Optimização das Condições de Processamento Utilizando Simulação Numérica

Estágio realizado na Empresa Simoldes Plásticos

Nuno Ricardo Pinho Moreira

Relatório do Projecto Final

Orientadora na Empresa Simoldes Plásticos: Eng.ª Cidália Amaro

Orientadora na FEUP: Eng.ª Ana Reis

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Julho de 2009

Aos pais, familiares e amigos

Resumo

No âmbito da cadeira de Projecto final do curso de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica da Universidade do Porto, foi realizado um estágio curricular na empresa Simoldes Plásticos, S.A. com o tema: Optimização das condições de processamento utilizando a simulação numérica.

O estágio permitiu a integração numa equipa do departamento de Engenharia de Processo desta empresa, responsável pela optimização das condições de processamento e alterações a efectuar no molde.

O trabalho apresentado decorreu no âmbito de um projecto para a Volkswagen tendo como principal objectivo a optimização do processo de injecção de um componente (Pilar A do modelo Caddy) com o apoio da simulação numérica. Estudou-se o comportamento do material ao longo do ciclo de injecção. Foi efectuado o estudo de enchimento, compactação, arrefecimento e empeno, conseguindo-se assim prever o comportamento do material e possíveis defeitos nas peças. Foi feita uma primeira abordagem teórica que permitiu uma primeira aproximação dos parâmetros do processo e depois utilizou-se o software de simulação MPI (Moldflow Plastics Insight). Este software permitiu analisar o enchimento da peça, visualizar possíveis defeitos entre eles, chupados, linhas de união, pontos de retenção de ar e empeno, bem como diferenças de temperatura na peça, desempenho do sistema de arrefecimento, entre outros.

A abordagem teórica permitiu verificar que os resultados obtidos diferem pouco dos resultados usados no Moldflow, mostrando assim, ser uma ferramenta útil no caso de não ter ao alcance uma ferramenta de cálculo numérica.

Por fim foram acompanhados os ensaios a fim de avaliar e comparar os resultados.

Devido a limitações temporais não foi possível o acompanhamento da totalidade do projecto. No entanto, este estágio permitiu uma boa integração na equipa de Projecto e participar em grande parte do desenvolvimento.

Abstract

Under the chair of Draft Final Course Integrated Master in Mechanical Engineering from the University of Porto, was made a traineeship in the company Simoldes Plastics, SA with the theme: Optimization of conditions for processing using the numerical simulation.

The training enabled the integration team in the department of Process Engineering of this company, responsible for the optimization of processing conditions and changes to make the mold.

The work was presented in a project for the Volkswagen with the primary aim of the optimization of the injection of a component (Pillar of the model Caddy) with the support of the numerical simulation. To study the behavior of the material over the course of injection. The studies was carried out of filling, compaction, cooling and warp and can it predict the behavior of the material and possible defects in parts. Was a first approach that allowed a first approximation of the parameters of the process and then used the software to simulate MPI (Moldflow Plastics Insight). This software allowed us to analyze the filling of the piece, see possible defects between them, sucking, lines of union, points to retention of air and warp and differences in temperature in the play, performance of the cooling system, among others.

The approach has shown that the results differ little used in Moldflow results, revealing thus be a useful tool in case you do not have to reach a tool for numerical calculation.

Finally the tests were monitored to assess and compare the results.

Due to time limitations it was not possible to monitor the whole project. However, this stage has a good integration of the project team and participate in most of the development.

Agradecimentos

Concluído o Projecto Final, não poderia deixar de prestar o meu agradecimento a todas as pessoas que me acompanharam ao longo deste período de estágio.

A realização do Projecto só foi possível devido à ajuda de todos aqueles que se mostraram disponíveis para me ajudar na elaboração do mesmo.

Assim, gostaria de agradecer:

Ao meu orientador da empresa, Eng.ª Cidália Amaro, por toda a disponibilidade, empenho para o esclarecimento de dúvidas, dedicação e companheirismo ao longo deste período de estágio;

À orientadora da Universidade, Eng.ª Ana Reis, pela organização e esclarecimento de dúvidas relativamente ao estágio.

Ao Eng.º Júlio Grilo, ao Dr. Paulo Bastos e ao Eng.º Filipe Valente, responsáveis pela minha entrada na Simoldes Plásticos.

A todo o grupo de trabalho da Simoldes, em especial ao Eduardo Mota, Jhonny Carvalhais, João Jardim, Natália Rodrigues e Regina por me receberem tão bem.

Ao Ricardo Costa, por todo o empenho, companheirismo e apoio prestardo em todo o percurso académico.

Por fim quero agradecer imenso à minha família, pai, mãe e irmãos por todo incentivo, apoio e ajuda prestada nesta fase da minha vida.

Muito obrigado a todos.

Índice de Conteúdos

Resumo iii

Abstract iv

Agradecimentos v

Índice de Conteúdos vi

Índice de Tabelas x

Índice de Figuras xi

Nomenclatura xv

Estrutura do relatório xvii

1 - Introdução 1

1.1 – Objectivos 1

1.2- O processo de moldação por injecção 2

1.3 – O Equipamento Básico 6

1.4 - O molde para a injecção de plásticos 7

2 – A empresa 9

2.1 - Localização da Simoldes Plásticos, S. A. 10

2.2 - Simoldes Plásticos - Engenharia de Processo 10

2.3 - Mercado e Produtos 11

3 – Optimização das condições de processamento 12

3.1 – Estudo proposto 12

3.2 – Situação actual 13

3.2.1 – Molde para o pilar 13

3.2.2 – Sistema de alimentação 15

3.2.3 – Sistema de refrigeração 17

3.2.4 – Matéria-prima utilizado no Pilar A 19

3.3 – Análise teórica 20

3.3.1 - Parâmetros de Injecção 20

3.3.2 - Sistema de Refrigeração 24

3.3.3 – Resultados obtidos 38

3.4 - Optimização dos parâmetros – análise numérica 40

3.4.1 – Apresentação do software 40

3.4.2 – Preparação do modelo para análise 40

3.4.2.1 – Importar modelo e gerar malha 41

3.4.2.2 – Reparar a malha 41

3.4.2.3 – Definir o tipo de simulação pretendida 42

3.4.2.4 – Definir o material a utilizar 42

3.4.2.5 – Criar o sistema de alimentação 42

3.4.2.6 – Criar o sistema de refrigeração 44

3.4.2.7 - Definir as condições de processamento 47

3.4.3 - Apresentação dos resultados 49

3.4.3.1 – Tempo de enchimento 49

3.4.3.2 – Pressão de injecção na comutação 50

3.4.3.3 – Temperatura na frente de fluxo 51

3.4.3.4 – Temperatura média do fundido no fim do enchimento 52

3.4.3.5 – Força de fecho 53

3.4.3.6 – Centroíde da força de fecho 54

3.4.3.7 – Tensões de corte na parede 55

3.4.3.8 – Taxa de corte no fundido ao longo do enchimento 56

3.4.3.9 – Pontos de retenção de ar 57

3.4.3.10 – Linhas de união 58

3.4.3.11 – Pressão ao longo do ciclo de injecção 59

3.4.3.12 – Contracção volumétrica ao longo do ciclo de injecção 60

3.4.3.13 – Peso das cavidades em percentagem 63

3.4.3.14 – Orientação do material no núcleo e a casca 64

3.4.3.15 – Caudal 65

3.4.3.16 – Temperatura máxima na peça ao longo da espessura 66

3.4.3.17 – Tempo de arrefecimento 67

3.4.3.18 – Temperatura da água no sistema de refrigeração 68

3.4.3.19 – Caudal no sistema de refrigeração e número de Reynolds 69

3.4.3.20 – Temperatura na interface água-aço 70

3.4.3.21 – Deflexão 71

3.5 – Comparação de resultados 75

3.5.1 – Para o sistema de alimentação 75

3.5.2 – Para o sistema de refrigeração 76

3.5.3 – Condições de processamento 76

4 - Ensaio ao Molde 77

4.1 – Condições de Processamento 77

4.2 – Defeitos apresentados nas peças 78

5 - Discussão dos resultados 82

5.1 – Comparação entre as condições de processamento calculadas, usadas em Moldflow e as usadas em ensaio 82

6 – Conclusão 84

7 - Bibliografia 86

Anexos 87

Anexo A - Tutorial de preparação do modelo para simulação 88

1– Importar o modelo 88

2 – Gerar a malha 89

3 – Estatística da malha 90

4 – Reparação da malha 91

5 – Definir o tipo de simulação pretendida 98

6 – Seleccionar o material 99

7 – Criar o sistema de alimentação 100

8 – Criar o sistema de refrigeração 104

9 – Definir as condições de processamento 107

Anexo B – Resultados de Excel 109

Anexo C – Parâmetros de ensaio do molde 119

Anexo D – Ficha técnica do material 120

Anexo E – Folha técnica do distribuidor 122

Anexo F - Galeria de fotos 123

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Condições de processamento recomendadas pelo fabricante 19

Tabela 2 - Alguns dados importantes 20

Tabela 3 - Factor β 27

Tabela 4 - Coeficientes de transferência de calor 28

Tabela 5 - Fluído de arrefecimento mais comuns 34

Tabela 6 - Diâmetro das linhas de água 36

Tabela 7 - Resultados teóricos 38

Tabela 8 - Dimensão dos canais de alimentação 43

Tabela 9 - Características do sistema de refrigeração 44

Tabela 10 - Características do fluído arrefecedor 45

Tabela 11 - Condições de processamento 48

Tabela 12 - Condições de processamento para melhorar a contração 61

Tabela 13 - Dimensões dos canais de alimentação calculados teoricamente 75

Tabela 14 - Dimensões dos canais de alimentação usados no Moldflow 75

Tabela 15 - Dimensões dos canais de refrigeração calculados teóricamente 76

Tabela 16 - Dimensões dos canais de refrigeração usadas no Moldflow 76

Tabela 17 - Condições de processamento 76

Tabela 18 - Condições de processamento usadas no ensaio 77

Tabela 19 - Condições de processamento usadas no Moldflow 82

Tabela 20 - Condições de processamento usadas no ensaio 82

Tabela 21 - Propriedades dos canais de alimentação 103

Índice de Figuras

Figura 1 - Fases do processo de moldação por injecção....4

Figura 2 - Esquema de uma máquina de injectar....6

Figura 3 - Organigrama do grupo Simoldes (Fonte: Simoldes Plásticos)....9

Figura 4 - Organigrama do Departamento de Engenharia do Processo da Simoldes (Fonte Simoldes Plásticos)....10

Figura 5 - Exemplo de peças produzidas na Simoldes Plásticos (Fonte Simoldes Plásticos)..11

Figura 6 - Localização do pilar A na Caddy....12

Figura 7 - Preliminar do molde....14

Figura 9 - Localização final do ponto de injecção....17

Figura 8 - Localização ideal do ponto de injecção....17

Figura 10 - Gráfico da viscosidade em função da taxa de corte....22

Figura 11 - Peça dividida em secções....23

Figura 12 - Balanço térmico num molde de injecção....26

Figura 13 - Transferência de calor por convecção numa placa....28

Figura 14 - Temperatura na parede da cavidade do molde em função do tempo....33

Figura 15 - Perfil do fluxo de calor....35

Figura 16 - Modelo importado....41

Figura 17 - Estatística da malha antes e após correcção....42

Figura 18 - Sistema de alimentação com a malha gerada....43

Figura 19 - Linhas de água com malha....45

Figura 20 - Modelo final apto para análise....46

Figura 21 - Pressão de injecção em função do tempo de enchimento....47

Figura 22 - Tempo de enchimento da moldação....49

Figura 23 - Pressão na comutação....50

Figura 24 - Variação da temperatura na frente de fluxo....51

Figura 25 - Temperatura do fundido ao longo do enchimento 52

Figura 26 - Força de fecho 53

Figura 27 - Centroíde da força de fecho 54

Figura 28 - Tensões de corte na parede 55

Figura 29 - Taxa de corte no fundido ao longo do enchimento 56

Figura 30 - Pontos de retenção de ar 57

Figura 31 - Linhas de união 58

Figura 32 – Pressão de injecção ao longo do ciclo de injecção 59

Figura 33 - Contracção volumétrica ao longo do ciclo de injecção 60

Figura 34 - Contracção volumétrica ao longo do ciclo de injecção com as novas condições de processamento 61

Figura 35 - Pressão de injecção com as novas condições de processamento 62

Figura 36 - Peso das cavidades em percentagem 63

Figura 37 - Orientação do material no núcleo e na casca 64

Figura 38 – Caudal 65

Figura 39 - Temperatura máxima na peça ao longo da espessura 66

Figura 40 - Tempo de arrefecimento 67

Figura 41 - Temperatura da água no sistema de refrigeração 68

Figura 42 - Caudal no sistema de refrigeração e número de Reynolds 69

Figura 43 - Temperatura na interface água-aço 70

Figura 44 - Deflexão total na peça 71

Figura 45 - Deflexão causada pelo efeito canto 71

Figura 46 - Deflexão causada pelo arrefecimento 72

Figura 47 - Deflexão causada pela contracção 72

Figura 48 - Deflexão causada pela orientação 73

Figura 49 – Tolerância do movimento 78

Figura 50 - Defeito de empeno 79

Figura 51 - Defeito chupado 80

Figura 52 - Defeito moldação incompleta 81

Figura 53 - Modelo importado do CAD 89

Figura 54 - Dimensões de cada elemento da malha 90

Figura 55 - Modelo com a malha gerada 90

Figura 56 - Estatística da malha 91

Figura 57 - Exemplo de um free edge 92

Figura 58 - Exemplos de free edges na malha 93

Figura 59 - Exemplo de free edge, manifold e non manifold edge 93

Figura 60 - Exemplo de intersecção de elementos de malha 94

Figura 61 - Exemplo de elementos sobrepostos na malha 94

Figura 62 - *Aspect ratio* 95

Figura 63 - Elementos com elevado *aspect ratio* do nosso modelo 96

Figura 64 - Pormenor dos elementos com o *aspect ratio* a corrigir 97

Figura 65 - Estatística da malha antes e após correcção da malha 98

Figura 66 - Tipo de simulação pretendida 98

Figura 67 - Propriedades do material 99

Figura 68 - Sistema de alimentação 100

Figura 69 - Propriedades do jito 101

Figura 70- Propriedades do ataque do canal quente 101

Figura 71 - Propriedades da ponteira do canal quente 101

Figura 72 - Propriedades do canal frio primário 102

Figura 73 - Propriedades do canal frio secundário 102

Figura 74 - Propriedades do ataque do canal frio 102

Figura 75 - Linhas de água do macho e da cavidade 104

Figura 76 - Propriedades das baffles 105

Figura 77 - Propriedades dos canais de refrigeração 105

Figura 78 - Canais de refrigeração com as devidas propriedades 105

Figura 79 - Linhas de água 106

Figura 80 - Propriedades do fluido arrefecedor 106

Figura 81 - Modelo pronto para análise 107

Figura 82 - Condições de processamento usadas na simulação 108

Nomenclatura

P_{inj}	pressão de injecção	Pa
$\Delta p_{percurso\ crítico}$	queda de pressão do percurso crítico	Pa
$\Delta p_{sistema\ de\ enchimento}$	queda de pressão do sistema de enchimento	Pa
Q_{inj}	caudal de injecção	cm^3/s
Pm	pressão média	bar
Tinj	tempo de injecção	seg
Vinjt	volume de injecção teórico	cm^3
V_{inj}	volume de injecção	cm^3
Ap	área projectada	cm^2
F_{fecho}	força de fecho	ton
Q_A	calor trocado com o ambiente	W
Q_{cd}	calor trocado por condução	W
A_{fix}	área de contacto com o molde, sistema de fixação	m^2
β	factor de proporcionalidade	
T_{amb}	temperatura ambiente	^0C
T_{mold}	temperatura do molde	^0C
Q_{cv}	calor transferido por convecção	W
A_{lat}	área exposta do molde	m^2
h	coeficiente de transferência de calor por convecção	W/m^2K
Q_r	calor trocado por radiação	W
σ	constante de Stefan-Boltzmann	W/m^2K^4
ε	factor de emissão do aço	
θ_{amb}	temperatura absoluta ambiente	K
θ_{mold}	temperatura absoluta do molde	K
Q_F	calor transportado pelo fundido	W
m	massa	kg
h_{inj}	entalpia específica do plástico à temperatura de injecção	J/Kg
h_{ext}	entalpia específica do plástico à temperatura de extracção	J/Kg
t_c	tempo de arrefecimento	s
Q_{MA}	calor trasferido pelo meio arrefecedor	W
$\Delta T1$	variação da temperatura do fluído	^0C
$\dot{m}$	caudal mássico	Kg/s
$\dot{v}$	caudal volumétrico	l/min

d	diâmetro do canal	mm
L	comprimento mínimo dos canais de arrefecimento	mm
a	profundidade dos canais	mm
e	espessura entre a cavidade e os canais	mm
b	passo dos canais	mm
R_e	números de Reynolds	
Bi	número de Biot	
j	erro	
C	calor específico do fluido	KJ/Kg C
$\Delta T2$	diferença de temperatura entre a cavidade e o líquido arrefecedor.	^{0}C
$\rho_{água}$	densidade volumétrica da água	Kg/m^3
λ_{TM}	condutividade térmica do material do molde	W/mºC
α_{TM}	coeficiente de transferência de calor da água	W/m^{2o}C

Estrutura do relatório

No capítulo 1 faz-se uma breve introdução ao trabalho a efectuar e referem-se os objectivos. Descreve ainda o processo de fabrico utilizado na produção da peça em estudo.

O capítulo 2 apresenta a empresa onde será efectuado este estágio: história do grupo Simoldes, departamento de engenharia do processo (equipa onde será integrado o estagiário), clientes e produtos desta empresa.

No capítulo 3 apresenta-se o estudo de optimização proposto e é feita a descrição do estado actual. São realizados dois estudos, numa primeira abordagem é feito o estudo teórico (baseado em formulações empíricas) sendo depois feito a análise numérica utilizando o software Moldflow.

Faz-se ainda a comparação entre o dimensionamento teórico e os valores usados na simulação numérica.

O capítulo 4 descreve o ensaio experimental realizado ao molde. São apresentadas as condições de processamento utilizadas e os defeitos apresentados pelas peças.

O capítulo 5 apresenta a discussão de resultados obtidos. Faz-se uma análise comparativa entre a análise teórica, numérica e o real.

O capítulo 6 apresenta a conclusão a que se chegou com a realização deste projecto.

O capítulo 7 apresenta a bibliografia utilizada.

Em anexo existem 6 anexos:

O anexo A é um tutorial que explica de forma pormenorizada as etapas a que se submeteu o modelo até este estar apto para análise.

O anexo B apresenta os resultados teóricos em Excel.

O anexo C apresenta os parâmetros de ensaio do molde.

O anexo D apresenta a ficha técnica do material.

O anexo E apresenta a ficha técnica do distribuidor.

O anexo F contém as fotografias tiradas as peças no primeiro ensaio.

1 - Introdução

Este relatório é o resultado do projecto final do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica na especialização em Produção, Desenvolvimento de Produto e Engenharia de Automóvel da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

O projecto decorreu na empresa Simoldes Plásticos e abordou a Optimização dos parâmetros de injecção através da simulação numérica do processo. Esta empresa produz peças por injecção principalmente para a indústria automóvel.

A injecção é um dos processos mais usado para produzir componentes em plástico, uma vez que possibilita a obtenção de geometrias complexas que requerem dimensões exactas.

A qualidade das peças injectadas está sobretudo relacionada com os materiais poliméricos, com a concepção do molde e com os parâmetros de injecção. O material polimérico e o *design* do molde são muitas vezes dados específicos e não podem ser alterados, os parâmetros de injecção representam o factor mais importante, pois são eles que determinam a boa qualidade das peças injectadas.

Devido á dependência entre a qualidade das peças e os parâmetros de injecção, é importante ajustá-los com o objectivo de eficientemente obter peças sãs. A configuração destes parâmetros é um desafio uma vez que os parâmetros de injecção interagem uns com os outros e um defeito pode estar relacionado com vários parâmetros em simultâneo. Assim a simulação numérica revela-se uma importante ferramenta na optimização do processo de modo a rapidamente responder a solicitações da produção.

1.1 – Objectivos

Este trabalho tem como objectivo a optimização das condições de processamento para injecção de um componente, da Volkswagen. Numa primeira fase foi feita uma abordagem teórica, baseada em formulações empíricas sendo depois realizada a simulação do processo utilizando o MPI, Moldflow Plastics Insight 6.1.

Com a utilização deste software estudou-se o comportamento do material ao longo do ciclo de injecção. Foi efectuado o estudo de enchimento, compactação, arrefecimento e

empeno, conseguindo-se assim prever o comportamento do material e possíveis defeitos nas peças. Este software permite analisar se a peça enche ou não, visualizar possíveis defeitos, entre eles, chupados, linhas de união, pontos de retenção de ar e empeno, bem como diferenças de temperatura na peça, desempenho do sistema de arrefecimento, entre outros.

No processo de injecção, a alteração dos parâmetros do processo são dependentes, pelo que a modificação de um, afectará os restantes. Assim, este software permite simular diferentes configurações dos parâmetros até se atingir as condições "ideais" de processamento a serem implementadas na máquina de injecção

Uma vez que o projecto do molde está numa fase preliminar, o estudo efectuado irá apoiar a equipa de projecto e desenvolvimento. Este estudo foi pedido para a obtenção dos parâmetros ideais, tais como localização e número de pontos de injecção (sem entrar em conflito com os movimentos que possam existir em certos locais da peça), linhas de água e força de fecho. Todo este estudo será feito com o intuito de obter peças que cumpram os requisitos do cliente.

Para além do estudo em Moldflow acompanhou-se também a equipa de projecto a fim de relacionar e perceber a diferença dos resultados obtidos no software e os obtidos na realidade.

1.2- O processo de moldação por injecção

A moldação por injecção é um dos principais processos de transformação de polímeros, sendo um dos que se reveste de maior importância económica. O seu sucesso deve-se, sobretudo, à diversidade e complexidade das formas que se podem moldar, à possibilidade de obter excelentes acabamentos superficiais, à facilidade de automatização do processo e garantia de produção de peças com apertadas tolerâncias dimensionais.

A primeira tentativa de moldar por injecção um material plástico data da segunda metade do século passado quando, em 1872 nos Estados Unidos, foi patenteada a primeira máquina, especificamente para o uso com nitrato de celulose. No entanto, a evolução da moldação por injecção foi muito lenta até aos anos 30, tendo por altura da 2.ª Grande Guerra sofrido uma grande expansão, devido ao aparecimento de uma gama bastante extensa de termoplásticos a preços competitivos. A partir da década de 50, com o desenvolvimento de uma nova geração

de equipamento (máquinas de parafuso alternativo), a moldação por injecção afirmou-se rapidamente como um dos mais importantes processos de transformação de plásticos.

O processo é desenvolvido de acordo com a sequência cíclica de fases representadas na figura 1.

Os equipamentos básicos para a moldação por injecção são a máquina de injecção e o molde. A obtenção de peças de boa qualidade e ciclos de produção eficientes envolve o uso de equipamentos auxiliares, tais como: controladores de temperatura do molde, sistemas de secagem e transporte da matéria-prima e sistemas para manuseamento e transporte das moldações *(robots,* tapetes rolantes, etc.)

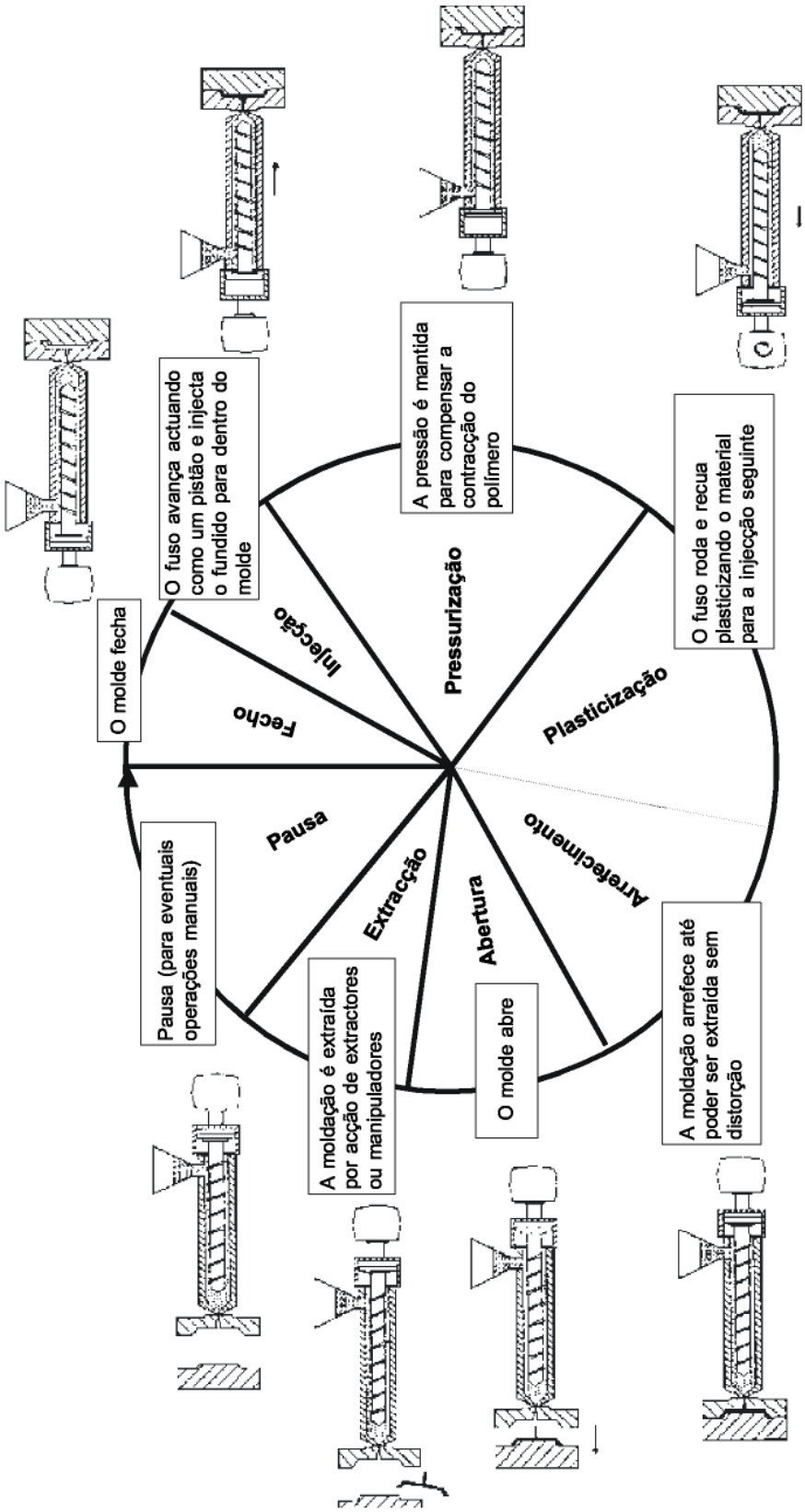


Figura 1 - Fases do processo de moldação por injecção

Durante o processamento, o polímero no estado sólido (usualmente na forma granular) é carregado numa máquina onde, é sucessivamente, aquecido até fundir[1] e injectado, sob pressão, para dentro de um molde fechado. No molde, o material fundido preenche a respectiva impressão e arrefece até retomar a rigidez que lhe permita ser removido mantendo a forma do objecto. O processo conclui-se com a ejecção da moldação.

A obtenção de peças injectadas de boa qualidade pode ser difícil devido ao número de parâmetros e variáveis envolvidas no processo. Interpretar correctamente o seu efeito nas propriedades é uma tarefa complexa. Para se ter uma ideia do tipo de parâmetros e variáveis envolvidos, indicam-se a seguir, os mais importantes:

a) Variáveis operatórias:

- velocidade de injecção;
- pressão de injecção;
- pressão de manutenção;
- perfil de temperaturas no cilindro;
- temperatura do molde;
- contra-pressão;
- velocidade de rotação do fuso;
- velocidade de movimentação do sistema de fecho.

b) Parâmetros de processamento:

- geometria do bico de injecção;
- espessura da peça;
- comprimento de fluxo;
- localização e geometria do ataque;
- distribuição de temperaturas na superfície moldante.

[1] Na prática utiliza-se o termo fundido para designar uma massa de material liquefeita (embora com viscosidade elevada).

c) Propriedades do material

- peso molecular;
- viscosidade
- estrutura e configuração macromolecular;
- sensibilidade térmica;
- higrospicidade;
- aditivação;
- propriedades térmicas.

1.3 – O Equipamento Básico

Como já foi referido na secção anterior, o processo de moldação de injecção envolve, necessariamente, uma injectora e um molde.

A constituição típica de uma máquina de moldação por injecção é baseada em quatro unidades, como mostra a figura 2.

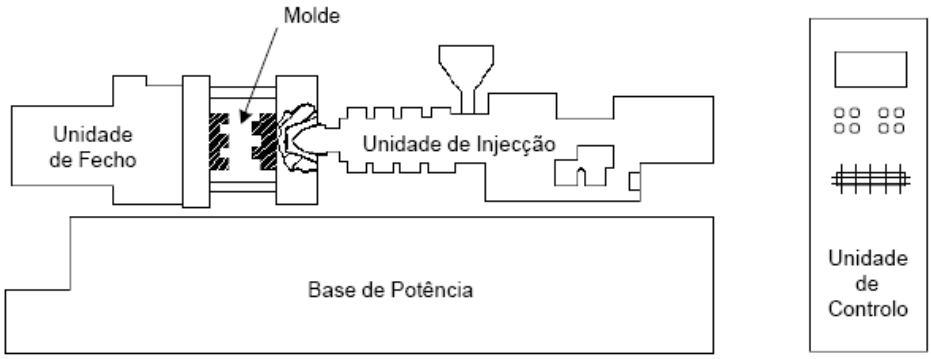


Figura 2 - Esquema de uma máquina de injectar

Seguidamente faz-se uma breve descrição da função de cada uma das unidades:

Unidade de Plasticização (Injecção) – promove o aquecimento, plasticização e homogeneização do polímero, em simultâneo com o seu transporte da tremonha até ao bico de injecção; garante também a subsequente injecção e pressurização do fundido.

Unidade de Fecho – assegura que o molde se mantenha fechado durante as fases de injecção e de pressurização, e movimenta a metade móvel do molde durante o ciclo. Esta unidade inclui, também, dispositivos necessários à extracção das moldações.

Unidade de Potência – geralmente é um sistema óleo-hidráulico (ou electromecânico), accionado por um conjunto motor eléctrico/bomba, que fornece a pressão necessária aos diversos movimentos do sistema.

Unidade de Controlo – as operações e os dispositivos necessários a assegurar a monitorização e controlo das diversas variáveis do processo estão centralizadas nesta unidade, que também permite a interface com o operador e as comunicações com periféricos ou sistemas de gestão de informação.

1.4 - O molde para a injecção de plásticos

Os moldes de injecção são ferramentas que permitem a moldação das peças numa máquina de injecção. Podem variar em tamanho, tipo (moldes de canais frios e de canais quentes) ou grau de complexidade (extracção simples ou com movimentos). Na sua forma mais simplificada, são constituídos por duas metades que se ajustam, definindo uma ou várias impressões com a configuração da(s) peça(s) que se pretende(m) obter.

A sua finalidade principal é dar a forma desejada ao material a moldar. Contudo, existem outras tarefas acometidas a este componente, nomeadamente: a alimentação desde o bico de injecção até à impressão permitindo o seu enchimento, a ventilação da impressão, o manter a impressão fechada durante o tempo necessário, o garantir a reprodutibilidade dimensional de ciclo para ciclo, o arrefecimento da moldação e a sua extracção. A qualidade superficial do molde é determinante no acabamento superficial da peça moldada.

O grau de sofisticação do projecto e do tipo do molde depende, basicamente, de aspectos económicos e tecnológicos. De entre os principais, saliente-se o número de peças a produzir, o tipo de material plástico que se pretende injectar, as especificações estipuladas para as mesmas (aspectos funcionais e estéticos da peça), capacidade da máquina em que ele vai trabalhar e o uso de equipamentos periféricos.

De uma maneira geral, o projecto mecânico do molde é encarado com grande cuidado, desde o desenho rigoroso dos seus componentes à selecção dos materiais e à definição de tolerâncias e ajustes. Apesar de todo o cuidado que se possa ter na concepção de um molde,

não se evita que, depois de montado o molde para ensaios, este tenha que regressar algumas vezes à fábrica para correcções mais ou menos complicadas.

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

2 – A empresa

O grupo Simoldes é um grupo do tipo familiar constituído por várias empresas e gabinetes técnicos-comerciais que actuam na área dos moldes e na injecção de plásticos.

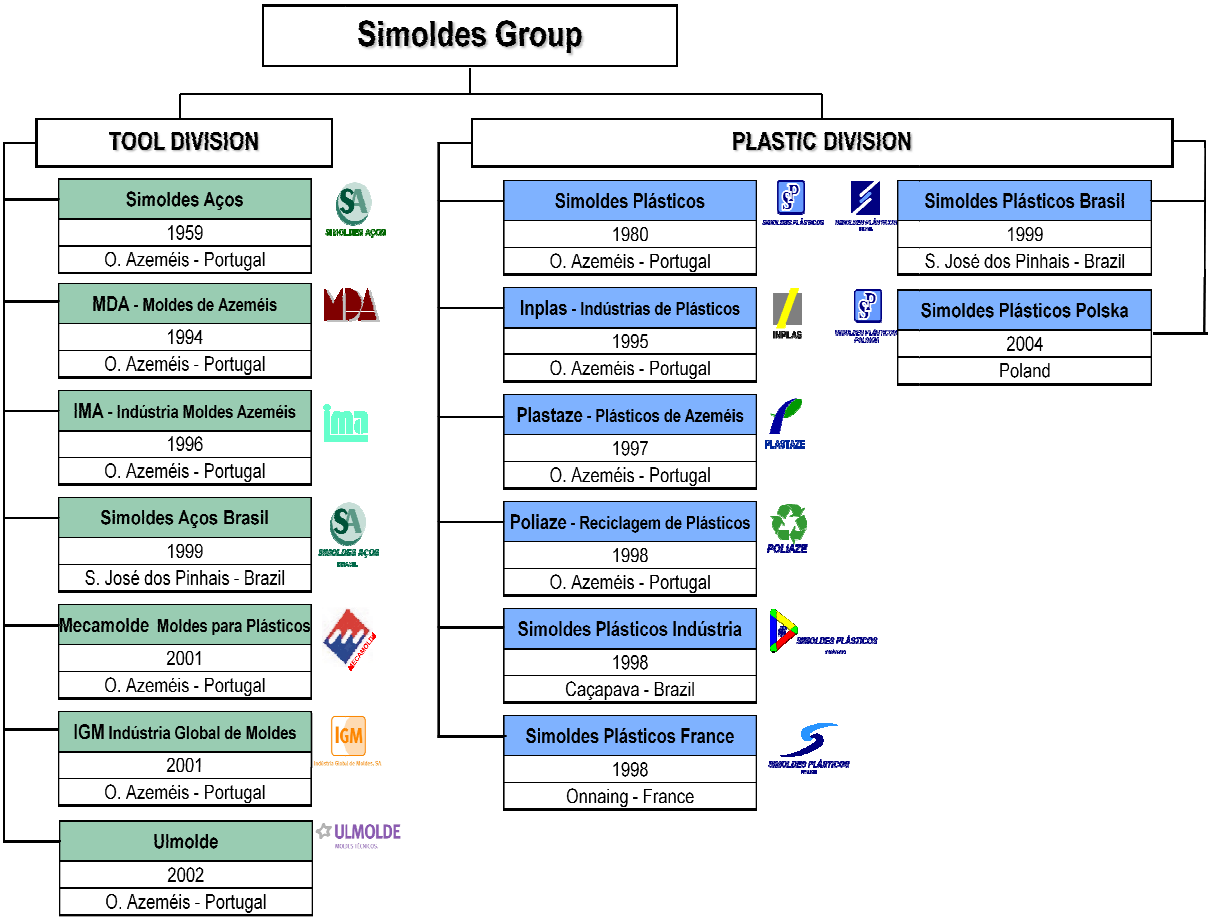


Figura 3 - Organigrama do grupo Simoldes (Fonte: Simoldes Plásticos)

2.1 - Localização da Simoldes Plásticos, S. A.

A Simoldes Plásticos, S. A., localiza-se na cidade de Oliveira de Azeméis, Rua Comendador António da Silva Rodrigues. é constituída por duas unidades, a SP Central e a SP Fábrica.

2.2 - Simoldes Plásticos - Engenharia de Processo

O grupo de Engenharia de Processo está dividido em duas partes: o grupo de processo de SP Central e o grupo de SP Fábrica.

Este trabalho decorreu sob a supervisão da Engenheira Cidália Amaro responsável, pelo estudo de Reologia, simulação do comportamento do material plástico, inserido no grupo de engenharia de processo situado na SP Central.

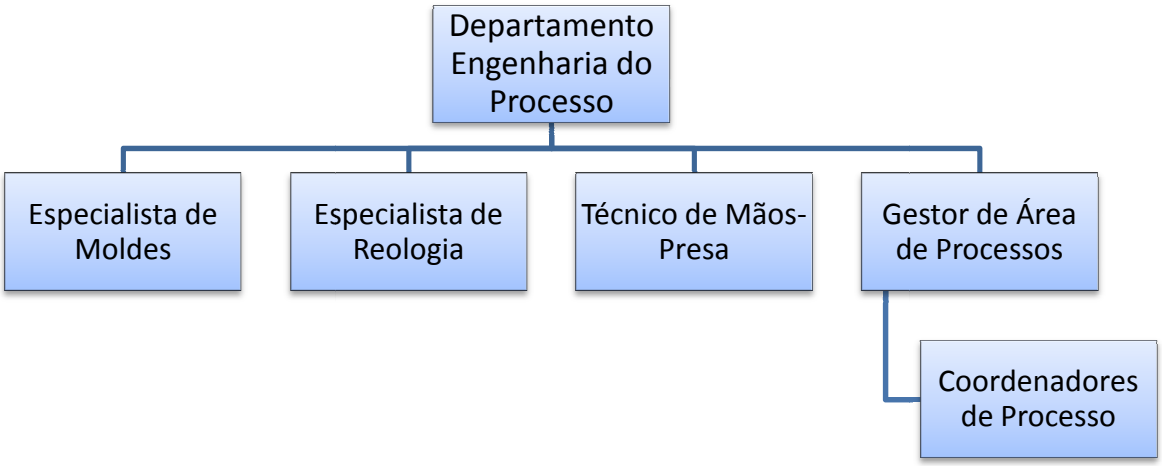


Figura 4 - Organigrama do Departamento de Engenharia do Processo da Simoldes (Fonte Simoldes Plásticos)

2.3 - Mercado e Produtos

As empresas da indústria automóvel - OEMs e seus fornecedores directos – constituem os principais clientes do Grupo Simoldes, sendo destino de 91% e 87% das vendas de moldes e peças plásticas, respectivamente. Para além da indústria automóvel apenas a electrónica e a indústria de electrodomésticos assumem alguma expressão nas vendas do Grupo. No caso das empresas de moldes, é de notar que as empresas de plásticos do grupo são os únicos clientes portugueses, representando cerca de 10% das vendas (incluídas na indústria automóvel).

O peso da indústria automóvel no total das vendas do Grupo reflecte-se na orientação geográfica das vendas, destacando-se, no período de 1996-2000, a França (33% do total), Portugal (21%), Espanha (18%), o Brasil (11%) e a Alemanha (5,7%).

Entre os clientes do Grupo Simoldes incluem-se os principais OEMs a nível mundial como a Renault, a Opel e a General Motors (GM), a Citroen, Audi e Volkswagen (VW), a Mercedes, Mitsubishi e DaimlerChrysler (DC) e, mais recentemente, a Toyota. Nos moldes, a carteira de clientes alarga-se à Volvo, Ford, SAAB e BMW. Em termos de modelos, os Clio, Twingo, Megane, Scénic e Corsa são apenas alguns exemplos.

Os produtos produzidos são os mais variados desde painéis para portas, pilares, pára-choques, front end, entre outros.

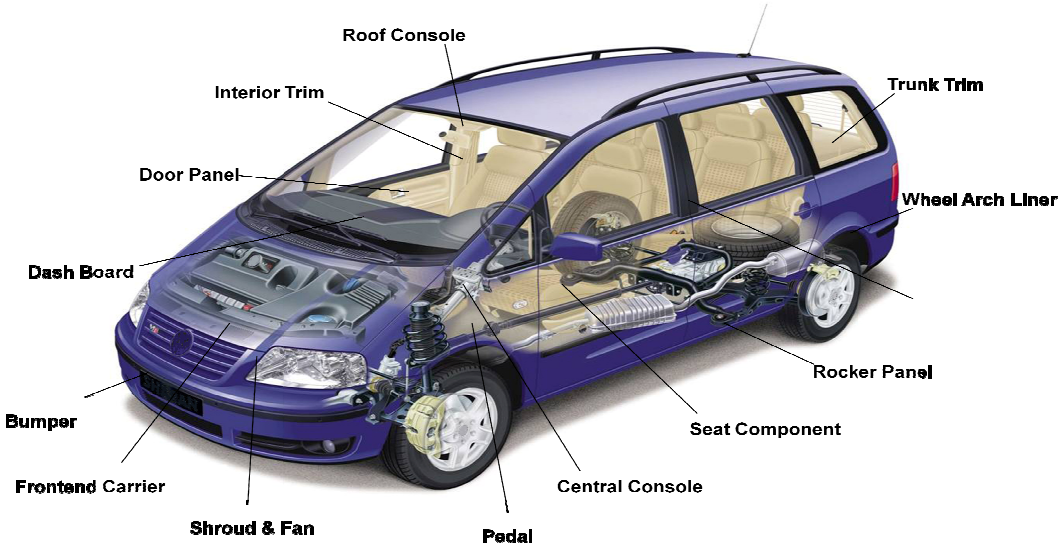


Figura 5 - Exemplo de peças produzidas na Simoldes Plásticos (Fonte Simoldes Plásticos)

3 – Optimização das condições de processamento

3.1 – Estudo proposto

O estudo proposto foi para uma peça que faz parte do modelo da Caddy lançado pela Volkswagen. Na indústria esta peça é designada por Pilar A e está localizada no interior do carro como se pode visualizar na figura 6.

