



INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO
Universidade Técnica de Lisboa

Estudo Teórico-Experimental do Fabrico de Peças Poliméricas por Injecção

Fábio Duarte Nóbrega Rodrigues

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Mecânica

Júri

Presidente: Prof. Rui Manuel dos Santos Oliveira Baptista

Orientador: Prof. Jorge Manuel da Conceição Rodrigues

Co-Orientador: Prof.^a Inês da Fonseca Pestana Ascenso Pires

Vogal: Eng. Luís Paulo Gonçalves Neves

Outubro – 2010

Este trabalho reflecte as ideias dos seus autores que, eventualmente, poderão não coincidir com as do Instituto Superior Técnico.

Agradecimentos

Agradeço ao meu Orientador, Prof. Jorge Rodrigues por toda a sua disponibilidade, experiência e bom ambiente que proporcionou ao longo da realização desta Tese.

À minha Co-Orientadora, Prof.^a Inês Pires por toda a sua dedicação, apoio e conhecimento do *software Autodesk Moldflow Insight®*.

À Prof. Bárbara Almeida pelo auxílio que prestou no levantamento de dados efectuado no início deste trabalho.

À empresa J.Deus® por ter possibilitado este trabalho ao disponibilizar o equipamento necessário e ao Eng. Luís Neves por todos os esclarecimentos e informações que concedeu durante o desenvolvimento do mesmo.

Ao meu colega e amigo Bruno Sousa pelo apoio técnico e moral durante o desenvolvimento deste trabalho.

Finalmente, à minha família e à Caroline por tudo.

Resumo

Neste trabalho estudou-se o fabrico de peças poliméricas por injeção a partir da análise de uma peça concebida em ambiente industrial. Através do *software* de elementos finitos *Autodesk Moldflow Insight®*, simularam-se numericamente as condições reais de processamento com o intuito de extrair os resultados que traduzem as características da peça.

Tendo como referência os resultados obtidos, fez-se uma avaliação do método de controlo utilizado no fabrico da peça, de acordo com as boas práticas inerentes a esta tecnologia de transformação de plásticos. Deste modo, e através da análise do efeito produzido por cada variável individualmente, foi possível sugerir uma definição apropriada das principais variáveis do processo de moldação por injeção tendo em vista a qualidade final do produto. Os resultados alcançados ilustram as vantagens da simulação numérica do processo e da definição apropriada de todos os parâmetros.

Palavras-chave: Moldação por Injeção, Termoplásticos, Método dos Elementos Finitos, Controlo do Processo de Injeção.

Abstract

This thesis gave an analysis of the fabrication process of polymeric parts by injection with reference to a single part conceived in an industrial environment. The use of finite element software, namely the *Autodesk Moldflow Insight®*, brought numerical simulated answers with real processing characteristics. The intent of this approach was to get results translating in the main features of the part in question.

Taking these results into account, an evaluation was done on the control method of the fabrication process of this part, complying with the normal guidelines of the technology of plastic transformation. With this in mind and the effect caused by each variable, a new and more suitable definition was advised in this work, concerning the main variables on the injection mold process, with the products' ultimate standard in mind. The goals achieved illustrate the benefits of the numerical simulation process and the appropriate definition of all parameters.

Keywords: Injection Molding, Thermoplastics, Finite Element Method, Injection Process Control.

Índice

Agradecimentos	i
Resumo	ii
Abstract	iii
Índice	iv
Lista de Figuras	vii
Lista de Quadros	x
Lista de Símbolos	xi
1 Introdução	1
1.1 Formulação do Problema.....	1
1.1.1 Projecto e Concepção de Peças Poliméricas	2
1.1.2 Objectivos.....	3
1.2 Estrutura da Dissertação.....	3
2 Materiais Poliméricos	5
2.1 Grupos de Materiais Poliméricos	5
2.2 Cristalinidade nos Termoplásticos	6
2.3 Pressão, Volume e Temperatura (P-v-T).....	7
2.4 Comportamento Mecânico	8
2.5 Reciclagem.....	10
3 Processos de Transformação de Plásticos	11
3.1 Processo de Industrialização	11
3.1.1 Descrição do Processo Convencional de Moldação por Injecção.....	13
3.1.1.1 Ciclo de Moldação.....	13
3.1.2 Máquina Injectora.....	14
3.1.3 Molde de Injecção	15
3.1.3.1 Gito e Canais de Alimentação.....	16
3.1.3.2 Ataques	17

3.1.3.3	Sistema de Escape de Gases.....	19
3.1.3.4	Sistema de Arrefecimento.....	19
3.1.3.5	Sistema de Extracção	20
4	Aspectos Fenomenológicos e Principais Variáveis do Processo de Moldação por Injecção.....	21
4.1	Preenchimento da Cavidade do Molde.....	21
4.2	Escoamento do Polímero Durante a Fase de Enchimento.....	22
4.2.1	Tensão de Corte do Fluxo.....	23
4.3	Viscosidade do Fundido.....	24
4.4	Compressibilidade do Fundido.....	26
4.5	Pressão de Injecção.....	26
4.5.1	Factores que Influenciam a Pressão de Injecção	26
4.6	Determinação da Rotação do Fuso	28
4.7	Determinação da Almofada.....	28
4.8	Determinação do Curso de Abertura do Molde	29
4.9	Determinação do Perfil de Velocidade de Injecção	29
4.10	Determinação do Perfil de Pressão de Compactação.....	30
4.11	Temperatura do Fundido.....	31
4.12	Temperatura de Superfície do Molde	32
4.13	Temperatura de Extracção Média.....	33
4.14	Tempo de Enchimento	34
4.15	Tempo de Compactação.....	34
4.16	Tempo de Arrefecimento.....	34
4.17	Defeitos de Moldação	36
5	Caso de Estudo – Peça Fabricada por Injecção	37
5.1	Levantamento das Condições de Processamento	38
5.1.1	Base de Comparação das Condições de Processamento	43
5.1.1.1	Resultados Obtidos pela Empresa.....	43
5.2	Simulação Computacional	45
5.2.1	Malha Utilizada no Programa <i>Autodesk Moldflow Insight®</i>	45
5.2.1.1	Pressupostos da Malha <i>Dual-Domain</i>	46
5.2.1.2	Pressupostos Específicos dos Elementos Triangulares na Malha <i>Dual-Domain</i>	46
5.2.2	Reprodução das Condições de Processamento.....	46
5.2.2.1	Resultados	51
5.2.2.2	Avaliação da Massa por Peça Obtida na Reprodução	55
5.2.2.3	Tempo de Ciclo Obtido	56
5.3	Melhoria do Controlo das Variáveis do processo	57
5.3.1	Localização do Ataque	61
5.3.2	Perfil de Velocidades	64

5.3.3	Comutação V/P	65
5.3.4	Pressão de Compactação.....	66
5.4	Alterações Sugeridas para o Controlo do Processo	67
5.4.1	Apresentação e Discussão de resultados.....	68
6	Conclusões	74
6.1	Trabalho Futuro.....	75
	Referências Bibliográficas	77
	Anexo A.....	79

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Classificação dos polímeros sintéticos de acordo com a sua estrutura intermolecular. (Fonte: http://www.demar.eel.usp.br/polimeros)	6
Figura 2.2 – Arrefecimento de termoplásticos não cristalinos e parcialmente cristalinos. (Fonte: http://www.demar.eel.usp.br/polimeros)	7
Figura 2.3 – Curvas P-v-T da poliamida 46 reforçada com 30% de fibra de vidro. (Fonte: ©Autodesk, 2010)	8
Figura 2.4 – Comportamentos típicos de materiais plásticos (Paiva, 2010).	9
Figura 3.1 – Máquina injectora de termoplásticos. (Shoemaker, 2006)	14
Figura 3.2 – Unidade de injeção da máquina injectora. (Fonte: http://www.demet.ufmg.br/docentes/rodrigo/processamento.htm).	15
Figura 3.3 – Configuração do gito (assinalado a vermelho). (Fonte: ©Autodesk, 2010)	16
Figura 3.4 – Ataques de remoção manual (Fonte: ©Autodesk, 2010).	17
Figura 3.5 – Ataques de remoção automática. (Fonte: ©Autodesk, 2010)	18
Figura 3.6 – Rasgo para escape de gases. (Fonte: ©Autodesk, 2010)	19
Figura 3.7 – (a) Cascata com canal central. (b) Cascata de lâmina. (Fonte: ©Autodesk, 2010)	20
Figura 4.1 – Fases do preenchimento da cavidade do molde. (Shoemaker, 2006)	21
Figura 4.2 – Camada solidificada nas paredes do molde. (Shoemaker, 2006)	22
Figura 4.3 – Distribuição da taxa de corte. (Shoemaker, 2006)	23
Figura 4.4 – Orientação molecular ao longo da espessura da peça. (Shoemaker, 2006)	24
Figura 4.5 – Representação esquemática do fluxo de material sujeito ao corte. (Shoemaker, 2006).	25
Figura 4.6 – Evolução da viscosidade em função da taxa de corte. (Beaumont, 2007)	25
Figura 4.7 – Evolução da pressão ao longo do sistema. (Shoemaker, 2006)	26
Figura 4.8 – Ilustração do movimento do fuso. (Shoemaker, 2006)	28
Figura 4.9 – <i>Almofada</i> . (Shoemaker, 2006)	29

Figura 4.10 – Curso de abertura do molde necessário para a extracção da peça. (Fonte: http://www.torresnetworking.com/).....	29
Figura 4.11 – (a) Velocidade da frente de fundido variável. (b) Constante. (Shoemaker, 2006)	30
Figura 4.12 – Degradação térmica do material. (Fonte: ©Autodesk, 2010)	31
Figura 4.13 – Influência da diferença de temperaturas dos lados da cavidade do molde. (Fonte: http://www.torresnetworking.com/).....	33
Figura 4.14 – (a) escoamento laminar. (b) escoamento turbulento. (Shoemaker, 2006)	36
Figura 4.15 – Difusão de calor. (Shoemaker, 2006)	36
Figura 5.1 – Peça fabricada por injeção.	37
Figura 5.2 – a) Máquina Injectora: ENGEL 500 Ton. (b) Molde.	38
Figura 5.3 – Evolução da pressão e força na máquina injectora. (Beaumont, 2007)	39
Figura 5.4 – Detalhe do sistema de alimentação após a eiecção da moldação.	40
Figura 5.5 – Sistema de alimentação modelado.....	40
Figura 5.6 – (a) Curso do fuso. (b) Perfil de velocidades utilizado no controlo do enchimento.	42
Figura 5.7 – Distribuição dos canais do sistema de arrefecimento.	42
Figura 5.8 – Moldação ejectada após um ciclo.....	43
Figura 5.9 – (a) Cavidade do molde. (b) Ataque e canais de alimentação.	44
Figura 5.10 – (a) Peça extraída da cavidade #1. (b) Peça extraída da cavidade #2.	44
Figura 5.11 – Elemento triangular – 3 nós.....	45
Figura 5.12 – Malha Dual-Domain.	46
Figura 5.13 – Malha de elementos finitos.....	47
Figura 5.14 – Sistema de arrefecimento.....	47
Figura 5.15 – Detalhe real da entrada do gito de alimentação.....	48
Figura 5.16 – Pressão de injeção máxima em função de D_i	49
Figura 5.17 – Tempo de injeção em função de D_i	49
Figura 5.18 – Dimensão característica de entrada do gito.	50
Figura 5.19 – Modelação e dimensionamento do gito.....	51
Figura 5.20 – Pressão máxima de injeção em função do tempo de enchimento.	52
Figura 5.21 – Formação da linha de soldadura na fase final do enchimento.....	52
Figura 5.22 – Linha de soldadura obtida na reprodução computacional.....	53

