamento	Desvio-Padrão	
Postiços Velhos (RUN01)	0,139	0,052	0,101
Postiços Novos (RUN02)	0,144	0,062	0,050

Gráfico 3			
	Resultados Medições		Resultados Simulação
	Deslocamento	Desvio-Padrão	
Postiços Velhos (RUN01)	0,650	0,17327784	0,373
Postiços Novos (RUN02)	0,261	0,034	0,103

Gráfico 4			
	Resultados Medições		Resultados Simulação
	Deslocamento	Desvio-Padrão	
Postiços Velhos (RUN01)	0,164	0,019810705	0,201
Postiços Novos (RUN02)	0,021	0,024	0,097