A Simoldes é responsável pelo projecto, fabrico do molde e entrega de peças na linha de montagem. Ao grupo Simoldes cabe perante o cliente, a tarefa de analisar e realizar estudos sobre o e enchimento compactação, arrefecimento, empeno, projecto e ensaios do molde enquanto a empresa IGM fica responsável pelo fabrico do molde.

Entre as várias etapas de projecto para esta peça, a nossa função é fazer o estudo de enchimento, compactação, arrefecimento e empeno a fim de cooperar com a equipa de projecto e desenvolvimento do molde a encontrar as condições ideais de processamento para esta peça.

Para tal, foi utilizado o Moldflow Plastics Insight 6.1, um software de simulação numérica que permite o estudo e ajuste das condições de processamento, bem como ter uma previsão de possíveis defeitos nas peças.

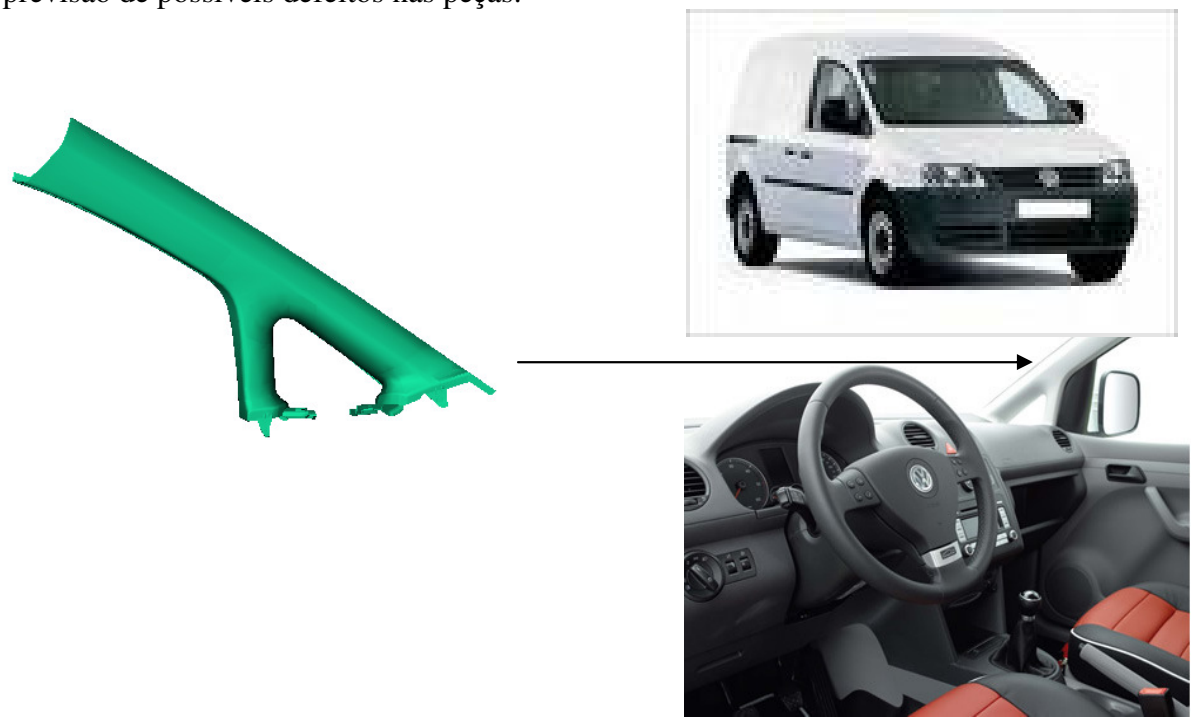


Figura 6 - Localização do pilar A na Caddy

3.2 – Situação actual

Este capítulo tem como objectivo fazer uma abordagem ao nível do molde, sistema de alimentação, sistema de refrigeração e matéria-prima utilizada na peça em estudo.

3.2.1 – Molde para o pilar

O molde utilizado para o fabrico desta peça foi fabricado pela IGM em cooperação com a equipa de projecto e processo da Simoldes Plásticos. Trata-se de um molde de duas cavidades, produzindo em cada ciclo de injecção duas peças, ou seja, o pilar A esquerdo e o direito da Caddy.

Este molde possui um distribuidor entre a chapa de aperto da injecção e a chapa das cavidades, ou seja, trata-se de um molde de canais quentes com distribuidor quente. Estes moldes garantem que o sistema de alimentação é mantido, aproximadamente, à temperatura do material do cilindro.

Nos moldes de distribuidor quente as resistências são montadas no exterior dos canais, que neste caso são circulares. Com as resistências o distribuidor fica quente, por isso deve ser isolado do resto do molde, de forma a minimizar as perdas de calor.

No entanto, este molde apresenta a particularidade de possuir também canais frios. Com esta solução construtiva pretende-se garantir uma elevada temperatura à entrada da peça para assim se atingirem maiores comprimentos de fluxo e garantir o enchimento da peça.

Os moldes de canais quentes, têm um custo de projecto e de fabrico superior devido à sua complexidade e ao maior custo dos componentes, permitem a obtenção de peças sem extracção do sistema de alimentação. Tem uma vantagem relativamente ao outro tipo de canais, nomeadamente aos canais frios, porque permite redução do desperdício de jitos e canais frios.

Este tipo de construção permite reduzir o tempo de ciclo devido a menor tempo de abertura e fecho, menor tempo de injecção, aumento da capacidade de injecção e possibilidade de programar a injecção.

Apesar das evidentes vantagens deste tipo de moldes, estes não são a solução para todos os problemas, já que também apresentam inconvenientes tais como um maior

investimento, maior complexidade do molde e do seu projecto e maior possibilidade de avarias.

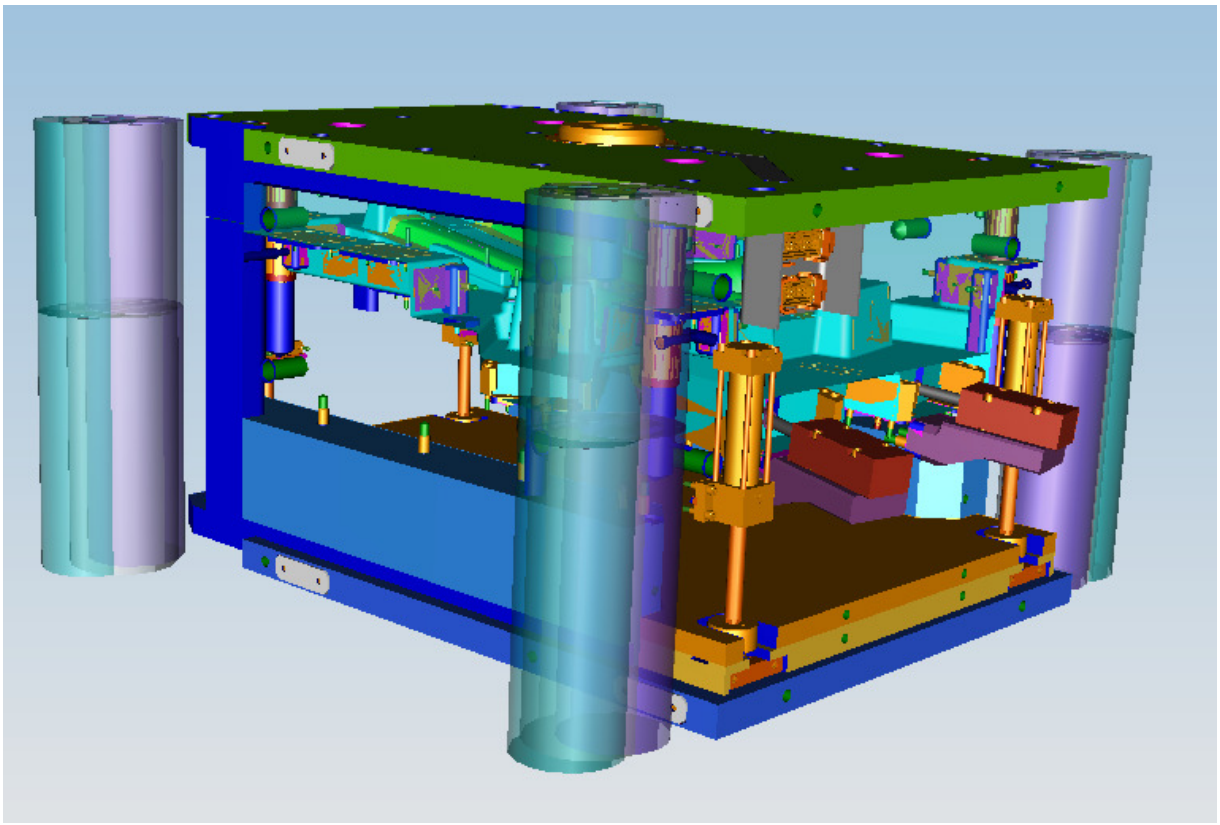


Figura 7 - Preliminar do molde

3.2.2 – Sistema de alimentação

O sistema de alimentação é o sistema que permite a passagem do polímero fundido desde o cilindro da máquina de injecção até às zonas moldantes, permitindo o seu enchimento. O fundido entra no molde pelo jito que pode comunicar directamente com a zona moldante (injecção directa) ou ramificar-se num sistema de alimentadores fazendo a ligação do jito as zonas moldantes. A entrada do polímero fundido nas zonas moldantes é feita através de ataques.

O sistema de alimentação de moldes, baseado na implementação de canais controlados termicamente para o processamento de termoplásticos, é designado por sistema de canais quentes. A sua função é manter o material no estado fundido desde o bico da máquina de injecção até à zona moldante, evitando a solidificação prematura no sistema de alimentação. No caso de materiais termoendureciveis, a moldação de peças não é obtida através do arrefecimento do material na cavidade, mas sim através de um processo de cura do material do molde a uma temperatura superior á de injecção. Neste processo, a temperatura dos canais do sistema de alimentação é inferior ao nível térmico do respectivo molde. O sistema de alimentação é, assim, designado por sistema de canais frios.

O sistema de alimentação para o molde para se injectar esta peça é constituído por canais quentes e canais frios. Serão abordados os canais frios, que permitem a passagem do fundido desde o ataque do distribuidor até as impressões, isto é permitir o enchimento da peça.

Os canais de alimentação são dispostos tendo em consideração, o número, a geometria das impressões e a posição do ataque. Desta forma devem ter, sempre que possível, um menor comprimento, garantindo uma alimentação balanceada que permite o enchimento simultâneo de todas as gravuras. Este equilíbrio, consegue-se conjugando a variação das dimensões e diâmetros do sistema de alimentação, procurando assim garantir que a variação da queda de pressão desde a entrada até ao fim do enchimento das peças seja a mesma.

As secções dos canais de alimentação maquinados no molde para a peça em questão, são trapezoidal modificado, que são considerados a melhor aproximação aos canais circulares, tendo a vantagem de ser maquinados em apenas num dos lados do molde, tendo deste modo a melhor relação preço/benefício.

A entrada do fundido nas impressões é feita através dos ataques, que neste caso, se trata de ataque em *bayer* (*bayer* modificada com secção em lâmina para permitir um maior caudal de alimentação).

Este tipo de ataque é utilizado em peças planas e a alimentação é feita através de uma fenda ao longo do bordo da peça.

Tem inconvenientes de ser mais difícil de partir e deixa uma marca visível no bordo da peça, devendo ser sempre colocada numa zona não visível.

De uma forma geral, o ataque é a ponte entre os alimentadores e tem com principais funções:

- sujeitar o fundido a taxas de corte suficientemente elevadas para que o aquecimento resultante da dissipação viscosa mantenha essa passagem aberta. No entanto o aumento excessivo da temperatura poderá provocar degradação do material;
- facilitar o controlo do enchimento, principalmente em moldes de várias impressões;
- permitir a separação fácil da peça e do sistema de alimentação, eventualmente automática, não deixando uma marca muito acentuada;
- a posição dos ataques deve ser de tal forma que permita controlar/minimizar/evitar alguns defeitos de enchimento tais como:
    - evitar o efeito jacto, não permitindo que o fundido entre à vontade na impressão mas, pelo contrário, que encontre uma parede o mais rapidamente possível;
    - o aparecimento de linhas de soldadura.

O sistema de alimentação é concebido de forma a permitir uma boa injecção da peça, eliminando possíveis defeitos. Desta forma o ponto de injecção deveria ficar situado em cima do porta agrafos, figura 8, o que não é possível devido à existência aí de um movimento para a formação do mesmo. Assim o ponto de injecção ficou atrás do porta agrafos como mostra a figura 9.

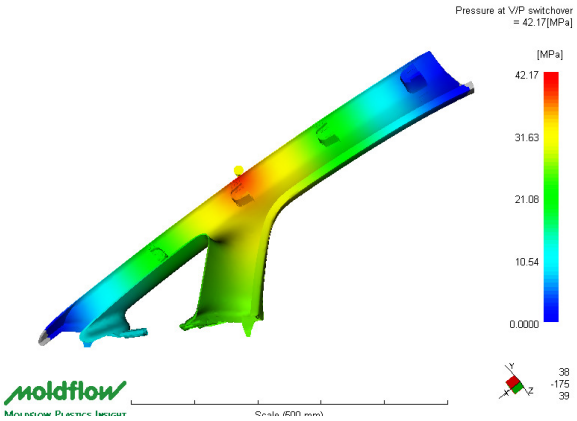


Figura 8 - Localização ideal do ponto de injecção

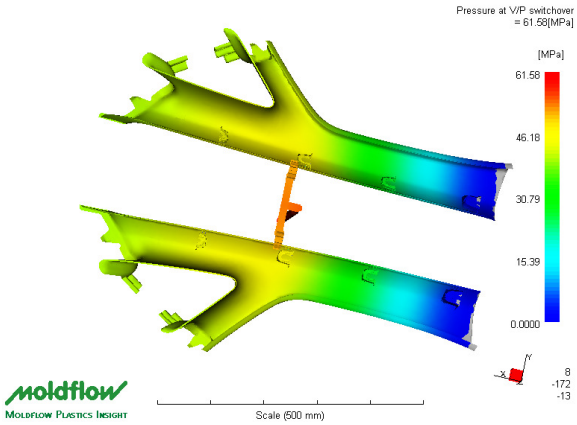


Figura 9 - Localização final do ponto de injecção

3.2.3 – Sistema de refrigeração

Na produção de componentes em materiais termoplásticos moldados por injecção existe um interesse particular em maximizar a cadência de produção das máquinas de injecção, devido ao custo elevado do produto e do equipamento, respectivos moldes e mão-de-obra envolvida. Por outras palavras, procura-se que o tempo necessário para se obter uma peça com qualidade seja tão reduzido quanto possível.

No ciclo de injecção, a fase de arrefecimento (pressurização mais arrefecimento propriamente dito) é aquela que, geralmente, consome mais tempo: cerca de metade, ou mais, do ciclo total. As condições em que a moldação é arrefecida reflectem-se nas propriedades mecânicas e superficiais do produto. Em alguns casos, podem originar tensões residuais suficientemente grandes para causar distorções ou mesmo fissuração das peças obtidas. Assim, se por um lado, convém que o arrefecimento das peças seja feito tão rapidamente quanto possível, por outro, existe a necessidade de garantir a qualidade da moldação.

Além de ser eficiente, o sistema de arrefecimento tem que proporcionar uma extracção uniforme de calor a partir da superfície da cavidade moldante de modo a garantir a qualidade e a homogeneidade morfológica da moldação. Por isso, o modo como se faz o arrefecimento deve ser controlado, não só em termos do gradiente de temperatura (e da consequente velocidade de arrefecimento) como da sua uniformidade ao longo das duas metades da superfície moldante. Isto leva a que, por vezes, sejam implantados no molde sistemas de arrefecimento sofisticados com soluções construtivas complexas.

O arrefecimento da peça é feito por canais de refrigeração independentes. Devido à complexidade das peças tentou fazer-se com que o arrefecimento fosse controlado, não só em termos de gradiente de temperatura como, também, da sua uniformidade na zona moldante de forma a evitar empenos na peça.

Tipicamente, o tempo de arrefecimento representa uma parte bastante significativa da duração do ciclo de injecção. Isto mostra bem a importância do sistema de refrigeração no correcto funcionamento do molde.

O arrefecimento do material injectado é feito por transferência de calor para a superfície moldante. Para proporcionar, acelerar e controlar o arrefecimento através da transferência de calor são maquinados, perto das zonas moldantes, furos para um fluído refrigerante.

Estes furos, também são designados por "linhas de água" devido ao fluído refrigerante utilizado com mais frequência ser a água, constituem o sistema de refrigeração

A arquitectura dos sistema de refrigeração depende principalmente da forma da peça, isto porque, deve acompanhar o melhor possível e das suas dimensões uma vez que o espaço é uma condicionante para a sua implementação devido a certos movimentos existentes em determinados pontos do molde.

Para o arrefecimento da cavidade não há, normalmente grandes problemas, pois todos os movimentos e insertos encontram-se do lado macho. Para dificultar as coisas, são estes elementos que normalmente necessitam de uma maior remoção de calor.

3.2.4 – Matéria-prima utilizado no Pilar A

A matéria-prima utilizada é PP com 20% de talco, ou seja, um copolímero polipropileno. Este cópolimero tem como fabricante a Basell Polyolefins Europe e apresenta-se sob a forma comercial de Hostacom X4323/3 S63 101173.

Este copolímero é um termoplástico semi-cristalino com 20% de talco.

É muito utilizado na indústria automóvel, no entanto este apresenta algumas desvantagens em relação ao seu homopolimero: fragilidade superior, fluência mais elevada, menor ductibilidade e menor resistência ao impacto.

Apresenta também vantagens como: dureza, rigidez e estabilidade dimensional elevada.

Em seguida, descrevem-se algumas das características deste material fornecidas pelo fabricante:

Tabela 1 - Condições de processamento recomendadas pelo fabricante

Temperatura do molde mínima	30°C
Temperatura do molde máxima	50 °C
Temperatura do molde recomendada	40 °C
Temperatura de injecção mínima	230 °C
Temperatura de injecção máxima	260 °C
Temperatura de injecção recomendada	245 °C
Temperatura de extracção recomendada	108 °C
Tensão de corte	0,25 MPa
Velocidade de corte	100000 1/s

Estas condições servirão como base de apoio quando for efectuado o estudo em Moldflow do enchimento da moldação das duas peças. Servirão de referência para se efectuar a simulação do enchimento, compactação, arrefecimento e empeno desta peça.

3.3 – Análise teórica

Neste capítulo faz-se o estudo teórico, recorrendo a formulações empírica do sistema de injecção e sistema de refrigeração. No sistema de injecção calcular-se-á teoricamente o caudal de injecção, tempo de injecção, dimensões do sistema de alimentação e força de fecho. Em relação ao sistema de refrigeração vai-se ficar com uma ideia do calor transportado pelo fundido, das trocas de calor com o meio ambiente, do calor retirado pelo sistema de refrigeração. Com isto é possível saber o caudal necessário para o sistema de refrigeração, através do caudal dimensiona-se as linhas de água.

De seguida são tabelados alguns dados importantes para os cálculos que se irão fazer:

Tabela 2 - Alguns dados importantes

Massa	0,60 Kg
h_{inj}	516216 J/Kg
h_{ext}	166104 J/Kg
ρ	0,8739 g/cm^3
V_{inj}	682,69 cm^3

Todos os restantes dados encontram-se no capítulo 6 tabelados. Os valores apresentados são o resultados obtidos pela ajuda de uma folha de cálculo do Excel.

3.3.1 - Parâmetros de Injecção

Os parâmetros do processo que se pretende obter são: o caudal de injecção, tempo de injecção, dimensionamento do sistema de alimentação, quedas de pressão e força de fecho.

3.3.1.1 - Cálculo do caudal de injecção

Através do volume de injecção é possível calcular o caudal de injecção. O volume da peça dado pelo Moldflow e através da expressão seguinte, calcula-se o Q_{inj}.

$$Q_{inj} = 67 \times \left(\frac{v_{inj}}{100}\right)^{0.73} = 272{,}31 \text{ cm}^3/\text{s}$$

3.3.1.2 – Tempo de injecção

O tempo de injecção é dado por:

$$t_{inj} = \frac{v_{inj}}{\mathrm{Q}_{inj}} = \frac{683{,}69}{272{,}31} = 2{,}51\ s$$

Onde, $\dot{Q}_{inj}$ é o caudal de injecção e v_{inj} é o volume de injecção.

3.3.1.3 - Dimensionamento do sistema de alimentação

O correcto dimensionamento deste sistema de alimentação é essencial na obtenção de peças com boa qualidade.

A maioria dos termoplásticos no estado fundido exibe um comportamento pseudoplástico. A relação entre a velocidade de corte e a tensão de corte não é linear, sendo traduzida por uma diminuição da viscosidade com o aumento do valor da velocidade de corte.

Este tipo de comportamento pode ser descrito por modelos matemáticos mais ou menos complexos. Um dos mais simples designa-se por lei de potência:

$$\eta = K\gamma^{\dot{n}-1}$$

Onde n e k representam os parâmetros reológicos:

n - expoente da lei de potência;

K - índice de viscosidade.

Aplicando logaritmos á expressão anterior obtém-se a seguinte expressão que pode ser aproximada à equação da recta:

$$\underbrace{\log\eta}_{y} = \underbrace{\log K}_{m} + \underbrace{(n-1)}_{b}\underbrace{\log\gamma}_{x}$$

Esta equação corresponde à recta presente na curva da viscosidade, ou seja, à parte reofluidificante do gráfico representando a diminuição linear da viscosidade com o aumento da taxa de corte.

O próximo gráfico que é referente ao X4323/3 S63 101173, material utilizado na obtenção das moldações, permite a obtenção das referidas propriedades.

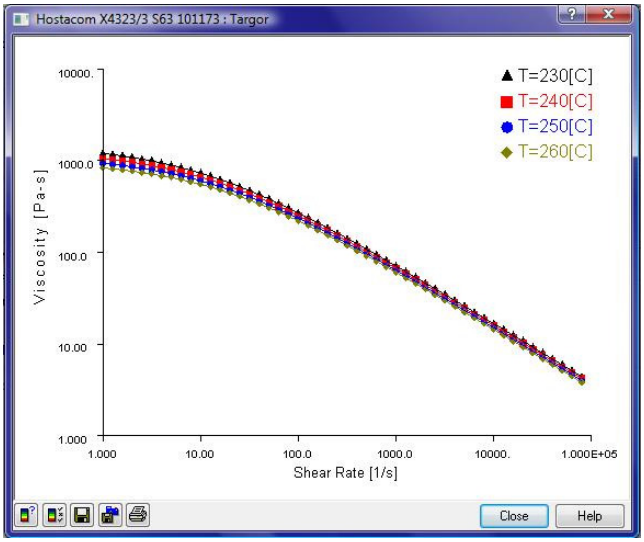


Figura 10 - Gráfico da viscosidade em função da taxa de corte

No anexo B, encontra-se uma tabela com os valores da viscosidade em função da taxa de corte para as diferentes temperaturas. Para cada temperatura os valores da viscosidade variam com a taxa de corte.

Aplicando logaritmos a esses valores traça-se um gráfico para cada temperatura. Através da nuvem de pontos faz-se uma aproximação linear a uma recta.

Através da equação da recta para cada valor de temperatura, tira-se os parâmetros y, m e b. A obtenção dos parâmetros reológicos n e k. O valor de n utilizado para o cálculo dimensional, é uma média ponderada dos valores de n para cada temperatura.

O método de processamento comum de termoplásticos está associados a velocidades de corte entre 100 s^{-1} e 100000 s^{-1}. Normalmente tira-se partido do carácter pseudoplástico destes materiais, através da utilização de velocidades de corte elevadas que garantem viscosidades baixas.

Depois de se conhecer o caudal de injecção e os parâmetros reológicos pode-se dimensionar o sistema de alimentação a partir das equações que se apresentam em seguida. O sistema de alimentação é um sistema misto, constituído por canais quentes e frios, pelo que o dimensionamento efectuado será apenas dos canais frios. Os canais quentes são geralmente escolhidos por catálogo.

Para o dimensionamento de canais frios são utilizadas equações empíricas apresentadas em seguida:

a) Para um canal de alimentação circular (γ=1E3 s^{-1}):

$$\gamma = \frac{3n+1}{4n} \times \frac{4Q_{inj}}{\pi R^3} \Rightarrow 1E3 = \frac{3*0{,}48+1}{4*0{,}48} \times \frac{4*272}{\pi R^3} \Rightarrow R = 6\,mm$$

Em que n é uma característica reológica do material, Q_{inj} o caudal e R o raio do canal.

b) Para um ataque em bayer (γ=1E5 s^{-1}):

$$\gamma = \frac{2n+1}{n} \times \frac{2Q_{inj}}{wH^2} \Rightarrow 1E5 = \frac{2*0{,}48+1}{0{,}48} \times \frac{2*272}{wH^2} \Rightarrow w = 6\,mm$$

Em que w é a largura, H a espessura do ataque dado por $H = 0{,}5\,S^2$ e S a espessura da peça.

3.3.1.4 - Cálculo das quedas de pressão

Antes do cálculo das quedas de pressão é necessário analisar qual o caminho crítico para o enchimento da peça e saber qual o seu ponto de injecção

Foi necessário dividir a peça em secções, durante o percurso crítico, de maneira a saber qual a perda de carga em cada secção. Na figura 11, pode-se visualizar a divisão da peça em secções.

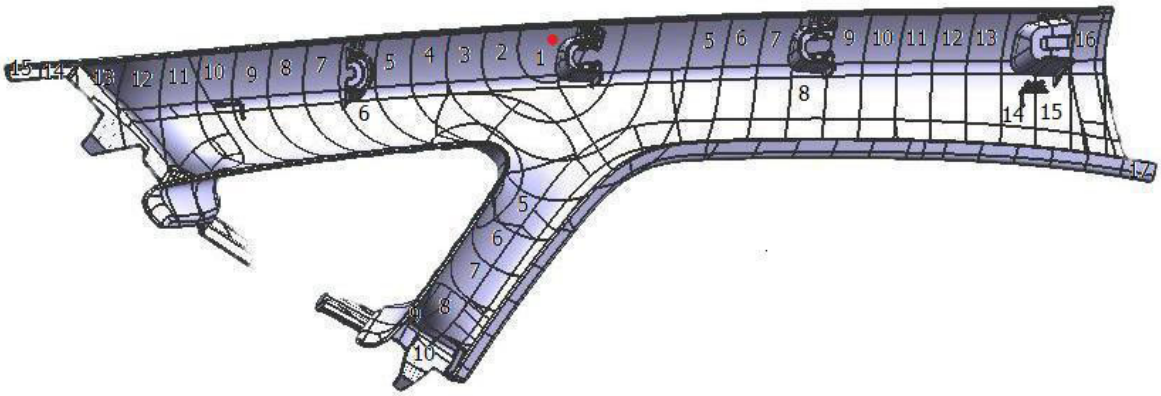


Figura 11 - Peça dividida em secções

Dividiu-se a peça em 17 secções circulares, para uma melhor aproximação do fluxo de material a encher a peça. Com a ajuda do UGS NX 5.0 tirou-se o volume de cada secção, bem como o comprimento da frente de fluxo. Com os valores retirados do UGS NX 5.0 fez-se uma folha de cálculo no Excel para se efectuar todos os cálculos inerentes as quedas de pressão.

O resultado destes cálculos estão em anexo B.

[2] Retirado do Manual do Projectista.

3.3.1.5 - Força de fecho

Para a força de fecho é considerada a soma das quedas de pressão na peça.

$$P_{inj=}\Delta P_{percursocritico} + \Delta P_{sistema\ de\ enchimento}$$

A força de fecho é dada pela expressão:

$$F_{fecho} = \frac{P_{inj}.\mathrm{A}}{x} = 782{,}94\ \mathrm{T}$$

$x = 4$ - factor de correcção

3.3.2 - Sistema de Refrigeração

O processo de arrefecimento de uma moldação depende da sua espessura, da temperatura do fluído arrefecedor e respectivo caudal, do diâmetro e layout dos canais de arrefecimento, das propriedades físicas do polímero e do material do molde. Por isso, a optimização do projecto do sistema de arrefecimento e das suas condições têm uma importância industrial significativa, uma vez que afecta a qualidade da peça.

O princípio fundamental da injecção por moldação, consiste em forçar o material previamente fundido a entrar, sob pressão, num molde, onde é arrefecido até uma temperatura que permita a obtenção da força e rigidez suficiente para que possa ser extraído, mantendo a forma da impressão.

Tipicamente o tempo de arrefecimento é 50% da duração total do ciclo de injecção da peça, sendo mais longo no caso dos materiais semi-cristalinos do que nos amorfos, é fundamental monitorizar o correcto funcionamento do sistema de arrefecimento para que permita ciclos mais rápidos e peças mais baratas.

Assim, a maneira como se faz o arrefecimento deve ser controlada, não só em termos de gradiente de temperatura do fluído refrigerador, mas também, da sua uniformidade da superfície da zona moldante, de forma a evitar empenos nas peças.

O arrefecimento do material injectado é feito através da transferência de calor para as superfícies moldantes, através das massas do molde. Para facilitar, acelerar e controlar o processo de transferência de calor, são maquinados perto das zonas moldantes furos de passagem para o fluido refrigerante. Estes furos são conhecidos por "linhas de água", por a água ser o fluído refrigerante mais frequente e o mais barato.

A optimização de um sistema de arrefecimento, consiste assim, a encontrar um compromisso entre ter um molde mais quente que facilite o fluxo do fundido, peças com melhor qualidade, mas com maior tempo de arrefecimento, ou ter um molde mais frio em que o fluxo do fundido é mais dificultado, obtendo-se peças com menos qualidade, com menores tempos de arrefecimento.

Durante o processo de moldação, as temperaturas em diferentes partes do molde oscilam devido ao ritmo regular do ciclo e também devido as modificações que se façam nas condições de processamento.

3.3.2.1 – Balanço térmico

Neste capítulo são discutidos os vários mecanismos de transferência de calor que ocorrem em moldes de injecção, durante o ciclo de produção, nomeadamente a condução, a convecção e a radiação. O calor transportado pelo fundido e o calor a ser retirado pelo fluído arrefecedor são também referidos.

Concretamente no arrefecimento de moldes de injecção é apresentada uma forma de estimar o tempo de arrefecimento necessário a uma peça moldada.

Durante a fase de arrefecimento do ciclo de injecção estão em jogo no molde várias trocas de calor.

Na figura 12 representa-se, esquematicamente, o balanço térmico num molde de injecção, que pode ser expresso pela seguinte equação:

$$\sum_{\mathrm{i}} \dot{\mathrm{Q}} = \dot{Q}_{MA} + \dot{Q}_{A} + \dot{Q}_{\mathrm{F}} = 0$$

Onde,

$$\dot{Q}_{A} = \dot{Q}_{cd} + \dot{Q}_{cv} + \dot{Q}_{r}$$

sendo, $\dot{\mathrm{Q}}_{\mathrm{A}}$ o calor trocado com o ambiente, $\dot{\mathrm{Q}}_{\mathrm{cd}}$ o calor trocado por condução, $\dot{\mathrm{Q}}_{\mathrm{cv}}$ o calor trocado por convecção, $\dot{\mathrm{Q}}_{\mathrm{r}}$ o calor trocado por radiação, $\dot{\mathrm{Q}}_{\mathrm{F}}$ o calor transportado pelo fundido e $\dot{\mathrm{Q}}_{\mathrm{MA}}$ o calor transferido pelo meio arrefecedor.

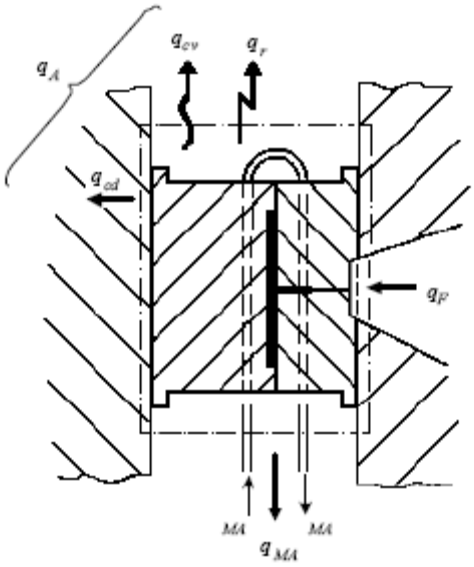


Figura 12 - Balanço térmico num molde de injecção

O balanço térmico é estabelecido definindo os fluxos de calor que são introduzidos dentro do molde em oposição àqueles que são removidos a partir dele. Os fluxos de calor individuais são considerados na forma de valores médios durante um ciclo de injecção e considerados como estacionários. O objectivo deste tipo de balanços é estabelecer a quantidade média de calor que tem que ser trocada pelo fluído de aquecimento/arrefecimento.

Para efeitos do balanço térmico, consideram-se como positivo o calor recebido pelo molde e como negativo o calor cedido pelo mesmo.

A troca de calor com o meio é muito difícil de medir. Vários estudos determinam a componente de modo indirecto com a máquina a funcionar em vazio, isto é, sem o polímero injectado dentro do molde. Neste caso, o calor que o molde troca com o meio é igual ao calor médio trocado por aquecimento/arrefecimento:

$$\sum_{i} \dot{Q} = 0$$

$$\dot{Q}_A = -\dot{Q}_{MA}$$

3.3.2.1.1 - Trocas de calor com o ambiente

A transferência de calor para o meio pode ser feita por três formas distintas: condução, convecção e radiação.

3.3.2.1.1.1 - Trocas de calor por condução

Quando existe um gradiente de temperatura num corpo ou entre dois corpos que estejam em contacto, verifica-se uma transferência de energia das zonas de temperatura mais elevada para as termicamente mais baixas. É a chamada transferência de calor por condução, que é proporcional ao gradiente normal de temperatura.

O fluxo de calor por condução dá-se para as placas de fixação do molde e é proporcional à diferença entre as temperaturas do molde e a do ambiente e pode ser calculado pela expressão:

$$\dot{Q}_{cd} = A_{fix} \cdot \beta \cdot (T_{amb} - T_{mold}) = 2340{,}36 \text{ W}$$

Sendo, A_{fix} área de contacto do molde, sistema de fixação e β factor de proporcionalidade

Tabela 3 - Factor β

Material	β	
Aço de baixa liga	100	W/m^2°C
Aços de alta liga	80	W/m^2°C
Ligas de cobre	20	W/m^2°C

3.3.2.1.1.2 - Trocas de calor por convecção

A convecção é o modo de transferência de energia entre uma superfície sólida e um fluído.

Se uma placa aquecida estiver exposta ao ar ambiente sem uma fonte externa de movimentação do fluído, a convecção diz-se natural ou livre. Se a transferência de calor resulta essencialmente de um escoamento de fluído, então a convecção diz-se forçada.

Consideremos uma placa aquecida à temperatura T_p, próxima de um fluído à temperatura T_∞, como mostra a figura 13.

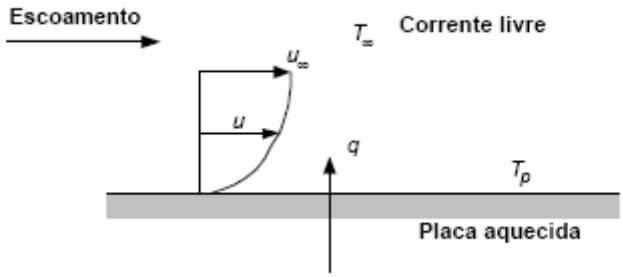


Figura 13 - Transferência de calor por convecção numa placa

O fluxo de calor transferido por convecção é dado pela *Lei de Newton* do arrefecimento:

$$\dot{Q}_{cv} = A_{lat} \cdot h \cdot (T_{amb} - T_{mold}) = 505{,}53 \text{ W}$$

Aqui, A_{lat} é a área da superfície da placa ou a área de transferência de calor e h é o coeficiente de transferência de calor por convecção.

Para alguns casos, pode ser feita a determinação analítica de h mas, muitas vezes, este é obtido experimentalmente.

Os coeficientes de transferência de calor dependem do tamanho, da forma e orientação da peça, assim como, das condições de escoamento em torno desta. Na tabela 4 são apresentados valores típicos para diferentes meios de arrefecimento.

Tabela 4 - Coeficientes de transferência de calor

Meio	h (W/m^{2}K)
Ar parado	10
Ar à velocidade de 5 m/s	50
Água a 5 ºC	1000
Água pulverizada	1500

3.3.2.1.1.3 - Trocas de calor por radiação

Em contraste com os mecanismos de condução e convecção, onde a energia é transferida através de um meio físico, a transferência de calor por radiação envolve a propagação de uma radiação electromagnética resultante da agitação térmica dos átomos do material.

A taxa de transferência de calor por radiação térmica é proporcional à quarta potência da temperatura absoluta do corpo negro. Quando dois corpos negros trocam calor por radiação, o fluxo de calor resultante é proporcional à diferença em T^4. Assim,

$$\dot{Q}_r = A_{lat} \cdot \varepsilon \cdot \sigma\left({T_1}^4 - {T_2}^4\right)$$

onde, ε é o factor de emissão do aço, T_1 e T_2 são as temperaturas dos corpos e σ é a chamada constante de *Stefan-Boltzmann* ($5{,}669 \times 10^{-8}$ W/m^{2}K^4).

A equação anterior é chamada de lei de *Stefan-Boltzmann* da radiação térmica e é válida somente para corpos negros.

Outros tipos de superfícies, como uma placa metálica polida, não emite tanta energia quanto o corpo negro. No entanto, a radiação total emitida por estes corpos ainda é proporcional a T^4. Para levar em consideração a natureza "cinzenta" destas superfícies é introduzido um outro factor na equação, o factor de proporcionalidade β. A equação é modificada para:

$$\dot{Q}_r = A_{lat} \cdot \beta \cdot \sigma\left(\left(\frac{\theta_{amb}}{100}\right)^4 - \left(\frac{\theta_{mold}}{100}\right)^4\right) = 52{,}98 \text{ W}$$

O calor transmitido da superfície do molde para o ar através da radiação não é significante, sendo menor que o calor trocado no arrefecimento do molde por convecção natural.

3.3.2.2 - Calor transportado pelo fundido

O calor transportado pelo polímero depende da massa injectada de fundido, da temperatura de injecção e da temperatura de ejecção.

Em ordem a determinar o calor a retirar da moldação $\dot{Q}_{\mathrm{F}}$, é necessário conhecer o diferencial de entalpia, que prevalece entre a temperatura de injecção e a temperatura de ejecção. Assim, a taxa de transferência de calor, por unidade de tempo, associado ao arrefecimento do polímero fundido, é dado pela seguinte expressão:

$$\dot{Q}_F = \frac{m\left(h_{inj} - h_{ext}\right)}{t_c} = 16153{,}61\ \mathrm{W}$$

onde, m é a massa injectada de fundido, h_{inj}, h_{ext} é a entalpia específica do plástico à temperatura de injecção e extracção, respectivamente e t_c o tempo de residência do material no molde.

A quantidade m é dada por:

$$\mathrm{m} = \rho.\mathrm{V} = 0{,}60\ \mathrm{Kg}$$

sendo, ρ a massa específica[3] e V o volume da moldação.

A entalpia do material pode ser obtida a partir de diagramas entálpicos para o respectivo material, não sendo invulgar que a mesma informação apareça tabelada. Neste caso, não pode ser esquecido o calor latente de cristalização para os polímeros semi-cristalinos.

3.3.2.2.1 – Tempo de arrefecimento

O tempo de arrefecimento depende de alguns parâmetros, tais como:

- espessura da parede da moldação;
- temperatura do fundido;
- temperatura do molde;
- temperatura de desmoldação da peça,
- condutividade térmica do material injectado.

[2] Importa referir que a massa específica dos polímeros é altamente dependente da temperatura. Os valores da massa específica à temperatura de processamento são, tipicamente, cerca de 70% e 85% dos correspondentes valores à temperatura ambiente, respectivamente para materiais semicristalinos e amorfos.

Assim, conhecidas a geometria da peça, as propriedades térmicas do plástico e as condições de processamento, pode estimar-se o tempo necessário para o arrefecimento através de uma solução em série da Equação de Fourier. Para o caso de uma geometria simples, tem-se:

$$\frac{T_w - T_a}{T_w - T_{inj}} = \frac{8}{\pi^2}\left(e^{-a_1 F_0} + \frac{1}{9}e^{-9a_1 F_0} + \frac{1}{25}e^{-25a_1 F_0}\right)$$

onde, T_w é a temperatura da superfície da parede da cavidade, T_{inj} a temperatura inicial, T_a a temperatura média da peça ao fim de algum tempo e a_1 é igual a $\left({}^{\pi}/_{2}\right)^2$

O número de Fourier, F_0 é definido por:

$$F_0 = \frac{t_c . \alpha}{X^2}$$

sendo, t_c o tempo de arrefecimento calculado, α a difusividade térmica média efectiva e X metade da espessura da placa.

Para valores de F_0 (> 0.1) elevados, termos da série da Equação de Fourier podem ser desprezados. Assim, é possível deduzir a expressão de *Menges-Wübken-Catic* que é uma estimativa do tempo de arrefecimento muito usada industrialmente:

$$t_c = \frac{s^2}{\pi^2 \alpha} ln\left[\left(\frac{4}{\pi}\right)\left(\frac{T_m - T_w}{T_e - T_w}\right)\right]$$

$$t_c = \frac{s^2}{\pi^2 \alpha} ln\left[\left(\frac{8}{\pi}\right)\left(\frac{T_m - T_w}{T_e - T_w}\right)\right]$$

$$t_c = 12{,}93 \text{ s}$$

onde, s é a espessura da placa, T_m a temperatura inicial do fundido, T_w a temperatura na parede da cavidade e T_e a temperatura de ejecção.