Figura 5.23 – Tempo de enchimento.	53
Figura 5.24 – Orientação local do fluxo de material durante a fase de enchimento.	54
Figura 5.25 – <i>Módulo de Young</i> na primeira direcção principal.	54
Figura 5.26 – <i>Módulo de Young</i> na segunda direcção principal.....	54
Figura 5.27 – Deflexão, todos os efeitos.	55
Figura 5.28 – Deflexão, todos os efeitos com factor de escala de 5.	55
Figura 5.29 – Contribuição das várias parcelas no tempo de ciclo obtido na reprodução computacional.	57
Figura 5.30 – Efeitos de contracção diferencial.....	58
Figura 5.31 – Efeitos de arrefecimento diferencial.	59
Figura 5.32 – Efeitos de orientação das fibras.	59
Figura 5.33 – Efeitos de canto.	59
Figura 5.34 – (a) Localização do ataque favorável. (b) Localização do ataque real.	62
Figura 5.35 – Deflexão total obtida na localização favorável do ataque.	62
Figura 5.36 – Deflexão total obtida na localização desfavorável do ataque.	63
Figura 5.37 – (a) Orientação favorável das fibras. (b) Orientação desfavorável das fibras.	63
Figura 5.38 – Perfil de velocidades do fuso recomendado: caudal nominal [%] vs volume de injeção [%].	64
Figura 5.39 – Evolução do enchimento durante o tempo de injeção.....	65
Figura 5.40 – Gráfico da deflexão total em função do caudal nominal.	65
Figura 5.41 – Gráfico da deflexão total em função do volume preenchido na comutação V/P.....	66
Figura 5.42 – Gráfico da deflexão total em função da pressão de compactação.	67
Figura 5.43 – (a) Curso do fuso. (b) Perfil de velocidades sugerido para o controlo do enchimento. .	69
Figura 5.44 – Gráfico da pressão máxima de injeção em função do tempo de enchimento.....	69
Figura 5.45 – Deflexão total obtida no perfil recomendado.	70
Figura 5.46 – Deflexão total obtida com a pressão de compactação de 48,5MPa.	71
Figura 5.47 – Gráfico das forças de fecho em função do tempo.....	72
Figura 5.48 – <i>Módulo de Young</i> na primeira direcção principal, controlo sugerido.....	72
Figura 5.49 – <i>Módulo de Young</i> na segunda direcção principal, controlo sugerido.....	73

Lista de Quadros

Quadro 4.1 – Factores que influenciam a pressão de injeção. (Shoemaker, 2006)	27
Quadro 4.2 – Correspondência entre o número de Reynolds e o tipo de escoamento. (Shoemaker, 2006)	35
Quadro 5.1 – Características da máquina injectora.	38
Quadro 5.2 – Parâmetros da máquina injectora.....	39
Quadro 5.3 – Parâmetros de controlo do processo de injeção.....	41
Quadro 5.4 – Controlo do enchimento.....	41
Quadro 5.5 – Base de comparação dos resultados da empresa com os da reprodução.	45
Quadro 5.6 – Resultados consoante a variação de D_i	48
Quadro 5.7 – Primeiros resultados obtidos na reprodução computacional.....	51
Quadro 5.8 – Resultados finais obtidos na reprodução computacional.	55
Quadro 5.9 – Resultados obtidos nas experiências de avaliação da massa das peças.....	56
Quadro 5.10 – Factores que influenciam a contracção e deformação das peças moldadas por injeção.	58
Quadro 5.11 – Modificações sugeridas para o controlo do processo.	68
Quadro 5.12 – Perfil de velocidade do fuso sugerido.....	68
Quadro 5.13 – Resultados de rigidez obtidos, controlo sugerido.....	73
Quadro A.1 – Propriedades do material <i>Stanyl TW200F6</i>	79
Quadro A.2 – Características de processamento do material <i>Stanyl TW200F6</i>	79

Lista de Símbolos

A	–	Área [mm ²]
A_c	–	Área da cavidade projectada [mm ²]
A_e	–	Área do êmbolo [mm ²]
A_f	–	Área do fuso projectada [mm ²]
C_a	–	Curso de abertura do molde [mm]
D	–	Diâmetro [mm]
D_e	–	Diâmetro do êmbolo [mm]
E	–	Módulo de <i>Young</i> ou de Elasticidade [GPa]
F	–	Força [N]
F_f	–	Força de fecho [N]
F_{trans}	–	Força transmitida [N]
h	–	Espessura [mm]
h_c	–	Altura do canal da bucha [mm]
h_p	–	Altura da peça injectada [mm]
N	–	Rotação do fuso [rpm]
P	–	Pressão [MPa]
$P_{h,max}$	–	Pressão hidráulica [MPa]
$P_{inj,max}$	–	Pressão de injeção máxima [MPa]
Q	–	Caudal [cm ³ /s]
Re	–	Número de <i>Reynolds</i> [–]
R_i	–	Razão de intensificação da máquina injectora [–]
t_{arref}	–	Tempo de arrefecimento [s]
$t_{arref,min}$	–	Tempo de arrefecimento mínimo [s]
t_c	–	Tempo de ciclo [s]
t_{comp}	–	Tempo de compactação [s]
T_E	–	Temperatura de ejeção [°C]
t_{ej}	–	Tempo de ejeção [s]
t_f	–	Tempo de fecho [s]
T_f	–	Temperatura de fusão ou de amolecimento [°C]
T_g	–	Temperatura de transição vítrea [°C]

t_{inj}	–	Tempo de injeção [s]
T_M	–	Temperatura do fundido [°C]
T_W	–	Temperatura da parede do molde [°C]
U	–	Velocidade média [m/s]
v	–	Velocidade [m/s]
V_t	–	Velocidade tangencial do fuso recomendada para o polímero [m/s]
w	–	Largura do escoamento [mm]
α	–	Difusividade térmica [m ² /s]
δ	–	Deflexão total máxima da peça [mm]
δ_{ad}	–	Deflexão máxima da peça resultante do arrefecimento diferencial [mm]
δ_c	–	Deflexão máxima da peça resultante do efeito de canto [mm]
δ_{cd}	–	Deflexão máxima da peça resultante da contracção diferencial [mm]
δ_{of}	–	Deflexão máxima da peça resultante da orientação das fibras [mm]
ε	–	Deformação [–]
$\dot{\gamma}$	–	Taxa de Corte [s ⁻¹]
η	–	Coefficiente de viscosidade [N.s/m ²]
ρ	–	Massa volúmica [kg/m ³]
σ	–	Tensão normal [MPa]
τ	–	Tensão de corte [MPa]
μ	–	Viscosidade dinâmica [N.s/m ²]

Capítulo 1

Introdução

Os materiais poliméricos têm um vasto campo de aplicações, sendo utilizados nos automóveis, indústria aeronáutica, electrodomésticos, equipamentos cirúrgicos, brinquedos, construção civil, embalagens para a indústria alimentar entre outros.

Actualmente, as indústrias deparam-se cada vez mais com padrões de elevada exigência vindo-se obrigadas a proporcionar produtos de qualidade diante um mercado globalizado, onde os custos finais competitivos encontram-se como pré-requisitos.

Neste panorama, a moldação por injeção apresenta-se como um processo de fabrico de grande destaque e importância no processamento de componentes à base de materiais poliméricos. São vários os investigadores que, através das suas pesquisas e experiências, estudam e tentam explicar os aspectos tecnológicos e fenomenológicos de todo este processo.

Perante este cenário, constata-se que algumas das dificuldades sentidas pelas empresas que utilizam a tecnologia de moldação por injeção provêm da falta de sistematização e optimização não só na construção das ferramentas, como é caso do molde, como também na definição das variáveis de controlo de todo o processo de injeção.

1.1 Formulação do Problema

Actualmente, são inúmeros os investigadores que estudam os fenómenos inerentes ao processo de moldação por injeção. As mais modernas técnicas de simulação por computador são ferramentas de grande importância em toda a fase de projecto, contribuindo manifestamente para a minimização de eventuais problemas na fase de fabrico. Perante este cenário, fica evidente a necessidade de um aumento de qualidade no projecto e concepção de peças poliméricas.

1.1.1 Projecto e Concepção de Peças Poliméricas

A competitividade das empresas está, cada vez mais, relacionada com a sua capacidade de inovação. Para que as empresas se mantenham activas, necessitam de aperfeiçoar os seus produtos ou serviços, proporcionando e oferecendo soluções inovadoras, de qualidade e menor custo, com prazos mais reduzidos. Assim, o aumento da concorrência, as elevadas mudanças tecnológicas e o aumento do grau de exigência dos consumidores, conduz a que as empresas caminhem cada vez mais no sentido do aumento da qualidade e diminuição do tempo de lançamento de novos produtos no mercado.

Observa-se durante este estudo que existem muitas variáveis na actividade de desenvolvimento do projecto de componentes poliméricos recorrendo ao processo de moldação por injeção. No entanto, as dúvidas surgem na altura de decidir como as utilizar. Este facto evidencia uma necessidade de compreensão de todo um conjunto de aspectos inerentes ao processo de injeção, de forma a poder-se assegurar a repetibilidade e qualidade do processo produtivo para diferentes componentes de uma forma tanto mais sistemática quanto possível.

Devido ao elevado capital investido nas máquinas, moldes e equipamentos auxiliares, é fundamental o conhecimento prévio e aprofundado dos aspectos relacionados com as operações do processo, uma vez que estão directamente ligados à sua viabilidade e à qualidade dos componentes injectados.

As variáveis do processo dependem não só das condições de processamento (parâmetros da máquina), mas também da combinação de três factores: polímero, molde e máquina utilizada. O controlo do processo tem sido amplamente estudado e relatado em várias publicações mas não tem sido objecto de uma aplicação industrial generalizada.

O desenvolvimento e a aplicação de *softwares* de simulação na análise dos projectos de peças poliméricas, fabricadas a partir do processo de moldação por injeção, têm aumentado significativamente nos últimos anos. Este facto deve-se ao aumento do número de requisitos a que os produtos desenvolvidos em materiais poliméricos têm de atender e a pressão exercida pelo mercado sobre o seu lançamento. Estas ferramentas de simulação numérica podem ser o diferencial na qualidade do produto final e na obtenção de custos competitivos.

São inúmeros os defeitos que podem surgir nos componentes injectados, provocando eventuais problemas ao nível da resistência mecânica e da qualidade superficial, afectando directamente a comercialização. Os esforços reúnem-se então no sentido de minimizar problemas no processo produtivo desde o projecto do molde de injeção até a concepção do componente a ser moldado. Neste contexto, a fundamentação de um projecto recorrendo à utilização de ferramentas sofisticadas de análise e simulação computacional constitui um factor incontestável para o seu sucesso.

1.1.2 Objectivos

Com a popularização do uso de materiais poliméricos é evidente a necessidade de, cada vez mais, as empresas investirem no estudo e melhoria das tecnologias de processamento destes materiais. Neste contexto, a presente dissertação tem como objectivo o estudo do processo convencional de moldação por injeção, procurando fazer uma abordagem a todo o processo tecnológico e dar ênfase à importância do controlo eficiente dos principais parâmetros do processo.

A compreensão do processo de controlo dos parâmetros do processo implica um conhecimento dos fenómenos inerentes à fase de injeção, nomeadamente acerca das características do escoamento durante o enchimento, tensões de corte, temperaturas e pressões desenvolvidas. Neste âmbito, é fundamental perceber o comportamento dos materiais poliméricos, não só ao nível da sua resistência mecânica como também ao nível das suas propriedades reológicas e do seu comportamento em função da pressão, volume específico e temperatura.

O trabalho visa também utilizar o *software* comercial *Autodesk Moldflow Insight®* como ferramenta de simulação do processo de moldação por injeção. Este *software* dispõe de ferramentas que permitem prever e eliminar potenciais problemas de produção e de optimização do projecto da peça e do molde, ao mesmo tempo que possibilita realizar experiências de forma a observar-se o comportamento dos diversos parâmetros do processo, permitindo, desta forma, adquirir-se destreza na manipulação das principais variáveis envolvidas em todo o processo de moldação por injeção.

Nos objectivos do trabalho, insere-se ainda a reprodução das condições reais de processamento de uma peça por injeção e a validação dos resultados ao nível dos estudos realizados, de forma a compreender-se e optimizar-se as variáveis do processo, recorrendo às simulações numéricas. Com este intuito, pretende-se encontrar um conjunto de definições melhoradas para o fabrico da referida peça polimérica, utilizando o processo de moldação por injeção e avaliando-se as decisões através do estudo realizado no *software* de simulação numérica *Autodesk Moldflow Insight®*.

1.2 Estrutura da Dissertação

Além deste primeiro capítulo de introdução, onde é feito o enquadramento da dissertação, a estrutura é constituída por mais cinco capítulos abaixo descritos.

O Capítulo 2 inicia com o enquadramento dos materiais poliméricos, distinguindo os diferentes tipos de polímeros através das suas características, e seguidamente expõem-se as principais propriedades da classe de polímeros com interesse no âmbito da presente Dissertação.

O Capítulo 3 introduz os processos de transformação de plásticos com especial ênfase para o processo convencional de moldação por injeção de termoplásticos, onde se descreve o processo, o funcionamento da máquina injectora e o molde.