A primeira equação é usada para peças finas e a segunda equação para peças espessas.

3.3.2.3 - Calor a retirar pela refrigeração

Conhecido o valor das trocas de calor com o ambiente e o calor libertado pelo fundido, a quantidade de calor transferido pelo meio arrefecedor é calculada através da equação de balanço térmico:

$$\dot{Q}_{MA} = -\dot{Q}_A - \dot{Q}_{\mathrm{F}} = -19097{,}48\ \mathrm{W}$$

No caso dos termoplásticos, $\dot{Q}_F$ é sempre positivo e $\dot{Q}_A$ é geralmente negativo, excepto quando a temperatura do molde é inferior à temperatura ambiente.

Tendo em conta o exposto anteriormente, o arrefecimento do molde é de extrema importância para a qualidade e a produtividade.

A temperatura do molde, mais concretamente a temperatura da superfície da cavidade do molde, condiciona a estrutura macro-molecular resultante na moldação e as suas propriedades devido à sua influência no arrefecimento da peça. As baixas temperaturas dos moldes conduzem a grandes velocidades de arrefecimento e, por conseguinte, a maiores taxas de produção.

Especialmente nos plásticos semi-cristalinos, o grau de cristalização depende fortemente da velocidade de arrefecimento. Um arrefecimento lento tem como consequência um elevado grau de cristalização. Por conseguinte, deverá achar-se uma solução de compromisso entre a qualidade e a capacidade de produção, que determine a rentabilidade do processo.

Por regra geral, não se pode falar de uma distribuição homogénea da temperatura no molde de injecção, uma vez que as temperaturas são diferentes tanto local como periodicamente no ciclo de produção, figura 14.

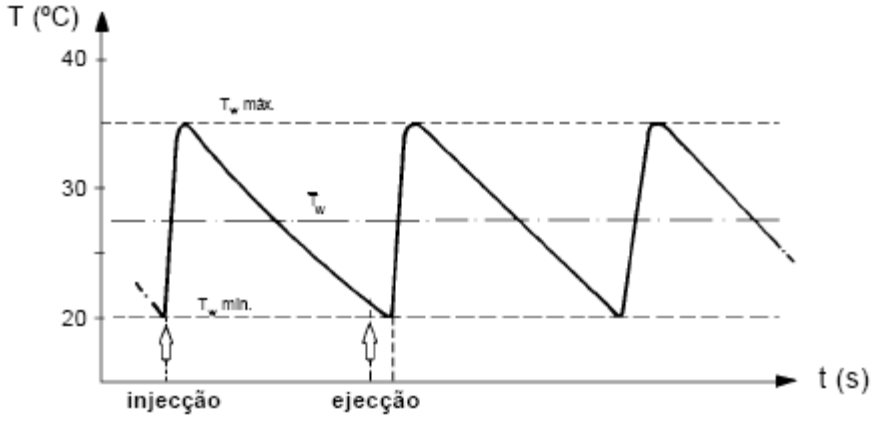


Figura 14 - Temperatura na parede da cavidade do molde em função do tempo

Contudo, para alcançar uma boa qualidade da peça injectada é necessário minimizar as diferenças de temperatura na superfície moldante. Para isso, torna-se necessário garantir o bom desempenho do sistema de arrefecimento. Para que a moldação arrefeça de forma efectiva, os canais de arrefecimento têm de estar cuidadosamente posicionados e correctamente dimensionados. O efeito do arrefecimento tem de ser bastante notório onde a moldação está bastante quente e progressivamente menos efectivo onde esta está mais fria. Se o projecto do molde permite obter um estado térmico equilibrado no molde/moldação, isso irá reflectir-se na melhor qualidade do produto.

A temperatura do fluído de arrefecimento é uma variável crítica do processo e é largamente responsável pelas condições operativas do sistema de arrefecimento.

A temperatura do refrigerante condiciona o mecanismo de remoção de calor do molde. Se a diferença de temperatura entre o refrigerante e a superfície do molde for elevada, os perfis de temperatura serão acentuadamente não uniformes, com as consequências já mencionadas.

A temperatura do fluído de arrefecimento depende, não só do material que se está a moldar, mas também do tipo de peça que se está a produzir. Alguns termoplásticos necessitam de temperaturas da superfície do molde elevadas. Neste caso, pode ser usada água ou óleo para o arrefecimento do molde. Geralmente, utilizam-se temperaturas do refrigerante baixas para se obter uma melhor transferência de calor e, por conseguinte, reduzir o tempo de ciclo.

Os fluidos de arrefecimento mais comuns usados em moldes de injecção estão mencionados na tabela 5.

Tabela 5 - Fluído de arrefecimento mais comuns

Água	5 a 90 ºC
Água com anticongelante	-20 a 5 ºC
Óleo	90 a 300 ºC

A água é o fluido mais usado devido ao seu baixo custo, reduzida viscosidade, facilidade de manuseamento e disponibilidade.

3.3.2.3.1 - Determinação do caudal

O caudal do fluido arrefecedor estima-se fixando o aumento da sua temperatura durante a passagem pelo molde. Esta variação de temperatura deve ser em geral de 2 a 5°C, o que impede que o percurso seja longo. O caudal é dado pela expressão:

$$\dot{m} = \frac{\left|\dot{Q}_{MA}\right|}{C \cdot \Delta T} = 1520{,}74 \text{ Kg/s}$$

Onde, C calor específico do fluído, que neste caso será a água e ΔT a variação de temperatura

3.3.2.3.2 – Determinação do diâmetro dos canais

O diâmetro dos canais de arrefecimento é limitado por aspectos construtivos de outros sistemas do molde e da própria logística industrial. No entanto, não deve ser esquecido que a maior eficiência do fluído de arrefecimento é conseguida quando o seu regime de escoamento é turbulento.

As diferenças de regime do escoamento prendem-se com a transferência de calor através do fluído. Num escoamento laminar, a transferência de calor através do fluído processa-se por atrito viscoso de uma camada de fluído para outra imediatamente adjacente. Tal escoamento ocorre a baixas velocidades. Porém, para velocidades maiores (escoamento turbulento), a transferência de calor por atrito viscoso é complementada pelo transporte molecular do próprio fluído em direcções perpendiculares à direcção principal do escoamento.

Devido à transferência de massa nas direcções perpendiculares ao escoamento, as trocas de energia em escoamento turbulento são muito maiores que em escoamento laminar.

Em condutas circulares, o escoamento laminar ocorre para números de *Reynolds* inferiores a 2300. Para números de *Reynolds* acima dos 3500, o escoamento pode ser considerado turbulento.

A quantidade de energia trocada está relacionada com a razão volume/área *da* superfície. Nas regiões onde a razão V/A é maior, o arrefecimento é mais difícil e são necessários canais com maior diâmetro.

O diâmetro dos canais de arrefecimento é um compromisso entre "turbulência" e perda de carga.

Tal como acontece na escolha do diâmetro dos canais de arrefecimento, a disposição dos mesmos é limitada por aspectos construtivos, como por exemplo, o *layout* dos bicos de injecção. Por este motivo, a disposição dos canais nem sempre é a mais adequada (do ponto de vista térmico) para a geometria e espessura da peça (ou peças).

Na literatura, a localização dos canais de arrefecimento é referida como sendo de extrema importância para um arrefecimento uniforme, pois determina a distribuição e a evolução da temperatura na superfície da cavidade durante o período de arrefecimento. Assim, os canais para a transferência de calor deveriam estar posicionados de modo a garantir um perfil de temperatura aproximadamente uniforme ao longo da superfície moldante.

Neste contexto, os principais parâmetros a considerar são: a distância dos canais à superfície *(a)* e a distância entre os canais *(b),* figura 15.

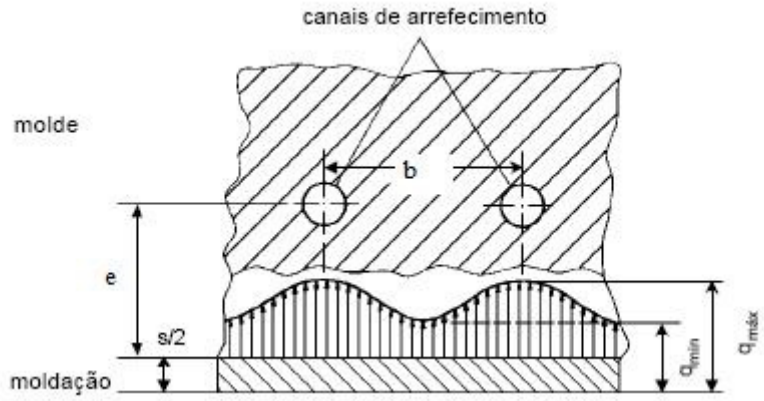


Figura 15 - Perfil do fluxo de calor

Diversos autores consideram que um grande afastamento dos canais da superfície aumenta a resistência térmica e que um grande espaçamento entre os canais provoca uma

variação irregular da temperatura à superfície moldante. Assim, o aumento da distância *a* e a diminuição da distância b, devem assegurar um perfil de temperatura mais uniforme.

Conhecido o caudal mássico torna-se fácil a determinação do caudal volumétrico:

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho_{água}} = 25{,}35\ \mathrm{l/min}$$

Conhecido o caudal volumétrico de fluído refrigerador pode-se determinar o diâmetro para os canais de refrigeração, através da tabela seguinte:

Tabela 6 - Diâmetro das linhas de água

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

O diâmetro que assegura o caudal calculado anteriormente, é de 15,45 mm.

O comprimento dos canais deve ser o maior possível e, por isso não deve ser calculado. Deve-se sim verificar se o comprimento das linhas de água existentes realmente no molde, é superior ao mínimo necessário para assegurar a transmissão de calor pretendida. O comprimento mínimo pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$L = \frac{2 \cdot \left|\dot{Q}_{TM}\right| \cdot e}{\lambda_{TM} \cdot \pi \cdot d \cdot \Delta T}$$

Onde, e é a espessura entre os canais e a cavidade, d o diâmetro dos canais, λ_{TM} a condutividade térmica do material do molde e ΔT a diferença de temperatura entre a cavidade e o líquido arrefecedor.

$$a = d$$

$$e = a - \frac{d}{a}$$

$$b = 3 \times d$$

$$L = \frac{2 \cdot \left|\dot{Q}_{TM}\right| \cdot e}{\lambda_{TM} \cdot \pi \cdot d \cdot \Delta T} = 26202{,}23 \text{ mm}$$

3.3.2.3.3 - Verificação do dimensionamento das linhas de água

Para que a transferência de calor seja eficiente, deve-se garantir que o escoamento seja turbulento. Para segurança tem que se garantir que o número de *Reynolds* superior a 10000 e que seja regime turbulento em todos os pontos dos canais inclusive nos canais de diferentes diâmetros.

Assim terá que se calcular o número de *Reynolds*, cuja expressão é a seguinte:

$$Re = \frac{v \cdot D}{\upsilon} = 15448$$

onde, v a velocidade de escoamento (m/s)

$$v = \frac{\dot{V}}{\frac{\pi \cdot D^2}{4}}$$

Onde, υ a viscosidade cinemática (m^2/s)

$$\upsilon = \frac{4 \cdot \dot{m}}{\pi \cdot D^2 \cdot \rho_{água}}$$

3.3.2.3.4 - Erro j

Este erro permite verificar o intervalo admissível para materiais cristalinos e amorfos.

$$j = 2{,}4 \times Bi^{-0{,}22} \times \left(\frac{b}{a}\right)^{2{,}8 \times \left|ln\left(\frac{b}{a}\right)\right|} = 11{,}52\ \%$$

$$Bi = \frac{\alpha_{TM} \times D}{\lambda_{TM}} = 0{,}000266$$

onde, α_{TM} o coeficiente de transferência de calor da água e λ_{TM} a condutividade do material do molde.

Este erro seria admissível para um material amorfo, já que para um material semi-cristalino, que é o nosso caso, o erro deveria estar compreendido entre 2 a 5%. Tal erro deve-se ao facto de se tratar de cálculos empíricos.

3.3.3 – Resultados obtidos

Neste capítulo estão os resultados do estudo teórico, apresentado no capítulo anterior, calculados através do Excel. Em anexo B encontra-se as respectivas folhas de cálculo.

Tabela 7 - Resultados teóricos

P_{inj}			20593189,60	Pa
	$\Delta p_{percurso\ crítico}$		20593189,60	Pa
	$\Delta p_{sistema\ de\ enchimento}$		0,00	Pa
Q_{inj}			272,31	cm^3/s
Pm			514,83	bar
Tinj			2,51	s
Tinj			0,00	s
Vinjt			656,20	cm^3
V_{inj}			682,69	cm^3
Ap			1520,77	cm^2
F_{fecho}			782,94	t
Q_A			2943,87	W
	Q_{cd}		2340,36	W
		A_{fix}	3,66	m^2
		β	80,00	
		T_{amb}	25,00	ºC
		T_{mold}	17,00	ºC
	Q_{cv}		550,53	W
		A_{lat}	4,59	m^2
		h	15,00	W/m^2K
	Q_r		52,98	W
		σ	5,67	W/m^2K^4

	ε	0,25	
	θ_{amb}	298,18	K
	θ_{mold}	290,18	K
QF		16153,61	W
	m	0,60	kg
	hinj	516216,00	J/Kg
	hext	166104,00	J/Kg
	tc	12,93	s
QMA		-19097,48	W
ΔT1		3,00	ºC
$\dot{m}$		1520,74	Kg/s
$\dot{v}$		25,35	l/min
d		15,45	mm
L		26202,23	mm
	a	15,45	mm
	e	7,72	mm
	b	46,34	mm
Re		15447,92	
Bi		0,00	
j		11,52	%
C		4,19	KJ/Kg C
ΔT2		8,00	ºC
$\rho_{água}$		1000,00	Kg/m3
λTM		29,00	W/mºC
αTM		0,50	W/m2ºC

3.4 - Optimização dos parâmetros – análise numérica

Este capítulo pretende descrever o software MPI e de uma forma geral as etapas a que se submeteu o modelo em estudo antes de executar a analise pretendida. Posteriormente será apresentada a simulação optimizada para a peça.

Para melhor entender as etapas a que se submete o modelo até estar pronto para análise, pode ser consultado o anexo A onde se encontra um tutorial que se explica de forma mais pormenorizada todas as etapas de preparação do modelo.

3.4.1 – Apresentação do software

O Moldflow Plastics Insight (MPI) é o líder mundial em simulação para optimização do projecto de peças e moldes. Possui ferramentas que prevêem e eliminam potenciais problemas de produção e de optimização do projecto da peça e molde.

Com o MPI é possível simular o enchimento, compactação e arrefecimento e prever fenómenos que ocorrem depois do enchimento da cavidade (como o empeno). É também possível simular o enchimento com materiais com fibras e outro tipo de cargas. Simula ainda outras formas de processamento como moldação por injecção assistida com gás, co-injecção, injecção de termoendurecíveis, injecção por compressão, RIM (reaction injection molding), encapsulação de microchips e injecção microcelular.

3.4.2 – Preparação do modelo para análise

De uma forma resumida, até se poder iniciar a simulação pretendida tem que se sujeitar o modelo as seguintes etapas: importar modelo, gerar e corrigir a malha, escolher o material, criar o sistema de alimentação e refrigeração, definir o ponto de entrada do material, definir o tipo de simulação pretendida, definir as condições de processamento e por fim dar início à análise.

3.4.2.1 – Importar modelo e gerar malha

O modelo CAD é importado para o Moldflow. Depois gera-se a malha no modelo que significa dividir a superfície da peça em elementos, triângulos no caso da malha *fusion*, cujas dimensões devem ser as semelhantes para permitir uma melhor previsão dos resultados.

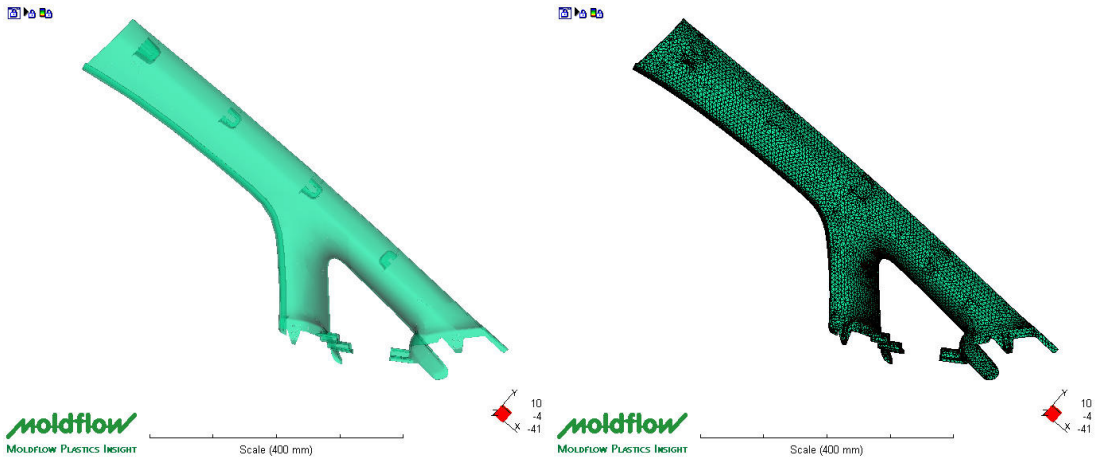


Figura 16 - Modelo importado

3.4.2.2 – Reparar a malha

Depois de gerada a malha é necessário analisa-la para verificar quais os parâmetros a corrigir. Para tal, analisa-se através de um resultado estatístico da malha. Neste resultado estatístico tem-se uma variedade de informação acerca do modelo que usam de forma a avaliar e corrigir a malha.

De seguida estão representados os resultados antes e após correcção da malha:

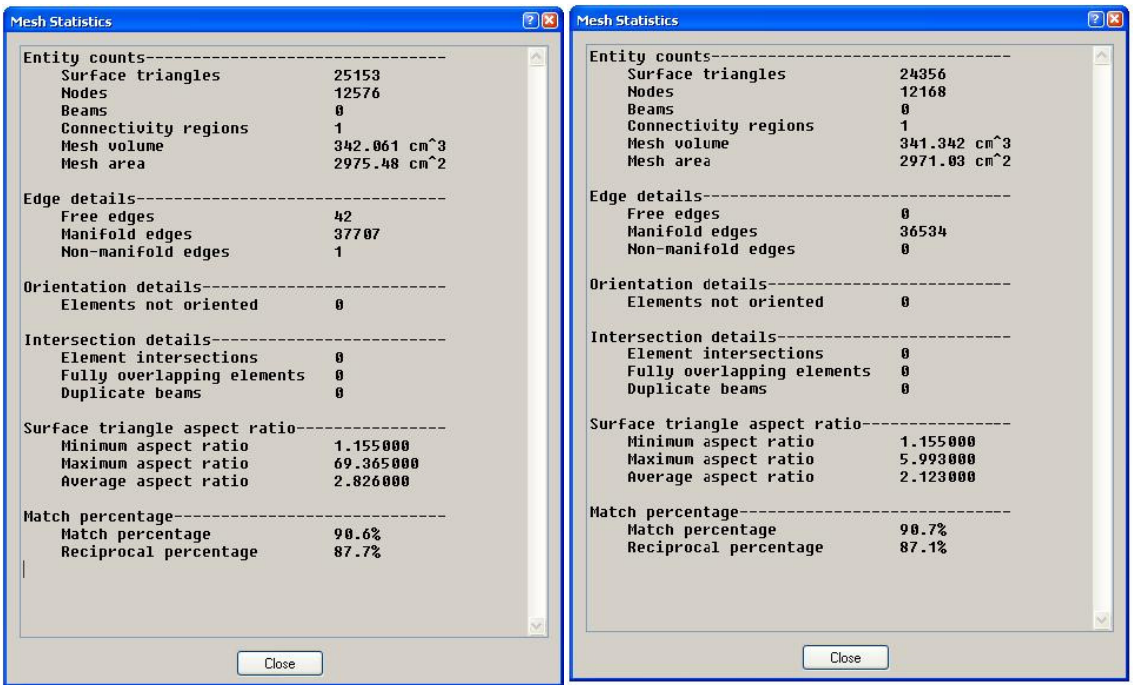


Figura 17 - Estatística da malha antes e após correcção

Como se pode verificar pela estatística final, a malha está devidamente corrigida

3.4.2.3 – Definir o tipo de simulação pretendida

A simulação pretendida é um estudo de enchimento, compactação arrefecimento e empeno pelo que no software se define como *fill, cool, pack e warp*.

3.4.2.4 – Definir o material a utilizar

O material usado na produção desta peça é um material da Basell Polyolefins Europe e apresenta-se sob a forma comercial de Hostacom X4323/3 S63 101173.

3.4.2.5 – Criar o sistema de alimentação

O sistema de alimentação utilizado é um sistema de alimentação constituído por canais quentes e frios.

Para criar os canais de alimentação, inicialmente desenha-se as linhas, para cada linha são atribuídas propriedades consoante se trate de um canal quente ou frio e as respectivas dimensões e depois gera-se a malha.

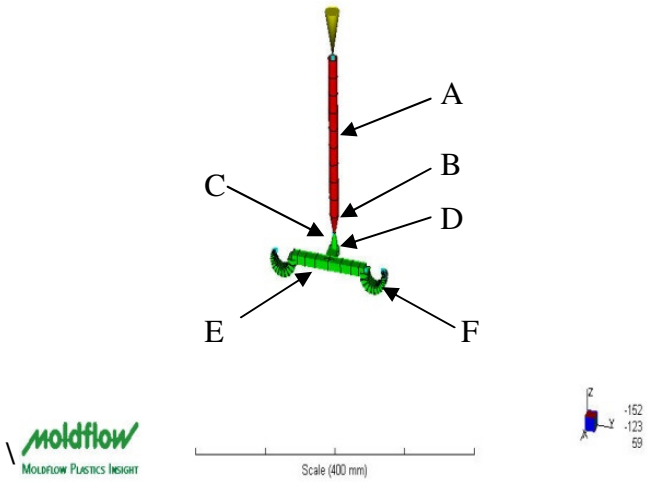


Figura 18 - Sistema de alimentação com a malha gerada

Tabela 8 - Dimensão dos canais de alimentação

	Designação	Nome	Secção	Diâmetro	Altura	Largura	Comprimento
Canal quente	A	Jito	Circular (constante)	14 mm			180 mm
	B	Ataque	Circular (variável)	14x4 mm			20 mm
Canais frios	C	Ponteira	Circular (variável)	4x13 mm			20 mm
	D	Canal frio primário	Trapezoidal		10 mm	14 mm 13 mm	20 mm
	E	Canal frio secundário	Trapezoidal		10 mm	13 mm 12 mm	106 mm
	F	Ataque	Fenda (variável)		1 mm	10mm	

Para a escolha das dimensões do distribuidor consultou-se a folha técnica fornecida pela IGM, do fornecedor da *Yudo*. Por consulta do anexo E escolhe-se o diâmetro do canal principal do distribuidor deve ser de 14 mm e o diâmetro do ataque de 4 mm.

As dimensões dos canais frios foram escolhidas no seguimento das dimensões dos canais quentes. De notar que o estudo desta peça iniciou-se depois do molde já estar grande parte produzido, pelo que se utilizou as dimensões do canal de alimentação do molde de forma a verificar ou não a eficiência desde.

3.4.2.6 – Criar o sistema de refrigeração

O sistema de refrigeração é fornecido pelo fabricante do molde a IGM, através de desenho que depois é traduzido para o Moldflow, apresentando-se este em forma de linhas.

Estas têm de ser corrigidas. Após correcção são-lhe atribuídas propriedades caso sejam *channels* ou *baffles,* representando-se de azul e amarelo respectivamente depois de se gerar a malha.

Em seguida são apresentadas as características de cada um destes constituintes do sistema de refrigeração.

Tabela 9 - Características do sistema de refrigeração

	Diâmetro	Transferência de calor efectiva	Rugosidade
channels	8 mm	1	0,05 mm
baffles	12 mm	0,5	0,05 mm

Depois da atribuição das características e gerada a malha, e de verificar se e os canais estão devidamente conectados e se não existem intersecções e sobreposição dos elementos, o sistema de refrigeração apresenta-se da seguinte forma:

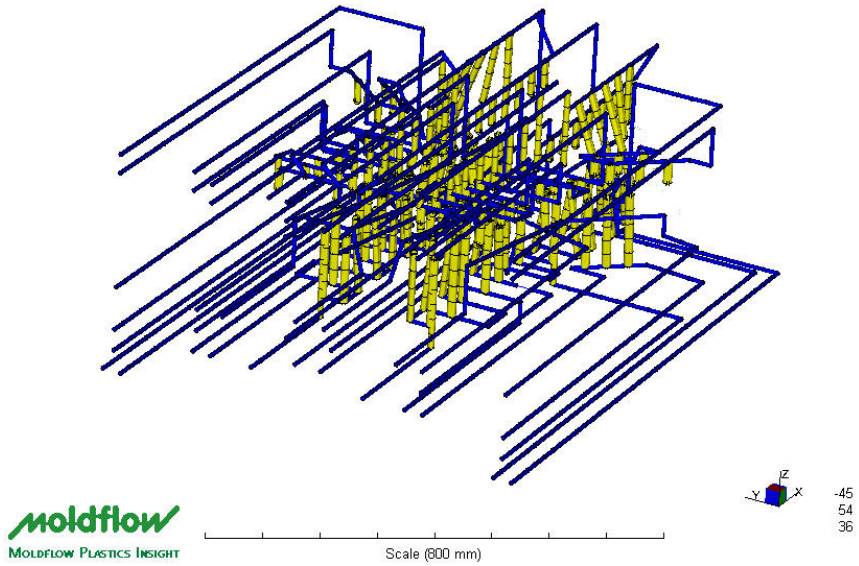


Figura 19 - Linhas de água com malha

Por fim devemos definir as entradas do fluído arrefecedor. Estas entradas são fornecidas pelo fornecedor do molde.

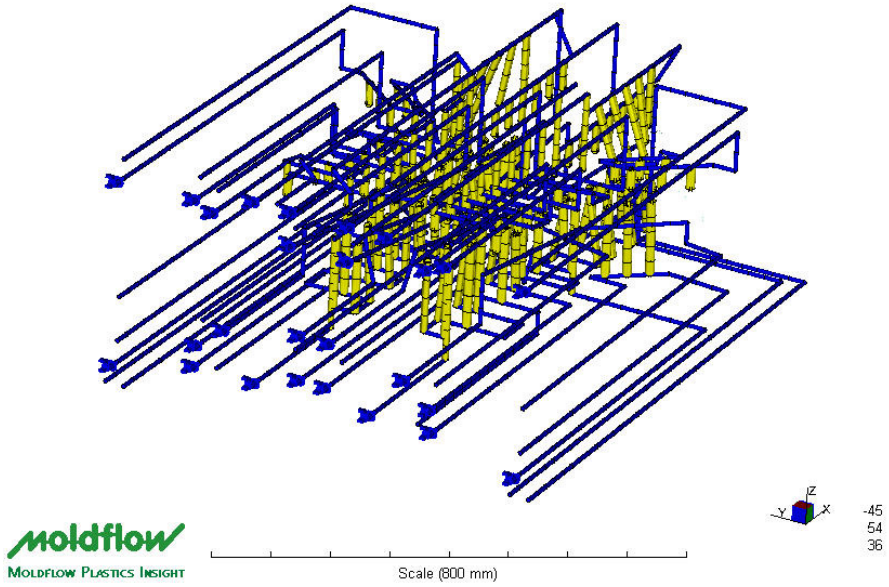


Tabela 10 - Características do fluído arrefecedor

Fluído	Água
Temperatura	17 ºC
Número de Reynolds	10000

Em suma, o modelo está apto a ser submetido a análise e apresenta-se na figura abaixo.

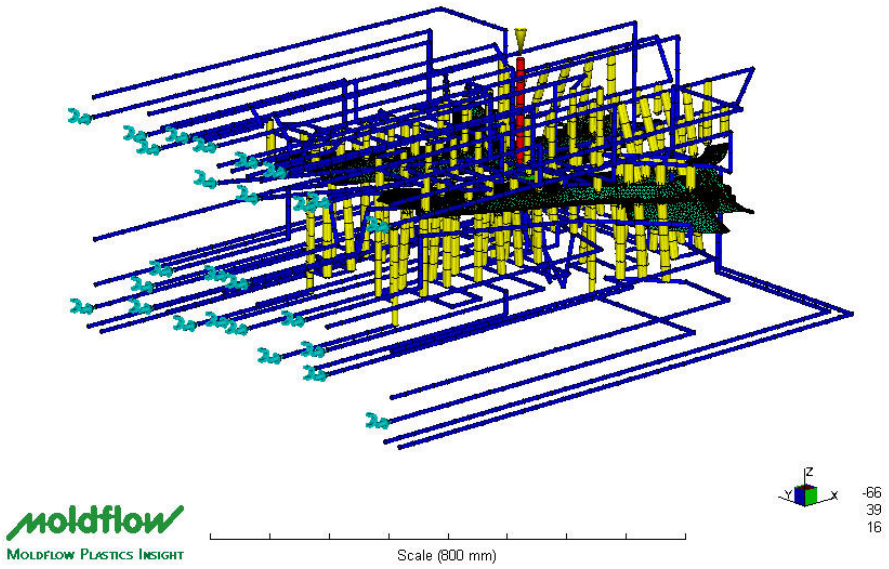


Figura 20 - Modelo final apto para análise

3.4.2.7 - Definir as condições de processamento

Para se definir as condições de processamento adequadas para o modelo, fez-se correr uma aplicação do Moldflow chamada janela de processamento que através do gráfico pressão em função do tempo de injecção nos indica as melhores parâmetros para uma solução optimizada. O resultado é o seguinte:

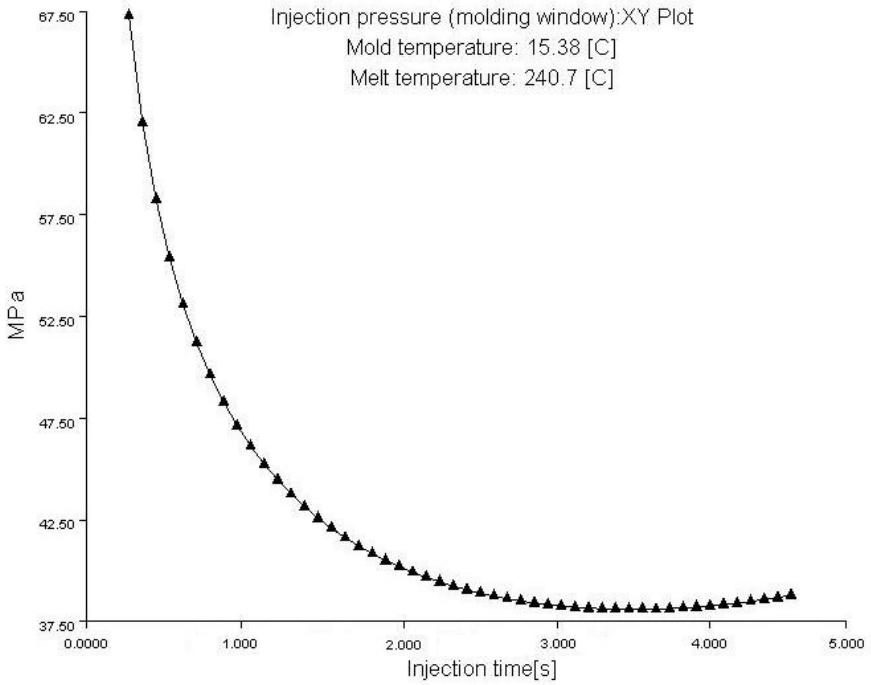


Figura 21 - Pressão de injecção em função do tempo de enchimento

Para uma temperatura de molde de 17ºC e temperatura de fundido de 240ºC, verifica-se que a pressão de injecção vai diminuindo com o aumento do tempo de injecção, até tornar a aumentar. O ponto de viragem é considerado o óptimo, que neste caso é 3,2 segundos.

A pressão torna a aumentar após os 3,2 segundos, devido ao facto de o material solidificar (aumentar viscosidade) e ser necessário uma maior pressão para acabar de encher a peça.

As vantagens de se usar uma temperatura do molde baixa relativamente ao recomendado pelo fornecedor do material deve-se ao facto de se conseguir diminuir o tempo de ciclo, diminuir o tempo de arrefecimento, não necessitar de aquecedores para a água da refrigeração, permitindo assim trabalhar com a água da rede. Além disso em termos de produtividade interessa produzir peças com a temperatura de molde o mais baixa possível, de

modo a reduzir o tempo de arrefecimento da moldação, uma vez que a fase de arrefecimento é a mais longa do ciclo de injecção.

Todos os outros parâmetros são afinados tendo em conta a obter a mais uniforme distribuição de temperaturas, contracção volumétrica nunca superior a 3 vezes à contracção volumétrica linear no material, velocidades de corte baixas de modo a obter peças com boa qualidade que cumpram as especificações do cliente.

As condições de processamento utilizadas na análise optimizada do modelo foram as seguintes:

Tabela 11 - Condições de processamento

Temperatura do molde	17 ºC
Temperatura do fundido	240 ºC
Tempo de abertura do molde	5 s
Tempo de injecção+compactação+arrefecimento	45 s
Caudal	272 cm^3/s
2ª pressão	80 % da inicial
Tempo de aplicação da 2ª pressão	10 s

3.4.3 - Apresentação dos resultados

Através da submissão do modelo a análise, tentou-se encontrar as condições ideais de processamento para esta peça. As simulações foram feitas tendo em conta as especificações do material fornecidas pelo fabricante, especificações do projecto e cliente.

Estes estudos permitiram testar as decisões que foram tomadas ao longo deste projecto, apoiando os coordenadores de projecto para as tomadas de decisões.

Em seguida são apresentados os resultados obtidos em Moldflow, considerando estes os ideais para um bom enchimento, permitindo obter peças que satisfaçam o cliente e que sejam aprovadas nos testes de qualidade, conforme especificações.

3.4.3.1 – Tempo de enchimento

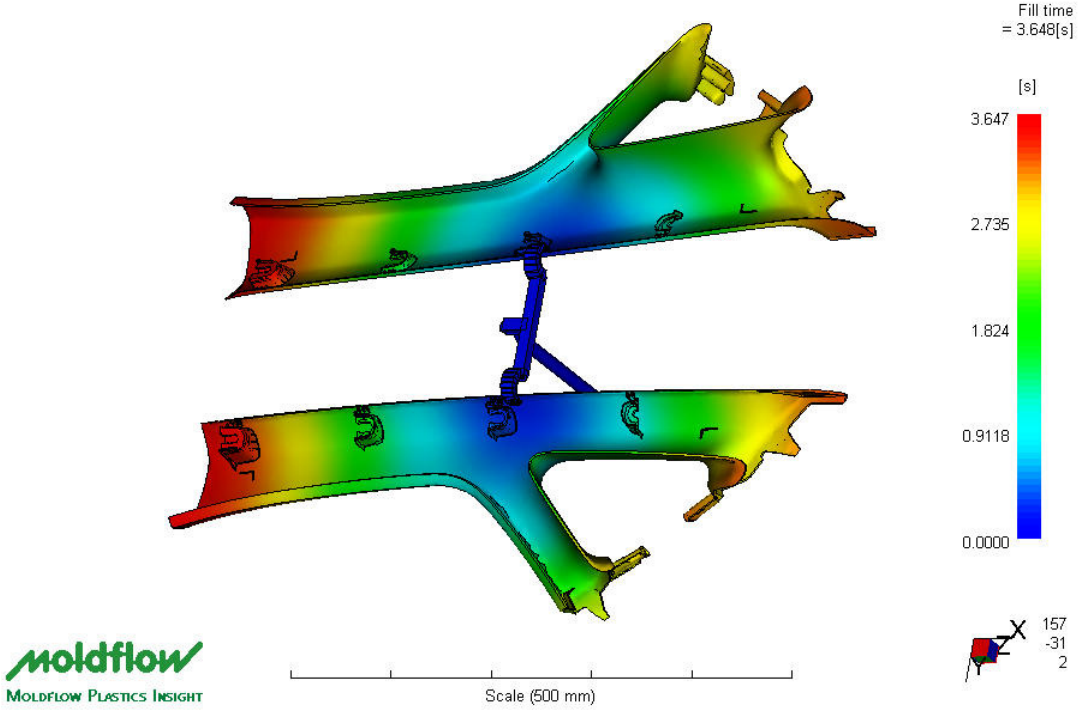


Figura 22 - Tempo de enchimento da moldação

O tempo de enchimento das duas cavidades é sensivelmente cerca de 3,6 segundos.

3.4.3.2 – Pressão de injecção na comutação

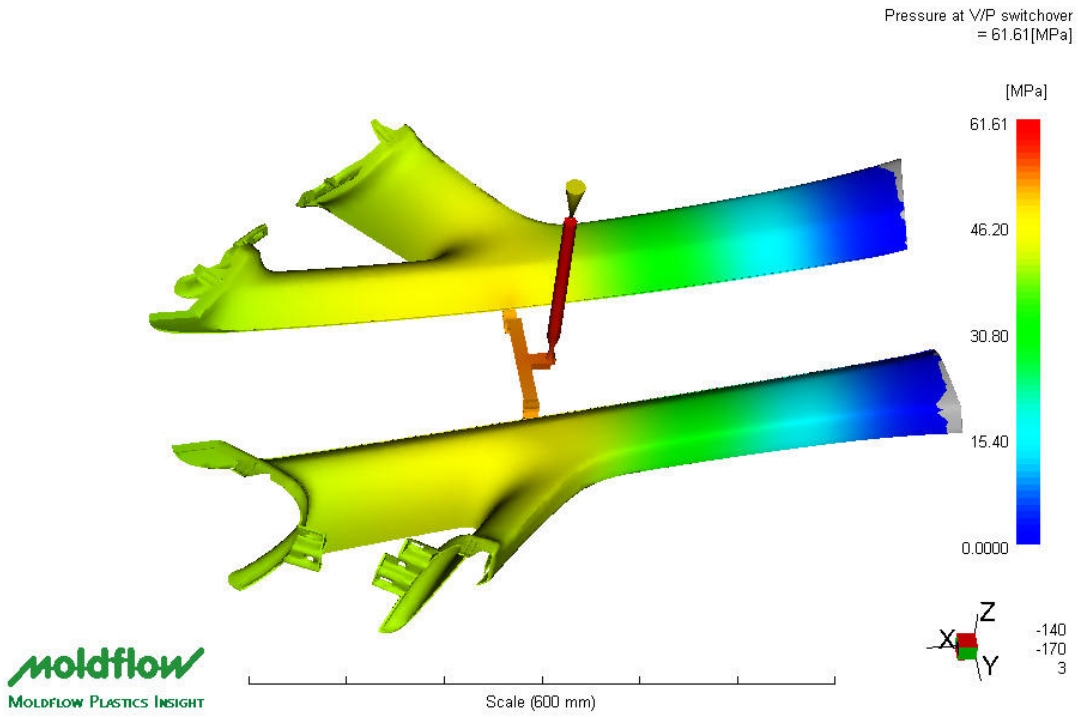


Figura 23 - Pressão na comutação

O ponto de passagem da fase de enchimento à fase de pressurização, até o ataque solidificar é designado por comutação. A pressão de comutação é maior na entrada do sistema de alimentação, com o valor de 61,61 MPa.

A partir do jito a pressão diminui até alcançar os cantos da peça, local onde a pressão é nula. Este canto não apresenta pressão, porque a pressão exercida ao longo dos canais e da peça é suficiente para encher esse canto, ou seja, volumétricamente a peça está cheia e enquanto o material fundido terá de ser compensado à medida que arrefece.

Neste caso, a comutação é efectuada por pressão hidráulica medida durante a fase de injecção.

O enchimento é radial (deslocação da frente de fluxo), sendo o canto mais afastado do início do enchimento o último a encher. De notar que, as 2 peças enchem ao mesmo tempo com a mesma queda de pressão. Sendo assim o fluxo está balanceado, o que é importante para o fecho do molde.

3.4.3.3 – Temperatura na frente de fluxo

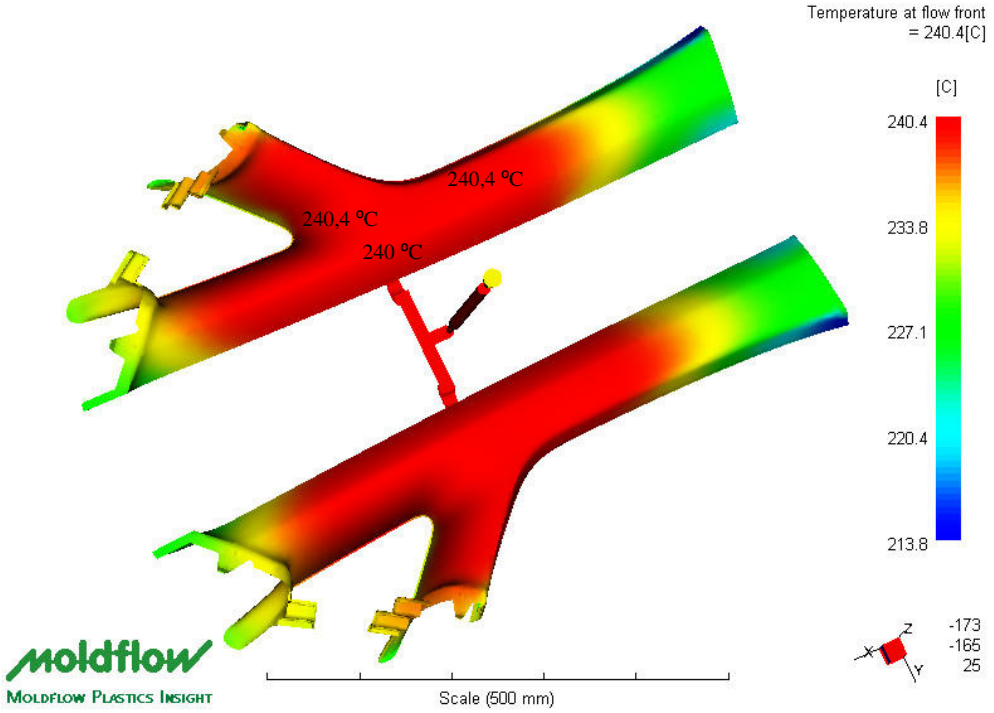


Figura 24 - Variação da temperatura na frente de fluxo

A temperatura na frente de fluxo é medida em instantes de tempo ao longo do enchimento da peça. Neste caso, verifica-se que com o aumento do tempo de injecção, a temperatura do fundido aumenta, até cerca do meio da peça, como assinalado na figura e depois vai diminuindo até as últimas zonas da peça a encher. O fundido é injectado a uma temperatura de 240ºC, e a pequena variação de aumento da temperatura para 240,4ºC, deve-se ao facto da peça ser injectada com um ataque pequeno, levando à formação de atrito molecular e dando-se o aumento da dissipação viscosa.

Nota-se ainda que a peça enche primeiro nas zonas mais espessas onde a temperatura é maior, sendo as nervuras e as zonas de montagem técnica da peça as últimas a encher por terem menor espessura e as que têm menor temperatura.

3.4.3.4 – Temperatura média do fundido no fim do enchimento

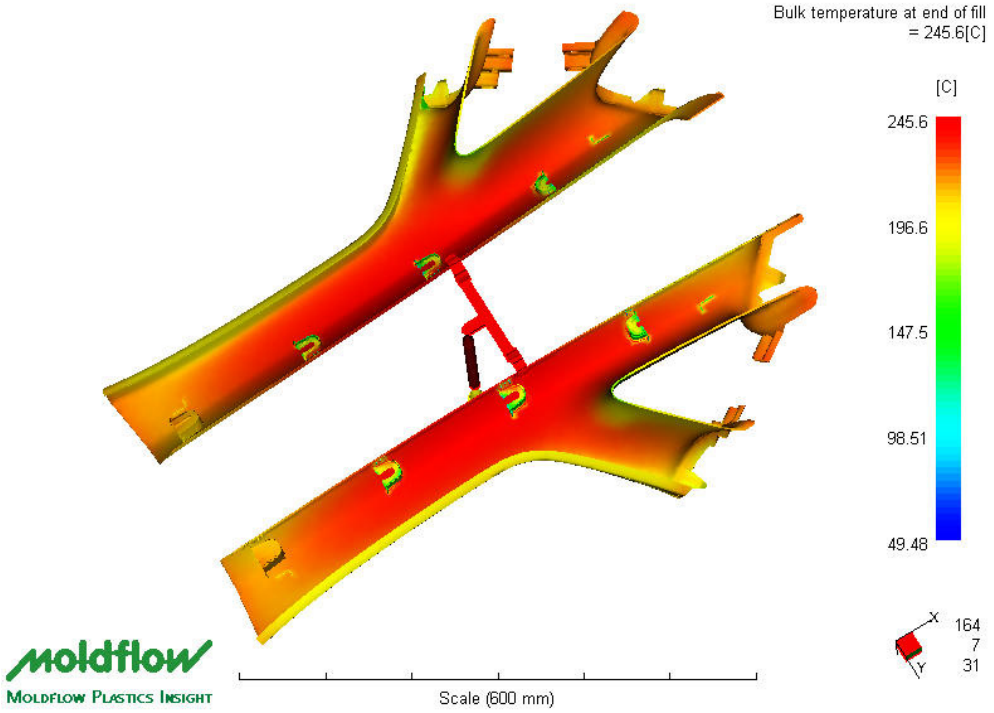


Figura 25 - Temperatura do fundido ao longo do enchimento

Pela imagem consegue-se visualizar a média ponderada da temperatura ao longo da espessura, no fim do enchimento.

Como se verifica, a temperatura do fundido no fim do enchimento é maior nos canais de alimentação e nas primeiras zonas da peça a encher, porque são as zonas que possuem material fundido durante mais tempo. A temperatura vai diminuindo gradualmente conforme a peça vai enchendo tendo os porta agrafos menor temperatura devido a este ter uma espessura mais reduzida e serem os primeiros a solidificar.

A temperatura no início do enchimento é mais elevada que a temperatura do fundido imposto, mesmo assim encontra-se na gama de temperaturas admissíveis pelo fornecedor do material, devido ao já mencionado atrás, sobre o facto de se forçar a passagem da mesma quantidade de material por um ataque pequeno. O material ao passar pelo ataque gera atrito intermolecular, o que leva ao seu aquecimento. Com isto a temperatura aumenta um pouco comparativamente à temperatura de injecção do fundido.

É de referir que áreas com fluxo contínuos têm maior temperatura média do fundido no fim do enchimento e esta decresce rapidamente quando o fluxo pára. É desejável uma temperatura média do fundido no fim do enchimento uniforme pois as diferenças de temperatura podem causar contracções não uniformes e empenos. Além disso se a

temperatura média do fundido no fim do enchimento for muito próxima da temperatura de degradação é necessário alterar a geometria do sistema de injecção ou condições de processamento, devido à degradação térmica do material.

3.4.3.5 – Força de fecho

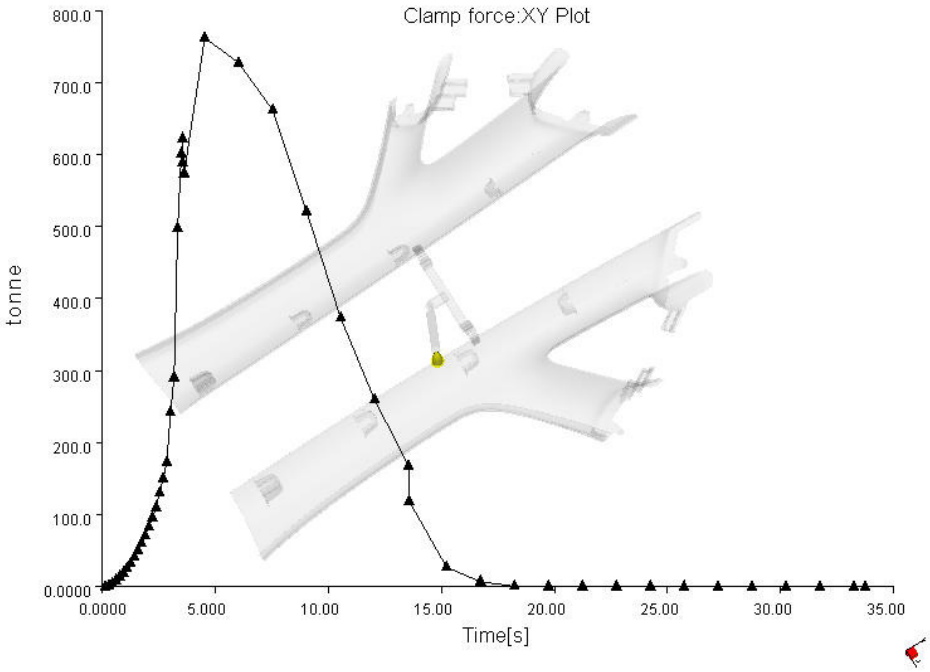


Figura 26 - Força de fecho

Pelo gráfico, verifica-se que no fim do enchimento das duas cavidades é quando se necessita de maior força de fecho, aproximadamente 762 toneladas, pois é neste instante em que a pressão de injecção é máxima. Assim, é necessário o uso de uma máquina que suporte esta força de fecho. A máquina utilizada será uma máquina de 800 toneladas (Engel 800 II), da Simoldes Plásticos.

Quando se tem com especificação o uso de uma força de fecho mais baixa, como solução, pode-se aumentar o tempo de enchimento e/ou diminuir a velocidade de injecção, ou seja, com o aumento do tempo de enchimento e/ou diminuição da velocidade de injecção consegue-se reduzir a força de fecho.

3.4.3.6 – Centroíde da força de fecho

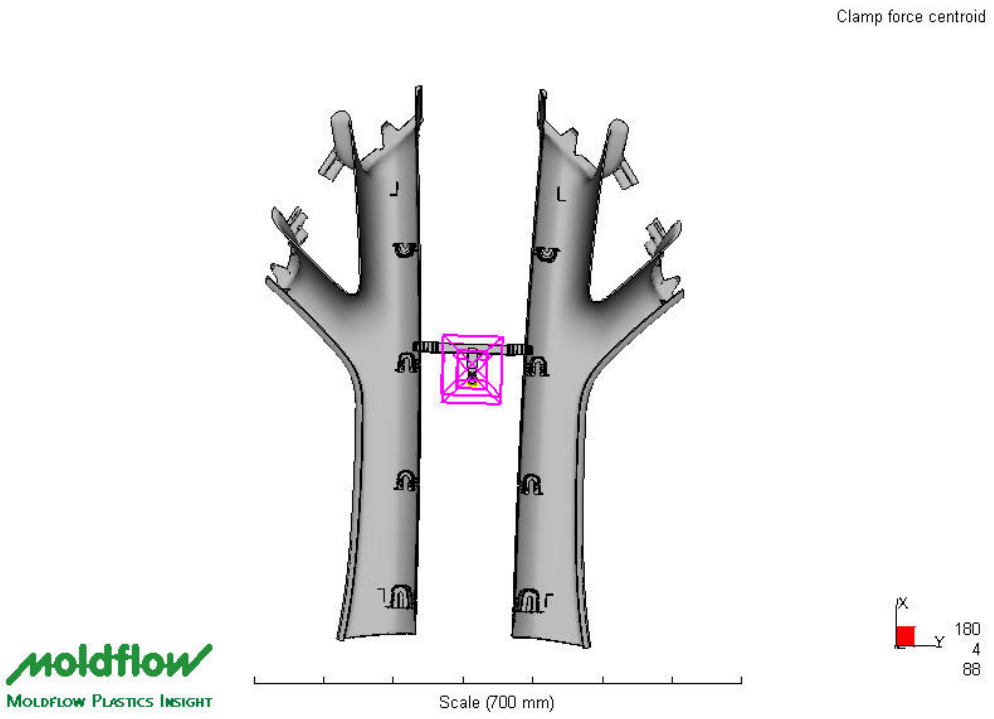


Figura 27 - Centroíde da força de fecho

Pela figura 27, verifica-se que as quedas de pressão estão equilibradas. Este centroíde deve estar alinhado com o ponto de injecção (bico de injecção da máquina). Se estiver alinhado com o bico de injecção, como é o caso, quer dizer que as quedas de pressão em ambas as cavidades são iguais.

3.4.3.7 – Tensões de corte na parede

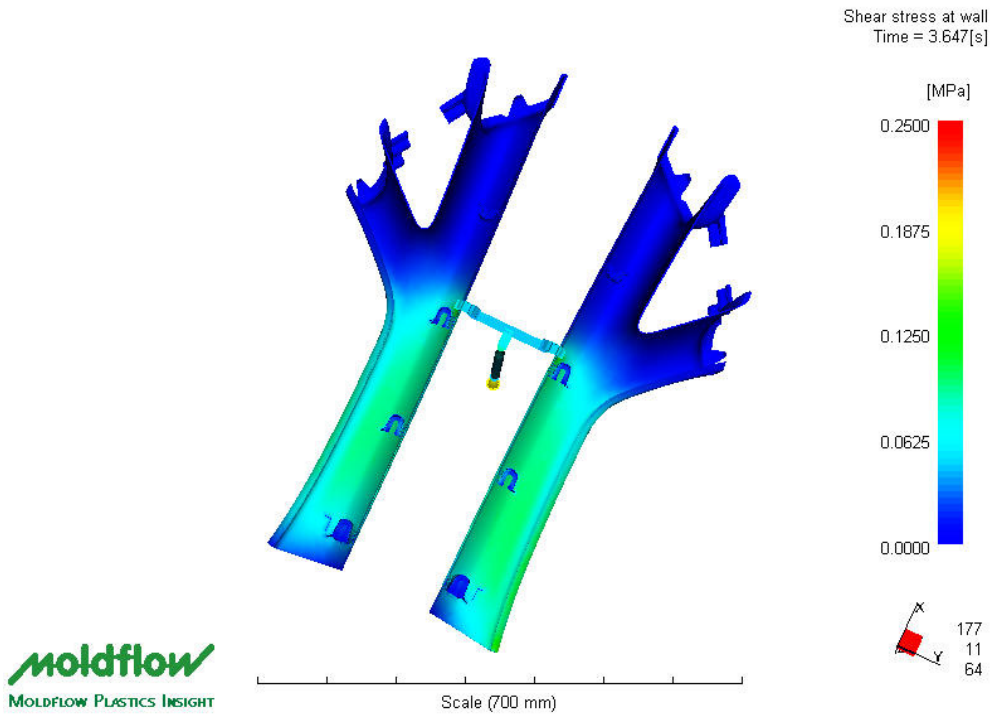


Figura 28 - Tensões de corte na parede

Verifica-se, pela figura 28 que as tensões de corte, no geral, encontram-se abaixo da tensão de corte especificadas pelo fabricante do material (0,25 MPa é a tensão máxima admissível para este material).

Estas tensões mais elevadas verificam-se nas zonas mais finas das peças, onde se tem velocidades maiores, em zonas onde o arrefecimento é bastante rápido ou no fim das nervuras.

3.4.3.8 – Taxa de corte no fundido ao longo do enchimento

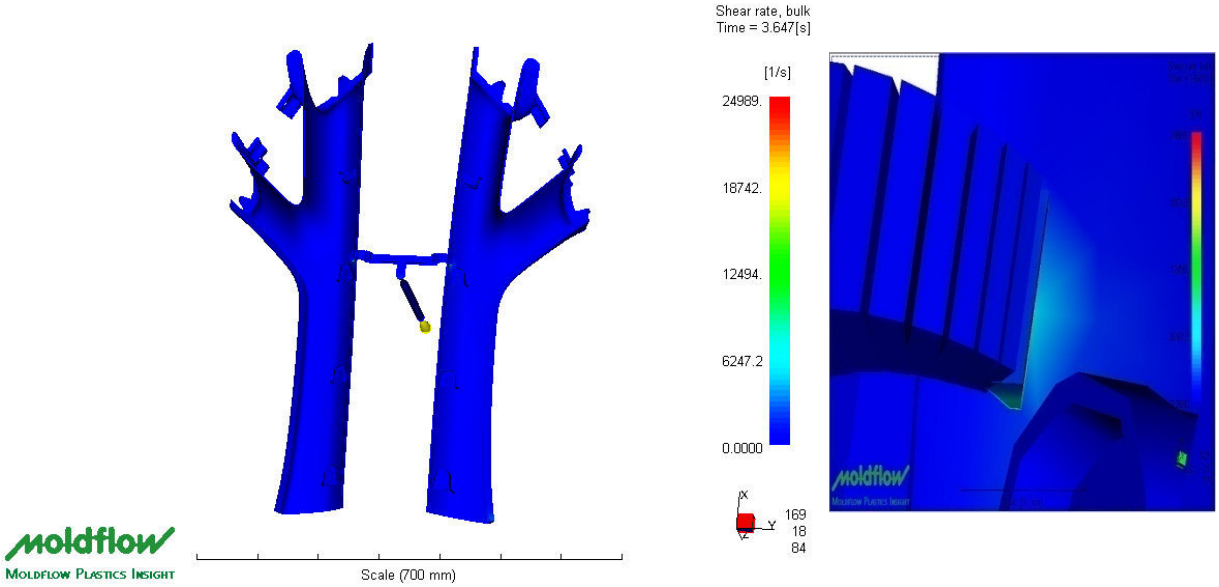


Figura 29 - Taxa de corte no fundido ao longo do enchimento

A taxa de corte máxima admitida para este material é de 100000 s^{-1}, pelo que a taxa de corte apresentada se encontra dentro desse limite.

Este tipo de análise serve essencialmente para dimensionar os canais de alimentação com secções mais pequenas porque são zonas onde ocorrem maiores taxas, logo torna-se necessário aumentar, se for o caso, as dimensões dos canais.

3.4.3.9 – Pontos de retenção de ar

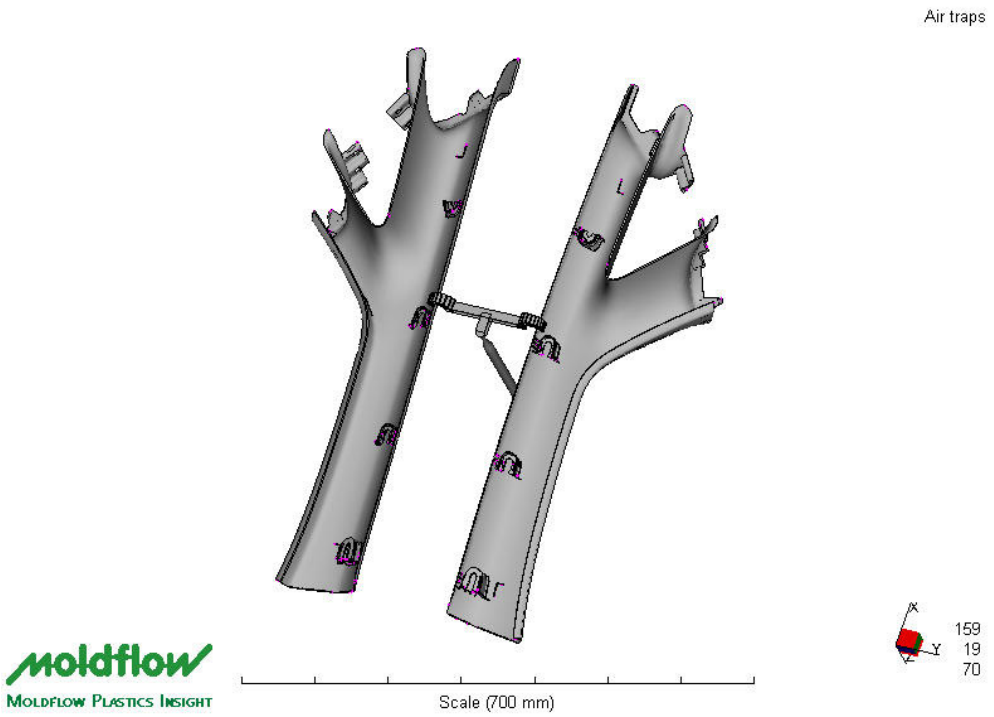


Figura 30 - Pontos de retenção de ar

Devido à complexidade da geometria da peça verifica-se que os pontos de retenção de ar se situam, na sua maior parte, na zona dos porta agrafos e cantos da peça. Isto acontece porque o fluxo vai-se deslocando ao longo da peça e se ao chegar as extremidades o ar não tiver por onde se escapar há formação de pontos de retenção de ar.

É nas zonas mais finas, ou nos últimos locais a serem cheios da peça onde se verifica a formação destas bolhas de ar, devido à sua difícil extracção nesses mesmos locais.

Para solucionar o problema de retenção dos pontos de ar, devem-se colocar escapes de gases para garantir o enchimento completo da peça.

3.4.3.10 – Linhas de união

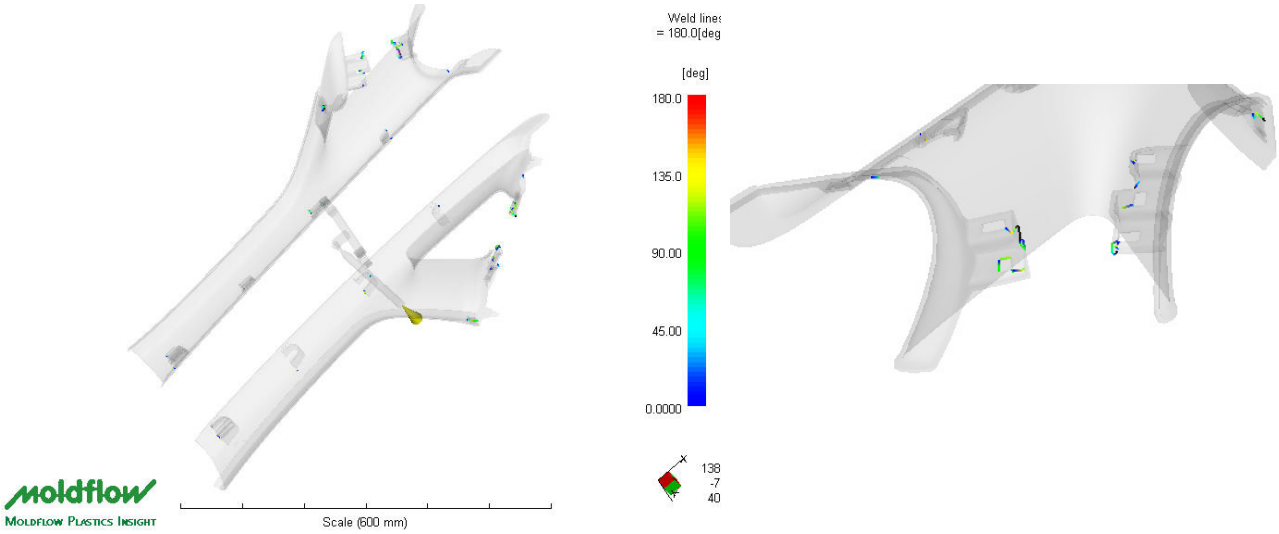


Figura 31 - Linhas de união

Pela análise da figura 31, verifica-se várias linhas de união na peça, pois trata-se de uma peça com uma geometria que origina a formação de linhas de união. Estas acontecem sempre que duas frentes de fluxo se encontram. O aparecimento das mesmas dá-se, por exemplo, quando a frente de fluxo se divide em duas para contornar uma zona de furos na peça e, na sua junção, dá-se a formação de uma linha de união.

As linhas de união, além de por vezes serem um defeito superficial não aceitável, tornam a peça frágil nessa zona, podendo dar-se a ruptura da mesma. Em zonas de furos as linhas de união são inevitáveis, sendo que, o que se tenta fazer nesses casos é disfarçar ou deslocar essa linha aumentando a espessura da peça em zonas estratégicas ou mudando a posição do ataque à peça.

3.4.3.11 – Pressão ao longo do ciclo de injecção

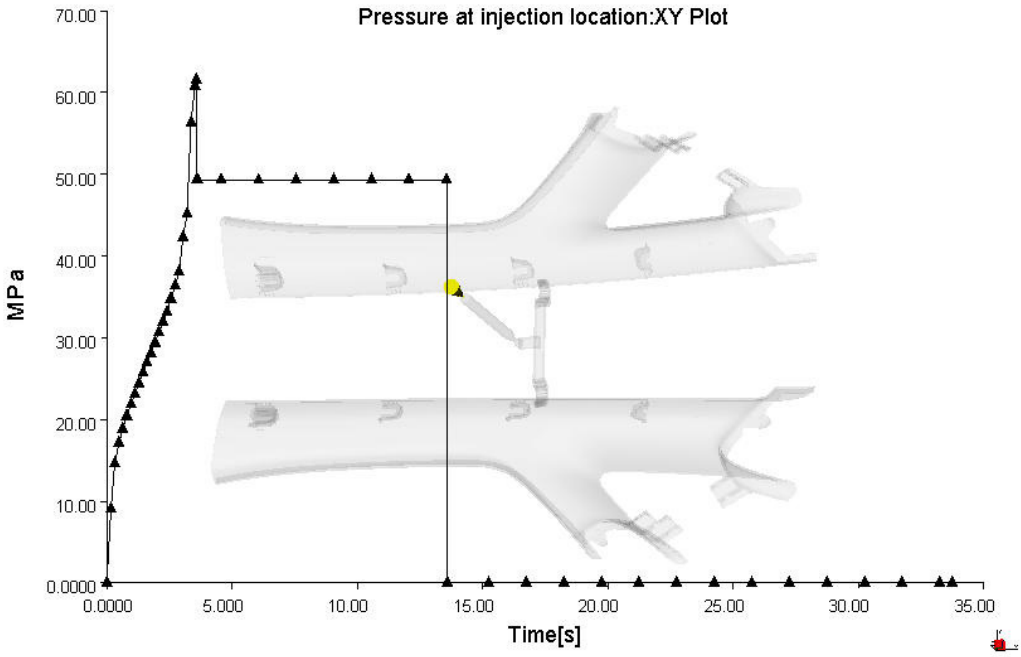


Figura 32 – Pressão de injecção ao longo do ciclo de injecção

Pelo gráfico, observa-se a variação da pressão ao longo do tempo de ciclo de injecção das peças. Como se verifica a pressão aumenta ao longo do enchimento, sendo a pressão máxima de cerca de 62 MPa. Após o enchimento dá-se a fase de compactação.

Entre a fase de enchimento e compactação dá-se a comutação onde 80% da pressão atingida no enchimento é usada na compactação durante 10 segundos do tempo de ciclo, sendo nesta fase a pressão aproximadamente de 50 MPa. Após a compactação temos a fase de arrefecimento onde a pressão é nula.

3.4.3.12 – Contracção volumétrica ao longo do ciclo de injecção

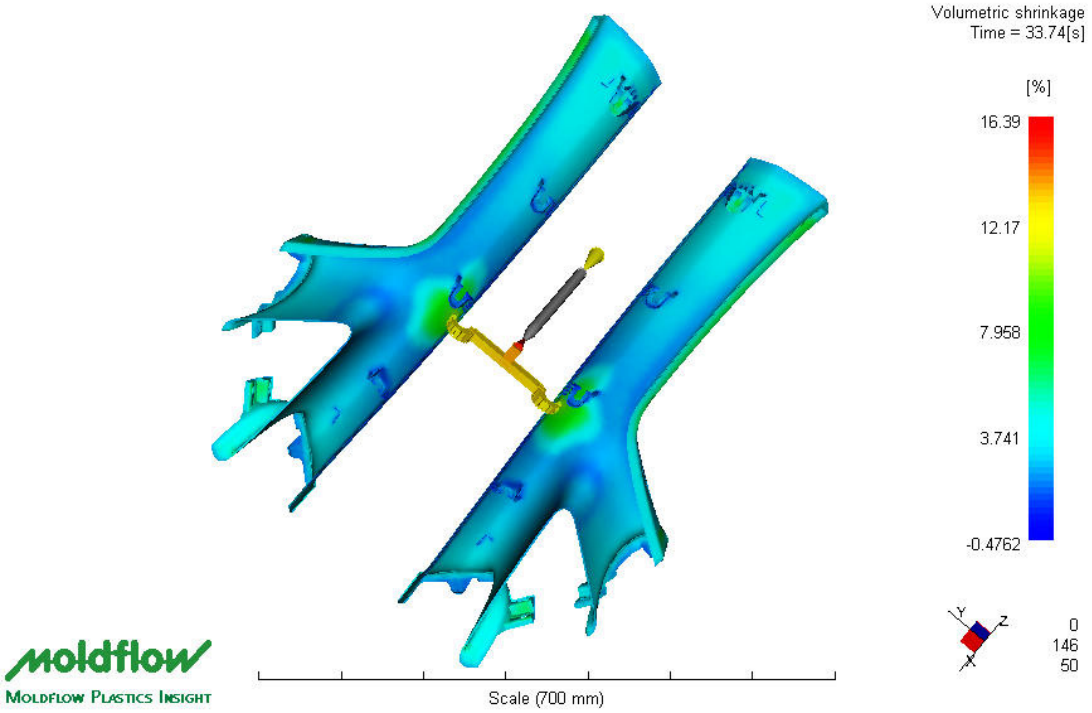


Figura 33 - Contracção volumétrica ao longo do ciclo de injecção

Verifica-se que existe maior contracção volumétrica nas zonas mais espessas da peça em relação às zonas mais finas que solidificam rapidamente não contraindo.

Como se verifica a peça não contrai uniformemente, apresentado valores muito altos relativamente aos apresentados pelo fornecedor do material A peça deve estar o mais uniforme, em termos de contracção. A contracção que a peça deve ter é cerca de 2,4% (este valor é cerca de 3x o valor da contracção linear do material).

A solução possível, além de se poder melhorar/redesenhar o sistema de alimentação, que não pode ser alterado, pode-se sim aumentar a 2ª pressão para diminuir a contracção longe do ponto de injecção. Neste caso pretende-se diminuir a contracção perto da zona de injecção, para isso cria-se um patamar ao fim da pressão de comutação, aumentando o tempo de aplicação da segunda pressão para a pressão ir a zero o mais linear possível.

3.4.3.12.1 – Análise se resultados

Para obter melhores resultados mexeu-se na janela de processamento, aumentando o tempo de aplicação da segunda pressão. As condições óptimas para melhorar a contracção estão referidas a seguir.

Tabela 12 - Condições de processamento para melhorar a contração

Temperatura do molde	17 ºC
Temperatura do fundido	240 ºC
Tempo de abertura do molde	5 s
Tempo de injecção+compactação+arrefecimento	45 s
Caudal	272 cm^3/s
2ª pressão	80 % da inicial
Tempo de aplicação da 2ª pressão	17 s

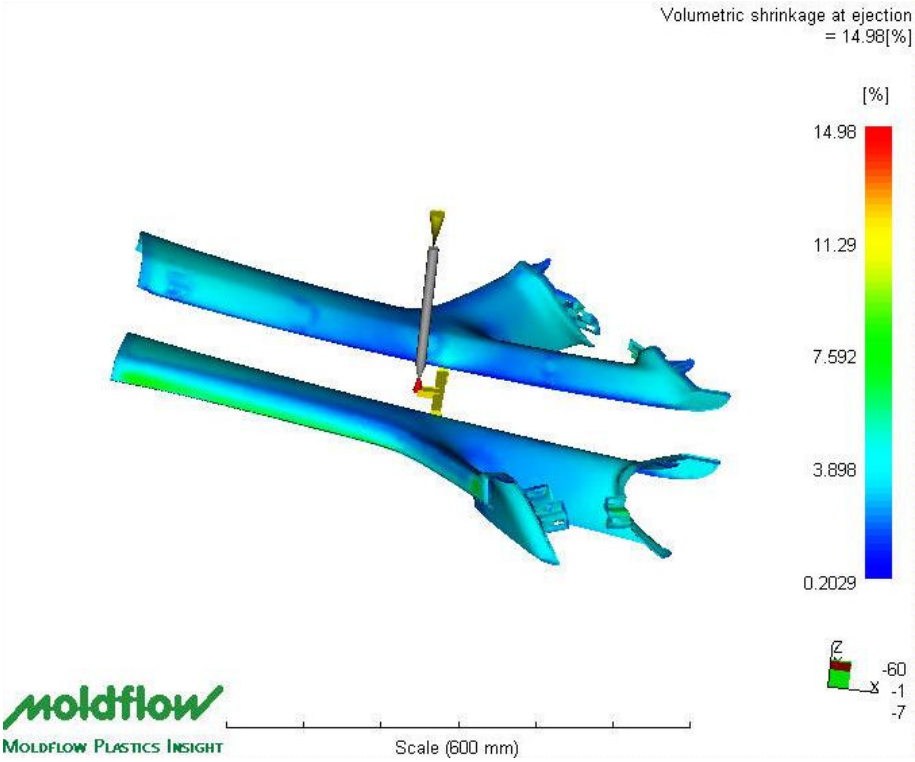


Figura 34 - Contracção volumétrica ao longo do ciclo de injecção com as novas condições de processamento

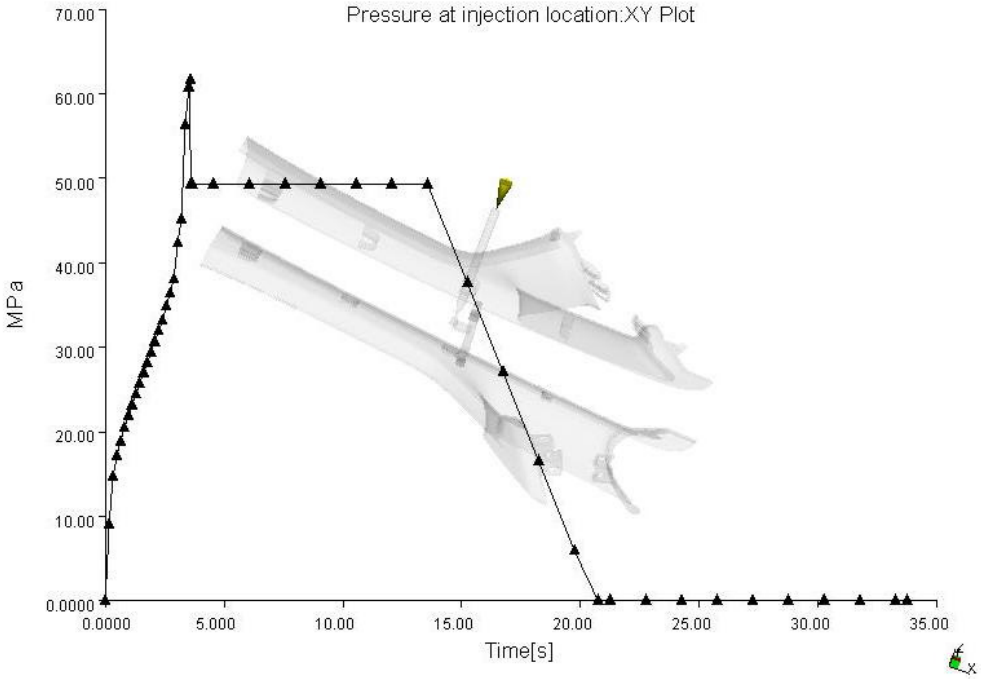


Figura 35 - Pressão de injecção com as novas condições de processamento

Através desta alteração nas condições de processamento verifica-se que se conseguiu melhorar a contracção relativamente as condições referidas anteriormente. Verifica-se que a contracção diminuiu perto do sistema de alimentação. As zonas representadas a verde apresentam valores de contracção altos por serem locais da peça com uma espessura mais elevada relativamente ao resto da peça.

Pode-se dizer que a peça no seu geral está dentro dos limites de contracção, cerca de 2,4%.

3.4.3.13 – Peso das cavidades em percentagem

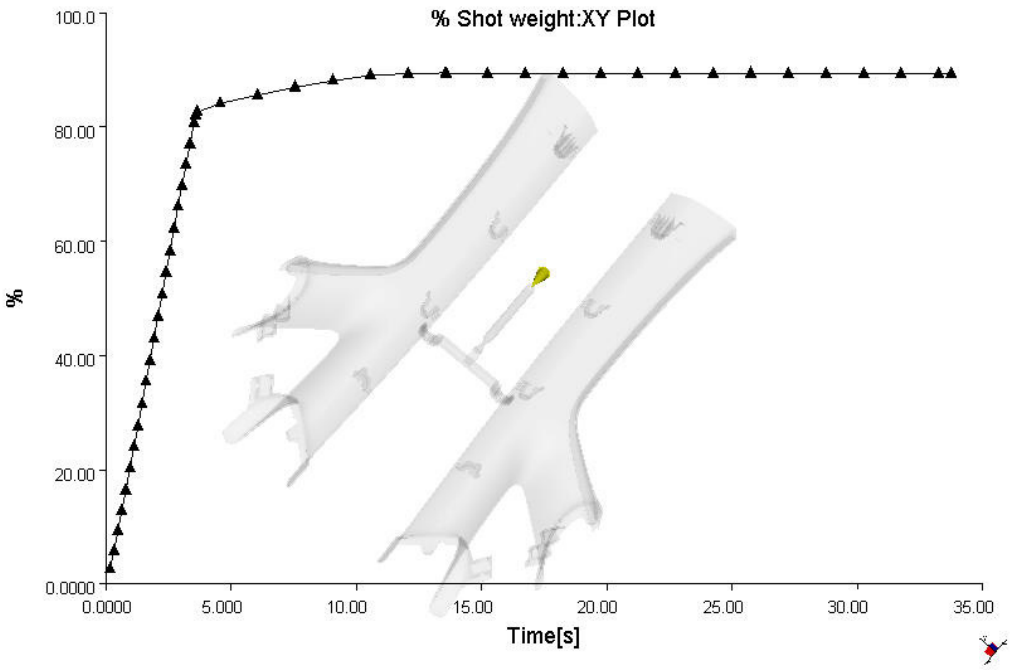


Figura 36 - Peso das cavidades em percentagem

Como se verifica pelo gráfico, com o decorrer do tempo de ciclo, o peso das peças vai aumentando em percentagem. Ou seja, quando a curva do gráfico atinge os 100% a peça está completamente cheia. Os 100% não foram atingidos devido à contracção da peça.

Como se pode ver pelo gráfico, o peso aumenta na fase de enchimento pois está a entrar material para a peça. Na fase de compactação aumenta mais um pouco pois continua a encher a peça para compensar a contracção do material. No entanto, provavelmente divido à solidificação do material no ataque, não se consegue injectar mais material para dentro da peça pelo que existe uma contracção de cerca de 16% como verificado anteriormente. Daí pelo gráfico se visualiza que apenas 84% da peça está devidamente cheia sem contracção.

Como solução poderia colocar-se mais ataques, aumentar a pressão de injecção ou trocar de material para que arrefeça mais lentamente.

De notar que, em qualquer peça existe sempre contracção volumétrica, não se conseguindo assim peças 100% cheias.

3.4.3.14 – Orientação do material no núcleo e na casca

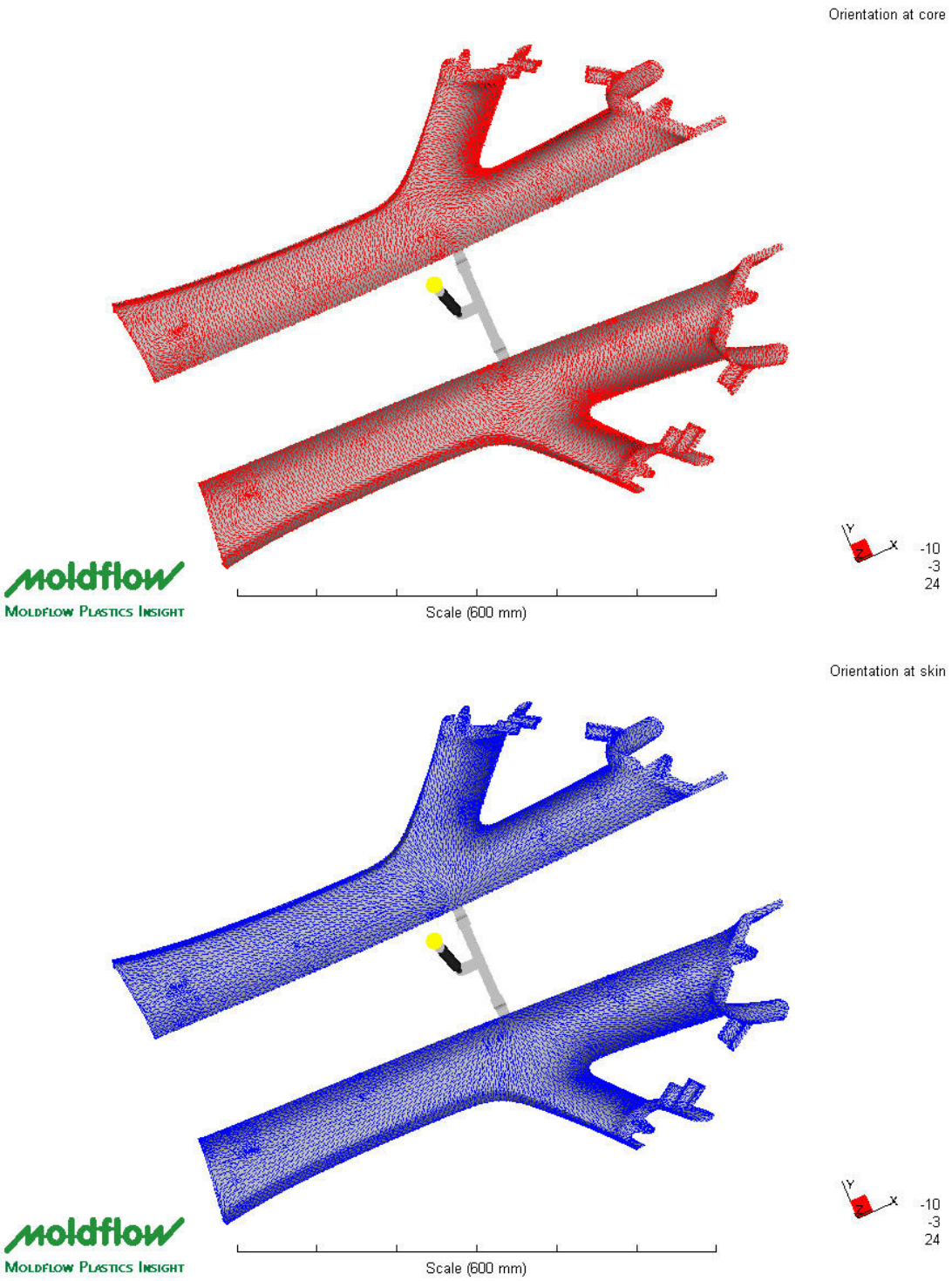


Figura 37 - Orientação do material no núcleo e na casca

A orientação das moléculas no núcleo, representado a vermelho é transversal ao deslocamento do fluxo, ou seja, é perpendicular ao vector velocidade. Isto indica como as moléculas estão orientadas na peça. A orientação das moléculas influencia a contracção da peça.

A orientação na direcção da casca, representado a azul, dá-se na direcção do vector velocidade, ou seja, paralela à deslocação do fluxo na peça.

Como o material usado contem talco, a contracção na direcção do núcleo é maior que na direcção da casca.