O Capítulo 4 apresenta os aspectos fenomenológicos e tecnológicos do processo convencional de moldação por injeção. Numa primeira fase, aborda-se a forma como o enchimento se processa e a sua influência nas características finais do produto. Na fase final do capítulo descreve-se a importância dos parâmetros de controlo do processo.

O Capítulo 5 trata de um caso de estudo referente a uma peça fabricada por injeção em ambiente industrial. Primeiramente expõe-se o levantamento das condições de processamento efectuado na empresa e seguidamente reproduz-se o processo computacionalmente, utilizando o *software Autodesk Moldflow Insight®*. Para concluir o caso, são sugeridas alterações ao fabrico da peça com o intuito de melhorar a sua qualidade final. Apresentam-se também os resultados obtidos e a respectiva discussão.

Finalmente, no Capítulo 6 apresentam-se as conclusões retiradas ao logo desta Dissertação, onde se realçam os aspectos mais importantes a reter. Além disso, são mencionadas algumas propostas de trabalhos futuros.

Capítulo 2

Materiais Poliméricos

O conhecimento das características dos materiais poliméricos é imprescindível para se compreender o processo de moldação por injeção. Este Capítulo começa por distinguir os diferentes tipos de polímeros através das suas características e seguidamente expõe as principais propriedades da classe de polímeros com interesse no âmbito da presente Dissertação.

2.1 Grupos de Materiais Poliméricos

O termo polímero é utilizado para designar compostos químicos resultantes de reacções químicas de polimerização. Na natureza existem muitos polímeros, por exemplo: celulose, amido, algodão, borracha, lã, couro, etc. Os primeiros polímeros sintéticos resultaram da procura de substâncias que reproduzissem as propriedades encontradas nos polímeros naturais. Na tentativa de substituir a seda, em 1935, descobriu-se a fibra de *nylon*. Posteriormente, surgiram vários tipos de polímeros que permitiram uma modificação muito grande nos costumes da sociedade actual.

Os plásticos¹ e os elastómeros são dois grupos de materiais poliméricos com elevada importância industrial. Dependendo do modo como estão ligados química e estruturalmente (Figura 2.1), os plásticos podem ser divididos em duas classes: termoplásticos e termoendurecíveis.

¹ A palavra plástico tem diversos significados, como substantivo refere-se a uma classe de materiais que podem ser moldados ou enformados, de modo a adquirirem uma determinada forma.

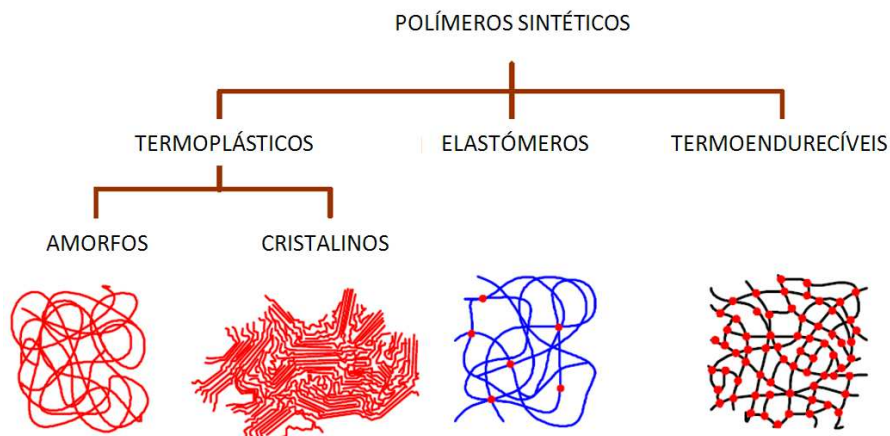


Figura 2.1 – Classificação dos polímeros sintéticos de acordo com a sua estrutura intermolecular. (Fonte: <http://www.demar.eel.usp.br/polimeros>)

Os termoplásticos necessitam de calor para serem enformados e, após serem arrefecidos, mantêm a forma que adquiriram durante a enformação. Estes materiais podem ser várias vezes reaquecidos e reenformados sem que ocorra alteração significativa das suas propriedades.

Os termoendurecíveis são enformados para uma determinada forma permanente e depois curados através de uma reacção química. Ao contrário dos termoplásticos, estes não podem ser refundidos e reenformados, uma vez que se degradam ou se decompõem quando aquecidos a temperaturas demasiado altas. Por este motivo, estes materiais não podem ser reciclados.

Os elastómeros, ou borrachas, são materiais poliméricos cujas dimensões podem variar bastante quando submetidos a tensões mecânicas e que voltam praticamente às dimensões iniciais quando se retira a tensão responsável pela deformação.

No âmbito deste trabalho, que tem por objectivo incidir sobre o processo convencional de moldação por injeção, tem interesse o estudo dos termoplásticos.

2.2 Cristalinidade nos Termoplásticos

Na solidificação de um termoplástico a partir do estado líquido, pode formar-se um sólido não cristalino, designado amorfo, ou um sólido parcialmente cristalino, designado semicristalino. Considerando a solidificação e o arrefecimento a processarem-se lentamente, na solidificação dos termoplásticos amorfos, não ocorre uma diminuição brusca do volume específico à medida que a temperatura diminui (Figura 2.2). Arrefecendo este material até temperaturas mais baixas, ocorre uma mudança no declive da curva do volume específico em função da temperatura. A temperatura média do estreito intervalo de temperaturas em que ocorre a alteração de declive designa-se por *temperatura de transição vítrea, T_g* . Acima de T_g , os termoplásticos amorfos têm um comportamento viscoso; abaixo de T_g , estes materiais apresentam um comportamento frágil, uma vez que o

movimento das cadeias moleculares fica muito limitado. Em certa medida, T_g pode ser considerada como uma temperatura de transição dúctil-frágil.

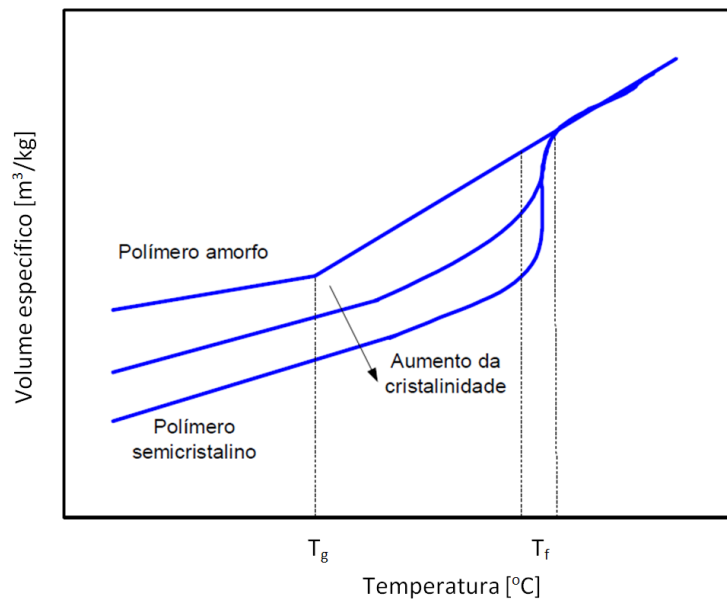


Figura 2.2 – Arrefecimento de termoplásticos não cristalinos e parcialmente cristalinos. (Fonte: <http://www.demar.eel.usp.br/polimeros>)

Em relação aos termoplásticos semicristalinos, verifica-se, durante o arrefecimento, uma diminuição súbita do volume específico na passagem pela *temperatura de fusão ou de amolecimento*, T_f (Figura 2.2). Esta diminuição de volume específico é provocada pelo empilhamento mais eficiente das cadeias poliméricas em regiões cristalinas. À medida que continua o arrefecimento, ocorre a transição vítrea e a estrutura do termoplástico passa a ser constituída por regiões cristalinas numa matriz vítrea não cristalina. O grau de cristalinidade depende da taxa de arrefecimento durante a solidificação e da configuração da cadeia. Quanto mais simples a cadeia, maior será a cristalinidade. Por outro lado, quanto maior a cristalinidade, maiores serão a densidade, a resistência mecânica, a resistência ao calor e a resistência à degradação.

2.3 Pressão, Volume e Temperatura (P-v-T)

Os materiais poliméricos apresentam coeficientes positivos de expansão térmica e são, geralmente, bastante compressíveis durante a moldação. Como consequência, há uma variação do volume específico do material que ocupará a cavidade do molde em função da pressão e temperatura de operação.

As características de pressão, volume e temperatura são estudadas para analisar o comportamento dos materiais poliméricos. Obtêm-se curvas experimentalmente que apresentam os dados de volume específico em função da temperatura, sob constantes variações de pressão, em

gráficos bidimensionais. A Figura 2.3 ilustra, a título de exemplo, as curvas P-v-T da poliamida 46 reforçada com 30% de fibra de vidro, que é o material utilizado no caso de estudo tratado no Capítulo 5.

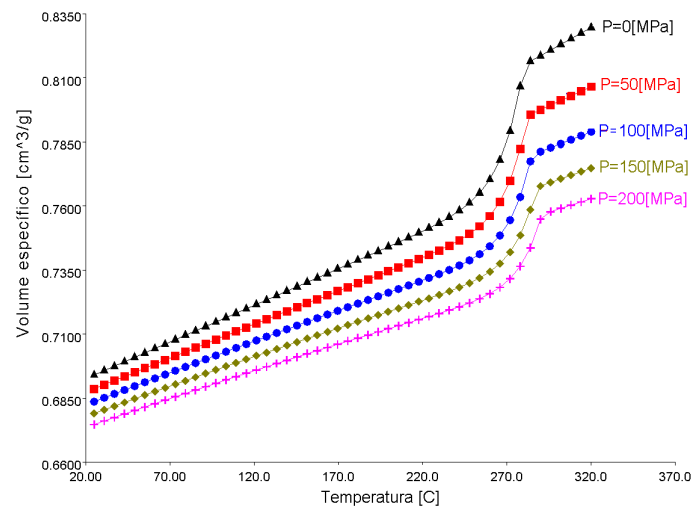


Figura 2.3 – Curvas P-v-T da poliamida 46 reforçada com 30% de fibra de vidro. (Fonte: ©Autodesk, 2010)

2.4 Comportamento Mecânico

Na Mecânica Clássica, as propriedades mecânicas dos sólidos elásticos podem ser descritas pela *Lei de Hooke*, Equação 2.1, que afirma que ao ser aplicada uma tensão σ ao material, verifica-se uma deformação ε que lhe é proporcional, sendo a tensão independente da velocidade de deformação. Quando esta tensão σ é retirada, o corpo recupera completa e instantaneamente a sua forma inicial.

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2.1)$$

em que E é o *Módulo de Young*, ou de Elasticidade.

As propriedades dos líquidos, por seu lado, são descritas pela *Lei de Newton*. Um fluido *Newtoniano* não consegue suportar deformações e a resposta instantânea a uma tensão é o escoamento viscoso. A tensão é independente da deformação, mas proporcional à velocidade de deformação, conforme se verifica na Equação 2.2.

$$\sigma = \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (2.2)$$

em que η é o coeficiente de viscosidade.

Os materiais poliméricos apresentam um comportamento intermédio entre o de um sólido elástico, *Hookeano*, e de um líquido viscoso, *Newtoniano*. Dessa forma, apresentam frequentemente

contribuição de ambos os tipos de resposta e a predominância de carácter viscoso ou elástico da resposta a uma solitação mecânica depende essencialmente da escala de tempo da experiência (Harper, 2000):

- A aplicação de uma tensão durante um intervalo de tempo longo provoca normalmente um escoamento viscoso e, portanto, deformação permanente no polímero.
- A aplicação de uma deformação muito rápida não dá tempo às moléculas do polímero, longas e entrelaçadas, de se ajustarem à deformação aplicada, induzindo uma resposta elástica.

Verifica-se que tanto o Módulo de Elasticidade, E , como a viscosidade, η , variam com a forma como a experiência é realizada. Este tipo de comportamento é classificado como viscoelástico.

O comportamento de plásticos sujeitos a cargas pode ser estudado através de ensaios de tracção uniaxial em condições normalizadas. A Figura 2.4 ilustra as curvas típicas (tensão – deformação) de comportamentos frágil (A), dúctil (B) e muito elástico (C).