3.4.3.15 – Caudal

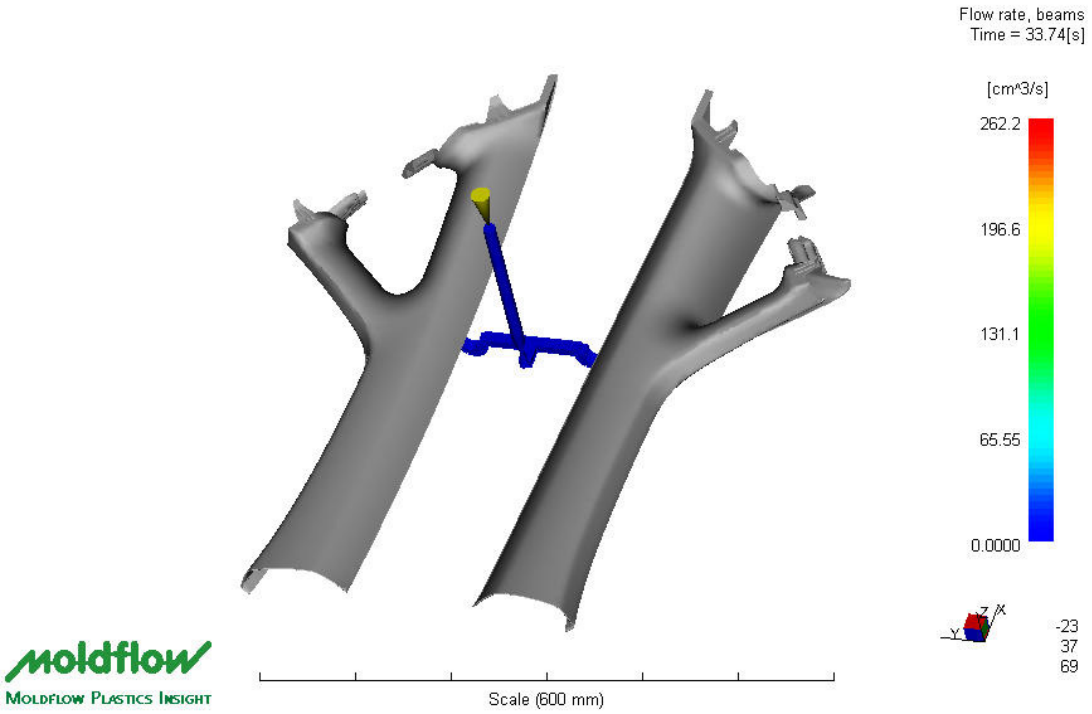


Figura 38 – Caudal

Verifica-se que o caudal que garante o enchimento das cavidades é de 262,2 cm^3/s. O caudal é máximo no sistema de alimentação devido à elevada pressão e velocidade de injecção nesta zona pois trata-se da primeira zona por onde passa o material fundido e vai diminuindo até à fase de compactação, nesta fase baixa ainda mais e quando o ataque solidifica, ou seja, não entra mais material para a peça, o caudal é nulo.

Este caudal garante o enchimento das cavidades para as pressões e tempo de injecção especificados atrás.

3.4.3.16 – Temperatura máxima na peça ao longo da espessura

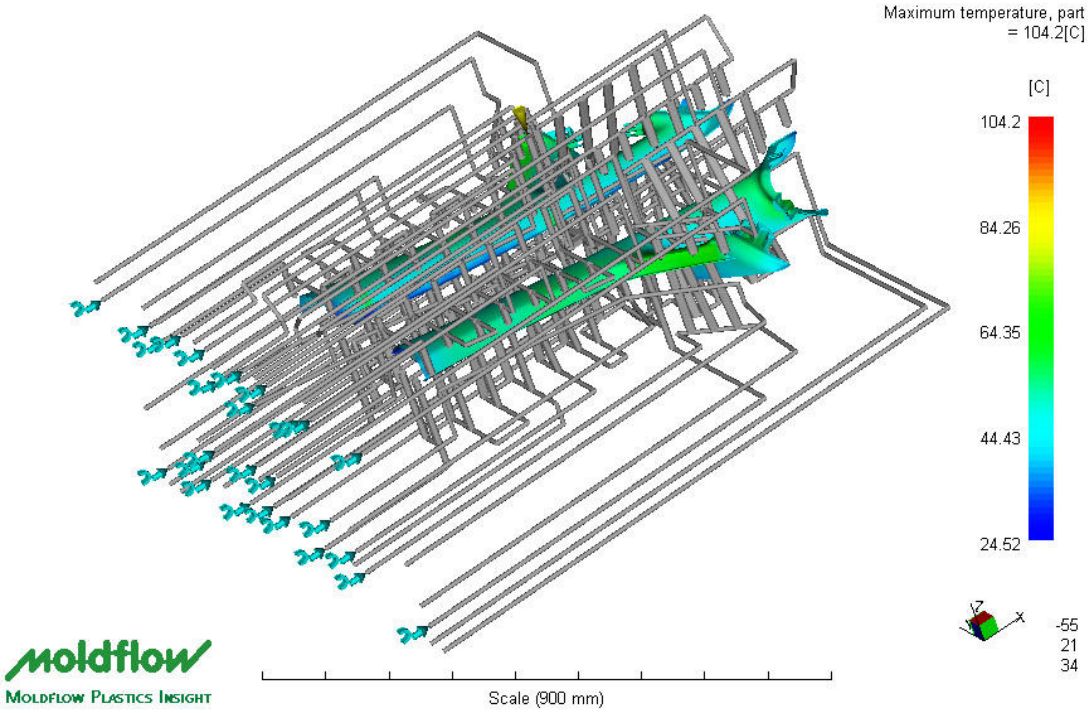


Figura 39 - Temperatura máxima na peça ao longo da espessura

Para o tempo de ciclo imposto (45 segundos) a temperatura da peça na altura da extracção na sua zona mais espessa é de 104,2 ºC. como a temperatura de ejecção máxima para este material é de 108ºC (especificação do fabricante) pode-se extrair a peça nestas condições.

No entanto, esta temperatura deveria ser o mais uniforme possível pois a não uniformidade no arrefecimento leva ao empeno da peça, como se verá mais à frente.

3.4.3.17 – Tempo de arrefecimento

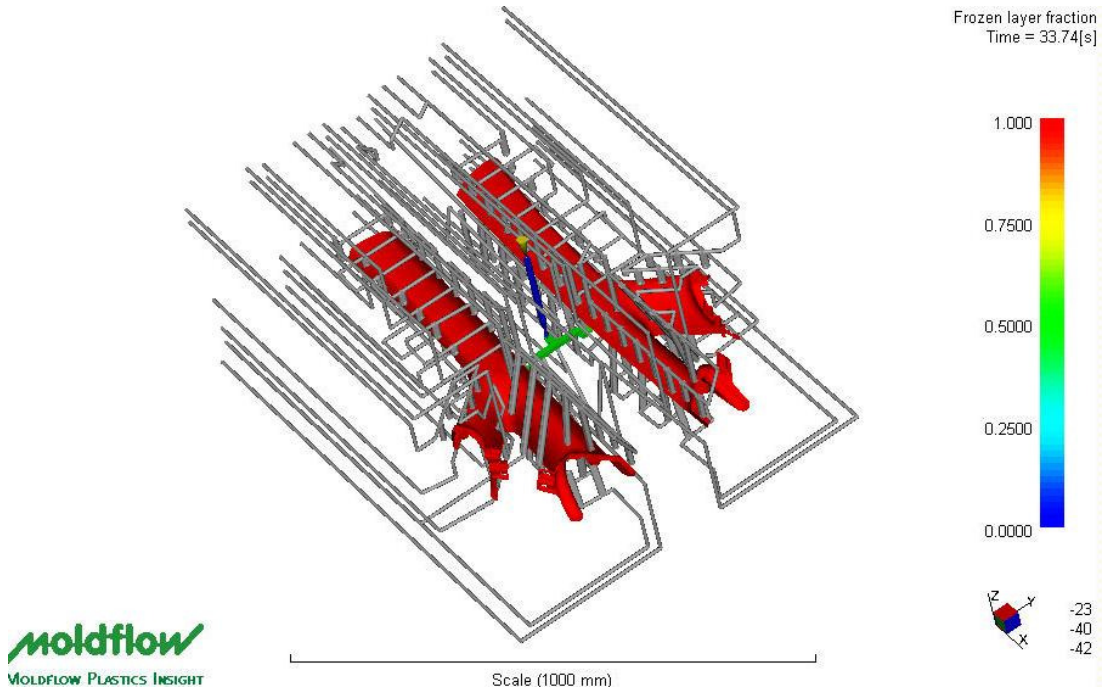


Figura 40 - Tempo de arrefecimento

Verifica-se que para arrefecer a peça é necessário 33,74 segundos (tempo desde que se começa a injectar a peça até à extracção sem abertura e fecho do molde).

A peça começa a arrefecer quando o material fundido encontra as paredes frias do molde, começando a arrefecer pelas partes mais finas da peça e pela última zona da peça a encher (zona onde o fundido chega a temperatura mais baixa).

3.4.3.18 – Temperatura da água no sistema de refrigeração

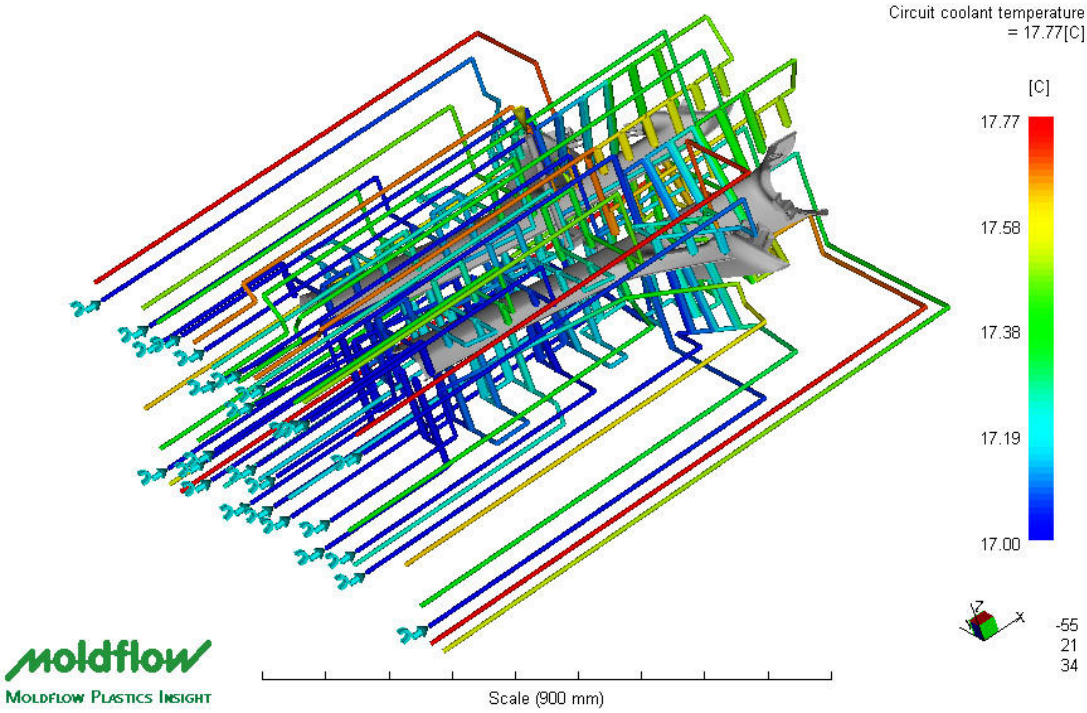


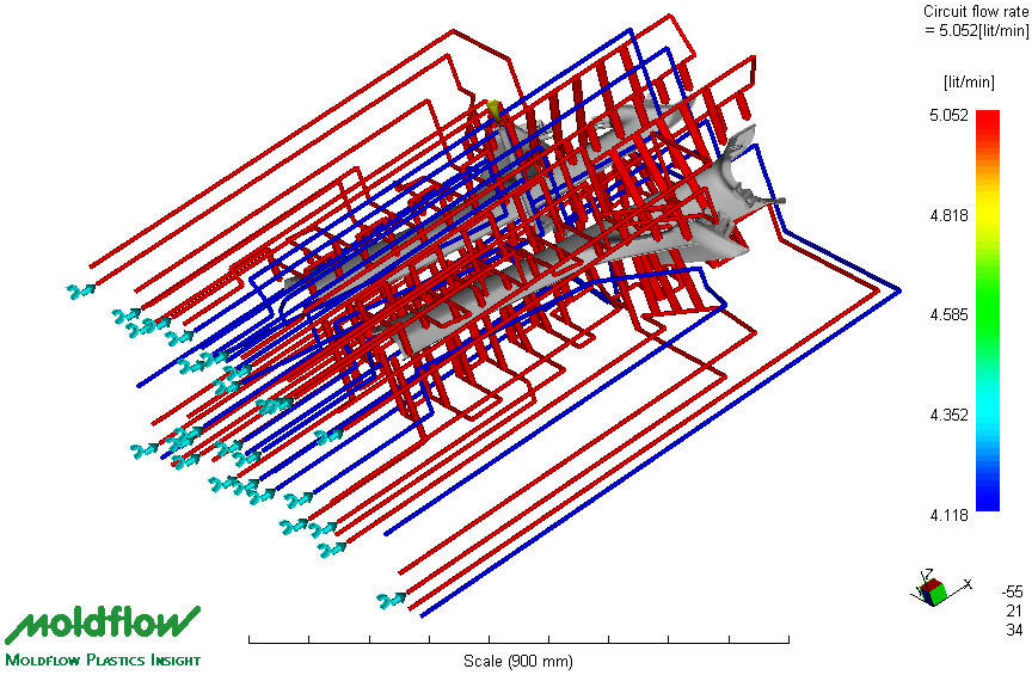
Figura 41 - Temperatura da água no sistema de refrigeração

Pode-se verificar as entradas e saídas de água e constata-se que a água está sempre mais fria na entrada dos canais de refrigeração e mais quente no fim destes canais. Ou seja, esta vai aquecendo se o caminho a percorrer for longo, não podendo esta aquecer mais de 3ºC.

As causas para o aquecimento da água devem-se ao referido longo caminho a percorrer pela água e devido à transferência de calor da peça para a água.

No início do canal a água encontra-se a 17ºC e no fim do canal a água está a 17,77ºC, ou seja, não excedendo os 3ºC admissíveis.

3.4.3.19 – Caudal no sistema de refrigeração e número de Reynolds



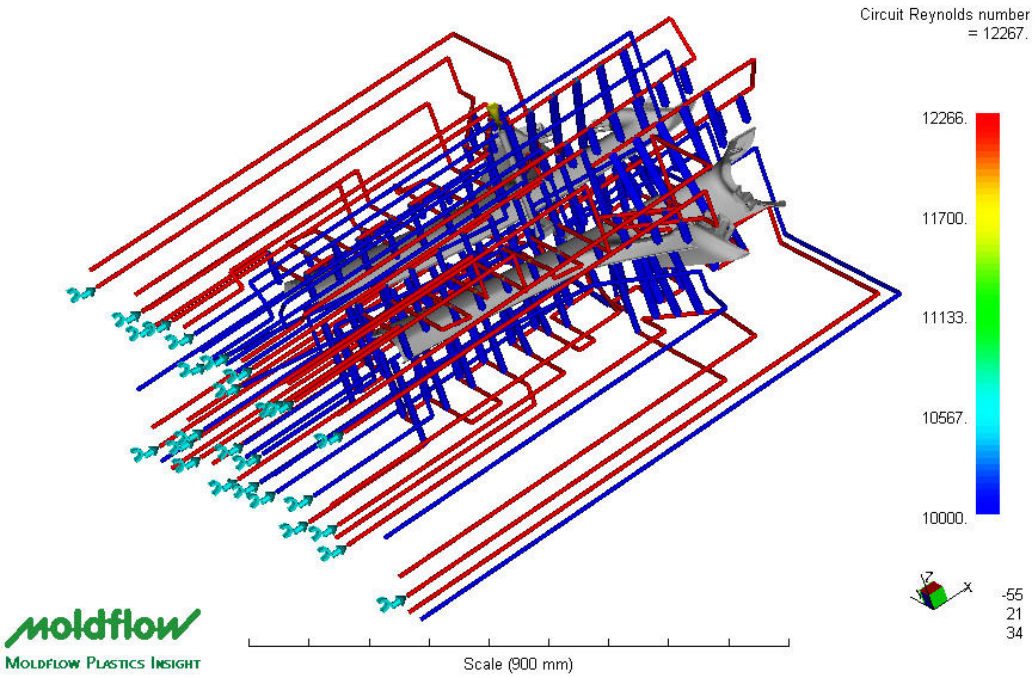


Figura 42 - Caudal no sistema de refrigeração e número de Reynolds

O caudal deve garantir um número de Reynolds com a mínima variação possível.

Assim para garantir que o regime seja turbulento é que tenha uma boa eficiência, o número de *Reynolds* no Moldflow deve ser superior a 10000. Verifica-se assim que este intervalo está garantido e o caudal para o número de *Reynolds* verificado na figura 42 é de 5,05 l/min de líquido arrefecedor, que neste caso é a água.

3.4.3.20 – Temperatura na interface água-aço

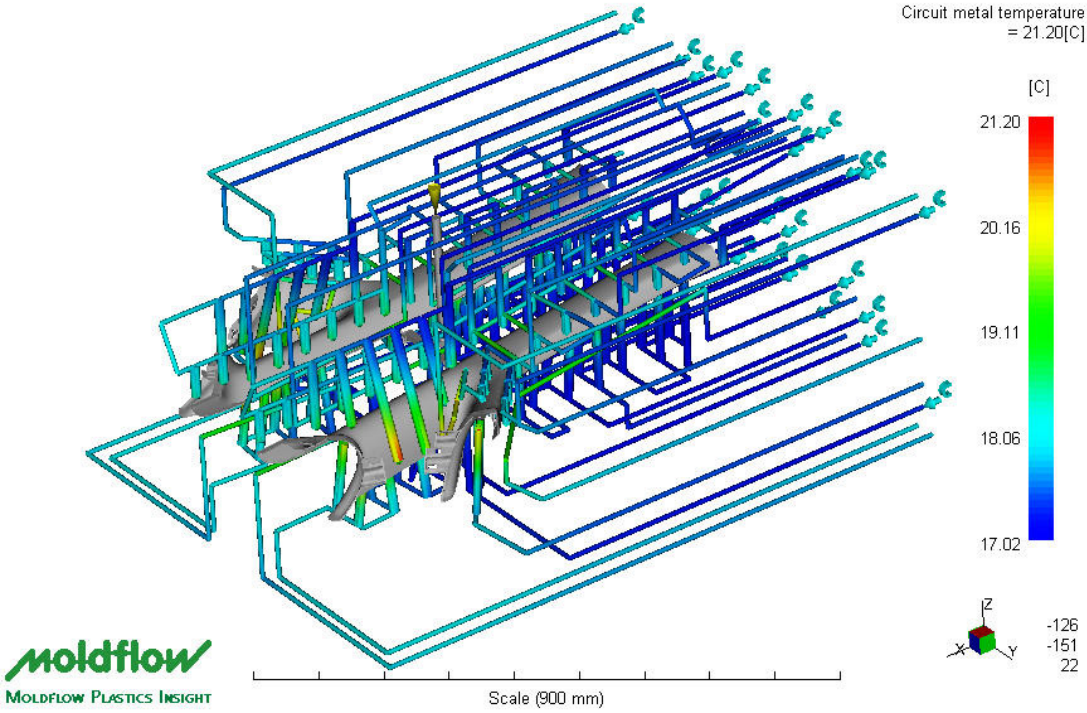


Figura 43 - Temperatura na interface água-aço

Verifica-se que a temperatura na interface água-aço dos canais de refrigeração é maior nas zonas mais próximas das peças (*baffles*). Esta temperatura é menor na entrada da água (cerca de 17,02ºC), aumenta para 21ºC nos canais junto a peça e volta a diminuir na saída da água dos canais (cerca de 18ºC).

3.4.3.21 – Deflexão

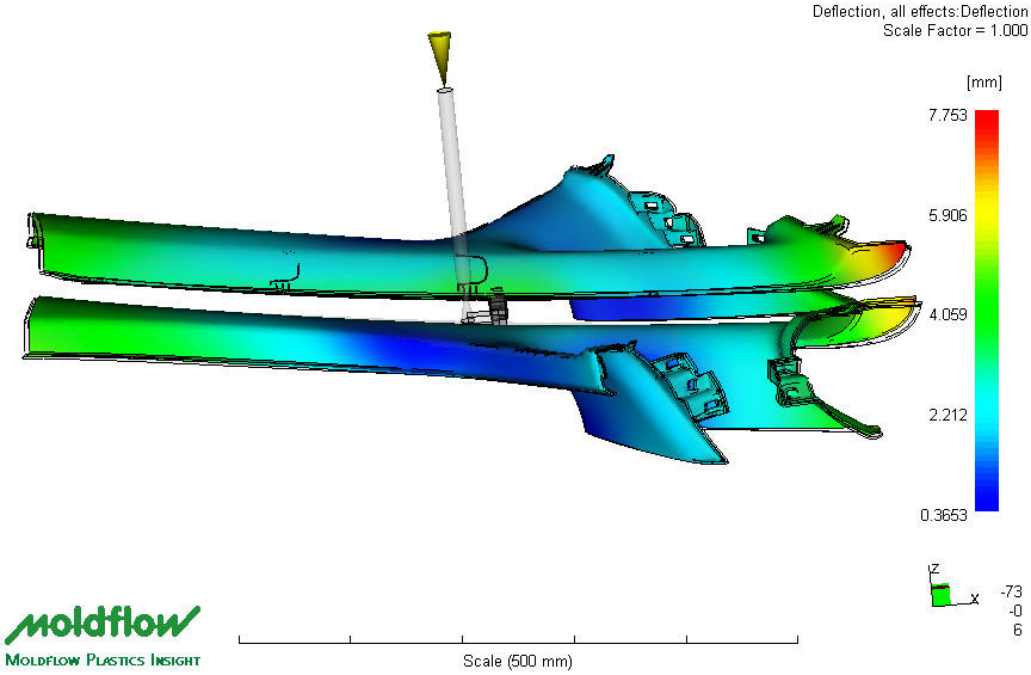


Figura 44 - Deflexão total na peça

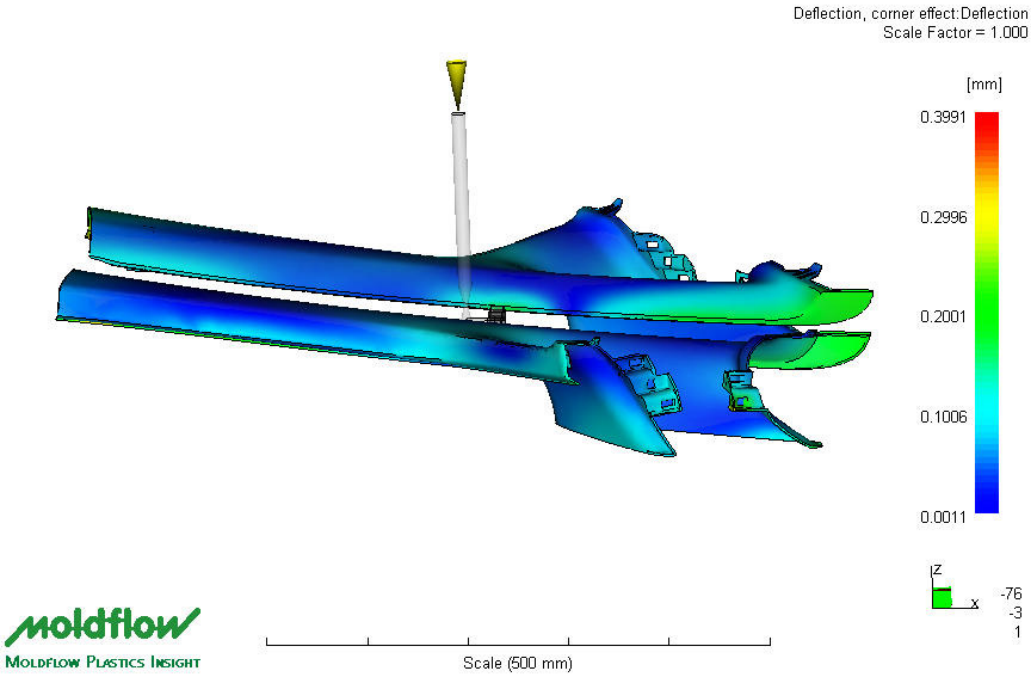


Figura 45 - Deflexão causada pelo efeito canto

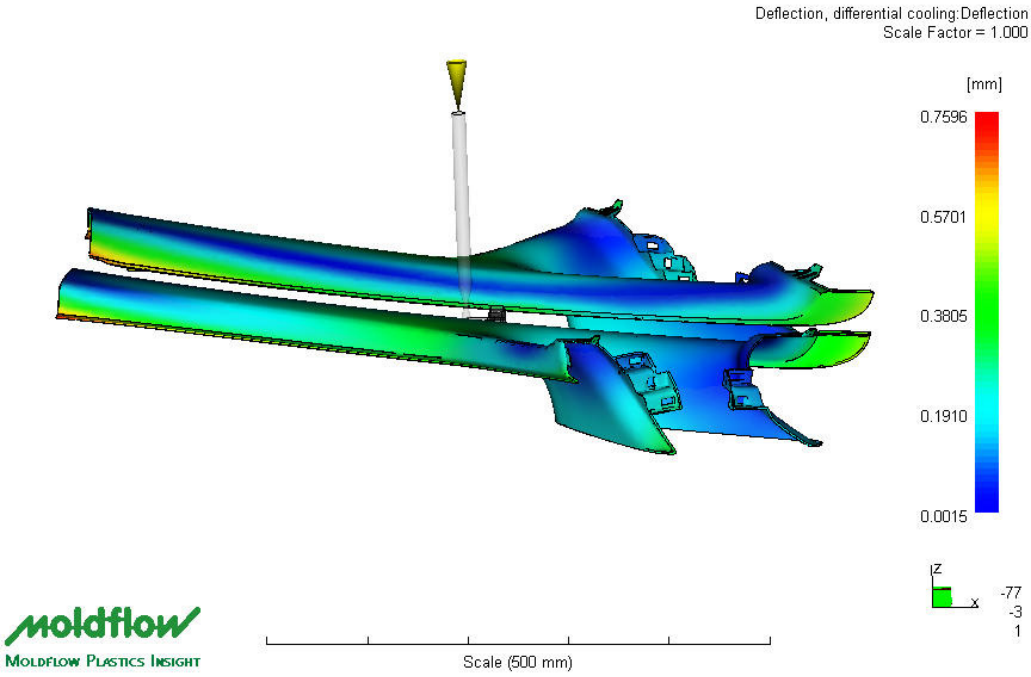


Figura 46 - Deflexão causada pelo arrefecimento

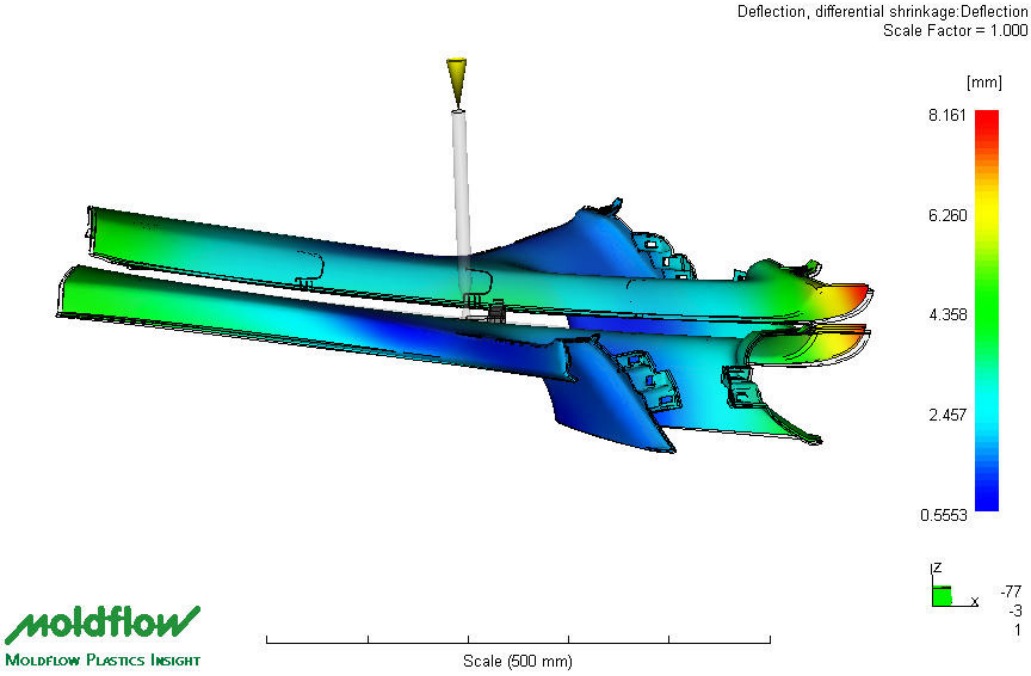


Figura 47 - Deflexão causada pela contracção

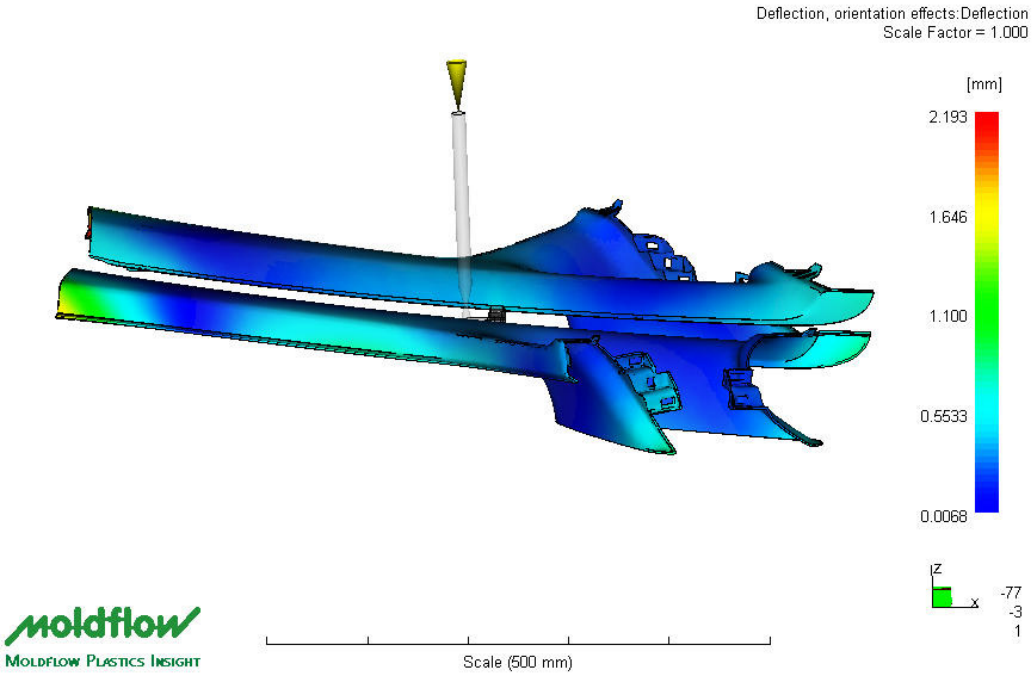


Figura 48 - Deflexão causada pela orientação

O empeno total é o resultado da soma de quatro factores principais responsáveis pelo empeno das peças em cada nó: contracção, arrefecimento, efeito canto e orientação do material.

Interessa perceber qual destes factores é o principal responsável pelo empeno das peças. Poderia ser feita uma análise mais pormenorizada, ou seja, verificar a contribuição de cada um destes factores no empeno segundo, x, y ou z. No entanto, será feita uma abordagem geral, verificando-se que a contracção excessiva do material é a principal responsável para o empeno das peças, seguida do arrefecimento, efeito canto e por fim a orientação.

Para solucionar este problema ter-se-ia que aplicar soluções para minimizar a contracção do material. Para reduzir o empeno devido à contracção existem três soluções principais:

- alterar as condições de compactação:
  - maior pressão durante mais tempo possível;
  - reduzir variações de espessura na peça;
  - usar postiços de cobre e berílio ou de um outro material com elevada condutividade térmica;
- como a refrigeração é também um dos aspectos que contribui para o empeno da peça, poder-se-ia:

    - alterar o layout de refrigeração;
    - usar postiços de cobre e berílio;
    - alterar a temperatura de entrada de água;
- no caso da orientação do material, para reduzir o efeito da orientação existem três pontos principais:
    - condições de processamento: é possível reduzir a orientação alterando as condições de processamento (temperatura do molde, temperatura do fundido, velocidade de injecção);
    - espessura da peça;
    - ponto de injecção: se a alteração das condições de processamento não forem as suficientes para reduzir a orientação, tem-se que optar por alterar a posição do ponto de injecção ou alterar a espessura.

3.5 – Comparação de resultados

3.5.1 – Para o sistema de alimentação

Tabela 13 - Dimensões dos canais de alimentação calculados teoricamente

	Nome	Secção	Diâmetro	Altura	Largura
Canais frios	Canal primário e secundário	Circular	12 mm		
	Ataque	Fenda (variável)		1,3 mm	6 mm

Tabela 14 - Dimensões dos canais de alimentação usados no Moldflow

	Nome	Secção	Diâmetro	Altura	Largura	Comprimento
Canais frios	Canal frio primário	Trapezoidal		10 mm	14 mm 13 mm	20 mm
	Canal frio secundário	Trapezoidal		10 mm	13 mm 12 mm	106 mm
	Ataque	Fenda (variável)		1 mm	10mm	

Através do estudo teórico baseado em formulações empíricas conseguiu-se uma boa aproximação entre alguns valores calculados e os valores para os quais foram dimensionados os canais no Moldflow.

Os valores encontrados teoricamente para os canais de alimentação, apesar de serem para um canal circular, assemelham-se aos usados no Moldflow, uma vez que um canal trapezoidal com a passagem do fundido assemelha-se a um canal de secção circular. Em relação ao ataque, o valor usado no Moldflow é inferior para permitir uma boa separação do ataque da peça.

Um dos aspectos importantes a ter em conta é o comprimento dos canais. Embora teoricamente sejam encontrados valores para os seus diâmetros, não foram calculados valores para os comprimentos dos mesmos.

Outro aspecto importante é o facto de os canais terem que garantir a passagem do caudal necessário para um bom enchimento da moldação.

3.5.2 – Para o sistema de refrigeração

Tabela 15 - Dimensões dos canais de refrigeração calculados teóricamente

Constituintes	Diâmetro (mm)
Canal	15,45

Tabela 16 - Dimensões dos canais de refrigeração usadas no Moldflow

Constituintes	Diâmetro (mm)
Canal	8
Baffle	12

Pelos cálculos teóricos efectuados, obtêm-se um diâmetro de 15,45 mm para os canais de refrigeração, que garante que o regime seja turbulento para uma melhor eficiência na dissipação do calor.

No Moldflow, o número ideal de *Reynolds* imposto para que garanta que o regime seja turbulento é de 10000. O diâmetro que satisfaz esta condição é de 8 mm.

3.5.3 – Condições de processamento

Tabela 17 - Condições de processamento

	Calculadas	Moldflow
Tempo de injecção	2,51 s	3,65 s
Caudal	272,31 cm^3/s	262 cm^3/s

Verifica-se que o caudal calculado teoricamente, necessário para encher as cavidades pouco diferencia do caudal dado pelo Moldflow. O tempo de injecção teórico é relativamente mais baixo do que o do Moldflow, porque o caudal teórico é relativamente mais alto, no entanto o tempo necessário para garantir o enchimento da cavidade é de 3,65 segundos.

4 - Ensaio ao Molde

Após várias simulações feitas em Moldflow e de optimizadas as condições ideais de processamento o molde foi a ensaio. Como se vai verificar os valores optimizados no Moldflow, não são aplicados totalmente na prática, ou seja, tendo-se as condições ideais optimizadas no Moldflow são enviadas para ensaio, com elas a máquina é ajustada relativamente à peça de maneira a obter peças com as melhores condições.

4.1 – Condições de Processamento

Foram realizados vários ensaios, os quais não foi possível acompanhar na sua totalidade. De seguida são apresentadas as principais condições de processamento utilizadas no último ensaio ao molde. Ou seja são apresentadas as condições de processamento que permitirão a produção de peças finais a serem entregues ao cliente.

As condições de processamento utilizadas no ensaio foram as seguintes:

Tabela 18 - Condições de processamento usadas no ensaio

Condições de processamento		
Tempos (s)	Ciclo	60
	Injecção	5
	Arrefecimento	15
	Aplicação da segunda pressão	7
Pressões (bar)	1ª pressão	115
	2ª pressão	42
	Contra-pressão	15
Força de fecho (ton)	800	
Plastificação(mm)	100	
Comutação(mm)	23	
Almofada (mm)	19,5	
Temperatura do molde (ºC)	Cavidade	17
	Macho	17

4.2 – Defeitos apresentados nas peças

Depois de realizados ensaios ao molde, a peça em questão apresentava alguns defeitos visíveis mas que não influenciavam o desempenho desta. Esta peça foi submetida a testes de validação da sua qualidade e foi aceite pelo que estes defeitos são aceites pelo cliente.

Em seguida, são descritos os defeitos presentes nestas peças bem como possíveis causas para a sua ocorrência.

a) Tolerância do movimento

Figura 49 – Tolerância do movimento

A moldação possui uma rebarba de material sob a forma de uma linha, nas linhas de união, neste caso devida a movimentos existentes nesta zona.

Para evitar o aparecimento deste defeito deve-se verificar os desalinhamentos dos movimentos e ajustar/afiná-los de modo a não raspar na peça na sua abertura. Também poder-se-ia baixar a pressão de injecção e/ou fazer a comutação mais cedo, diminuir o tempo de pressurização e diminuir a velocidade de injecção.

b) Empeno

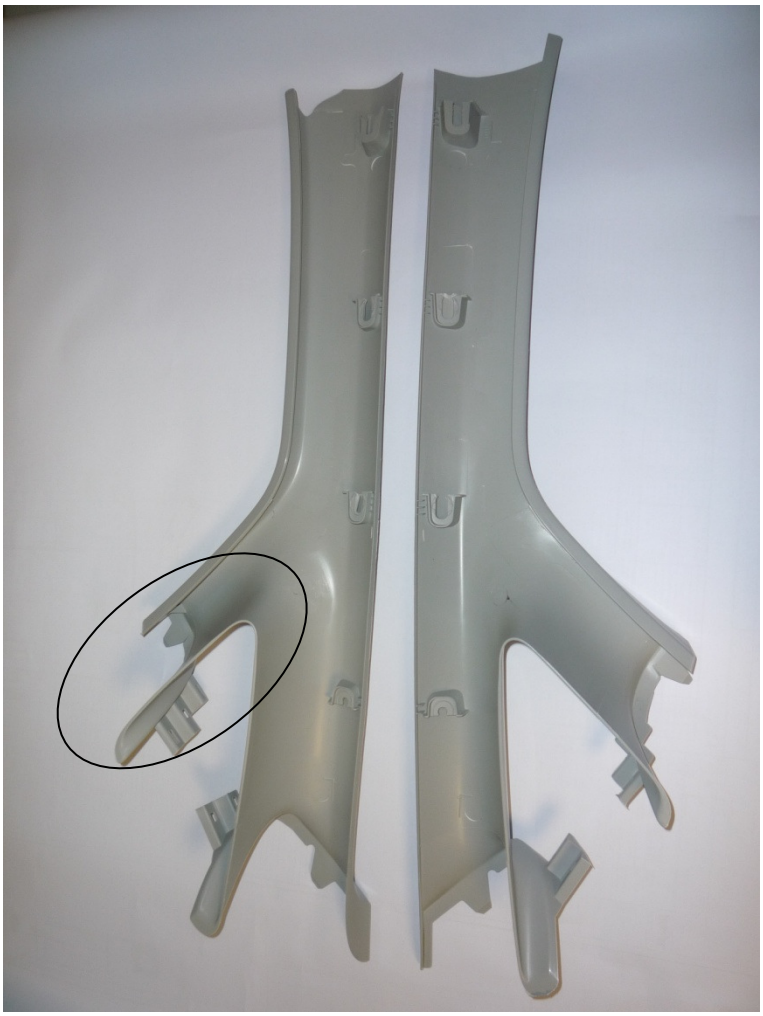


Figura 50 - Defeito de empeno

A peça apresenta empenos se em relação á cavidade se apresenta distorcida.

O empeno apresentado pela peça provavelmente deve-se a um relaxamento de tensões internas excessivo ou então ao deslocamento radial do fluxo. Para atenuar este empeno poder-se-ia diminuir a pressão de injecção, diminuir o tempo de pressurização, arrefecer a moldação lentamente em água morna imediatamente após a extracção da peça, principalmente para peças espessas, aumentar a temperatura do fundido, colocar as peças sob formas ou gabaris após extracção, aumentar o caudal do fluido arrefecedor, se necessário usar diferentes temperaturas em cada metade do molde, colocar o ataque na zona mais espessa da peça, mudar a posição/geometria do ataque, aumentar o diâmetro dos alimentadores ou do jito ou verificar se existem desalinhamentos cavidade/bucha.

c) chupados

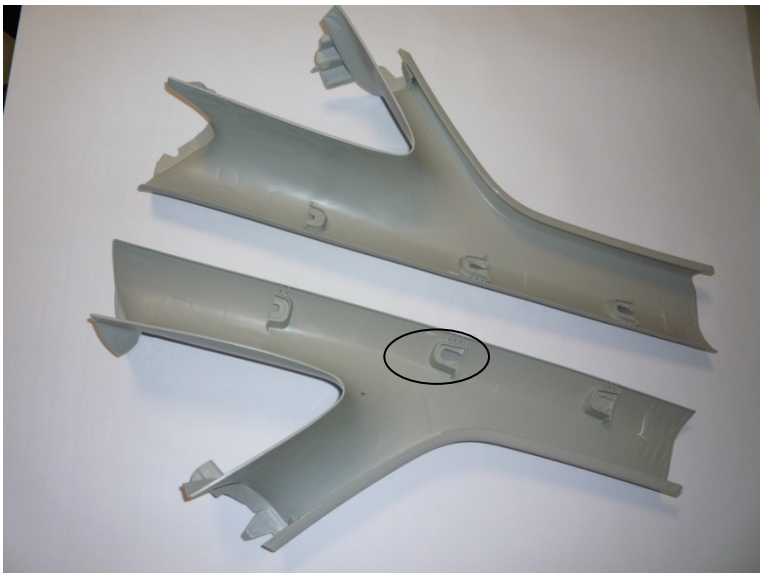


Figura 51 - Defeito chupado

Chupados são marcas superficiais na peça que surgem do lado oposto às nervuras, onde a acumulação de material é mais intensa, devido à contracção excessiva e não uniforme do material ao longo da espessura.