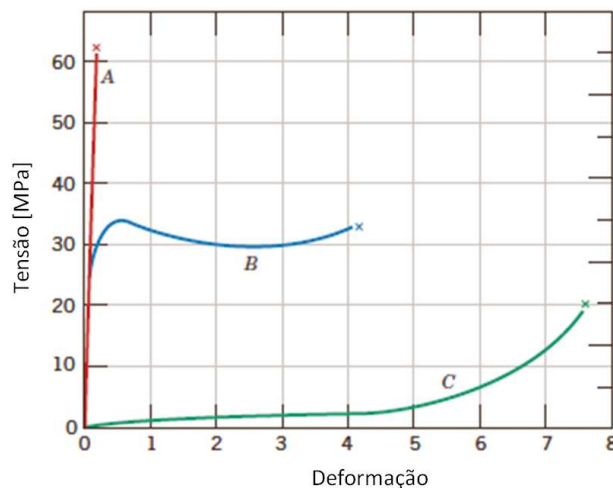


Figura 2.4 – Comportamentos típicos de materiais plásticos (Paiva, 2010).

De um modo geral, as vantagens dos plásticos termoendurecíveis em aplicações de engenharia são uma ou mais de entre as seguintes:

- Rigidez elevada
- Estabilidade dimensional elevada
- Resistência à fluência e à deformação sob carga
- Baixo peso
- Estabilidade térmica elevada

2.5 Reciclagem

Actualmente, o impacto ambiental é sempre um aspecto a considerar no que diz respeito ao fim de vida dos produtos. Os materiais utilizados na moldação por injeção pertencem à classe dos polímeros termoplásticos e, tal como referido na Secção 2.1, estes podem ser reaquecidos e reenformados várias vezes sem prejuízo significativo das suas propriedades. Por esta razão, os produtos resultantes da moldação por injeção que estejam em fim de vida podem ser reciclados.

Capítulo 3

Processos de Transformação de Plásticos

A selecção da tecnologia a usar na transformação de plásticos depende de vários factores, tais como a geometria e as dimensões da peça, o custo do projecto, entre outros. Além de uma abordagem sobre os aspectos envolvidos na selecção do processo para transformação de plásticos, este Capítulo faz uma descrição do processo convencional de moldação por injeção descrevendo o equipamento utilizado no processo.

3.1 Processo de Industrialização

Os polímeros graças às suas propriedades conseguem em inúmeras situações substituir com vantagem os metais e os cerâmicos. De facto, estes materiais permitem a concepção de peças de elevado grau de complexidade, menor peso, boa qualidade superficial e com custos significativamente mais reduzidos.

Existem diversas tecnologias que transformam e processam polímeros, como por exemplo:

- Moldação por injeção
- Extrusão
- Termoenformação
- Moldação por compressão
- Moldação rotacional
- Moldação por vácuo
- Moldação por sopro
- Moldação por transferência
- Injeção de baixa pressão – RIM “*Reaction Injection Molding*”

A escolha da tecnologia de processamento é uma decisão crítica e implica um conhecimento completo dos métodos de processamento. Portanto, existem vários factores envolvidos na selecção do processo para transformação ou processamento de plásticos que devem ser considerados, nomeadamente (Avery, 1998):

- Geometria da peça
 - Simples ou complexa
 - Oca ou maciça
 - Plana ou redonda
- Dimensões
 - Grande ou pequena
 - Paredes espessas ou finas
- Volume
 - Baixo
 - Médio
 - Elevado
- Material
 - Termoplástico ou termoendurecível
 - Flexível ou rígido
 - Material singular ou combinado
- Tolerâncias
 - Apertadas
 - Médias
 - Grosseiras
- Custo do projecto
 - Baixo
 - Médio
 - Elevado

Muitas outras questões podem ser levantadas na selecção do processo de fabrico, porém, os processos dominantes industrialmente são a moldação por injeção e a extrusão, uma vez que são os mais versáteis relativamente aos requisitos de selecção enunciados. A presente Dissertação tem por objectivo estudar o processo de moldação por injeção e, portanto, será esse o processo de fabrico considerado a partir deste momento.

3.1.1 Descrição do Processo Convencional de Moldação por Injecção

A moldação por injecção é uma das técnicas mais aplicadas para obtenção de peças a partir de materiais poliméricos termoplásticos e é amplamente discutida, sendo os seus princípios apresentados em diversas publicações sobre o tema.

A moldação por injecção pode ser definida como o processo a partir do qual um material plástico, originalmente no estado sólido (usualmente sob a forma de grãos), é carregado numa máquina onde, sequencialmente, é aquecido a fim de plastificar² e forçado, sob pressão, a entrar para um molde. No molde, o material fundido preenche a respectiva impressão e arrefece recuperando a rigidez. O processo conclui-se com a ejeção da moldação. De uma forma resumida, o conceito principal de moldação por injecção é:

$$\text{Polímero Granulado} + \text{Temperatura} + \text{Pressão} + \text{Molde} \Rightarrow \text{Peça de Plástico}$$

3.1.1.1 Ciclo de Moldação

O ciclo de moldação é o conjunto de operações que se efectuam numa máquina injectora entre a produção de duas peças consecutivas. Assim, o ciclo pode ser dividido nas seguintes etapas (Cruz, 2002):

1. Fecho do molde
2. Injecção do material fundido
3. Compactação
4. Arrefecimento
5. Abertura do molde e ejeção

Desta forma, o ciclo inicia-se com o fecho do molde. Segue-se a injecção do polímero no interior da cavidade do molde onde, após o seu enchimento, se inicia a fase de compactação para compensar a contracção do material devido ao arrefecimento. A próxima fase designa-se de arrefecimento (embora, efectivamente, este decorra durante todo o processo), onde é necessário esperar que a peça atinja a rigidez exigida antes de se proceder à abertura do molde e sequente ejeção. Por consequência, o tempo de ciclo, t_c , pode ser determinado através da Equação 3.1.

$$t_c = t_f + t_{inj} + t_{comp} + t_{arref} + t_{ej} \quad (3.1)$$

onde o seu valor é resultado do somatório dos tempos de fecho, t_f , injecção, t_{inj} , compactação, t_{comp} , arrefecimento, t_{arref} , e de ejeção, t_{ej} .

A optimização deste ciclo revela-se fundamental para assegurar a competitividade económica do processo, dado o elevado investimento requerido para a instalação de todo o equipamento.

² Amolecer o material plástico.

3.1.2 Máquina Injectora

A constituição típica de uma máquina de moldar por injeção – a injectora – é constituída pelas seguintes unidades funcionais, tal como se ilustra na Figura 3.1:

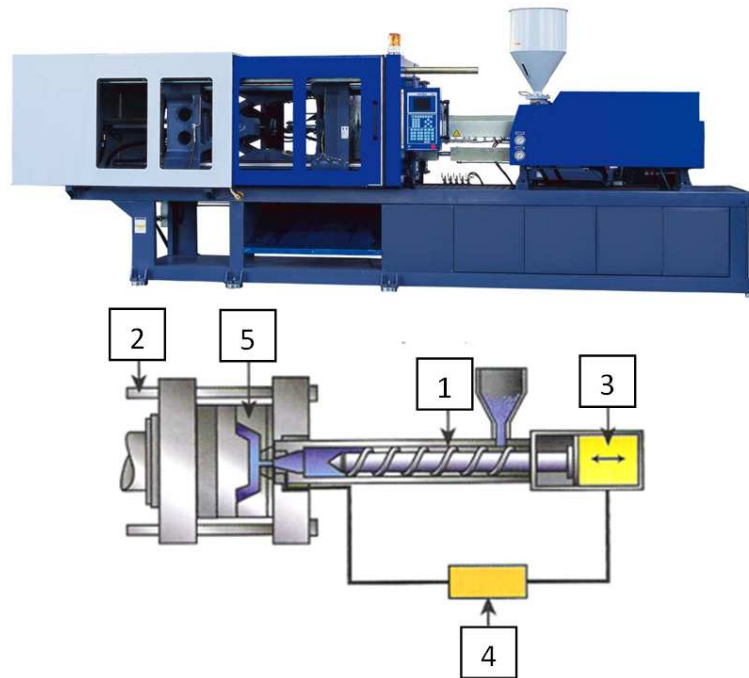


Figura 3.1 – Máquina injetora de termoplásticos. (Shoemaker, 2006)

1. Unidade de injeção: promove o transporte, aquecimento, plastificação e homogeneização do material desde a base da tremonha até ao bico de injeção; garante também a subsequente injeção e compactação do fundido.
2. Unidade de fecho: permite a fixação e a movimentação do molde, devendo ser capaz de o manter fechado durante as fases de injeção e de compactação; também integra os dispositivos necessários à extracção das moldações.
3. Unidade de potência: fornece a energia adequada aos diversos actuadores da máquina; geralmente é um sistema electro-hidráulico, onde a bomba é accionada através de um motor eléctrico.
4. Unidade de controlo: garante a consistência e repetibilidade do funcionamento da máquina. 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.

5. **Molde:** para além da máquina, o processo de moldação por injeção implica a existência de um molde que define a geometria do produto final. Trata-se de uma ferramenta constituída por, pelo menos, duas partes que são mantidas fechadas durante os períodos de injeção e subsequente arrefecimento, abrindo posteriormente na altura da ejeção da respectiva moldação.

Na Figura 3.2 é apresentada de uma forma mais detalhada os componentes que constituem a unidade de injeção.

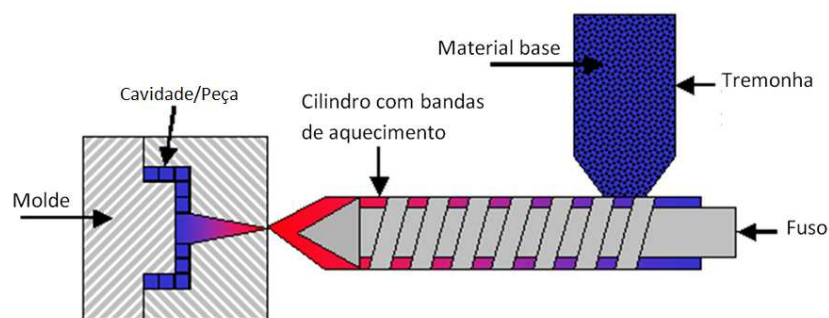


Figura 3.2 – Unidade de injeção da máquina injetora. (Fonte: <http://www.demet.ufmg.br/docentes/rodrigo/processamento.htm>).

3.1.3 Molde de Injeção

O molde é a ferramenta que permite a enformação das peças nas máquinas de injeção. O grau de sofisticação do projecto e do tipo de molde depende, basicamente, de aspectos económicos e tecnológicos, tais como o número de peças a produzir, as especificações estipuladas para as mesmas e a capacidade da máquina em que ele vai trabalhar (Harada, 2004).

O molde é um componente fulcral na máquina injetora. É responsável pela distribuição do polímero fundido no interior da cavidade, atribuindo forma às peças. É também responsável pelo arrefecimento e pela ejeção do produto final. O molde é fabricado sob medida e é composto pelos seguintes elementos (Osswald *et al.*, 2008):

- Gito e canais de alimentação
- Ataque
- Sistema de escape de gases
- Cavidade
- Sistema de arrefecimento
- Sistema ejector

Durante o enchimento, o fluxo de fundido³ entra pelo gito e é distribuído através dos canais de alimentação até ao(s) ataque(s). O ataque é o elemento responsável pela distribuição do material no

³ Designação atribuída ao material polimérico quando está amolecido devido à elevada temperatura em que se encontra.

interior da(s) cavidade(s). No final do ciclo de injeção o sistema ejector tem a função de extrair a peça do interior do molde.

3.1.3.1 Gito e Canais de Alimentação

O gito é um canal de tronco cónico divergente que liga o bico do cilindro aos canais de alimentação (ou, por vezes, à própria cavidade do molde). Esta conicidade é necessária para facilitar a sua extracção. Na Figura 3.3, ilustra-se a configuração do gito. Esta configuração do gito pode ser maquinada directamente no molde ou, em alternativa, resultar da utilização de um acessório designado bucha de injeção que desempenha de modo prático a mesma função.