Neste caso, a peça apresenta uma espessura bastante superior, na zona representada na imagem acima, em relação ao resto da peça. Com o aumento da espessura naquela zona levou à formação de um chupado.

Para atenuar o aparecimento deste defeito superficial poder-se-ia aumentar a dosagem, aumentar a pressão de injecção e/ou 2ª pressão, aumentar o tempo de pressurização, assegurar que se está a usar a almofada de material correcta, verificar a válvula de não retorno porque o seu desgaste resulta numa perda de pressão, ajustar a temperatura do cilindro, aumentar o diâmetro dos alimentadores ou secção de ataque, diminuir a temperatura do molde, arrefecer a peça em água morna imediatamente após extracção, tornar o arrefecimento do molde mais eficaz de modo a manter a temperatura na superfície do molde uniforme ou redimensionar o sistema de alimentação.

d) Moldação incompleta (“Ratado”)

Figura 52 - Defeito moldação incompleta

Este efeito acontece quando não existe o completo balanceamento da cavidade. Este tipo de defeito geralmente acontece longe do ponto de injecção, má maquinação ao nível do sistema de alimentação e ataques e espessura da moldação.

Para evitar este defeito a maquinagem das duas cavidades tem de ser feita com o mesmo rigor de modo a permitir um enchimento balanceado.

É de tomar em consideração que alguns defeitos, como chupados, podem ser vistos a olho nu e notar-se mais numas peças relativamente a outras consoante as cores da peça.

No processamento de peças em plástico muitas alterações poderiam ser feitas nos moldes a fim de se obter peças com melhor qualidade, no entanto, para a indústria o que interessa é a aprovação das peças. O tempo e o custo são aspectos a ter em atenção, porque quanto menor for o tempo e o custo dispendido maior é o ganho para a empresa e satisfação do cliente.

5 - Discussão dos resultados

5.1 – Comparação entre as condições de processamento calculadas, usadas em Moldflow e as usadas em ensaio

Tabela 19 - Condições de processamento usadas no Moldflow

Temperatura do molde	17 ºC
Temperatura do fundido	240 ºC
Tempo de abertura do molde	5 s
Tempo de injecção+compactação+arrefecimento	45 s
1ª Pressão	62 MPa
2ª Pressão	80% da 1ª = 50 MPa
Tempo de aplicação da 2ª pressão	10 s
Tempo de injecção	3,65 s
Caudal	262 cm^3/s
Força de fecho	762 T

Tabela 20 - Condições de processamento usadas no ensaio

Condições de processamento		
Tempos (s)	Ciclo	60
	Injecção	5
	Arrefecimento	15
	Aplicação da segunda pressão	7
Pressões (bar)	1ª pressão	115
	2ª pressão	42
	Contra-pressão	15
Força de fecho (ton)	800	

Plastificação(mm)	100	
Comutação(mm)	23	
Almofada (mm)	19,5	
Temperatura do molde (ºC)	Cavidade	17
	Macho	17

No ensaio o tempo utilizado foi de 5 segundos. Este valor deve-se ao facto de no Moldflow não ser possível ver defeitos superficiais como manchas ou raiados. Quando se injecta com tempos de injecção mais baixos, utiliza-se por norma, uma velocidade de injecção maior, o tempo de arrefecimento será menor e em contrapartida os tempos de ciclo são mais baixos. No entanto esta velocidade de injecção elevada pode provocar o efeito jacto, manchas ou raiados nas peças. Por este motivo, na realização de ensaios e posteriormente na produção das peças se usem tempos mais elevados.

Relativamente à força de fecho segundo o Moldflow era necessário uma máquina que garantisse uma força de fecho de 762 toneladas e no ensaio foi usada uma de 800 toneladas para que a força de fecho fosse garantida. Para reduzir a força de fecho pode-se aumentar o tempo de injecção. Aparentemente existe uma contradição nos resultados apresentados pois, segundo o Moldflow são necessários 3,65 segundos para o enchimento e a força de fecho de 762 toneladas e no ensaio com um tempo de enchimento de 5 segundos e uma força de fecho de 800 toneladas, quando segundo a afirmação anterior não deveria ser. Isto deve-se ao facto de o processo de injecção ser um processo bastante complexo e que envolve um conjunto de variáveis que dependem uma das outras. A alteração de uma implica a alteração das restantes, ou seja, influência os resultados finais.

Neste caso, a justificação possível é a utilização de pressões de injecção superiores, tanto a 1ª como a 2ª pressão relativamente às usadas na análise em Moldflow. Quanto mais elevada for a pressão, maior a força de fecho necessária.

Além disso há aspectos que transcendem o uso do software como o estado em que se encontra o parafuso, a idade da máquina a sensibilidade do operador e a calibração da máquina de injecção.

6 – Conclusão

A qualidade das peças injectas está sobretudo relacionada com os materiais poliméricos, com a concepção do molde e com os parâmetros de injecção. O material polimérico e o *design* do molde são muitas vezes dados específicos e não podem ser alterados, os parâmetros de injecção representam o factor mais importante, pois são eles que determinam a boa qualidade das peças injectadas. Devido à dependência entre a qualidade das peças e os parâmetros de injecção, é importante ajustá-los com o objectivo de eficientemente obter peças sãs. A configuração destes parâmetros é um desafio uma vez que os parâmetros de injecção interagem uns com os outros e um defeito pode estar relacionado com vários parâmetros em simultâneo.

Este trabalho teve como objectivo a optimização das condições de processamento de um componente. Foi feita uma primeira abordagem através de formulações empíricas e posterior análise numérica utilizando um software de simulação numérica do processo e injecção, o Moldflow.

Os resultados obtidos permitiram apoiar a equipa de produção fornecendo dados de processamento, tais como tempo de injecção e capacidade da máquina, devido à força de fecho.

Durante os ensaios os parâmetros foram sendo ajustados. Existem factores intrínsecos à máquina e ao processo que não são incluídos na análise numérica, o desgaste da máquina e do molde e a sensibilidade do operador influenciam os resultados obtidos e que levam à necessidade de afinação de alguns parâmetros durante o ensaio do molde.

A simulação numérica deve ser vista sobretudo como uma ferramenta de apoio especialmente na fase de projecto da peça e do molde. Este permite verificar e validar o sistema de refrigeração e alimentação utilizados, ou seja, permite verificar se as linhas de água pensadas para o molde são suficientes para o bom arrefecimento da peça e para reduzir os empenos, assim como permite verificar se o sistema de alimentação e o tipo de ataque pensado bem como a localização do mesmo na peça assegura um bom e completo enchimento sem esta apresentar defeitos.

Permite também ter uma ideia dos defeitos que a peça apresentará e a partir daí tomar decisões de forma a evitá-los. Todos os outros parâmetros obtidos pelo software como tempos e pressões são essencialmente resultados indicativos. Têm que ser ajustados consoante a capacidade da máquina.

Este trabalho permitiu uma optimização de parâmetros essenciais para ajuste dos parâmetros de injecção da máquina permitindo assim produzir peças que cumpram os requisitos do cliente e que passem nos testes de qualidade.

Deste modo, com o apoio da simulação numérica é possível minimizar os tempos de projecto e ensaio de forma a dar mais rentabilidade à empresa.

7 - Bibliografia

REINHOLD, VAN NOSTRAND, Injection Molding Handbook. New York, 1986, p. 56-83.

POUZADA, A. S.; BERNARDO, C. A. *Introdução à Engenharia de Polímeros.* Braga: Universidade do Minho, 1983.

BRITO, A. M.; POUZADA, A. S. *Moldes de Injecção de Termoplásticos.* Braga: Universidade do Minho, 1988.

SINGH, K. J. *Design of Mold Cooling System.* In ISAYEV, A. I. – Injection Molding Fundamentals. New York: Marcel Derrer, 1987, p. 325-347.

HADIM, H. A.; XU, K.; HOBOKEN, N. J.; FERGUSON, D. E. *Computer-Aided Design Methodology for Mold Cooling.* Proc. of Antec '95, 1995, p. 702-706.

PANDELIDIS, I. O.; LINGARD, T. J. *Optimization of Cooling Systems for Injection Molding.* Intern. Polym. Proc. Vol. 5, n.º 2 (1990), p. 100-108

Manual do Projectista, Centimfe, Departamento de Polimeros

CADFLOW, http://www.cadflow.pt/moldflow.htm

Anexos

Anexo A - Tutorial de preparação do modelo para simulação

Este tutorial tem como objectivo descrever de forma pormenorizada todos os passos a que foi submetido o modelo até este estar pronto para se iniciar a simulação pretendida.

De notar que, ao longo deste tutorial muitas expressões apresentar-se-ão em Inglês devido a ser a língua em que se encontra instalado o software, sendo estas as expressões vulgarmente usadas pelos utilizadores do MPI.

De uma forma resumida, até se poder iniciar a simulação de enchimento, compactação, arrefecimento e empeno pretendida, tem que se efectuar as seguintes etapas:

- importar o modelo;
- gerar a malha;
- reparar a malha;
- definir o tipo de simulação pretendida;
- seleccionar o material;
- criar o sistema de alimentação e definir o ponto de entrada de material;
- criar o sistema de refrigeração;
- definir as condições de processamento;
- colocar a decorrer a análise.

1– Importar o modelo

O modelo CAD é geralmente importado para o Moldflow depois de este ser guardado na extensão .igs. No entanto, este software permite a importação do modelo em outras extensões, como o .step, .catpart, .sldprt, entre outros.

O modelo quando importado para o Moldflow apresenta-se da seguinte forma:

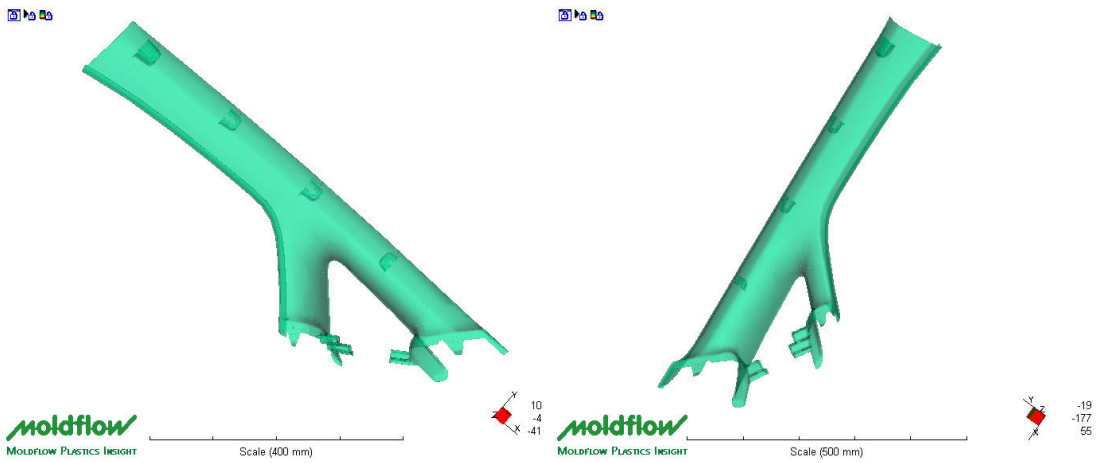


Figura 53 - Modelo importado do CAD

2 – Gerar a malha

Gerar a malha significa dividir as superfícies da peça em elementos, estes elementos são triângulos. A malha deve ser constituída por estes elementos o quanto mais semelhantes possíveis, garantindo a geometria, comprimento e espessura, para permitir a melhor previsão e leitura dos resultados pretendidos.

Assim, uma malha é constituída por nós e triângulos, sendo os nós os pontos que unem as arestas dos triângulos entre si.

Começa-se por gerar a malha na peça depois de a ter importado do cad para o Moldflow. Existem três tipos de malha, malha *fusion* ou *dual domain*, malha *midplane* ou malha 3D. Na malha *fusion* representa apenas as paredes externas do modelo, a malha *midplane* representa a casca média da espessura do modelo e a malha 3D analisa a toda a espessura e divide-a em elementos tetraédricos.

Para a peça em estudo usou-se uma malha *fusion* que foi gerada tendo em consideração os seguintes parâmetros:

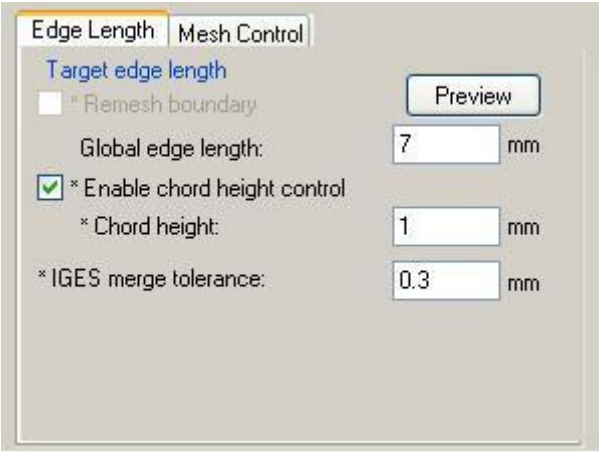


Figura 54 - Dimensões de cada elemento da malha

A malha depois de gerada apresenta o seguinte aspecto:

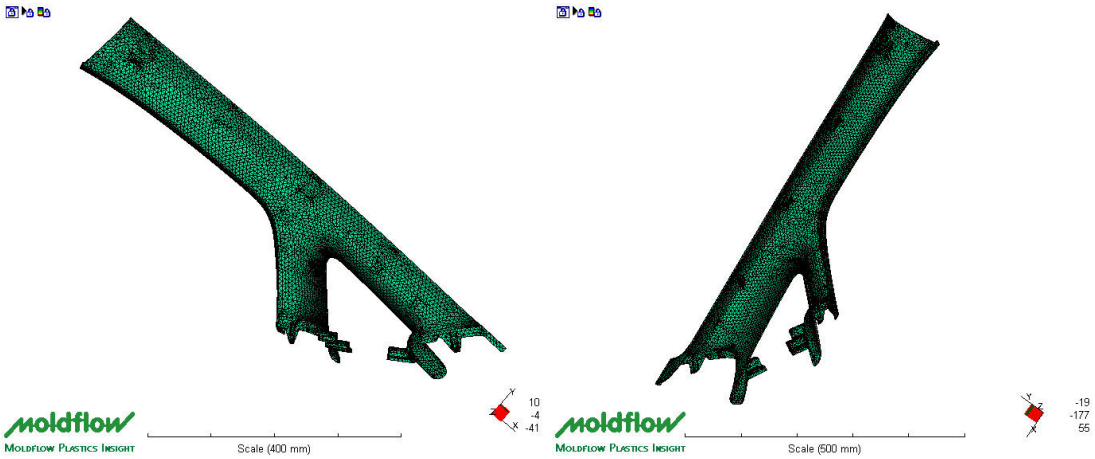


Figura 55 - Modelo com a malha gerada

3 – Estatística da malha

Depois de criada a malha é necessário analisá-la para verificar quais os defeitos apresentados a fim de a reparar. Para tal analisa-se a estatística da malha.

Esta é um relatório que tem uma variedade de informações à cerca da malha que podem ser usadas para avaliar a qualidade da malha.

Assim, a estatística obtida para a malha efectuada foi a seguinte:

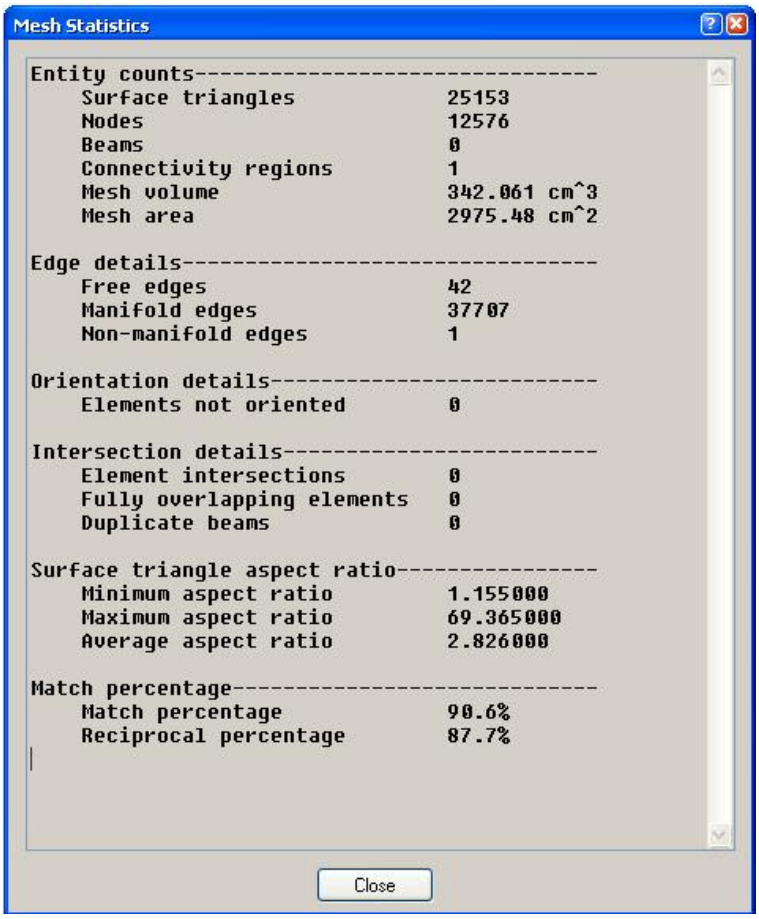


Figura 56 - Estatística da malha

4 – Reparação da malha

Em seguida, e para melhor compreensão, serão descritos todos os parâmetros surgidos na estatística desta malha a fim de perceber o que falhou na geração da malha e o que corrigir nesta malha para se obter bons resultados na leitura do modelo.

***Surface triangles*:** Indica o número de elementos, gerado nas superfícies do modelo importado do CAD.

Nodes: Indica o número de nós na malha.

Beams: Elementos que se usam para representar por exemplo, canais de refrigeração ou alimentação, onde a razão comprimento/espessura é maior que 4:1.

Connectivity regions: Alguns modelos importados incluem regiões da peça que não estão ligadas ao resto do modelo. Se isto acontecer tem que se corrigir pois o número de conectividade das regiões deve ser 1, ou seja, garantir que todo o modelo está conectado.

***Mesh volume e mesh área*:** Indica o volume e a área dos elementos da malha.

***Free edges*:** Um *free edges* é um elemento da malha em que pelo menos uma aresta não é compartilhada por outro elemento da malha. Ou seja, um *free edge* tem um elemento anexado a um só lado. Uma aresta é um segmento que liga dois nós da malha.

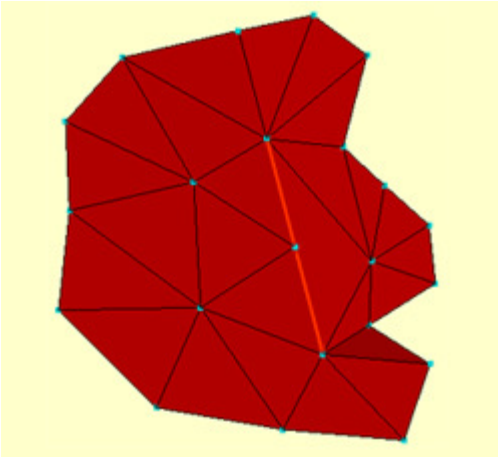


Figura 57 - Exemplo de um free edge

Em malha fusion os free edge devem ser corrigidos porque eles indicam elementos que não tenham sido correctamente gerados na malha.

Com o uso do comando *free edges diagnostics*, o software procura todos os elementos vazios na malha. Neste caso, como verificado na estatística da malha tem-se 42 free edges para corrigir.

Nas seguintes imagens consegue-se visualizar exemplos de *free edges* na peça em estudo, pelas zonas assinaladas a vermelho

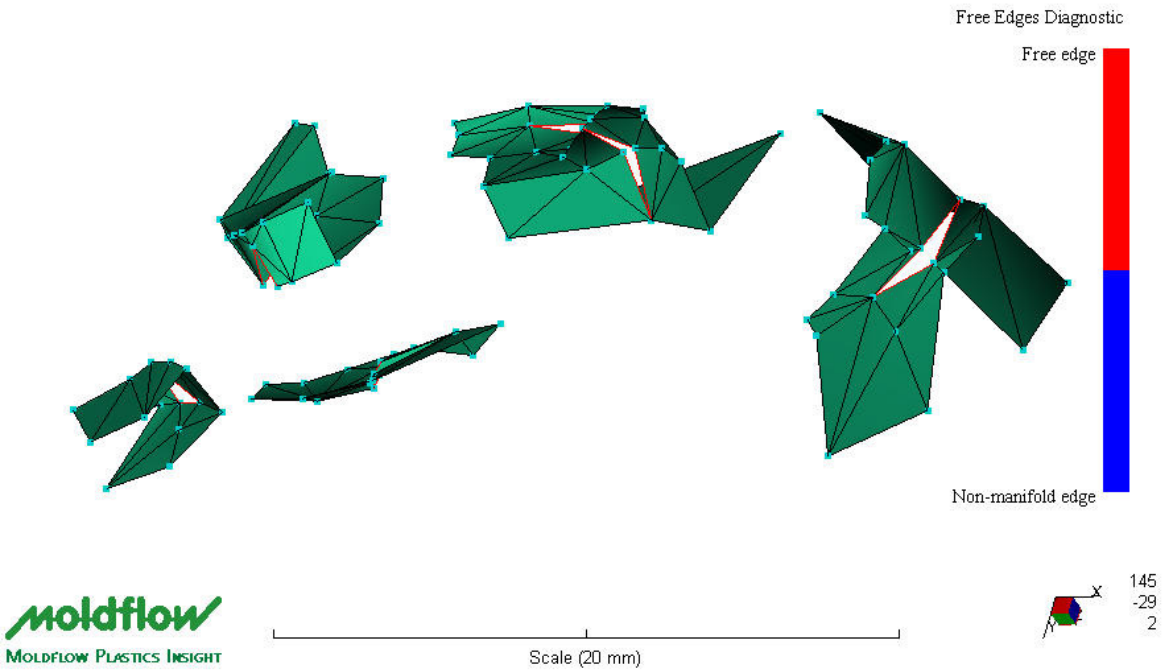


Figura 58 - Exemplos de free edges na malha

***Manifold edges e non-manifold edges*:** Um *manifold edge* é uma aresta da malha que tem dois elementos que lhe estão associados. Uma aresta é um segmento que liga dois nós na malha.

Um *non-manifold edge* de uma malha trata-se de uma aresta que tem mais de duas entidades (triângulos) que lhe estão associadas.

Em malha f*usion*, *manifold edges* são o único tipo de arestas admissíveis. Todos os outros tipos, como *non manifold edges*, devem ser corrigidos porque eles indicam elementos que não tenham sido correctamente inscritos na malha.

A – *Free edge*

B – *Manifold edge*

C – *Non-manifold edge*

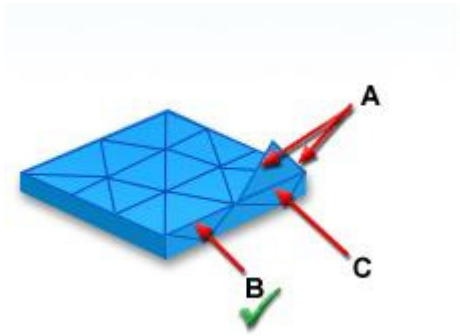


Figura 59 - Exemplo de free edge, manifold e non manifold edge

***Elements not oriented*:** são elementos que não se encontram orientados na malha de forma consistente.

Deve-se proceder à reparação destes usando o comando *elements orientation* ou o comando *orient all*.

***Element intersections e overlapping elements*:** são elementos da malha que se encontram intersectados uns com os outros. Estes elementos da malha encontram-se em diferentes planos, e cruzam-se mutuamente.

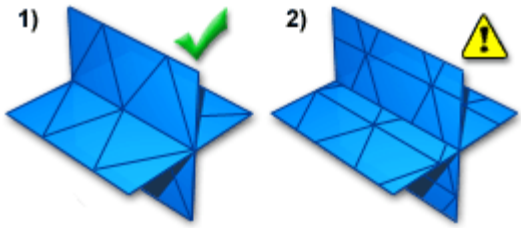


Figura 60 - Exemplo de intersecção de elementos de malha

Overlapping elements são elementos que se sobrepõem no mesmo plano. Esta malha não apresenta *overlapping elements* pelo que estes não têm que ser corrigidos uma vez que interferem na análise.

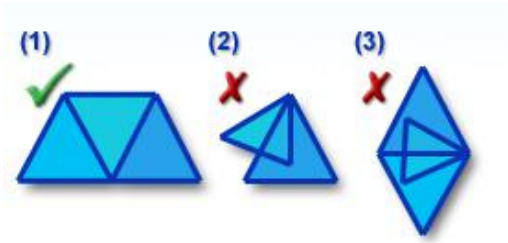


Figura 61 - Exemplo de elementos sobrepostos na malha

Quando se tem intersecções de elementos, ou seja, estes atravessam uns nos outros, ou estes estão sobrepostos, isto não é aceitável. Deve-se remover a intersecção ou sobreposição destes elementos antes de executar uma análise.

Para isso, usa-se o comando *overlapping elements diagonostic* que consegue detectar estas anomalias na malha, sendo que esta malha não apresenta nenhum elemento intersectado nem nenhum elemento sobreposto.

***Aspect ratio*:** indica a mínima, máxima e média dimensão da razão de *aspect ratio* encontrado na malha.

Refere-se normalmente à relação entre a largura e altura de um elemento da malha.

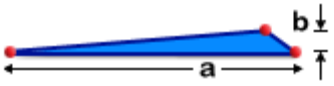


Figura 62 - *Aspect ratio*

Este factor de razão de aspecto é importante pois afecta a precisão e desempenho da análise. O *aspect ratio* é particularmente importante em zonas sensíveis, tais como ataques, ou canais de gás numa simulação de injecção com gás.

Elevado *aspect ratio* pode causar uma análise mais lenta e afectar os resultados.

Para detectar o número de elementos cuja relação entre a altura e a largura é considerada pequena tem que ser ter em conta o tipo de análise que se pretende. Se a simulação pretendida for uma análise de enchimento esta razão terá que ser no mínimo de 9, se a análise pretendida for uma análise mais completa, uma análise de enchimento, compactação, arrefecimento e empeno, como é o caso, esta razão terá que ser no mínimo de 6.

Com o uso do comando *aspect ratio diagnostic* consegue-se detectar o número de elementos desta malha cuja razão de aspecto é menor que 6. Assim, este valor é de 2183 e serão estes os elementos da malha a corrigir.

Como demonstrado mais à frente, a correcção de todos estes elementos da malha levará a uma ligeira alteração do volume, área e número de elementos da malha.

Em seguida, pode ser visualizado na malha as zonas onde esta razão de *aspect ratio* inferior a 6 é mais frequente.

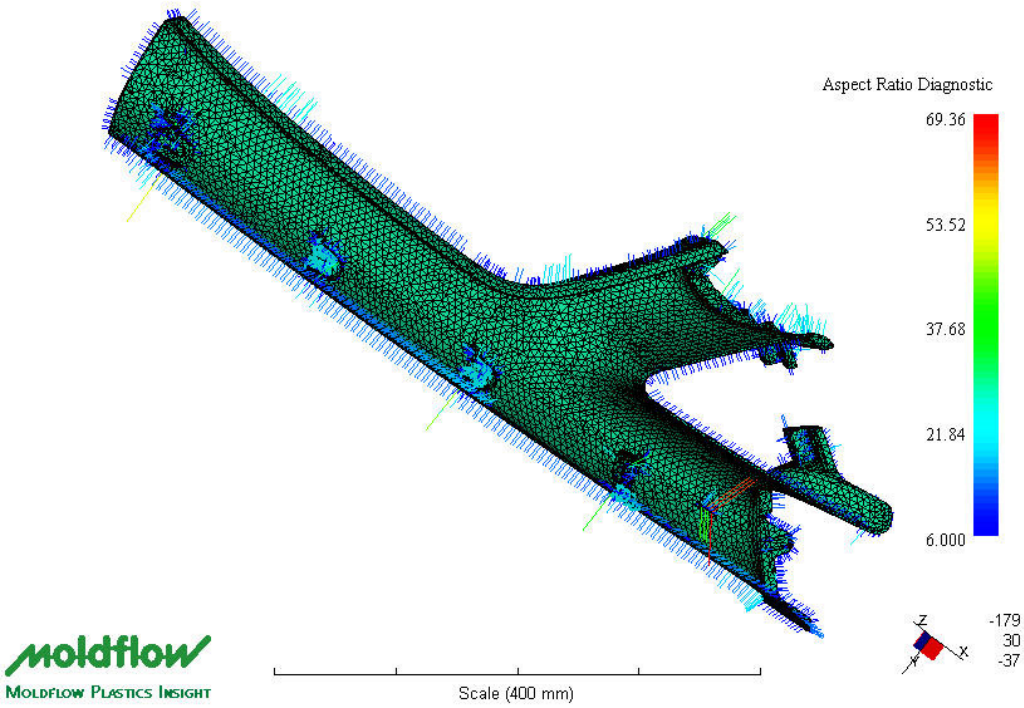


Figura 63 - Elementos com elevado *aspect ratio* do nosso modelo

Como se pode verificar, encontra-se sobretudo no topo das nervuras e zonas de encaixe da peça, normalmente designado por porta agrafos. Por se tratar de zonas finas, ao gerar a malha torna-se complicado fazê-lo correctamente nestas zonas.

De uma forma mais pormenorizada apresentam-se as seguintes imagens que mostram as zonas da malha que se terá que reparar.

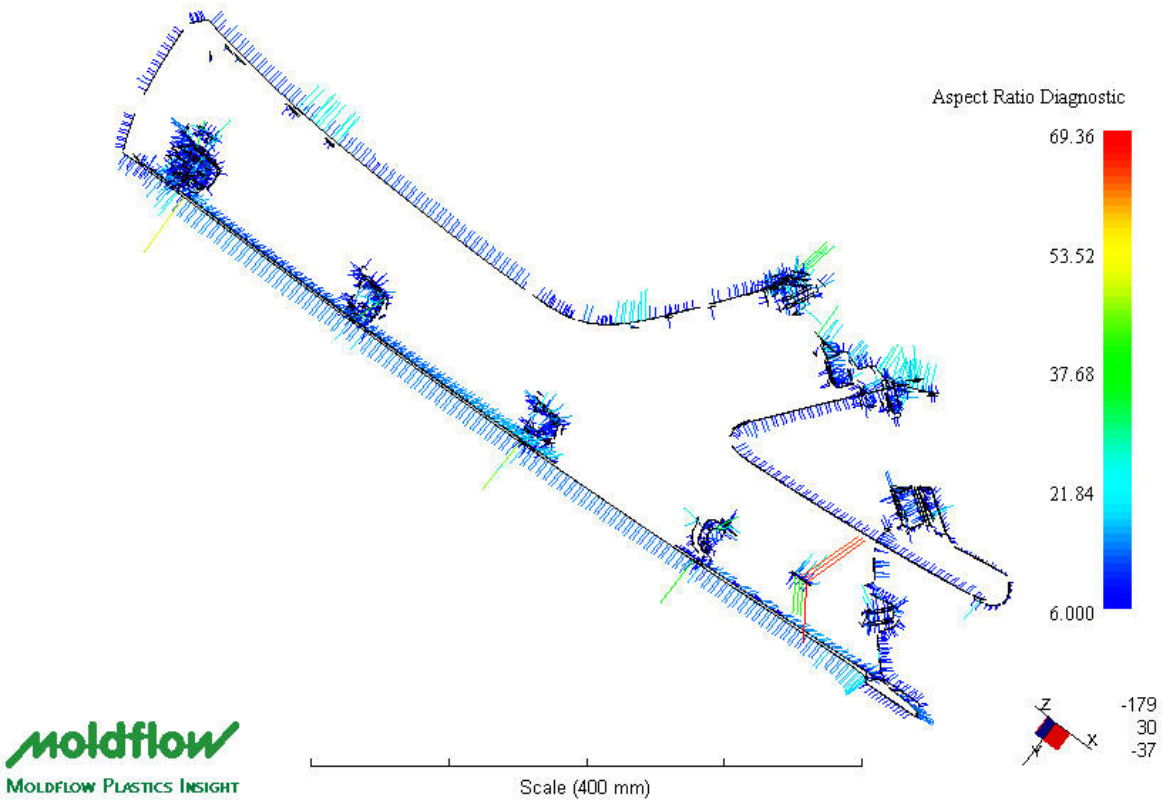


Figura 64 - Pormenor dos elementos com o *aspect ratio* a corrigir

***Match percentage*:** um dos aspectos mais importantes a ter em conta quando se analisa a estatística da malha é a *match percentage*. Este valor terá necessariamente que ser igual ou superior a 85% para a malha ser aceitável para análise. *Match percentage* indica a percentagem de elementos de uma superfície alinhados com elementos da outra superfície.

Neste caso, temos uma percentagem de 90,6% pelo que a malha é aceitável.

Depois de efectuada a devida reparação na malha verifica-se se esta está devidamente reparada, consultando novamente a estatística da malha. Em seguida, é apresentada a estatística antes e após a reparação da malha.

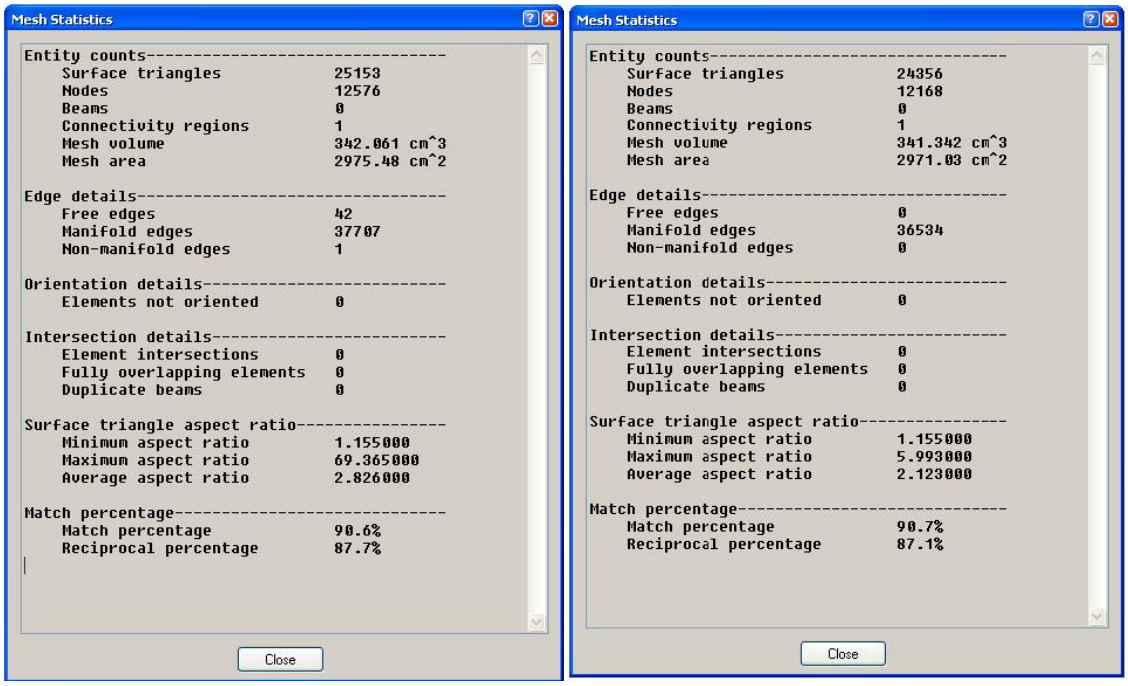


Figura 65 - Estatística da malha antes e após correcção da malha

Como se pode verificar pela estatística final, a malha está devidamente corrigida. De notar que, alguns dos valores da estatística se alteraram da malha inicial para a malha corrigida. Alguns exemplos são o número de triângulos e de nós, a área e o volume, *manifold edges e match percentage* que se alteraram devido a correcção feita á malha.

5 – Definir o tipo de simulação pretendida

Pretende-se um estudo do comportamento do material no enchimento, compactação, arrefecimento e empeno.

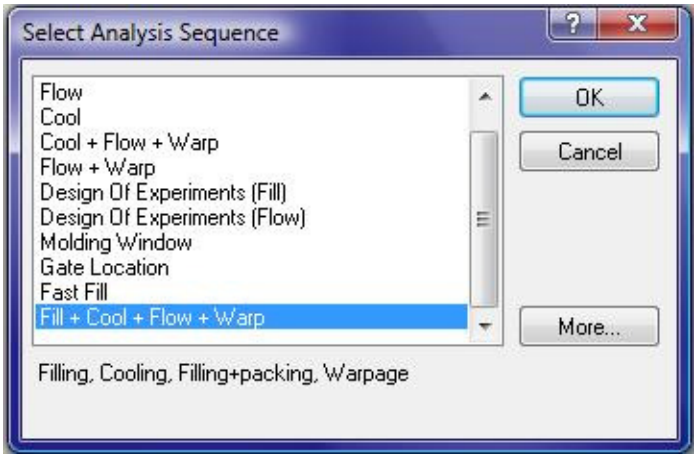


Figura 66 - Tipo de simulação pretendida

6 – Seleccionar o material

O material usado na produção da peça será um material da Targor. cujo grade é Hostacom X4323/3 S63 101173. Este material apresenta as seguintes propriedades:

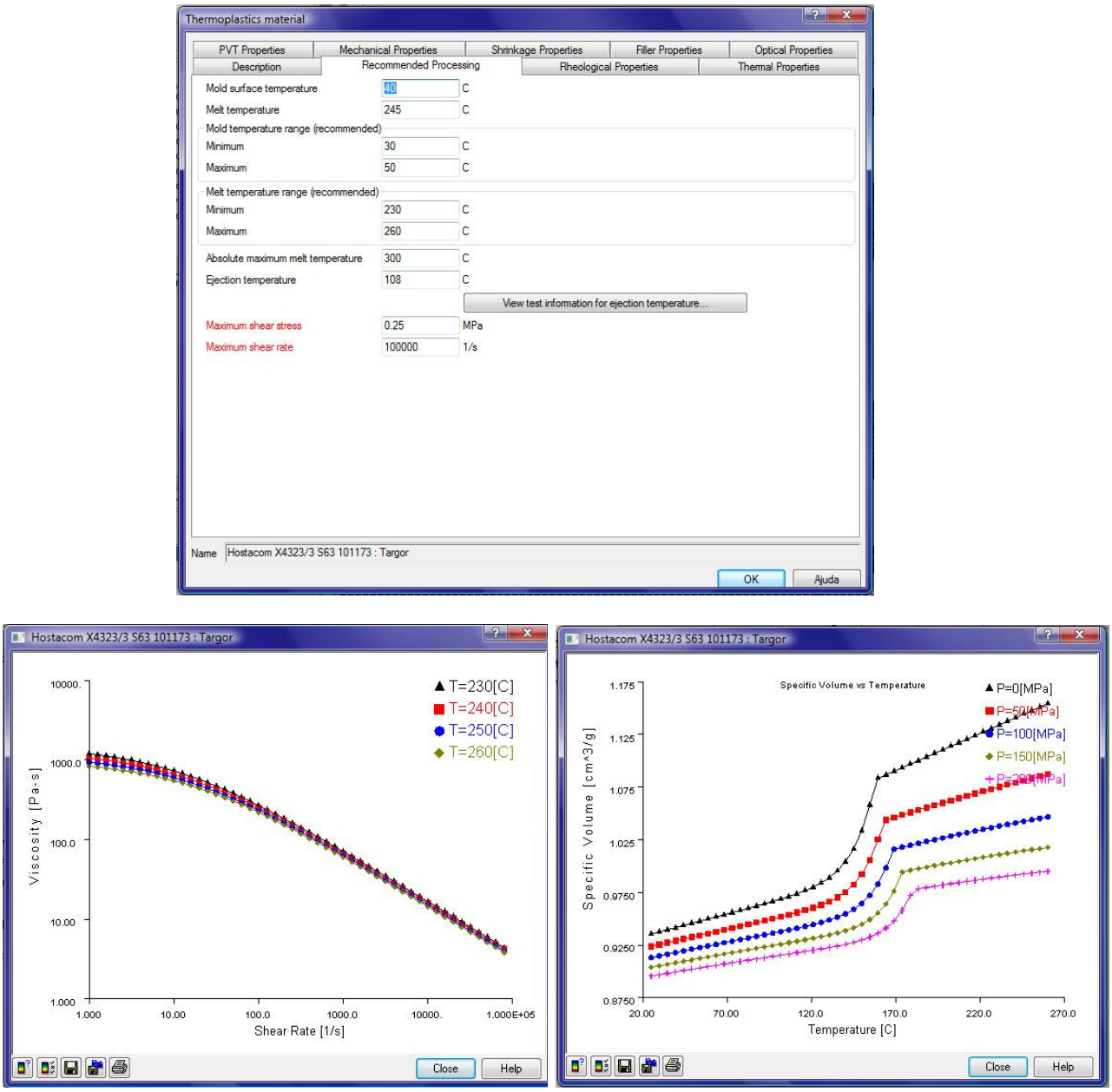


Figura 67 - Propriedades do material

7 – Criar o sistema de alimentação

Em seguida, procedeu-se à criação do sistema de alimentação. Como referido ao longo do relatório, o sistema de alimentação usado é constituído por canais quentes e canais frios.