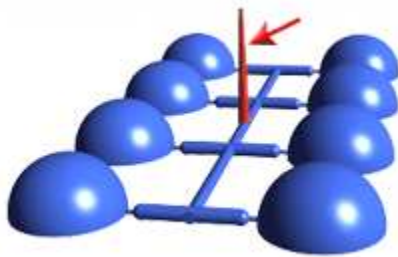


Figura 3.3 – Configuração do gito (assinalado a vermelho). (Fonte: ©Autodesk, 2010)

Os canais de alimentação ligam o gito aos ataques. Estes canais devem ter sempre o menor comprimento possível e proporcionar uma alimentação equilibrada. A respectiva secção transversal tem normalmente uma das seguintes formas:

- Circular
- Semi-circular
- Trapezoidal
- Forma de U
- Rectangular

Estes elementos podem ser de dois tipos diferentes – frios ou quentes. Os canais frios são ejectados com a peça e cortados após a remoção do molde. A vantagem de serem frios é o custo inferior do molde. Os canais quentes mantêm o polímero acima da sua temperatura de fusão. Assim, o material permanece no sistema após a remoção da peça e é injectado na cavidade no ciclo seguinte. Embora um sistema de canais quentes aumente consideravelmente o custo do molde, as suas vantagens incluem o facto de a peça ser ejectada desagregada do sistema de alimentação, dispensando dessa forma a sua remoção, e originam pressões mais baixas para o processo de injeção.

3.1.3.2 Ataques

O ataque é uma constricção entre os canais de alimentação e a cavidade, tendo as seguintes finalidades:

- Sujeitar o fundido a uma velocidade de corte suficientemente elevada para que o aquecimento resultante da dissipação viscosa mantenha essa passagem, de pequena secção, aberta durante o enchimento e a fase de compactação. Além disso, deve solidificar a tempo de permitir que o fuso da injectora possa recuar sem perigo de refluxo do material.
- Facilitar o controlo do enchimento, principalmente em moldes de várias impressões ou de impressões com mais de um ataque.
- Permitir uma separação fácil da peça ao sistema de alimentação, não deixando uma marca muito pronunciada.

A posição dos ataques deve ser tal que permita controlar, minimizar e evitar alguns defeitos de enchimento, por exemplo, o efeito de jacto e o aparecimento de linhas de soldadura (Hassan *et al*, 2009). Para além da alimentação directa utilizada em moldes de uma só impressão, em que a peça é alimentada directamente pelo gito e, por isso, não se pode considerar que exista um ataque propriamente dito, os ataques podem ter diversas configurações e são classificados em duas categorias – remoção manual e remoção automática – consoante o método pelo qual o ataque é removido.

Os ataques de remoção manual são aqueles que necessitam de um operador para os remover numa operação secundária e incluem as variantes ilustradas na Figura 3.4.

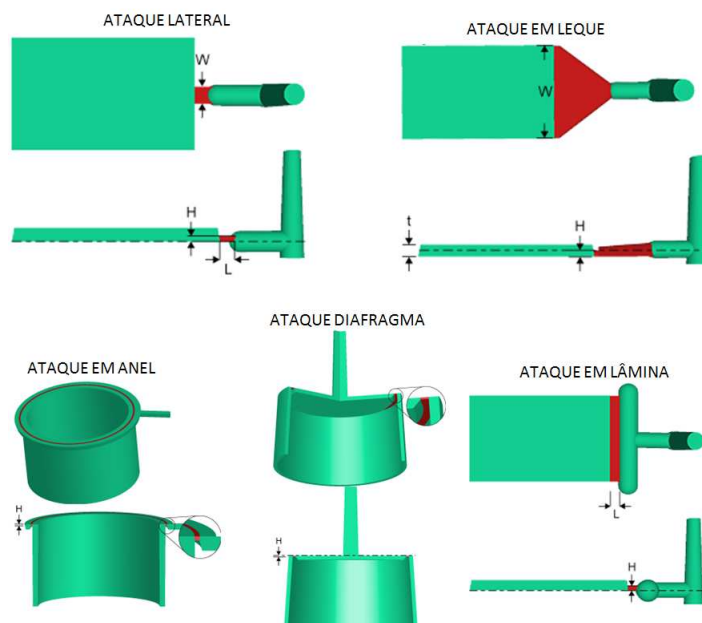


Figura 3.4 – Ataques de remoção manual (Fonte: ©Autodesk, 2010).

- Lateral: É o tipo de ataque mais comum. Apresenta secção rectangular, o que dá origem a maior facilidade de maquinação, logo, maior rigor dimensional e menor custo.
- Leque: A alimentação é realizada através de uma fenda. É utilizado para criar uma frente de fluxo uniforme a toda a largura da peça, onde o empenamento e a estabilidade dimensional são as principais preocupações.
- Anel: É utilizado em peças cilíndricas com o canal de alimentação a contornar a peça.
- Diafragma: É semelhante ao ataque em anel mas a alimentação é feita interiormente. É utilizado quando a concentricidade é um requisito dimensional importante. Tipicamente são difíceis de remover após a extracção da peça.
- Lâmina: A alimentação é feita através de uma fenda ao longo do bordo da peça. Os objectivos são os mesmos do ataque em leque mas têm uma execução mais difícil.

Os ataques de remoção automática não necessitam de uma operação secundária para serem removidos, além de minimizarem as marcas na superfície da peça. As variantes são apresentadas na Figura 3.5.

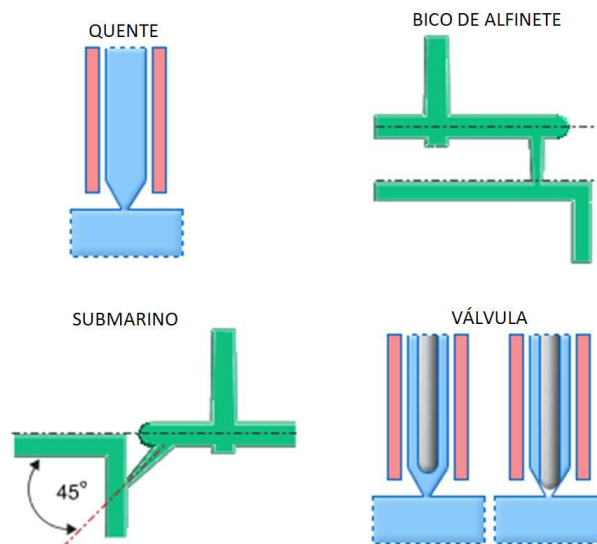


Figura 3.5 – Ataques de remoção automática. (Fonte: ©Autodesk, 2010)

- Quente: O ataque quente pode ter configurações diferentes e é utilizado quando os canais de alimentação são, também, quentes.
- Bico de alfinete: Apresenta um orifício circular e é utilizado em desgitação automática.
- Submarino: Tem geralmente forma cilíndrica. O Ataque e os canais de alimentação são extraídos pelo sistema ejector.
- Válvula: Este ataque apresenta a forma de um pino e incorpora uma válvula que pode ser controlada de forma a fechar ou abrir a passagem.

3.1.3.3 Sistema de Escape de Gases

O sistema de escape de gases, muitas vezes negligenciado, é fundamental para um funcionamento correcto do molde. Durante o enchimento das impressões, o ar que se encontra no interior é empurrado pelo fundido para fora do molde. Uma vez que dois corpos não podem coexistir no mesmo espaço ao mesmo tempo, pelas leis da física, o material polimérico não pode encher completamente a impressão se o ar não sair. Para isso, o molde deve ser dotado de um sistema de escape de gases que permita a saída do ar. Na maioria dos casos, o ar pode escapar pelo plano de partição do molde. Contudo, devido à elevada precisão de ajustamento entre as duas (ou mais) partes do molde, o escape de gases por este plano não é eficiente. Assim, devem ser maquinados pequenos rasgos para facilitar a sua saída. Estes rasgos devem ser colocados ao longo de toda a peça, sendo particularmente importantes nas zonas onde se dá o fim do enchimento ou a confluência de frentes de fluxo (Figura 3.6). A sua profundidade deve permitir a saída do ar mas ser suficientemente pequena para que o fundido não possa sair e, dessa forma, criar rebarba.



Figura 3.6 – Rasgo para escape de gases. (Fonte: ©Autodesk, 2010)

3.1.3.4 Sistema de Arrefecimento

O arrefecimento do fundido é um aspecto de elevada importância no funcionamento do molde, procurando-se conjugar a rapidez do ciclo e a qualidade das peças com as especificações técnicas e económicas do produto. O modo como o arrefecimento é efectuado deve ser controlado não só em termos do gradiente de temperaturas, como também da uniformidade da superfície da zona moldante. O arrefecimento do material injectado é realizado por transferência de calor para a superfície moldante que se encontra a uma temperatura inferior. Para facilitar, acelerar e controlar este processo são maquinados, perto das superfícies moldantes, furos de passagem para um fluido refrigerante que usualmente é água.

A arquitectura dos sistemas de controlo de temperatura depende essencialmente da forma da peça e das suas dimensões, uma vez que necessitam de espaço para a sua implementação. Caso não seja exequível maquinar canais de arrefecimento de forma a percorrerem toda a geometria da peça é possível recorrer a acessórios específicos, como por exemplo as cascatas Figura 3.7.

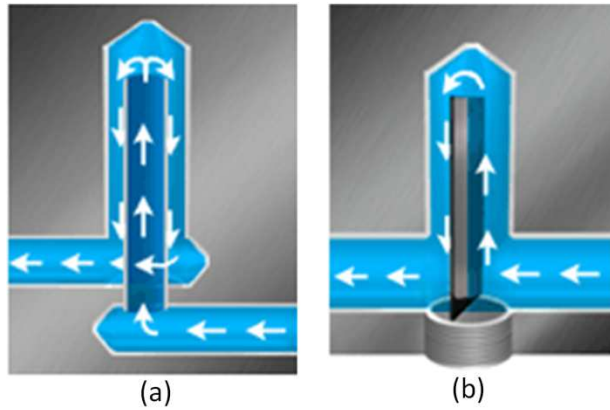


Figura 3.7 – (a) Cascata com canal central. (b) Cascata de lâmina. (Fonte: ©Autodesk, 2010)

Na cascata com canal central, tal como se observa na Figura 3.7a, o fluido de arrefecimento entra por um canal central e sai pelo seu lado exterior, sendo novamente encaminhado para os canais de arrefecimento. A diferença da cascata de lâmina é que, em vez do canal, existe uma lâmina que obriga o fluxo a entrar de um lado e a sair pelo outro.

3.1.3.5 Sistema de Extração

No fim do ciclo de injeção, as peças moldadas atingem uma temperatura que assegura a sua estabilidade dimensional. Nessa altura, o molde abre e o sistema de extração tem a função de retirar a peça do seu interior. Dada a necessidade de elevadas cadências de produção e ao facto das peças ainda se encontrarem a temperaturas altas, a extração deve ser realizada da forma mais automatizada possível.

Capítulo 4

Aspectos Fenomenológicos e Principais Variáveis do Processo de Moldação por Injecção

Durante o preenchimento da cavidade do molde surgem vários aspectos de elevada importância que devem ser controlados de forma a garantir qualidade na moldação. Numa primeira fase, este capítulo explica os fenómenos inerentes ao processo de injecção. Posteriormente, abordam-se as variáveis de controlo do processo e a suas influências são discutidas convenientemente.

4.1 Preenchimento da Cavidade do Molde

O processo de preenchimento da cavidade do molde pode ser dividido em três fases (Figura 4.1). Na primeira fase, designada fase de enchimento, o fuso desloca-se segundo o perfil de velocidades definido no sistema de controlo da máquina injectora e termina no instante em que o controlo do preenchimento da cavidade do molde passa a ser efectuado por pressão em vez de ser realizado através da velocidade, ou seja, a partir do instante de comutação V/P.

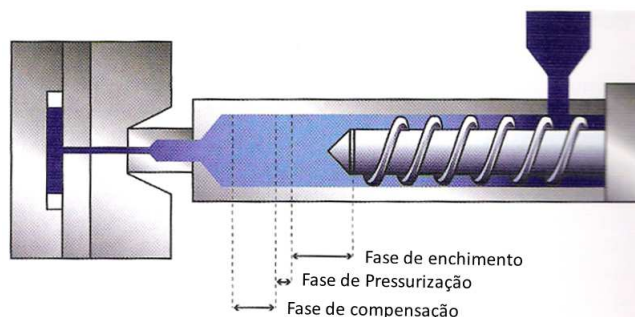


Figura 4.1 – Fases do preenchimento da cavidade do molde. (Shoemaker, 2006)

Segue-se a fase de pressurização, a qual tem a função de terminar de preencher o volume da cavidade do molde, após uma desaceleração do fuso. Além do plástico fundido ser altamente compressível, verifica-se também uma significativa contracção volumétrica devido à redução de temperatura, consequência do arrefecimento da peça. Portanto, a última fase é a de compensação, onde uma quantidade extra de material é injectada na cavidade do molde de forma a compensar a diminuição de volume. Perante esta abordagem fica claro que as fases de pressurização e de compensação não são nada mais que uma simples discretização do período de compactação (Shoemaker, 2006).

4.2 Escoamento do Polímero Durante a Fase de Enchimento

Considere-se o molde fechado e o escoamento do fundido a partir do bico de injeção. O primeiro material injectado enche o gito e os canais de alimentação e em seguida entra na cavidade do molde. Sucede-se que o material plástico ao entrar em contacto com a parede do molde, que se encontra a uma temperatura inferior, arrefece e solidifica rapidamente, enquanto o centro do escoamento permanece fundido. Ao ser injectado mais material, o material já existente é forçado a escoar e, conseqüentemente, vai prolongar a camada solidificada ao longo de toda a parede do molde, tal como ilustra a Figura 4.2.

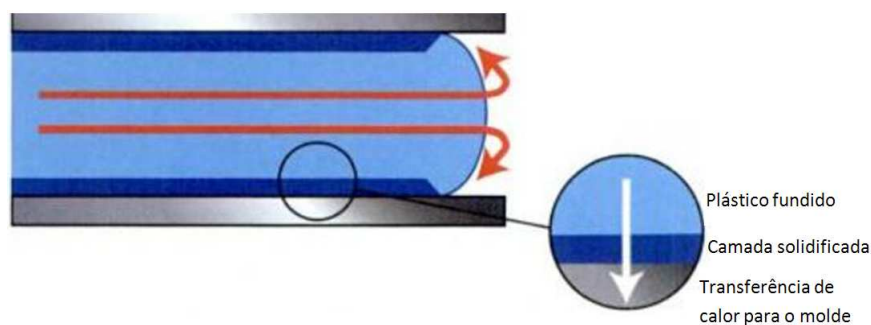


Figura 4.2 – Camada solidificada nas paredes do molde. (Shoemaker, 2006)

As setas vermelhas indicam a direcção do fluxo de plástico fundido. Ilustra-se também, através da seta branca, a direcção do fluxo de calor do polímero fundido para as paredes do molde. Ou seja, a montante o plástico quente flui continuamente, trazendo novo material e gerando um significativo calor por fricção. Ao mesmo tempo, perde-se calor através da camada solidificada na superfície do molde.

Inicialmente, a camada solidificada é muito fina e, por consequência, o calor perde-se muito rapidamente. Isto faz com que o material continue a solidificar e que a camada solidificada veja a sua espessura aumentar, reduzindo assim o fluxo de calor através da parede do molde. Após um certo tempo, a camada solidificada atinge uma determinada espessura em que o calor perdido por

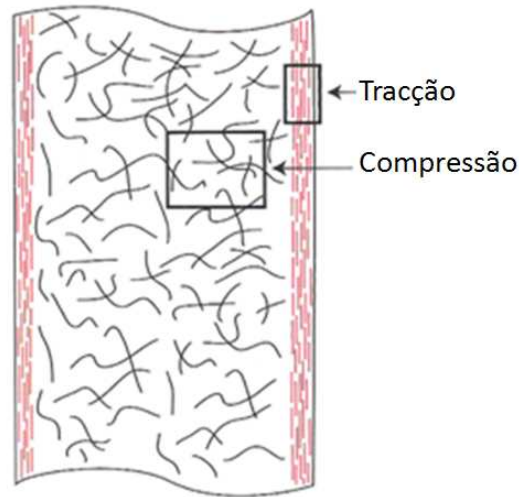


Figura 4.4 – Orientação molecular ao longo da espessura da peça. (Shoemaker, 2006)

Verifica-se uma grande orientação junto às paredes do molde, o que se explica devido ao rápido arrefecimento a que essa camada foi sujeita. Em direcção ao centro, é visível uma redução da orientação molecular, visto que nessa zona o arrefecimento é mais lento e permite mais tempo para relaxação.

A orientação molecular vai afectar o padrão de tensão residual. Junto às paredes do molde desenvolve-se a tensão de corte máxima e, no momento em que o material solidifica, essa camada fica impossibilitada de reajustar a orientação das moléculas, sendo que adquiriu uma elevada orientação. Esse material orientado tem uma grande tendência a contrair mas é, de certa forma, impedido de o fazer pelo restante da zona central. Assim, constata-se que a camada próxima da superfície da peça fica sujeita a tracção, enquanto o material da zona central fica sujeito a compressão, conforme indicado na Figura 4.4. É também de notar que as tensões residuais são uma das causas comuns do empeno das peças moldadas por injeção (Shoemaker, 2006).

4.3 Viscosidade do Fundido

A viscosidade é a resistência que o material apresenta ao escoamento. Em geral, os polímeros fundidos são altamente viscosos devido à sua estrutura molecular de cadeias longas. Utilizando a Figura 4.5 como referência, pode exprimir-se a viscosidade, η , como a razão entre a tensão de corte, τ , e a taxa de corte, $\dot{\gamma}$, conforme apresentado na Equação 4.1.

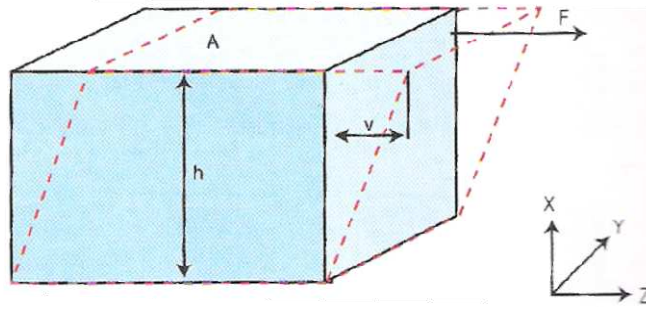


Figura 4.5 – Representação esquemática do fluxo de material sujeito ao corte. (Shoemaker, 2006)

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (4.1)$$

onde a tensão de corte, τ , é definida pela razão entre a força, F , e a área, A , conforme ilustra a Equação 4.2.

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (4.2)$$

e a taxa de corte, $\dot{\gamma}$, é definida pela razão entre a velocidade, v , e a espessura, h , conforme ilustra a Equação 4.3.

$$\dot{\gamma} = \frac{v}{h} \quad (4.3)$$

A viscosidade do polímero é uma propriedade muito importante no enchimento da cavidade do molde. Verifica-se que esta diminui com o aumento da velocidade, ou seja, com o aumento da taxa de corte e com isso melhora a fluidez do material (Figura 4.6).

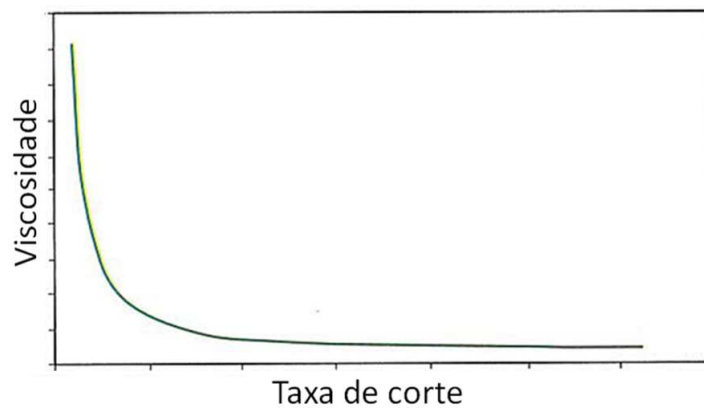


Figura 4.6 – Evolução da viscosidade em função da taxa de corte. (Beaumont, 2007)

4.4 Compressibilidade do Fundido

Devido às características P-v-T do material, quando o polímero é aquecido e sobre ele é aplicada uma determinada pressão, resulta uma elevada compressibilidade. Durante o processo de moldação por injeção, este aspecto é de elevada importância uma vez que o volume de material que ocupa a cavidade do molde varia em função da pressão e da temperatura de operação. Assim, devido a este comportamento, fica evidente que qualquer variação dos parâmetros do processo pode afectar positiva ou negativamente o produto final.

4.5 Pressão de Injecção

A pressão de injeção é responsável por empurrar o material polimérico fundido para o interior da cavidade do molde durante as fases de enchimento e compactação. De modo a exemplificar a evolução desta pressão ao longo do sistema, observe-se a Figura 4.7.

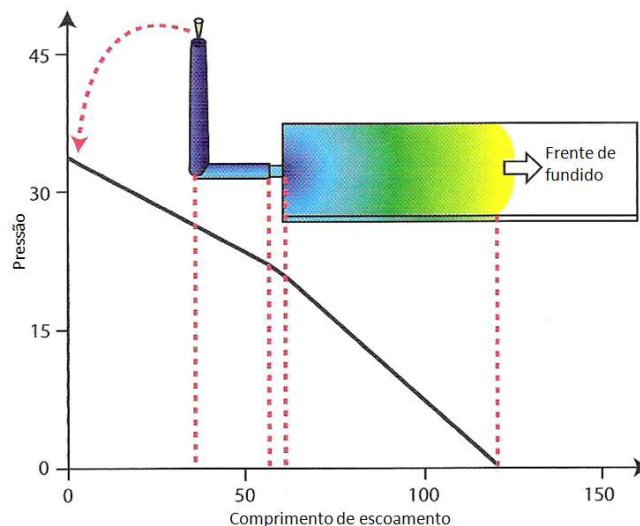


Figura 4.7 – Evolução da pressão ao longo do sistema. (Shoemaker, 2006)

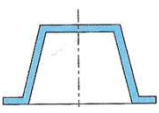
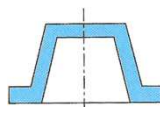
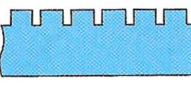

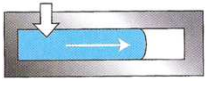
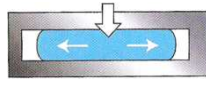
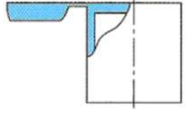
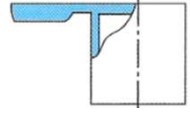


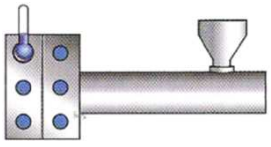
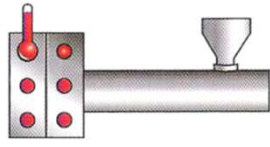
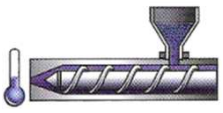
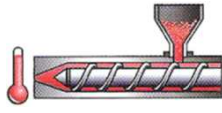
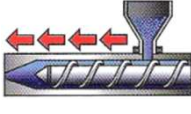
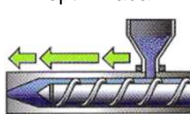


Verifica-se que a pressão máxima se situa no ponto de injeção. A partir desse ponto, a pressão vai diminuindo progressivamente ao longo do sistema até o seu valor ser nulo, o que ocorre na frente de escoamento.

4.5.1 Factores que Influenciam a Pressão de Injecção

Durante o processo de moldação por injeção, são diversos os factores que influenciam a pressão de injeção, nomeadamente a geometria da peça, o sistema de alimentação, as condições de processamento e a selecção do material, entre outros. De forma a compreender-se o efeito de cada

um destes factores, a Quadro 4.1 apresenta as condições que tipicamente originam baixas e elevadas pressões de injeção.