Para criar os canais de alimentação, primeiramente desenharam-se as linhas que permitirão a criação da malha destes. Para cada linha são atribuídas propriedades consoante se trate de canal frio ou quente e as respectivas propriedades.

Pela imagem, pode-se verificar que os canais quentes estão representados a vermelho e os canais frios a verde. As linhas apresentam estas cores depois de lhes atribuir propriedades de canais quentes e canais frios.

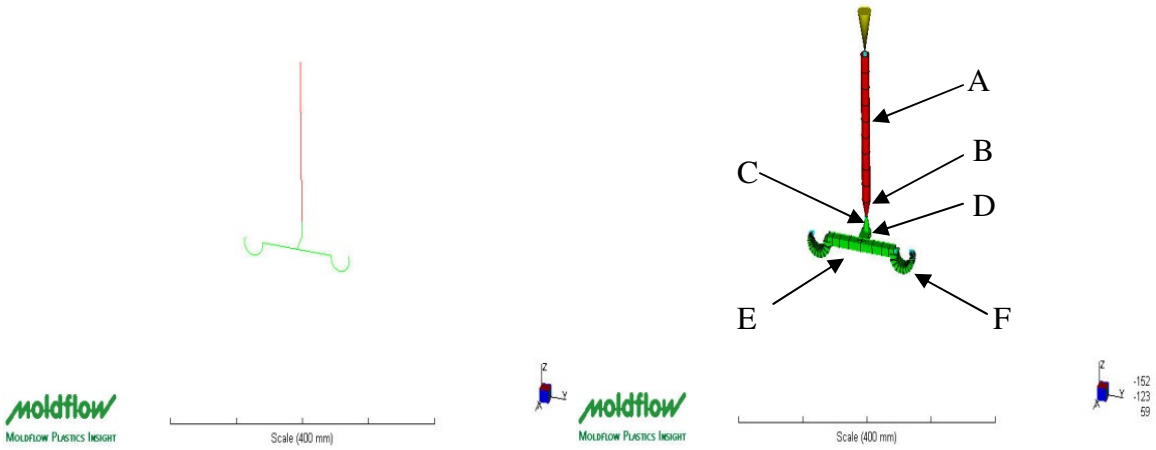


Figura 68 - Sistema de alimentação

Pela imagem da direita pode-se visualizar que depois de criar o sistema de alimentação tem que se definir a entrada do material. Para isso selecciona-se o topo do jito e a entrada do material está representada na imagem a amarelo.

As propriedades apresentadas aos canais foram as seguintes:

a) jito

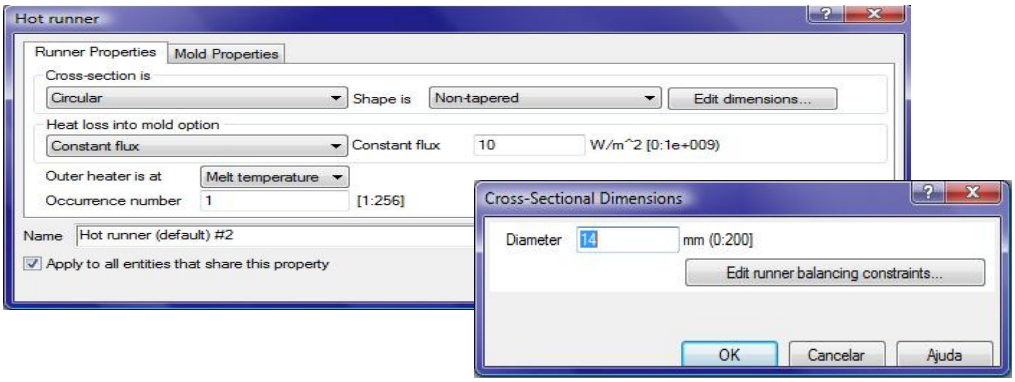


Figura 69 - Propriedades do jito

b) ataque

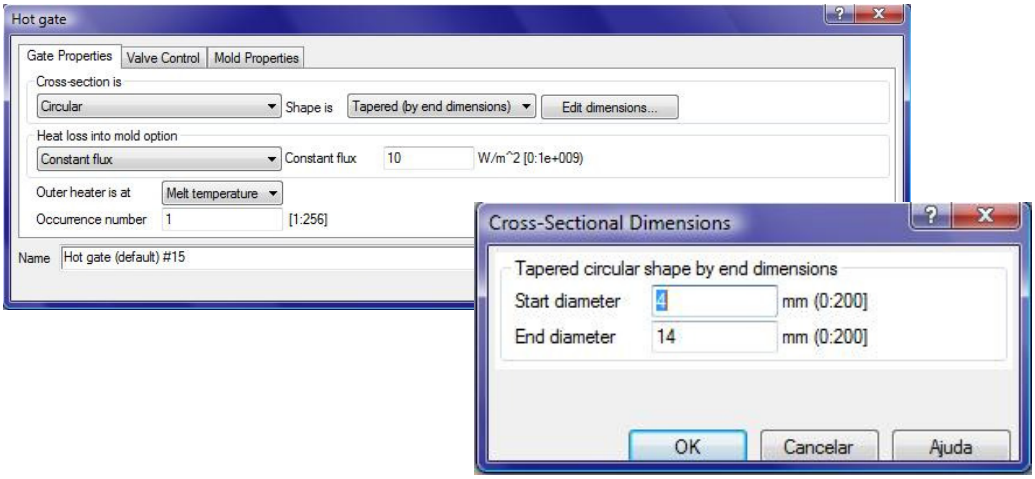


Figura 70- Propriedades do ataque do canal quente

c) ponteira

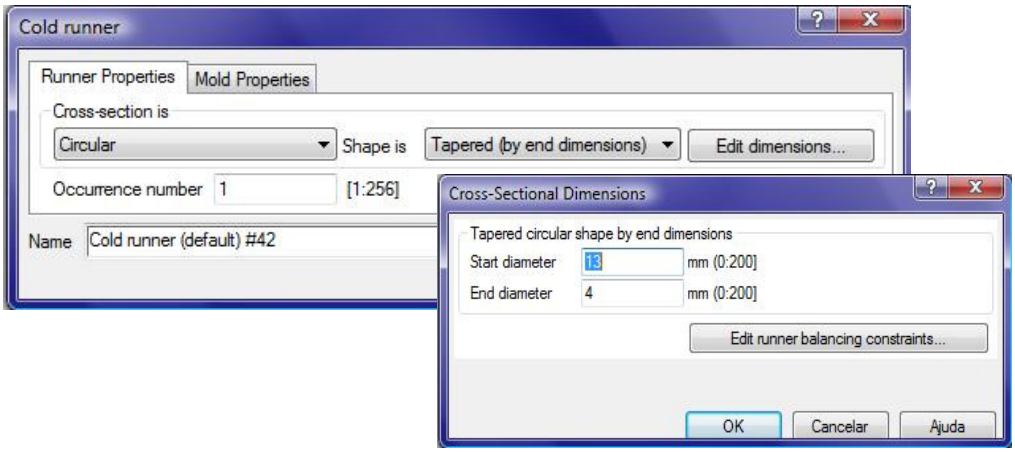


Figura 71 - Propriedades da ponteira do canal quente

d) canal frio primário

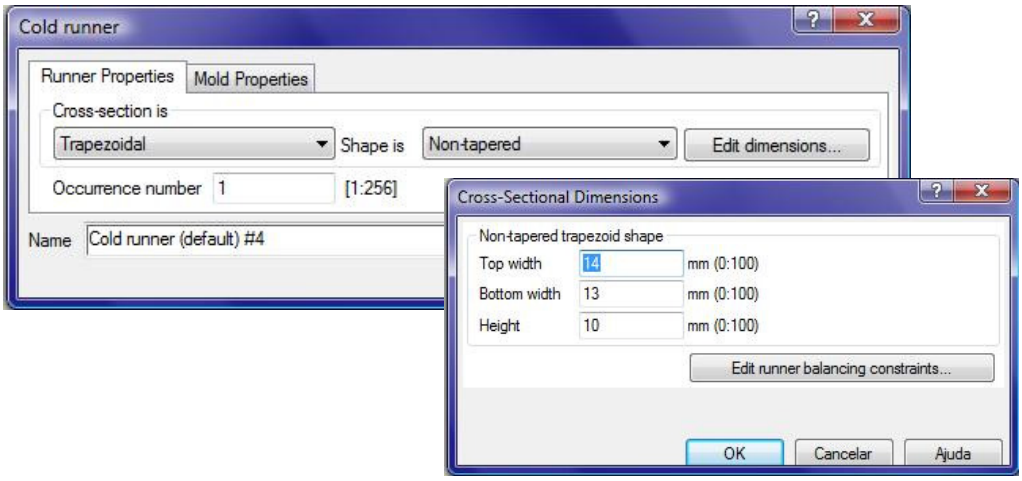


Figura 72 - Propriedades do canal frio primário

e) canal frio secundário

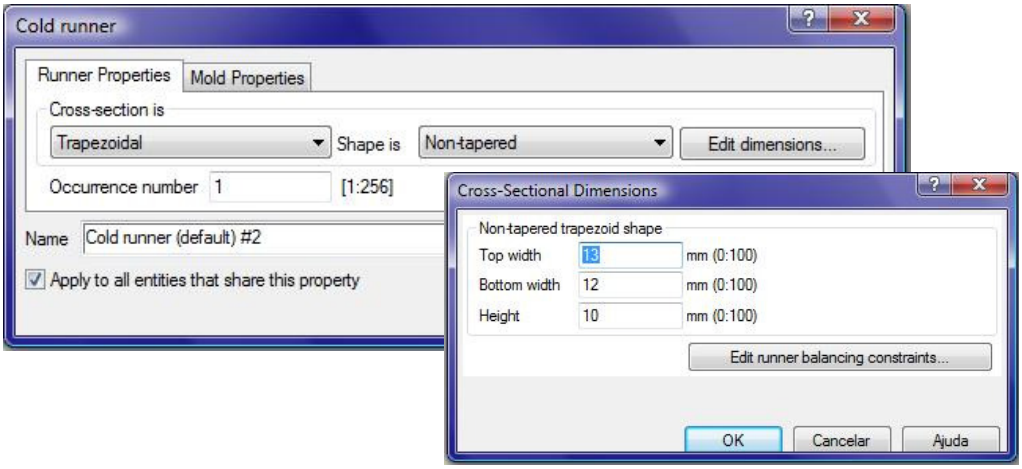


Figura 73 - Propriedades do canal frio secundário

f) ataque

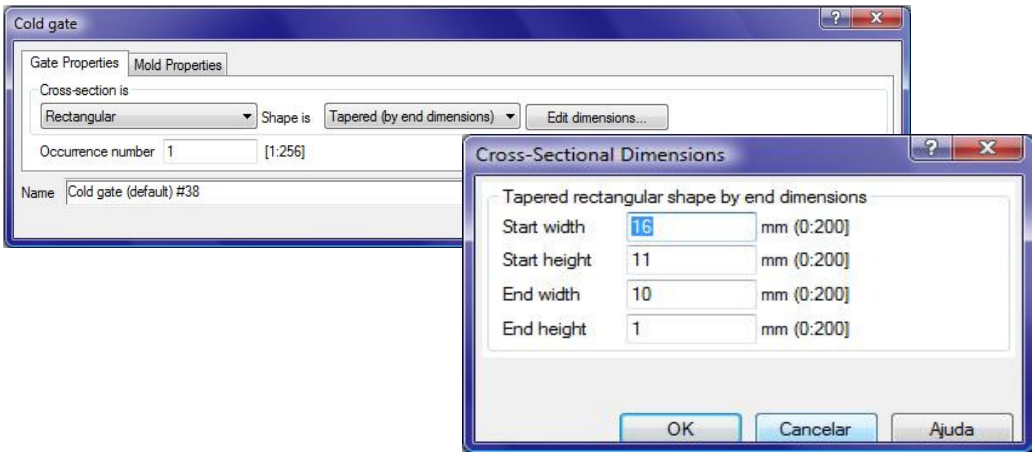


Figura 74 - Propriedades do ataque do canal frio

Em suma, os canais de alimentação apresentam as seguintes dimensões:

Tabela 21 - Propriedades dos canais de alimentação

	Designação	Nome	Secção	Diâmetro	Altura	Largura	Comprimento
Canal quente	A	Jito	Circular (constante)	14 mm			180 mm
	B	Ataque	Circular (variável)	14x4 mm			20 mm
Canais frios	C	Ponteira	Circular (variável)	4x13 mm			20 mm
	D	Canal frio primário	Trapezoidal		10 mm	14 mm 13 mm	20 mm
	E	Canal frio secundário	Trapezoidal		10 mm	13 mm 12 mm	106 mm
	F	ataque	Fenda (variável)		1 mm	10mm	

Para a escolha das dimensões do distribuidor consultou-se a folha técnica fornecida pela IGM, do fornecedor da *Yudo*. Por consulta do anexo E escolhe-se o diâmetro do canal principal do distribuidor deve ser de 14 mm e o diâmetro do ataque de 4 mm.

As dimensões dos canais quentes foram escolhidas no seguimento das dimensões dos canais frios. De notar que, o estudo desta peça só se iniciou depois de o molde já estar grande parte produzido pelo que utilizou-se as dimensões dos canais de alimentação do molde real.

8 – Criar o sistema de refrigeração

O sistema de refrigeração é traduzido do software de desenho para o Moldflow apresentando-se este sob a forma de linhas. Estas linhas têm que ser corrigidas a fim de ser possível gerar a malha nestes. Em seguida, estão apresentadas as linhas de água enviadas do cad do macho e da cavidade.

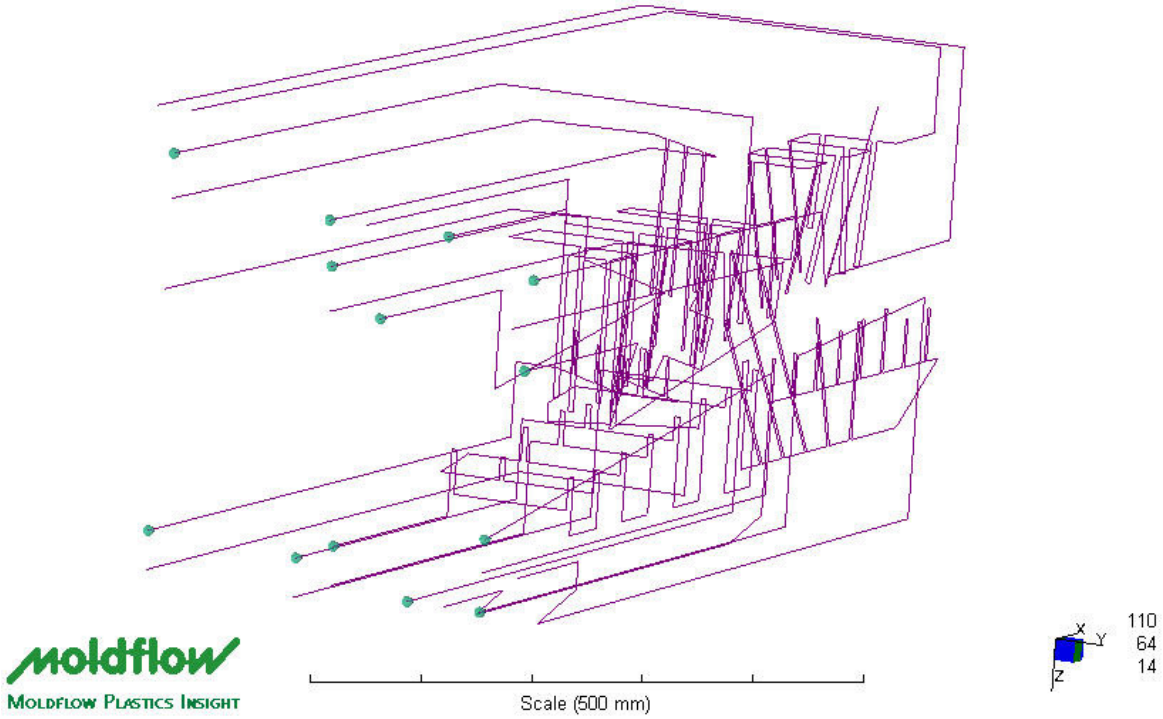


Figura 75 - Linhas de água do macho e da cavidade

Depois de corrigidas as linhas atribuem-se propriedades a estas, tal como se fez aos canais de alimentação. Estas linhas designam-se por canais e *baffles*.

Em seguida, apresentam-se as características de cada um destes constituintes do sistema de refrigeração.

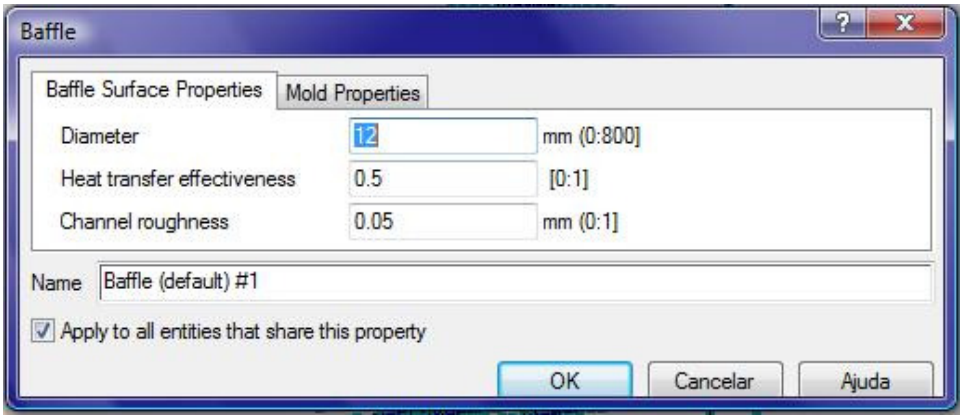


Figura 76 - Propriedades das baffles

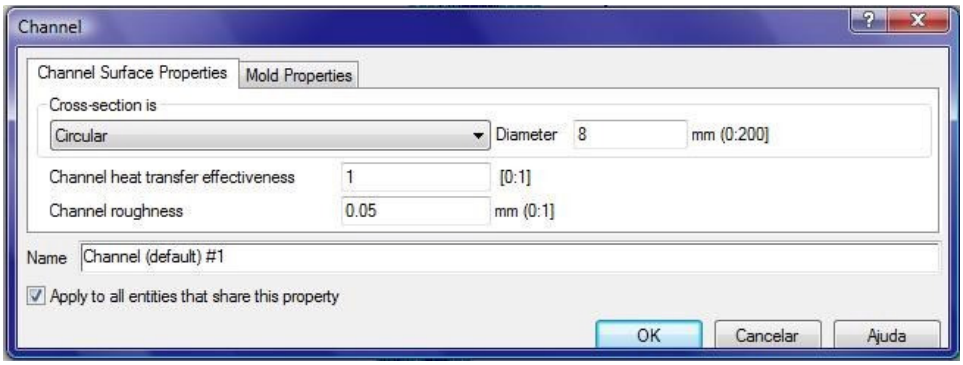


Figura 77 - Propriedades dos canais de refrigeração

Depois de seleccionadas e atribuídas as devidas propriedades às linhas constituintes dos canais de refrigeração, os canais apresentam-se a azul e as *baffles* a amarelo.

Figura 78 - Canais de refrigeração com as devidas propriedades

A partir daqui o que se tem a fazer é gerar a malha tal como nos canais de alimentação.

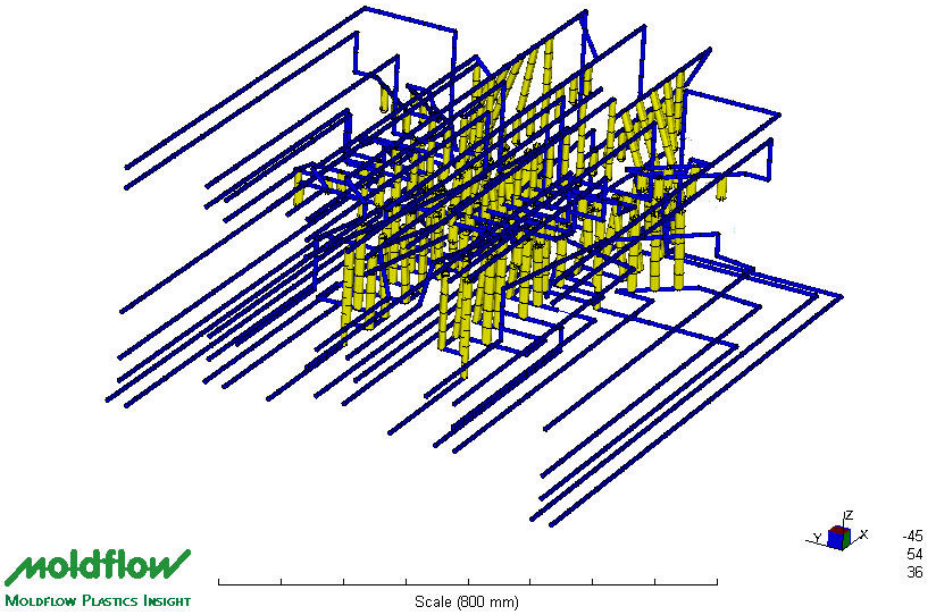


Figura 79 - Linhas de água

Depois de gerada a malha tem que se verificar se os canais estão devidamente conectados e não existem intersecções de elementos.

Por fim, interessa definir as entradas do fluido arrefecedor. Estas entradas são fornecidas pelo fornecedor do molde. As propriedades do fluido arrefecedor são as mencionadas abaixo.

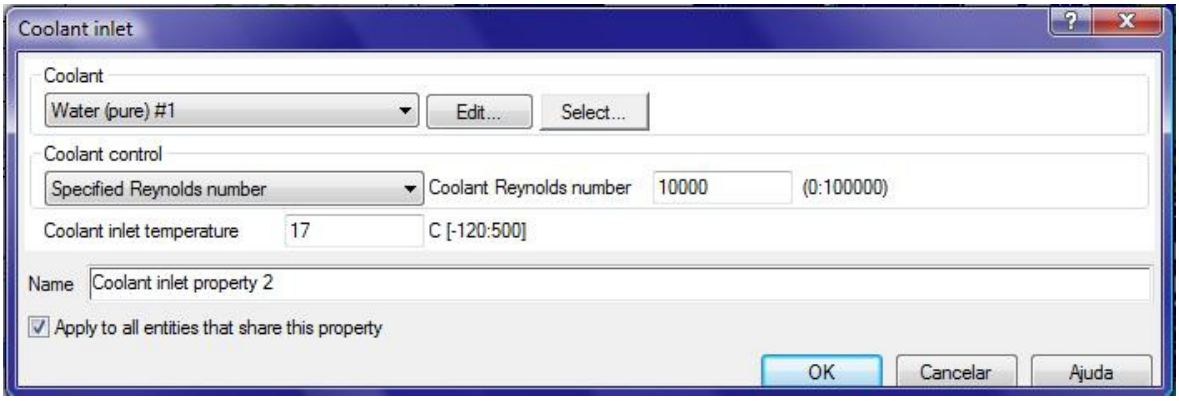


Figura 80 - Propriedades do fluido arrefecedor

Por fim, temos o nosso modelo final, onde se pode visualizar a distribuição das linhas de água bem como as entradas de água.

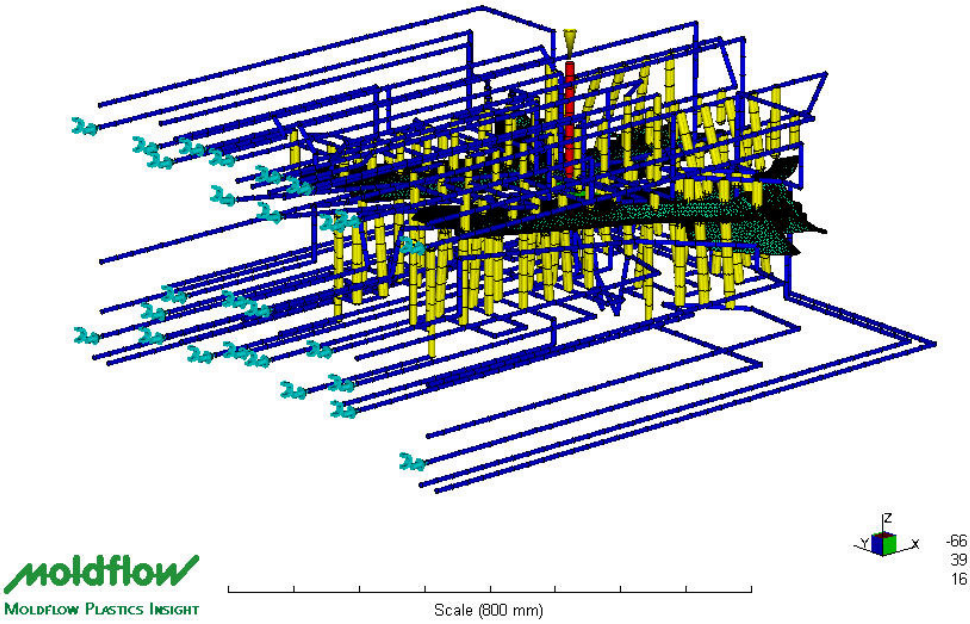
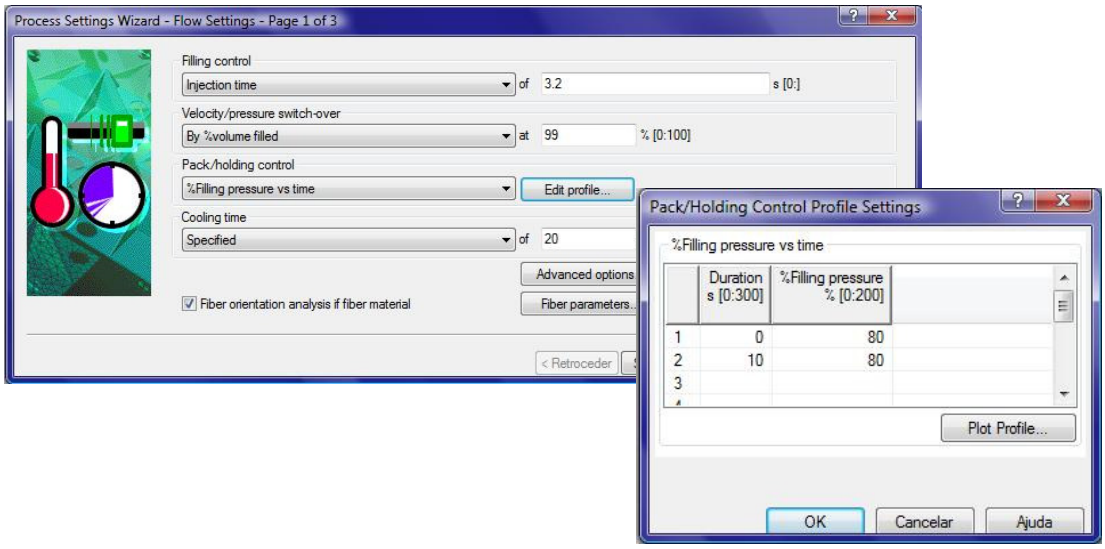


Figura 81 - Modelo pronto para análise

9 – Definir as condições de processamento

Para iniciar a análise do modelo deve-se seleccionar as condições de processamento. Estas condições devem estar dentro da gama de valores especificada pelo fabricante do material, como temperatura do fundido, temperatura do molde, velocidades de corte, tensões de corte e temperatura de extracção.



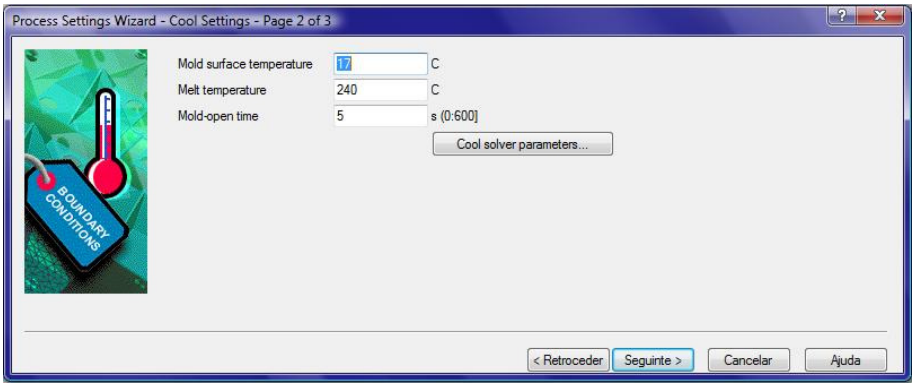


Figura 82 - Condições de processamento usadas na simulação

Depois de efectuados todos estes passos o modelo está apto para ser analisado, podendo-se assim iniciar a análise.

Anexo B – Resultados de Excel

Tempo de arrefecimento

(eq. Wübken)

α_{eff} (m^2/s)	6,50E-08
s (m)	2,70E-03
K	1,27
T_{inj} (ºC)	240
T_{mold} (ºC)	17
T_{ext} (ºC)	108

Y	2,45
t_c (s)	12,93

1 bar	1,00E+05	Pa	1,00E-01	Mpa
115	1,15E+07		1,15E+01	

$$t_c = \frac{s^2}{\pi^2 \alpha_{eff}} \ln(KY)$$

em que:

t_c - tempo de arrefecimento (incluindo tempo de manutenção) [s]

s - espessura da parede [mm]

α_{eff} - difusividade térmica efectiva média [m^2/s]

k - coeficiente dependente da espessura da peça

$4/\pi$ - para peças finas ($s \leq 3$ mm) e $8/\pi^2$ para peças espessas ($s > 3$ mm)

Y - temperatura adimensional, dada por: $Y = \frac{T_{fund} - T_{int}}{T_{ext} - T_{int}}$

T_{fund} - temperatura do fundido

T_{int} - temperatura de interface (aprox. temperatura do molde Tm)

T_{ext} - temperatura de extracção

Balanço térmico

		Cp (J/Kg C)		
Tinj (ºC)	240,00	2150,90		
Tmold (ºC	17,00			
Text (ºC)	108,00	1538,00		
Cp	2783,70			
Vinj (cm3	682,69			
ρ (g/cm3)	0,8739		QF (w)	16153,61
m (kg)	0,60			
$h_{inj\ (J/Kg)}$	516216,00			
$h_{ext\ (J/Kg)}$	166104,00			
$t_{c\ (s)}$	12,93			

$$\sum_i \dot{Q}i = \dot{Q}_{TM}+\dot{Q}_{PI}+\dot{Q}_{Amb} = 0$$

$$\dot{Q}_{Amb} = \dot{Q}_{cond}+\dot{Q}_{conv}+\dot{Q}_{rad}$$

$\dot{Q}_{TM}$ - (Fluxo de) calor transferido pelo meio arrefecedor

$\dot{Q}_{PI}$ - calor trazido pelo fundido

$\dot{Q}_{Amb}$ - calor transferido para o ambiente

$\dot{Q}_{cond}$ - calor por condução

$\dot{Q}_{conv}$ - calor por convecção

$\dot{Q}_{rad}$ - calor por radiação

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

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

onde:

m - massa de fundido injectada (kg)

$h_{inj\ (ext)}$ - entalpia específica do plástico à temperatura de injecção (extracção) (J/kg)

t_c - tempo de residência do material no molde (s)

t_c - tempo de residência do material no molde (s)

O fluxo de calor por condução dá-se para as placas de fixação do molde e é proporcional à diferença entre as temperaturas do molde e do ambiente e pode ser calculado pela expressão:

$$\dot{Q}_{cond} = A_{fix} \cdot \beta \cdot (T_{amb} - T_{mol})$$

sendo:

A_{fix} - área de contacto molde - sistema de fixação (m^2)

β - factor de proporcionalidade (W/m^2 °C) (ver tabela 7.5)

Material	β
Aços de baixa liga	100
Aços de alta liga	80
Ligas de cobre	20

Tab. 7.5 – Factor β

Note-se que, das trocas de calor para o ambiente, as perdas por condução são as maiores (aproximadamente 70 a 80% do total das perdas de calor para o ambiente). Para as reduzir, os moldes que vão funcionar a temperaturas elevadas (maiores que 60 °C) deverão ter placas isoladoras.

Afix (m2)	3,66		
β	80	Qcond (W)	2340,36
Tamb (C)	25		

O fluxo de calor por convecção dá-se pela área lateral do molde e pode ser calculado pela expressão:

$$\dot{Q}_{conv} = A_{lat} \cdot \alpha \cdot (T_{amb} - T_{mol})$$

em que:

A_{lat} - área exposta do molde (m^2)

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

T_{amb} e T_{mol} - Temperatura do meio ambiente e do molde (°C)

Alat (m2)	4,59	Qconv (W	550,53
h (W/m2 (	15,00		

O fluxo de calor por radiação pode ser calculado por:

$$\dot{Q}_{rad} = A_{lat} \cdot \varepsilon \cdot C_{rad} \cdot \left(\left(\frac{\theta_{amb}}{100}\right)^4 - \left(\frac{\theta_{mol}}{100}\right)^4 \right)$$

em que:

ε - factor de emissão (0.25 para o aço)

C_{rad} - coeficiente de radiação do corpo negro (5,77 $W/m^2 . K4$)

θ - temperatura absoluta (K = °C + 273.18)

Alat (m2)	4,59		
ε	0,25		
Crad (W/n	5,67	Qrad (W)	52,98
θamb (K)	298,18		
θmol (K)	290,18		

			Qamb (W)	2943,87
			QTM (W)	-19097,48
caudal mássico				
C (KJ/Kg C	4,19			
ΔT (peça t	3,00		$\dot{m}$ (Kg/s)	1520,74
caudal volumétrico				
$\dot{V}$(m3/s)	1,52		V (l/min)	25,35
ρágua Kg/	1000,00			

D	15,45	mm	0,02	m
Comprimento dos canais de refrigeração				
a	15,45	mm	0,02	m
b	46,34	mm	0,05	m
e	7,72	mm	0,01	m
L	26,20	m	26202,23	mm
QTm	19097,48	W		
λtw	29,00	J/m*s*ºC		
ΔT	8,00	ºC		
Tint	17,00	ºC		
Tágua	25,00	ºC		

Conhecido o valor do calor transportado pelo fundido (que no caso dos termoplásticos é sempre positivo) e das trocas de calor com o ambiente (geralmente negativo, excepto quando a temperatura do molde é inferior à ambiente), a quantidade de calor que terá que se retirar com o fluido de arrefecimento é calculada pela equação de balanço térmico:

$$\dot{Q}_{TM} = -\dot{Q}_{PI} - \dot{Q}_{amb}$$

O caudal do fluido arrefecedor estima-se fixando o aumento da sua temperatura durante a passagem pelo molde. Esta variação de temperatura deve ser em geral de 2 a 5 °C. O caudal é dado pela equação:

$$\dot{m} = \frac{|\dot{Q}_{TM}|}{C.\Delta T}$$

em que:

C - calor específico do fluido (4.186 kJ/kg °C para a água)

ΔT - variação de temperatura do fluido

V (l/min) =	25,35	
D (mm)=	15,45	
D (mm)	V (l/min)	D interpolado
8,00	3,80	0,00
11,00	9,50	0,00
19,00	38,00	0,00
23,80	85,00	0,00

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

O comprimento dos canais deve ser o maior possível e, por isso, não deve ser calculado. Deve-se sim, verificar se o comprimento de "linhas de água" realmente existente no molde, é superior ao mínimo necessário para assegurar a transmissão de calor pretendida. O comprimento mínimo pode ser calculado pela seguinte expressão:

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

onde:

e - distância dos canais à superfície moldante

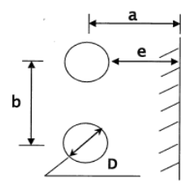
k - condutividade térmica do material do molde (J/m.s.°C)

d - diâmetro dos canais (m)

ΔT - diferença de temperatura entre a parede da cavidade e o líquido arrefecedor

$e = a - \frac{D}{2}$ espessura entre a cavidade e os canais

$a = D \qquad b = 3 \times D$



$\Delta T \rightarrow$ variacção entre o $T_{cav}(T_w)$ e $T_{água}(25^o)$

Verificação do dimensionamento das linhas de água		
Re	15447,92	
v	8113,83	m/s
D	0,02	m
υ	0,01	m^2/s

Erro j		
αTm	0,50	W/m^2ºC
D	0,02	m
λtw	29,00	W/mºC
Bi	0,000266	
j	11,52	%

Verificação do dimensionamento das linha de água

O fluido de refrigeração deverá ter um escoamento turbulento para retirar o calor de forma mais eficiente assim:

Re>2300

$$\boxed{\mathrm{Re} = \frac{v \times D}{\upsilon}}$$

$v \rightarrow$ velocidade de escoamento [m/s]

$\upsilon = \dfrac{4 \times \dot{m}}{\pi \times D^2 \times \rho_{água}}$ viscosidade cinemática [m²/s]

erro j

$$j = 2.4 \times \mathrm{Bi}^{0.22} \times \left(\frac{b}{a}\right)^{2.8 \times \left|\ln\left(\frac{b}{a}\right)\right|} \quad [\%] \qquad \text{e} \qquad Bi = \frac{\alpha_{Tm} \times D}{\lambda_W}$$

$\alpha_{Tm} \rightarrow$ coefeciente de tranferência de calor da água $\rightarrow 0.5[\mathrm{W/m^2 °C}]$

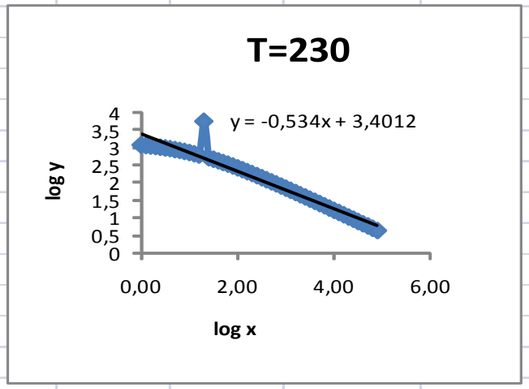
$\lambda_W \rightarrow$ condutividade térmica do aço $\rightarrow 48[\mathrm{W/m\ °C}]$

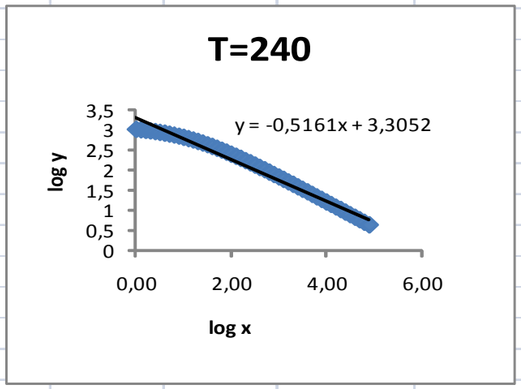
$$\text{intervalo admissivel para j} \begin{cases} \text{2 a 5\% semi cristalinos} \\ \text{5 a 10\% amorfos} \end{cases}$$

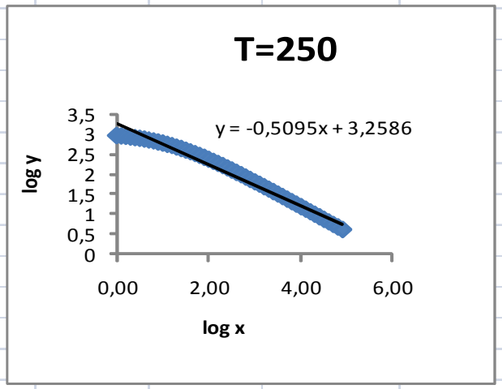
Parâmetros de injecção

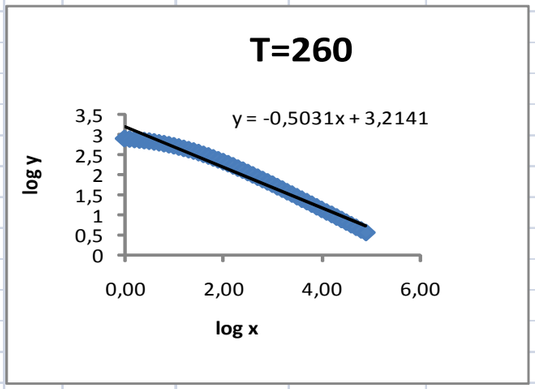
230 °C					240 °C					250 °C					260 °C				
T	X	Y	Log(x)	Log(y)	T	X	Y	Log(x)	Log(y)	T	X	Y	Log(x)	Log(y)	T	X	Y	Log(x)	Log(y)
230	1	1195,61	0,00E+00	3,08E+00	240	1	1051,85	0,00E+00	3,02E+00	250	1	931,967	0,00E+00	2,97E+00	260	1	831,201	0,00E+00	2,92E+00
230	1,25893	1160,91	1,00E-01	3,06E+00	240	1,25893	1023,52	1,00E-01	3,01E+00	250	1,25893	908,577	1,00E-01	2,96E+00	260	1,25893	811,703	1,00E-01	2,91E+00
230	1,58489	1123,1	2,00E-01	3,05E+00	240	1,58489	992,498	2,00E-01	3,00E+00	250	1,58489	882,875	2,00E-01	2,95E+00	260	1,58489	790,201	2,00E-01	2,90E+00
230	1,99526	1082,21	3,00E-01	3,03E+00	240	1,99526	958,793	3,00E-01	2,98E+00	250	1,99526	854,824	3,00E-01	2,93E+00	260	1,99526	766,643	3,00E-01	2,88E+00
230	2,51189	1038,36	4,00E-01	3,02E+00	240	2,51189	922,454	4,00E-01	2,96E+00	250	2,51189	824,438	4,00E-01	2,92E+00	260	2,51189	741,017	4,00E-01	2,87E+00
230	3,16228	991,739	5,00E-01	3,00E+00	240	3,16228	883,606	5,00E-01	2,95E+00	250	3,16228	791,79	5,00E-01	2,90E+00	260	3,16228	713,357	5,00E-01	2,85E+00
230	3,98107	942,647	6,00E-01	2,97E+00	240	3,98107	842,45	6,00E-01	2,93E+00	250	3,98107	757,014	6,00E-01	2,88E+00	260	3,98107	683,75	6,00E-01	2,83E+00
230	5,01187	891,459	7,00E-01	2,95E+00	240	5,01187	799,266	7,00E-01	2,90E+00	250	5,01187	720,316	7,00E-01	2,86E+00	260	5,01187	652,344	7,00E-01	2,81E+00
230	6,30957	838,632	8,00E-01	2,92E+00	240	6,30957	754,408	8,00E-01	2,88E+00	250	6,30957	681,967	8,00E-01	2,83E+00	260	6,30957	619,344	8,00E-01	2,79E+00
230	7,94328	784,692	9,00E-01	2,89E+00	240	7,94328	708,295	9,00E-01	2,85E+00	250	7,94328	642,299	9,00E-01	2,81E+00	260	7,94328	585,015	9,00E-01	2,77E+00
230	10	730,211	1,00E+00	2,86E+00	240	10	661,398	1,00E+00	2,82E+00	250	10	601,7	1,00E+00	2,78E+00	260	10	549,673	1,00E+00	2,74E+00
230	12,5893	675,784	1,10E+00	2,83E+00	240	12,5893	614,223	1,10E+00	2,79E+00	250	12,5893	560,596	1,10E+00	2,75E+00	260	12,5893	513,675	1,10E+00	2,71E+00
230	15,8489	622,004	1,20E+00	2,79E+00	240	15,8489	567,286	1,20E+00	2,75E+00	250	15,8489	519,434	1,20E+00	2,72E+00	260	15,8489	477,407	1,20E+00	2,68E+00
230	19,9526	5694,36	1,30E+00	3,76E+00	240	19,9526	521,094	1,30E+00	2,72E+00	250	19,9526	478,665	1,30E+00	2,68E+00	260	19,9526	441,267	1,30E+00	2,64E+00
230	25,1189	518,595	1,40E+00	2,71E+00	240	25,1189	476,123	1,40E+00	2,68E+00	250	25,1189	438,72	1,40E+00	2,64E+00	260	25,1189	405,645	1,40E+00	2,61E+00
230	31,6228	469,926	1,50E+00	2,67E+00	240	31,6228	432,795	1,50E+00	2,64E+00	250	31,6228	400	1,50E+00	2,60E+00	260	31,6228	370,912	1,50E+00	2,57E+00
230	39,8107	423,79	1,60E+00	2,63E+00	240	39,8107	391,471	1,60E+00	2,59E+00	250	39,8107	362,851	1,60E+00	2,56E+00	260	39,8107	337,4	1,60E+00	2,53E+00
230	50,1187	380,461	1,70E+00	2,58E+00	240	50,1187	352,435	1,70E+00	2,55E+00	250	50,1187	327,562	1,70E+00	2,52E+00	260	50,1187	305,393	1,70E+00	2,48E+00
230	63,0957	340,122	1,80E+00	2,53E+00	240	63,0957	315,895	1,80E+00	2,50E+00	250	63,0957	294,355	1,80E+00	2,47E+00	260	63,0957	275,118	1,80E+00	2,44E+00
230	79,4328	302,871	1,90E+00	2,48E+00	240	79,4328	281,982	1,90E+00	2,45E+00	250	79,4328	263,381	1,90E+00	2,42E+00	260	79,4328	246,744	1,90E+00	2,39E+00
230	100	268,73	2,00E+00	2,43E+00	240	100	250,754	2,00E+00	2,40E+00	250	100	234,73	2,00E+00	2,37E+00	260	100	220,378	2,00E+00	2,34E+00
230	125,893	237,655	2,10E+00	2,38E+00	240	125,893	222,209	2,10E+00	2,35E+00	250	125,893	208,428	2,10E+00	2,32E+00	260	125,893	196,074	2,10E+00	2,29E+00
230	158,489	209,546	2,20E+00	2,32E+00	240	158,489	196,289	2,20E+00	2,29E+00	250	158,489	184,453	2,20E+00	2,27E+00	260	158,489	173,836	2,20E+00	2,24E+00
230	199,526	184,264	2,30E+00	2,27E+00	240	199,526	172,894	2,30E+00	2,24E+00	250	199,526	162,739	2,30E+00	2,21E+00	260	199,526	153,624	2,30E+00	2,19E+00
230	251,189	161,642	2,40E+00	2,21E+00	240	251,189	151,894	2,40E+00	2,18E+00	250	251,189	143,185	2,40E+00	2,16E+00	260	251,189	135,367	2,40E+00	2,13E+00
230	316,228	141,492	2,50E+00	2,15E+00	240	316,228	133,135	2,50E+00	2,12E+00	250	316,228	125,67	2,50E+00	2,10E+00	260	316,228	118,966	2,50E+00	2,08E+00
230	398,107	123,616	2,60E+00	2,09E+00	240	398,107	116,452	2,60E+00	2,07E+00	250	398,107	110,053	2,60E+00	2,04E+00	260	398,107	104,307	2,60E+00	2,02E+00
230	501,187	107,815	2,70E+00	2,03E+00	240	501,187	101,674	2,70E+00	2,01E+00	250	501,187	96,1875	2,70E+00	1,98E+00	260	501,187	91,2618	2,70E+00	1,96E+00
230	630,957	93,8935	2,80E+00	1,97E+00	240	630,957	88,6264	2,80E+00	1,95E+00	250	630,957	83,9224	2,80E+00	1,92E+00	260	630,957	79,6994	2,80E+00	1,90E+00
230	794,328	81,6616	2,90E+00	1,91E+00	240	794,328	77,1431	2,90E+00	1,89E+00	250	794,328	73,1085	2,90E+00	1,86E+00	260	794,328	69,4871	2,90E+00	1,84E+00
230	1000	70,9411	3,00E+00	1,85E+00	240	1000	67,0634	3,00E+00	1,83E+00	250	1000	63,6018	3,00E+00	1,80E+00	260	1000	60,4953	3,00E+00	1,78E+00
230	1258,93	61,5656	3,10E+00	1,79E+00	240	1258,93	58,2365	3,10E+00	1,77E+00	250	1258,93	55,2654	3,10E+00	1,74E+00	260	1258,93	52,5996	3,10E+00	1,72E+00
230	1584,89	53,3818	3,20E+00	1,73E+00	240	1584,89	50,5228	3,20E+00	1,70E+00	250	1584,89	47,9716	3,20E+00	1,68E+00	260	1584,89	45,6832	3,20E+00	1,66E+00
230	1995,26	46,2502	3,30E+00	1,67E+00	240	1995,26	43,7938	3,30E+00	1,64E+00	250	1995,26	41,6025	3,30E+00	1,62E+00	260	1995,26	39,6373	3,30E+00	1,60E+00

230	2511,89	40,0445	3,40E+00	1,60E+00	240	2511,89	37,9333	3,40E+00	1,58E+00	250	2511,89	36,0503	3,40E+00	1,56E+00	260	2511,89	34,362	3,40E+00	1,54E+00
230	3162,28	34,6511	3,50E+00	1,54E+00	240	3162,28	32,836	3,50E+00	1,52E+00	250	3162,28	31,2175	3,50E+00	1,49E+00	260	3162,28	29,7665	3,50E+00	1,47E+00
230	3981,07	29,9689	3,60E+00	1,48E+00	240	3981,07	28,408	3,60E+00	1,45E+00	250	3981,07	27,0162	3,60E+00	1,43E+00	260	3981,07	25,7689	3,60E+00	1,41E+00
230	5011,87	25,908	3,70E+00	1,41E+00	240	5011,87	24,5652	3,70E+00	1,39E+00	250	5011,87	23,3682	3,70E+00	1,37E+00	260	5011,87	22,2955	3,70E+00	1,35E+00
230	6309,57	22,3888	3,80E+00	1,35E+00	240	6309,57	21,2333	3,80E+00	1,33E+00	250	6309,57	20,2035	3,80E+00	1,31E+00	260	6309,57	19,2808	3,80E+00	1,29E+00
230	7943,28	19,3412	3,90E+00	1,29E+00	240	7943,28	18,3468	3,90E+00	1,26E+00	250	7943,28	17,4605	3,90E+00	1,24E+00	260	7943,28	16,6666	3,90E+00	1,22E+00
230	10000	16,7037	4,00E+00	1,22E+00	240	10000	15,8476	4,00E+00	1,20E+00	250	10000	15,0848	4,00E+00	1,18E+00	260	10000	14,4015	4,00E+00	1,16E+00
230	12589,3	14,4223	4,10E+00	1,16E+00	240	12589,3	13,6852	4,10E+00	1,14E+00	250	12589,3	13,0285	4,10E+00	1,11E+00	260	12589,3	12,4403	4,10E+00	1,09E+00
230	15848,9	12,4498	4,20E+00	1,10E+00	240	15848,9	11,8151	4,20E+00	1,07E+00	250	15848,9	11,2496	4,20E+00	1,05E+00	260	15848,9	10,7432	4,20E+00	1,03E+00
230	19952,6	10,7451	4,30E+00	1,03E+00	240	19952,6	10,1984	4,30E+00	1,01E+00	250	19952,6	9,71148	4,30E+00	9,87E-01	260	19952,6	9,2754	4,30E+00	9,67E-01
230	25118,9	9,2723	4,40E+00	9,67E-01	240	25118,9	8,80144	4,40E+00	9,45E-01	250	25118,9	8,38204	4,40E+00	9,23E-01	260	25118,9	8,00648	4,40E+00	9,03E-01
230	31622,8	8,00028	4,50E+00	9,03E-01	240	31622,8	7,59466	4,50E+00	8,81E-01	250	31622,8	7,23339	4,50E+00	8,59E-01	260	31622,8	6,9099	4,50E+00	8,39E-01
230	39810,7	6,90194	4,60E+00	8,39E-01	240	39810,7	6,55249	4,60E+00	8,16E-01	250	39810,7	6,24126	4,60E+00	7,95E-01	260	39810,7	5,9626	4,60E+00	7,75E-01
230	50118,7	5,95378	4,70E+00	7,75E-01	240	50118,7	5,65269	4,70E+00	7,52E-01	250	50118,7	5,38454	4,70E+00	7,31E-01	260	50118,7	5,14447	4,70E+00	7,11E-01
230	63095,7	5,13541	4,80E+00	7,11E-01	240	63095,7	4,87597	4,80E+00	6,88E-01	250	63095,7	4,64493	4,80E+00	6,67E-01	260	63095,7	4,43809	4,80E+00	6,47E-01
230	79432,8	4,42919	4,90E+00	6,46E-01	240	79432,8	4,20563	4,90E+00	6,24E-01	250	79432,8	4,00655	4,90E+00	6,03E-01	260	79432,8	3,82832	4,90E+00	5,83E-01

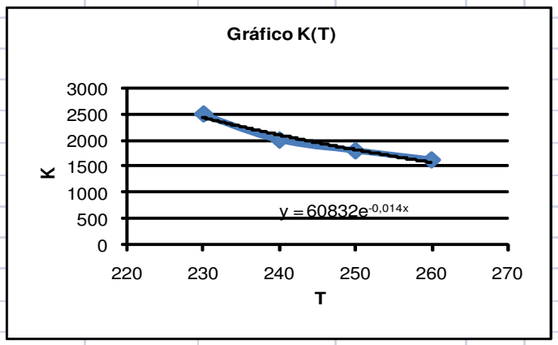








B	T	m	k	n
-0,53	230	3,4012	2,52E+03	4,66E-01
-0,52	240	3,3052	2,02E+03	4,84E-01
-0,51	250	3,2586	1,81E+03	4,91E-01
-0,5	260	3,2141	1,64E+03	4,97E-01



n médio		
0,48	A	60832
	C	-0,014

Lei de Potência

$$\underbrace{\log(\eta)}_{y\,=} = \underbrace{\log K}_{m\,=} + \underbrace{(n-1)}_{Bx}\log\tau$$

$m = \log K$

$y = Ae^{Cx}$

$B = n - 1$

η viscosidade [Pa.s]
τ Tensão de corte [Pa]
K Consistencia [Pa.s]
$\dot{\gamma}$ velocidade de corte
n índicie de potência
(n=1 para fluidos Newtonianos e n<1 para polimeros)

$$K(T) = A \times e^{CT}$$

n = usar valor médio das 3 temperaturas

Cálculo do caudal de injecção

$$Q_{inj} = 67 \times \left(\frac{v_{inj}}{100}\right)^{0.73}$$

v_{inj} = volume de injecção

!!!!(a formula só é válida para V em cm3)

Dimensionamento do sistema de alimentação

Dimensionamento do bico de injecção : $\dot{\gamma}_{max} = \frac{3n+1}{4n} \times \frac{4 \times Q_{inj}}{\pi R^3}$

$\dot{\gamma}_{max} = 1E5$ bico de injecção (ataque)

$\dot{\gamma}_{max} = 1E3$ Gito se for canal quente nao é necessário contabilizar)

Dimensionamento

Qinj	272,31	cm3/s
V inj	682,69	cm3
tinj	2,51	s

imensionamento dos canais de alimentaçã

γ max	1,00E+03	c.alim.
R	0,60	cm
D	1,21	cm

Dimensionamento da bayer

a velocidade de corte é maior devido a espessura ser reduzida

γ max	1,00E+05	leque	H=0,50*S	0,14	cm	1,35	mm
w	0,59	cm	Q/2				

$$\dot{\gamma} = \frac{2n+1}{n} \times \frac{4Q \times H/2}{W \times H^3}$$

- Largura (W): 6.4 mm – 25% a largura da moldação
- Espessura máxima (h): 75% da espessura nominal da moldação

Quedas de pressão

Secção	W (m)	L (m)	H (m)	Vinj (m^3)	tinj (s)	Q(m^3/s)	y~	Ti	K(T)	η(T)	Fo	α	H/2	a	Tdv	Ta	Tc	Tfinal	Tinj	Tw	Δpi (Pa)
1	0,88	0,005	2,70E-03	1,19E-05	0,044	0,00027231	344,9	240	2,11E+03	103,82	1,56E-03	6,50E-08	1,35E-03	2,47	0,6	223,03381	17,0	223,7	240	17	1,33E+05
2	1,84	0,0025	2,70E-03	1,24E-05	0,046	0,00027231	165,0	223,67633	2,66E+03	190,83	1,63E-03	6,50E-08	1,35E-03	2,47	0,6	207,86895	15,8	208,5			5,83E+04
3	4,51	0,0025	2,70E-03	3,04E-05	0,112	0,00027231	67,4	208,45943	3,29E+03	374,77	3,98E-03	6,50E-08	1,35E-03	2,47	1,2	191,31105	17,1	192,5			4,68E+04
4	6,70	0,0025	2,70E-03	4,52E-05	0,166	0,00027231	45,3	192,4707	4,11E+03	575,25	5,93E-03	6,50E-08	1,35E-03	2,47	1,8	174,96895	17,5	176,7			4,83E+04
5	4,29	0,005	2,70E-03	5,79E-05	0,213	0,00027231	70,8	176,74896	5,12E+03	569,32	7,58E-03	6,50E-08	1,35E-03	2,47	3,5	159,49193	17,3	163,0			1,49E+05
6	3,02	0,0073	2,70E-03	5,95E-05	0,218	0,00027231	100,6	163,01521	6,21E+03	575,78	7,79E-03	6,50E-08	1,35E-03	2,47	5,2	147,09096	15,9	152,3			3,13E+05
7	0,80	0,026	2,70E-03	5,65E-05	0,207	0,00027231	377,3	152,29334	7,21E+03	338,41	7,40E-03	6,50E-08	1,35E-03	2,47	10,9	137,79785	14,5	148,7			2,46E+06
8	0,88	0,026	2,70E-03	6,16E-05	0,226	0,00027231	346,3	148,68812	7,59E+03	372,01	8,06E-03	6,50E-08	1,35E-03	2,47	12,0	134,15253	14,5	146,1			2,48E+06
9	0,92	0,026	2,70E-03	6,48E-05	0,238	0,00027231	329,1	146,12427	7,86E+03	395,88	8,48E-03	6,50E-08	1,35E-03	2,47	12,7	131,60893	14,5	144,3			2,51E+06
10	1,27	0,017	2,70E-03	5,84E-05	0,215	0,00027231	238,5	144,34881	8,06E+03	479,10	7,65E-03	6,50E-08	1,35E-03	2,47	10,1	130,54634	13,8	140,6			1,44E+06
11	0,98	0,017	2,70E-03	4,52E-05	0,166	0,00027231	308,6	140,62716	8,49E+03	441,96	5,92E-03	6,50E-08	1,35E-03	2,47	9,3	128,30281	12,3	137,6			1,72E+06
12	0,82	0,019	2,70E-03	4,19E-05	0,154	0,00027231	371,7	137,60225	8,86E+03	418,90	5,49E-03	6,50E-08	1,35E-03	2,47	9,9	125,84385	11,8	135,7			2,19E+06
13	0,79	0,019	2,70E-03	4,04E-05	0,149	0,00027231	385,2	135,69503	9,10E+03	422,41	5,30E-03	6,50E-08	1,35E-03	2,47	9,9	124,24067	11,5	134,2			2,29E+06
14	0,45	0,019	2,70E-03	2,32E-05	0,085	0,00027231	671,0	134,17436	9,30E+03	324,10	3,04E-03	6,50E-08	1,35E-03	2,47	7,6	124,28138	9,9	131,9			3,06E+06
15	2,91	0,003	2,70E-03	2,36E-05	0,087	0,00027231	104,4	131,90306	9,60E+03	873,48	3,09E-03	6,50E-08	1,35E-03	2,47	3,2	122,17252	9,7	125,4			2,03E+05
16	1,23	0,005	2,70E-03	1,66E-05	0,061	0,00027231	246,5	125,41589	1,05E+04	614,03	2,18E-03	6,50E-08	1,35E-03	2,47	3,8	116,78398	8,6	120,6			5,61E+05
17	0,49	0,005	2,70E-03	6,67E-06	0,024	0,00027231	614,9	120,584	1,12E+04	410,06	8,73E-04	6,50E-08	1,35E-03	2,47	2,5	113,11367	7,5	115,7			9,34E+05
			Σ	0,0006562	2,410															Σ	2,06E+07

Vinjt	656,20	cm^3		
Qinj	272,31	cm^3/s	0,000	m^3/s
n	0,48			
K(t)				
A	60832,00			
C	-0,01			
Text	108,00	ºC		
Tfund	240,00	ºC		
ρ	0,87	Kg/m^3		
Cp	2783,70	J/Kg*K		

$$T_{dv} = \frac{t_{inj} \times \eta \times \dot{\gamma}^2}{\rho \times Cp}$$

$$\dot{\gamma} = \frac{2n+1}{n} \times \frac{4Q \times H/2}{W \times H^3}$$

$$\eta = A \times exp(C \times T) \times \dot{\gamma}^{n-1}$$

$$Fenda\ Plana: \Delta P = \frac{2 \times K \times L_i}{H_i^{2n+1}} \times \left(\frac{2n+1}{n} \cdot \frac{2Q_i}{W_i} \right)^n$$

$$Canal\ cicular: \Delta P = -\frac{2 \times K \times L_i}{R_i^{3n+1}} \times \left(\frac{3n+1}{n} \cdot \frac{Q_i}{\pi} \right)^n$$

$$Disco\ injectado\ ao\ centro: \Delta P = -\frac{K}{(1-n)H^{2n+1}} \times \left(\frac{2n+1}{n} \cdot \frac{Q_i}{4\pi} \right)^n (R_1^{1-n} - R_0^{1-n})$$

Força de fecho							
Ap (cm2)	1520,77						
Pinj (bar)	2059,32		Ff (KN)	7829,38		Ff (T)	782,94
Pm (bar)	514,83						
Tinjteórico (s)	2,41						
Vinjteórico	656,20	cm^3					
Vinj_mold	682,69	cm^3					
erro	-4,04	%					
volume_catia	333,07	cm3	666,13				
Δp_pc (Pa)	20593189,60						
Δp_si (Pa)							
Pinj (Pa)	20593189,60	20,59	Mpa				

$$F_f = (A_p \times P_m) / 100$$

em que:

F_f – força de fecho [kN]

A_p – área projectada da moldação [cm^2]

P_m – pressão média na impressão durante a fase de enchimento [bar] (cerca de 1/3 a 1/5 da pressão de injecção)

A espessura da peça não é igual em todas as zonas. Aumentando a espessuar da peça, as quedas de pressão diminuem e a força de fecho diminui

Resultados

P_{inj}			20593189,60	Pa
	$\Delta p_{percurso\ crítico}$		20593189,60	Pa
	$\Delta p_{sistema\ de\ enchimento}$		0,00	Pa
Q_{inj}			272,31	cm^3/s
Pm			514,83	bar
Tinj			2,51	s
Tinj			0,00	s
Vinjt			656,20	cm^3
V_{inj}			682,69	cm^3
Ap			1520,77	cm^2
F_{fecho}			782,94	t
Q_A			2943,87	W
	Q_{cd}		2340,36	W
		A_{fix}	3,66	m^2
		β	80,00	
		T_{amb}	25,00	ºC
		T_{mold}	17,00	ºC
	Q_{cv}		550,53	W
		A_{lat}	4,59	m^2
		h	15,00	W/m^2K
	Q_r		52,98	W
		σ	5,67	W/m^2K^4
		ε	0,25	
		θ_{amb}	298,18	K
		θ_{mold}	290,18	K

Q_F			16153,61	W
		m	0,60	kg
		h_{inj}	516216,00	J/Kg
		h_{ext}	166104,00	J/Kg
		t_c	12,93	s
Q_{MA}			-19097,48	W
ΔT1			3,00	ºC
			1520,74	Kg/s
			25,35	l/min
d			15,45	mm
L			26202,23	mm
		a	15,45	mm
		e	7,72	mm
		b	46,34	mm
R_e			15447,92	
Bi			0,00	
j			11,52	%
C			4,19	KJ/Kg C
ΔT2			8,00	ºC
$\rho_{água}$			1000,00	Kg/m^3
λ_{TM}			29,00	W/mºC
α_{TM}			0,50	$W/m^2ºC$

Anexo C – Parâmetros de ensaio do molde

Simoldes

Registo de Parametros de Ensaio do Molde

Direcção Engenharia

Molde Nº: 7030 **Projecto:** SP028/03 **Fornecedor** IGN 348

Desig. Peça: Pilar A Bavette

Ensaio Nº	1	2	3	4	5	6	7
Data	30/04/2009						

Local de Ensaio SA **Máquina** KM 1000 **Afinador** Nomo **Coordenador Técnico** V. Tavares

Dados do Material

Desig. Material	PPT
Cod. Interno.	
Lote Cor.	
Estufa	S [X]
Temperatura	80 ºC
Tempo	2 h

Temperatura do Fuso

245 ºC	245 ºC	245 ºC	240 ºC	230 ºC	220 ºC

Bico 240 ºC Diametro do Fuso Ø ____ mm

DADOS DO MOLDE

Comprimento	mm
Largura	mm
Altura	mm

EXTRAÇÃO	
MECANICA	
HIDRÁULICA	X
MOVIMENTOS	Nº
Hidráulicos	
Mecanicos	
Anilha Centragem	
Diam:	mm

Temperatura média do Molde	Teorica	Real
Cavidade	Uniforme ºC	ºC
Macho	ºC	ºC
Movimentos	ºC	ºC
Nº circuitos de Água		

TEMPERATURA DO MOLDE

Grupo 1	230 ºC	Grupo 15	ºC	Grupo 29	ºC
Grupo 2	ºC	Grupo 16	ºC	Grupo 30	ºC
Grupo 3	ºC	Grupo 17	ºC	Grupo 31	ºC
Grupo 4	ºC	Grupo 18	ºC	Grupo 32	ºC
Grupo 5	ºC	Grupo 19	ºC	Grupo 33	ºC
Grupo 6	ºC	Grupo 20	ºC	Grupo 34	ºC
Grupo 7	ºC	Grupo 21	ºC	Grupo 35	ºC
Grupo 8	ºC	Grupo 22	ºC	Grupo 36	ºC
Grupo 9	ºC	Grupo 23	ºC	Grupo 37	ºC
Grupo 10	ºC	Grupo 24	ºC	Grupo 38	ºC
Grupo 11	ºC	Grupo 25	ºC	Grupo 39	ºC
Grupo 12	ºC	Grupo 26	ºC	Grupo 40	ºC
Grupo 13	ºC	Grupo 27	ºC	Grupo 41	ºC
Grupo 14	ºC	Grupo 28	ºC	Grupo 42	ºC

DADOS DA PEÇA

Nº Injecções		Peso Injecção	gr.
Nº Cavidades		Peso Gitos	gr.
Nº Rejeições		Cota indexa	mm

DADOS DE ENSAIO/PRODUÇÃO

Tipo de defeito	Incompletos		Raiados		Queimados	
	Manchas		Deformações		Marcas extr.	

DADOS DE INJECÇÃO

1ª Pressão	115	bar
2ª Pressão	42	bar
Tempo 1ª pressão	3,7	seg.
Tempo 2ª pressão	7	seg.
Tempo pausa Plast.	0,5	seg.
Tempo Plastificação	9,8	seg.
Tempo arrefecimento	15	seg.
Tempo Ciclo	60	seg.
Força de Fecho	800	Ton.

Almofada	Comutação	velocidade de injeção mm/seg	Plastificação	Descompr.
19,5 mm	23 mm	37%	100 mm	3 mm
				Perfil velo. Injeção mm .
				Perfil 2ª pressão
				Perfil Plastificação
15				Perfil contra pressão

Observações

falta etiquetas identificação

INJECÇÃO GÁS

PAUSA INJ.
seg

Bico 1			Bico 2		
T.S.P	Tempo	Pressão	T.S.P.	Tempo	Pressão

Bico 3			Bico 4		
T.S.P	Tempo	Pressão	T.S.P.	Tempo	Pressão

INJECÇÃO SEQUENCIAL

Bico	Abre	Fecha	Abre	Fecha
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				

Realizado Por: Carlos Oliveira

Dist. DPTP [ ] DD [ ] Coord. Projecto ____ [ ]
DQ [ ] DO [ ] Outro(s) [ ]

MOO3FI068

Anexo D – Ficha técnica do material

Hostacom X 4323 3 S63

Compounded Polyolefin

Product Description

Hostacom X 4323/3 S63 is a 20% mineral filled polypropylene copolymer . Low odour, low fogging and low carbon-emission. In use for interior application.

Product Characteristics

Status	Commercial: Active
Test Method used	ISO
Availability	Europe, North America, Latin America
Features	Copolymer
Typical Customer Applications	Interior Applications

Typical Properties	**Method**	**Value**	**Unit**
Physical			
Density	ISO 1183	1.04	g/cm³
Melt volume flow rate (230°C/2.16Kg)	ISO 1133	8.0	cm³/10min
Mechanical			
Tensile Modulus (Secant)	ISO 527-1, -2	2000	MPa
Tensile Stress at Yield (50 mm/min)	ISO 527-1, -2	22	MPa
Tensile Strain at Yield (50 mm/min)	ISO 527-1, -2	4.0	%

Impact			
Charpy unnotched impact strength (23 °C, Type 1, Edgewise)	ISO 179	No Break	kJ/m²
Charpy notched impact strength (23 °C, Type 1, Edgewise, Notch A)	ISO 179	11	kJ/m²
Thermal			
Heat deflection temperature A (1.80 MPa) Unannealed	ISO 75A-1, -2	58	°C
Vicat softening temperature (A50 (50°C/h 10N))	ISO 306	60	°C

Notes

Typical properties; not to be construed as specifications.

© 2003 Basell Service Company B.V.

For the contact details of the LyondellBasell company selling this product in your country, please visit http://www.basell.com/.

Before using a LyondellBasell product, customers and other users should make their own independent determination that the product is suitable for the intended use. They should also ensure that they can use the LyondellBasell product safely and legally. This document does not constitute a warranty, express or implied, including a warranty of merchantability or fitness for a particular purpose. In addition, no immunity under LyondellBasell's or third parties' intellectual property rights shall be implied from this document. No one is authorized to make any warranties, issue any immunities or assume any liabilities on behalf of LyondellBasell except in a writing signed by an authorized LyondellBasell employee. Unless otherwise agreed in writing, the exclusive remedy for all claims is replacement of the product or refund of the purchase price at LyondellBasell's option, and in no event shall LyondellBasell be liable for special, consequential, incidental, punitive or exemplary damages.

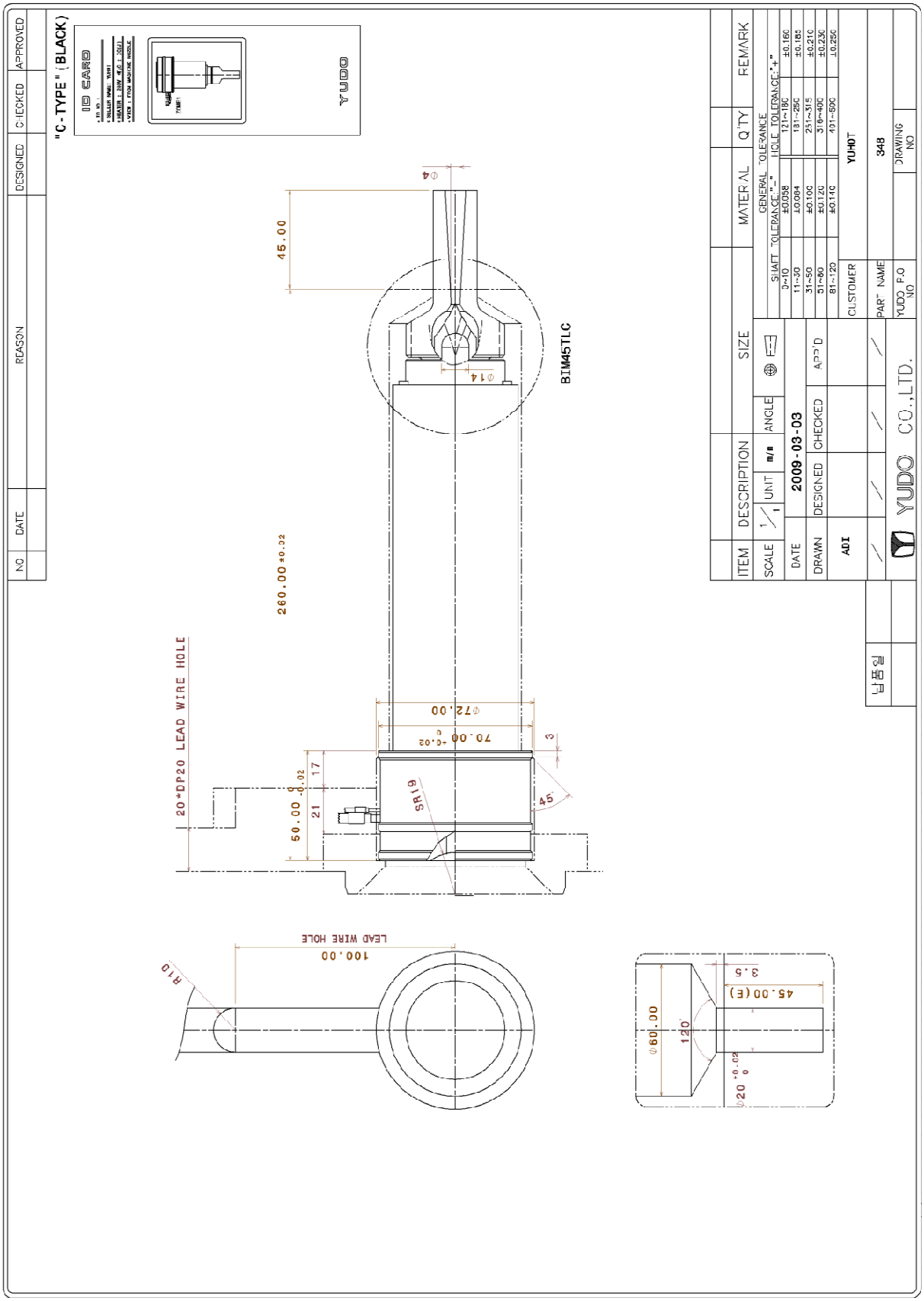
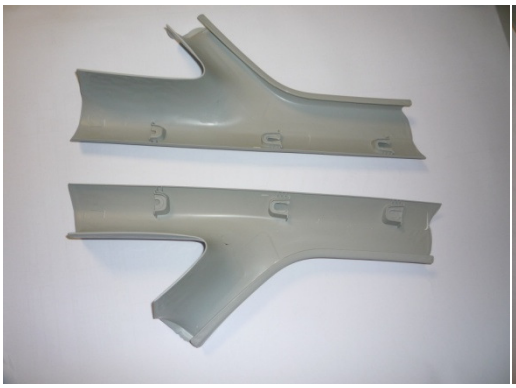
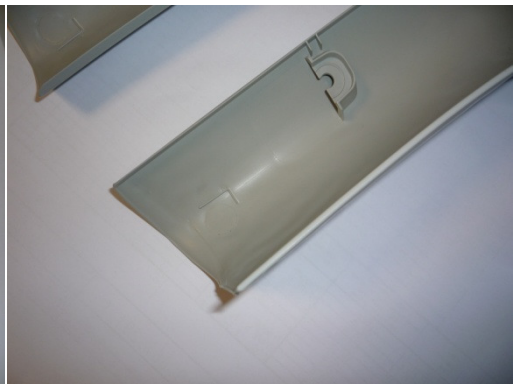
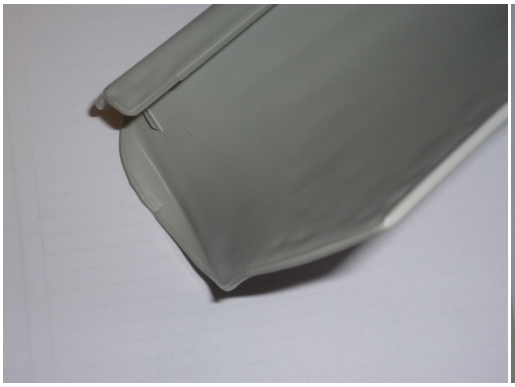
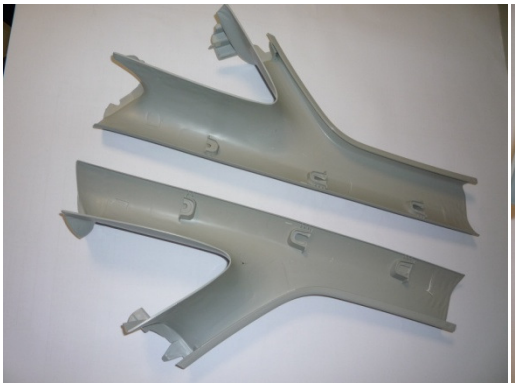
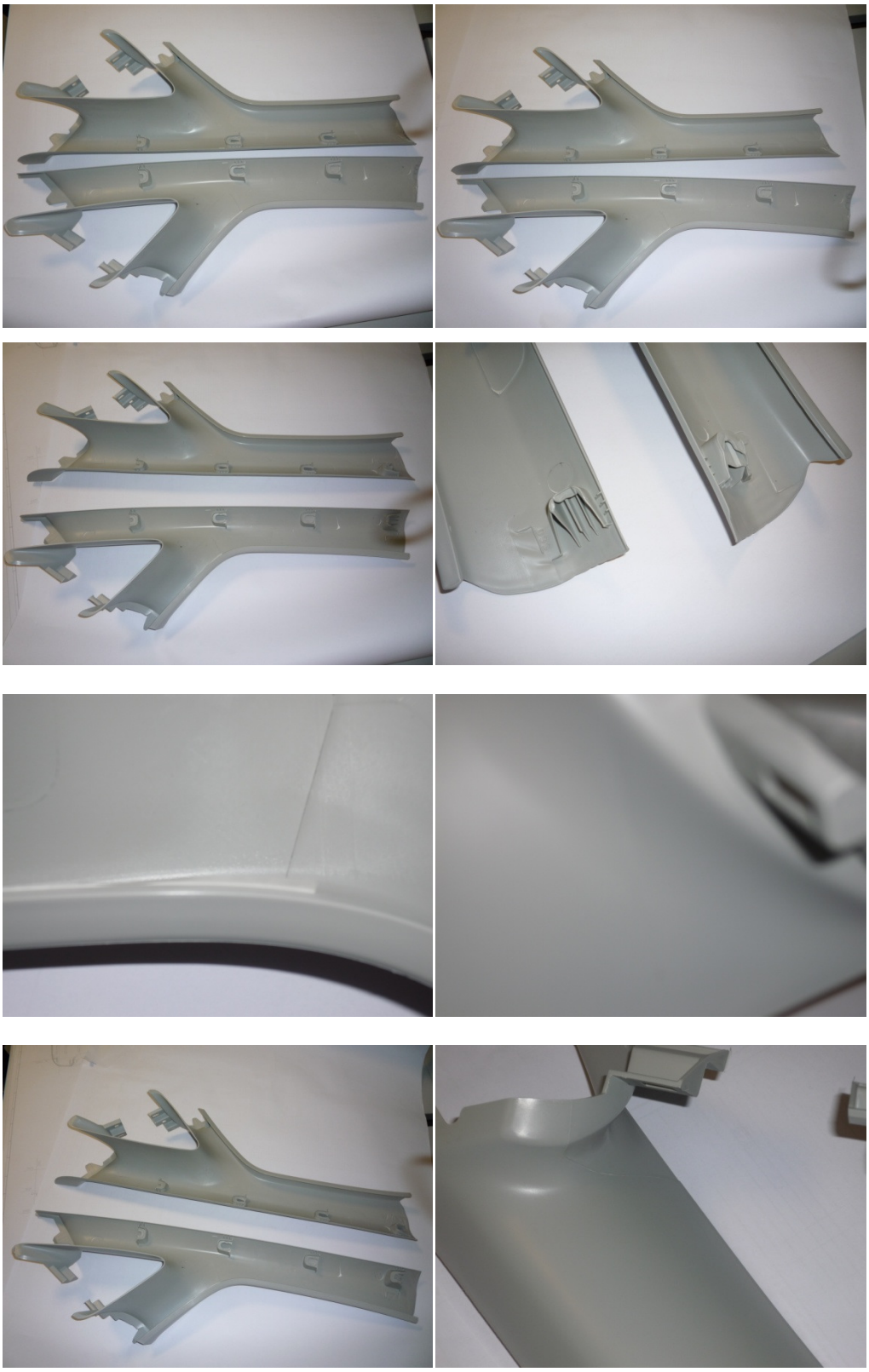
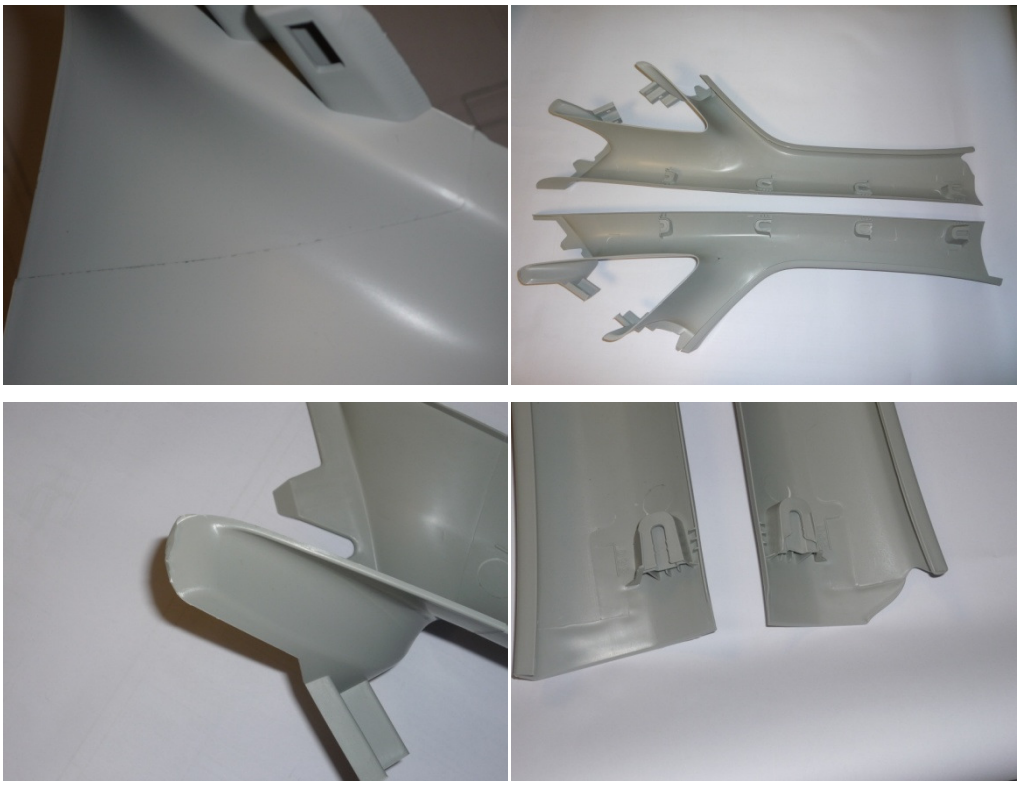
CRP, Adflex, Adstif, Adsyl, Akoalit, Akoafloor, Avant, Catalloy, Clyrell, Entegrity, Get in touch with, Hifax, Higran, Histif, Hostacom, Hostalen, LIPP, Lucalen, Luflexen, Lupocomp, Lupolen, Lupolex, Luposim, Lupostress, Lupotech, Metocene, Moplen, Pristene, Purell, Pro-fax, Sholybox, Softell, Spherilene, Spheripol, Spherizone, Stretchene, Toppyl and *Valtec* are trademarks owned or used by LyondellBasell group companies.

Adflex, Adstif, Adsyl, Clyrell, CRP, Hifax, Hostacom, Hostalen, Lucalen, Luflexen, Lupolen, Lupotech, Moplen and *Pro-fax* are registered in the U.S. Patent and Trademark Office.

Unless specifically indicated, the grades mentioned are not suitable for applications in the pharmaceutical/medical sector.

Release Date: 14 Nov 2007

Anexo E – Folha técnica do distribuidor



Anexo F - Galeria de fotos