Quadro 4.1 – Factores que influenciam a pressão de injeção. (Shoemaker, 2006)

Factor	Variável	Maior pressão exigida	Menor pressão exigida
Geometria da peça	Espessura da peça	Peça fina 	Peça espessa 
	Superfície da peça	Mais arrefecimento e resistência das paredes 	Menor arrefecimento e resistência das paredes 
Geometria do sistema de alimentação	Comprimento do fluxo	Comprimento do fluxo longo 	Comprimento do fluxo curto 
	Dimensão do ataque	Ataque restritivo 	Ataque com maior secção 
	Canais do sistema de alimentação	Área reduzida do canal 	Área do canal optimizada 
Condições de processamento	Temperatura do molde	Baixa temperatura do fluido de arrefecimento 	Alta temperatura do fluido de arrefecimento 
	Temperatura do fundido	Baixa temperatura do fundido 	Alta temperatura do fundido 
	Velocidade do fuso	Velocidade do fuso imprópria 	Velocidade do fuso optimizada 
Seleção de material	Índice de fluidez	Pouca fluidez 	Elevada fluidez 

A taxa de enchimento do molde é reconhecidamente o factor que mais contribui para os níveis de pressão necessários para preencher a cavidade do molde. A pressão necessária para empurrar o polímero fundido é directamente proporcional à velocidade local do polímero. A Equação 4.4, baseada na Lei de *Hagen Poiseuille*, permite estimar a pressão necessária durante a fase de enchimento do molde. Verifica-se que a variação de pressão, ΔP , é directamente proporcional ao caudal, Q , à viscosidade do polímero, η , e ao comprimento do fluxo, l . Por outro lado, é inversamente proporcional à largura do escoamento, w , e ao cubo da espessura do canal canal de fluxo, h .

$$\Delta P = \frac{12Q\eta l}{wh^3} \quad (4.4)$$

4.6 Determinação da Rotação do Fuso

O valor da velocidade de rotação do fuso deve ser correctamente determinado, uma vez que está associado ao valor de velocidade tangencial ao qual o polímero deve ser submetido para que seja adequadamente plastificado sem sofrer degradação (Figura 4.8). Assim, o valor recomendado para a velocidade tangencial deve ser extraído do catálogo dos fornecedores de matérias-primas de forma a proceder-se ao cálculo da velocidade de rotação do fuso.

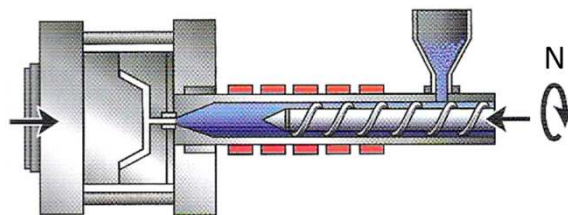


Figura 4.8 – Ilustração do movimento do fuso. (Shoemaker, 2006)

Deste modo, a rotação do fuso, N , pode ser determinada pela Equação 4.5, onde V_t é a velocidade tangencial do fuso recomendada e D o diâmetro.

$$N = \frac{V_t}{\pi \cdot D} \quad (4.5)$$

4.7 Determinação da Almofada

Para a generalidade dos casos, deve ajustar-se o curso do fuso para que no final da compactação reste uma sobremedida de material, designada de *almofada*, à frente do fuso (Figura 4.9). A sua principal função é garantir que a pressão de compactação seja aplicada à peça até ao fim do tempo

estabelecido, evitando a presença de vazios e rechupes. A dimensão recomendada da *almofada* varia geralmente entre 3mm e 9mm, sendo proporcional ao porte das máquinas injectoras.



Figura 4.9 – Almofada. (Shoemaker, 2006)

4.8 Determinação do Curso de Abertura do Molde

O curso de abertura do molde também exerce influência no tempo de ciclo, uma vez que quanto mais longo for o curso mais tempo o molde vai estar aberto, portanto, maior será a parcela de tempo não produtivo. Este aspecto ganha maior preponderância ao considerar-se a produção em série de uma determinada peça. A Figura 4.10 permite visualizar o curso necessário para a abertura do molde, C_a , e o respectivo valor pode ser estimado através da Equação 4.6.

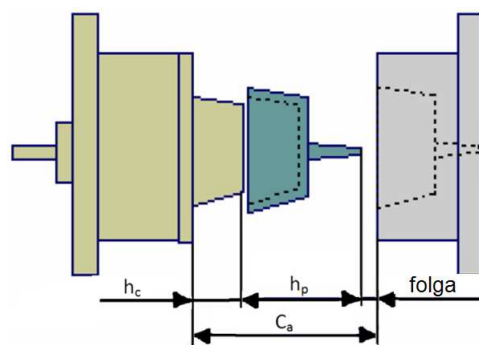


Figura 4.10 – Curso de abertura do molde necessário para a extração da peça. (Fonte: <http://www.torresnetworking.com/>)

$$C_a = 2 \cdot h_p + h_c + folga \quad (4.6)$$

onde, h_p representa a altura da peça injetada e h_c a altura do canal da bucha. A folga varia geralmente entre 50 a 100mm.

4.9 Determinação do Perfil de Velocidade de Injecção

Usualmente, a fase de injeção é realizada perante condições de velocidade controlada. Isso significa que o fuso empurra o material plastificado para o interior da cavidade do molde mediante um perfil de velocidades, o qual pode ser programado com valores diferenciados.

A definição do perfil de velocidades, adequado a cada peça, é fundamental para a qualidade do produto final. O perfil mais adequado depende de vários factores tais como a geometria, a dimensão e os requisitos finais da peça. Com o objectivo de se minimizar os efeitos da orientação molecular na camada junto à superfície da peça, bem como o de permitir uma transição mais suave para a fase de compactação, é essencial controlar-se a velocidade da frente de fundido adequadamente. Para tal, a velocidade de avanço do fuso deve ser programada no sentido de se obter uma velocidade de frente de fundido o mais constante possível. Considere-se a Figura 4.11.

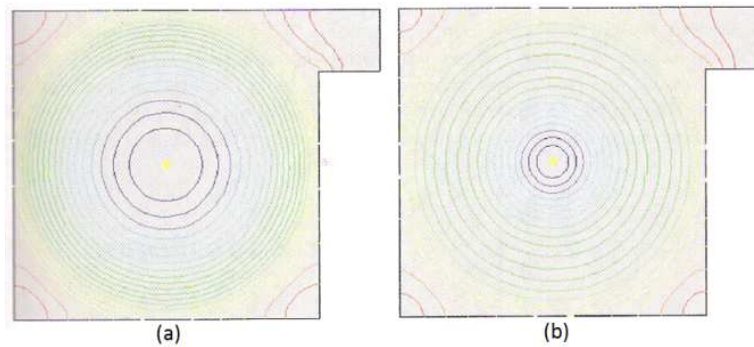


Figura 4.11 – (a) Velocidade da frente de fundido variável. (b) Constante. (Shoemaker, 2006)

Na Figura 4.11a, verifica-se um perfil de velocidades do fuso desadequado, uma vez que neste caso a velocidade da frente de fundido é variável. Por outro lado, a Figura 4.11b apresenta um espaçamento uniforme entre as linhas que representam a evolução do enchimento em função do tempo. Este último é, portanto, considerado um perfil de velocidades otimizado visto que a velocidade na frente de fundido se mantém aproximadamente constante.

Para uma melhor compreensão da importância do método de controlo de velocidade descrito acima, convém recordar os efeitos negativos da orientação molecular e os fenómenos que lhes dão origem (Secção 4.2.1).

4.10 Determinação do Perfil de Pressão de Compactação

A compactação tem como funções compensar a contracção da peça devido ao seu arrefecimento na cavidade do molde, bem como manter a pressão aplicada até que o ponto de injeção ou o ataque solidifique, para que o material que está no interior da cavidade não retorne pelos canais de alimentação.

Com esse intuito, são recomendados valores de pressão de compactação que variam de 40 a 80% da pressão de injeção atingida no instante imediatamente antes da comutação V/P. Contudo, para se obter uma peça de qualidade é necessário considerar-se as suas características e as condições de processamento, ou seja, por vezes pode ser vantajoso que a pressão de compactação esteja fora da gama recomendada.

Em vez de se programar uma pressão de compactação constante, é possível programar-se um perfil que se inicie com um valor na gama referida acima, reduzindo-o à medida que decorre o tempo de compactação. Além de significar uma redução significativa na força de fecho máxima do molde, são também minimizados os efeitos de uma pressão de compactação elevada sobre a peça, nomeadamente as tensões residuais e o surgimento de rebarbas, o que poderia comprometer a qualidade do produto.

4.11 Temperatura do Fundido

A temperatura do fundido é aquela à qual o material sai do bico da máquina injectora e entra no gito ou no canal da bucha do molde de injeção para os casos em que a injeção é directa. Os materiais poliméricos devem ser aquecidos de forma a tornarem-se moldáveis, uma vez que com o aumento da temperatura a viscosidade diminui, necessitando-se assim de menor pressão para atingir o rendimento de injeção desejado. Porém, cada material está limitado a uma temperatura máxima de aquecimento sob o risco de ocorrer uma degradação térmica e consequente quebra de qualidade do material (Figura 4.12). O objectivo do ajuste da temperatura do material antes da injeção é a obtenção de um fundido com boa qualidade recorrendo às menores temperaturas possíveis.

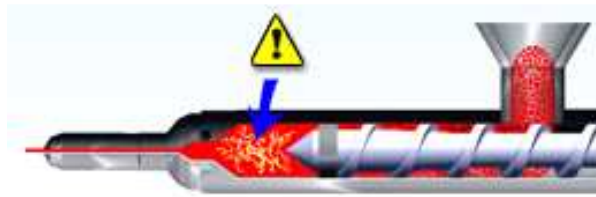


Figura 4.12 – Degradação térmica do material. (Fonte: ©Autodesk, 2010)

Cada material polimérico apresenta uma gama de temperaturas onde a eficiência de injeção é maximizada sem prejuízo das suas propriedades mecânicas e físicas. Esta gama de temperaturas é geralmente especificada pelos fabricantes do material. No entanto, existe um valor de temperatura para o qual as características do escoamento obtido conduzem a um produto final com maior qualidade. Para cada caso, a temperatura de fundido deve ser otimizada iterativamente através de um processo de tentativa e erro. O valor da temperatura do fundido é influenciado por alguns factores, dos quais se destacam a velocidade de rotação do fuso e a velocidade de injeção. Assim, durante o processo industrial de injeção é fundamental efectuar-se a medição da temperatura do material que sai do bico da máquina injectora e certificar-se que o calor introduzido no polímero resultou na temperatura desejada.

É também conveniente perceber de que forma a temperatura da frente de fundido evolui depois de entrar na cavidade. Dependendo das características do molde, do material e da sua velocidade de injeção, o escoamento irá originar maior ou menor fricção nas paredes do molde e, por

consequência, gerar mais ou menos calor. Por outro lado, devido ao facto da temperatura de superfície do molde ser inferior à do material injectado, o fundido tende a iniciar o processo de arrefecimento imediatamente após a sua injeção. Assim, devido à ponderação da influência oposta desses dois factores, assiste-se a que em alguns casos a temperatura da frente de fundido apresente um aumento gradual ao longo do escoamento no interior do molde, ao invés de outros casos onde se verifica uma diminuição.

Avaliando os produtos finais, constata-se que a variação de temperatura do fundido deve ser tanto menor quanto possível, visto que a uniformidade de temperatura da peça durante o arrefecimento é um factor essencial para a obtenção de peças que satisfaçam os requisitos de qualidade exigidos.

4.12 Temperatura de Superfície do Molde

Para cada material termoplástico existe uma gama recomendada para a temperatura de superfície do molde a utilizar que normalmente é especificada pelos fabricantes do material. Por razões económicas relacionadas com o tempo de ciclo subsiste a tendência por parte das empresas de operar com a menor temperatura do molde possível. No entanto, se esta temperatura estiver abaixo do valor mínimo, há um elevado risco de se comprometer a qualidade do acabamento superficial. Portanto, fica evidente que neste contexto a questão essencial é encontrar a temperatura dentro da gama recomendada que conduza ao melhor compromisso entre o menor tempo de ciclo possível e o cumprimento dos requisitos de qualidade superficial da peça.

Na realidade, assiste-se a que a definição da temperatura do molde a utilizar é um processo muito mais complexo do que aquilo que foi dito no parágrafo anterior. Além das consequências no acabamento superficial, a temperatura do molde é de reconhecida importância para as seguintes características da peça injectada (Ficher, 2003):

- Contração
- Tensões residuais
- Uniformidade da estrutura morfológica do polímero
- Empenamentos

Naturalmente, o tempo que um molde que não possua sistema de arrefecimento ou que possua um sistema defeituoso leva a atingir a temperatura de regime pode ser consideravelmente maior quando comparado com um molde que o possua bem projectado. Entenda-se por temperatura de regime aquela que é inicialmente especificada como a temperatura de superfície do molde a utilizar no processo. Esta depende directamente da temperatura de entrada do fundido e da temperatura do fluido do sistema de arrefecimento do molde, no caso de este existir, uma vez que a temperatura de superfície do molde vai tender rapidamente para uma temperatura entre essas duas por motivos óbvios.

Outro factor que também deve ser levado em consideração é a influência exercida pela temperatura do molde no grau de cristalização atingido pelo material injectado na cavidade do molde, bem como na homogeneidade da estrutura cristalina ao longo da espessura da peça. Comprova-se que para temperaturas de superfície do molde excessivamente baixas o grau de cristalização do material cai acentuadamente, o que pode dar origem a defeitos no produto final, nomeadamente contracção diferenciada e empenamentos. Verifica-se igualmente para temperaturas demasiado baixas pouca homogeneidade da estrutura cristalina. Os efeitos da não homogeneidade dessa estrutura podem ser empenamentos e contracção pós-moldação, exercendo claramente uma influência negativa sobre o desempenho da peça injectada.

Os parâmetros que controlam o arrefecimento do molde devem ser ajustados de forma a que não ocorram diferenças de temperatura entre as diferentes regiões de uma peça injectada, o que conduz ao empenamento da mesma. A título de exemplo considere-se a Figura 4.13 onde uma face da peça está exposta a baixas temperaturas, relativamente à outra face.

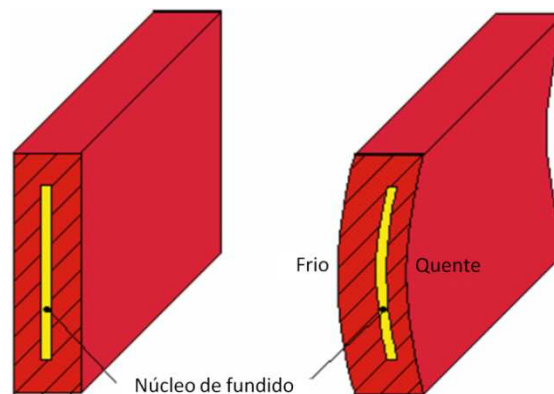


Figura 4.13 – Influência da diferença de temperaturas dos lados da cavidade do molde. (Fonte: <http://www.torresnetworking.com/>)

O motivo que leva ao empenamento é o deslocamento do núcleo de fundido para regiões mais próximas do lado mais quente do molde. Ao arrefecer e contrair, essa região produz tensões que conduzem ao empenamento da peça moldada. Portanto, fica claro que o controlo da temperatura do molde deve dar origem a um arrefecimento do molde uniforme e que a peça ao ser desmoldada apresente uma temperatura superficial tanto mais constante quanto possível.

4.13 Temperatura de Extracção Média

Regra geral, nenhuma peça moldada por injecção deve ser extraída da cavidade do molde até ao momento em que esteja dimensionalmente estável, ou seja, não sofra distorção ou empenamento.

A determinação da temperatura média de desmoldação é também importante do ponto de vista económico, uma vez que quanto menor for essa temperatura maior será o tempo de ciclo e, consequentemente, isso implica menores produtividades.

A máxima temperatura de desmoldação pode ser determinada através das curvas P-v-T do material. No caso de polímeros semicristalinos, utiliza-se a da temperatura de cristalização, conforme foi definida na Secção 2.3. Contudo, a temperatura de extracção média é comumente especificada e fornecida pelo fabricante do material.

4.14 Tempo de Enchimento

O tempo de enchimento está relacionado com a taxa de injeção, a qual deve ser suficientemente elevada para evitar o arrefecimento e solidificação do material durante a fase de enchimento. No entanto, a taxa de injeção pode estar limitada devido à sensibilidade do polímero ao corte durante o escoamento através de passagens estreitas. Considerando estes factores, o tempo de enchimento obtido deve ser aquele que permita satisfazer os requisitos de qualidade da peça. Contudo, interessa que seja tanto menor quanto possível visto que a sua duração tem influência directa no tempo de ciclo do processo.

O enchimento é uma fase crítica durante o processo de moldação por injeção devendo por isso ser controlado convenientemente. Geralmente o tempo de injeção resulta da definição de um perfil de velocidades do fuso, o qual vai originar diferentes níveis de pressão durante a injeção.

4.15 Tempo de Compactação

Recorde-se que a compactação tem como objectivo compensar a contracção que a peça sofre durante o arrefecimento na cavidade do molde. Esta fase inicia-se imediatamente após a fase de enchimento e deverá ser prolongada até que o ponto de injeção ou o ataque solidifique para que o material que está dentro da cavidade do molde não retorne. Assim, é importante averiguar em que instante se assiste à solidificação do ponto de injeção ou do ataque e finalizar imediatamente esta fase de forma a minimizar o tempo de compactação, uma vez que não faz sentido manter a pressão de compactação após esse instante visto que a mesma não estará a ser transmitida à cavidade.

4.16 Tempo de Arrefecimento

A fase de arrefecimento é geralmente a mais extensa do processo de moldação por injeção. O tempo de arrefecimento é contabilizado desde o fim da fase de compactação até ao momento da extracção da peça do interior do molde. Do ponto de vista teórico a peça apenas deveria ser ejectada

após todo o material que a constitui estar a uma temperatura inferior à *temperatura de extracção média* (definida na Secção 4.13.) de forma a garantir a sua estabilidade dimensional. Contudo, industrialmente interessa diminuir o tempo de ciclo o máximo possível desde que essa redução não origine prejuízo na qualidade final da peça. Desta forma, considera-se vulgarmente que a temperatura de ejeção é atingida quando 80% da espessura da peça se encontra à *temperatura de extracção média* ou abaixo dela. Utilizando este critério, é possível determinar o tempo mínimo de arrefecimento para cada peça, $t_{arref,min}$, de acordo com a Equação 4.7 (Georgia Institute of Technology, 2010). Deste modo, verifica-se que o tempo de arrefecimento é proporcional ao quadrado da espessura da peça, h , e inversamente proporcional à difusividade térmica, α . É ainda proporcional ao logaritmo da razão entre a diferença de temperaturas do fundido, T_M , e da parede do molde, T_W , pela diferença de temperaturas de ejeção, T_E , e da parede do molde, T_W .

$$t_{arref,min} = \frac{h^2}{\alpha\pi^2} \ln \left| \frac{4}{\pi} \left(\frac{T_M - T_W}{T_E - T_W} \right) \right| \quad (4.7)$$

Para que a extracção de calor do molde seja mais eficiente, é necessário promover a turbulência nos canais de arrefecimento. Considere-se então o número de Reynolds definido na Equação 4.8.

$$Re = \frac{\rho U D}{\mu} \quad (4.8)$$

onde, ρ é a massa volúmica, U a velocidade média e μ a viscosidade dinâmica do fluido de arrefecimento. O diâmetro (equivalente) dos canais de arrefecimento é representado por D .

O Quadro 4.2 faz a correspondência entre o número de Reynolds e o respectivo tipo de escoamento.

Quadro 4.2 – Correspondência entre o número de Reynolds e o tipo de escoamento. (Shoemaker, 2006)

Número de <i>Reynolds</i> [Re]	Tipo de escoamento
4000 < Re	Escoamento turbulento
2300 < Re < 4000	Escoamento transição
100 < Re < 2300	Escoamento laminar
Re < 100	Escoamento estagnado

Observe-se a Figura 4.14 onde se compara esquematicamente o escoamento laminar ao turbulento.

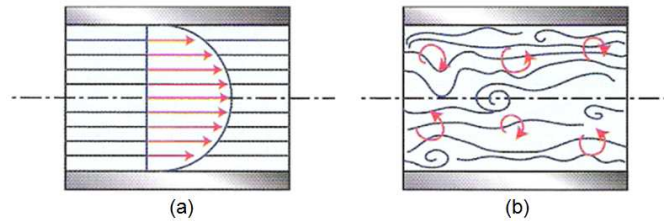


Figura 4.14 – (a) Escoamento laminar. (b) Escoamento turbulento. (Shoemaker, 2006)

Compreende-se facilmente que para o escoamento turbulento a difusão de calor seja superior ao caso do escoamento laminar (Figura 4.15).

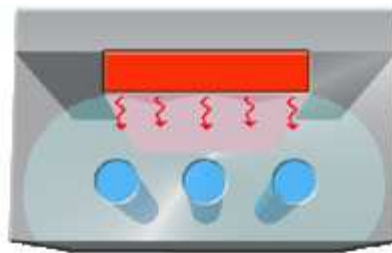


Figura 4.15 – Difusão de calor. (Shoemaker, 2006)

4.17 Defeitos de Moldação

Existem vários factores que influenciam o aparecimento de defeitos em peças moldadas por injeção, nomeadamente o molde, o material polimérico e as condições de processamento. Os principais defeitos que sucedem são os seguintes (Olmsted e Davis, 2001):

- Rebarbas;
- Degradação térmica;
- Rechupes;
- Linhas de soldadura;
- Prisões de ar;
- Mau acabamento superficial;
- Empenamento da peça.

Para se obter uma peça com qualidade, necessita-se em primeiro lugar de garantir um molde bem projectado e uma escolha acertada do material polimérico. Porém, é ainda fundamental definir-se adequadamente as variáveis de controlo do processo, uma vez que geralmente é deste factor que resultam a maioria dos defeitos.

Capítulo 5

Caso de Estudo – Peça Fabricada por Injecção

Este capítulo apresenta um caso de estudo referente a uma peça (Figura 5.1) fabricada em série por injeção na empresa J. Deus® com a finalidade de ser comercializada.



Figura 5.1 – Peça fabricada por injeção.

O primeiro objectivo neste estudo é reproduzir o mais fielmente possível as condições de processamento utilizadas na empresa, utilizando o programa de simulação numérica *Autodesk Moldflow Insight®*. Com esse intuito, realizou-se um levantamento das características do equipamento utilizado no processo, do material da peça e de todos os parâmetros programados no sistema de controlo de modo a proceder-se à respectiva simulação computacional.

Após a validação da reprodução computacional, o próximo objectivo consiste em indicar os parâmetros e condições de processamento mais influentes na qualidade do produto final. Desta forma, recorrendo a diversas análises através das ferramentas do software referido, apresenta-se o efeito destes parâmetros com a sua variação, tendo como finalidade encontrar o ponto de equilíbrio que conduza a melhores características do produto final.

Este caso de estudo culmina com a sugestão de novas condições de processamento tendo em conta o efeito conjunto dos parâmetros mais influentes, com a finalidade de melhorar alguns aspectos relacionados com a qualidade da moldação.

5.1 Levantamento das Condições de Processamento

O levantamento das condições de processamento foi realizado em ambiente industrial. Em primeiro lugar, é necessário ter informação acerca das ferramentas utilizadas no processo (Figura 5.2).

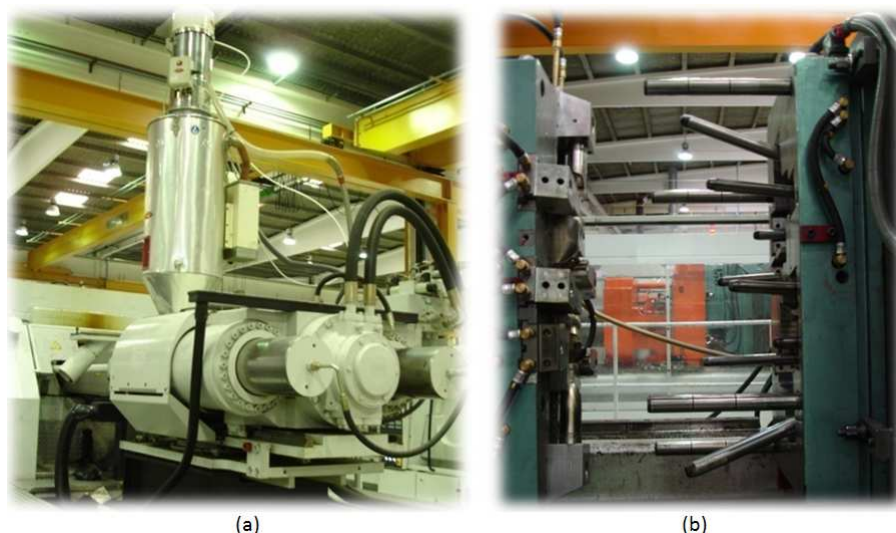


Figura 5.2 – a) Máquina Injectora: ENGEL 500 Ton. (b) Molde.

As características reunidas da máquina injectora são apresentadas no Quadro 5.1.

Quadro 5.1 – Características da máquina injectora.

ENGEL 500 Ton	
Força de fecho máxima [ton]	500,0
Pressão hidráulica máxima [MPa]	21,4
Pressão de injeção máxima [MPa]	173,0
Diâmetro do fuso [mm]	80,0
Caudal máximo [cm ³ /s]	460,0

Através da informação recolhida, é possível esquematizar a transmissão de pressões e forças de forma a se compreender a sua evolução. Considere-se a Figura 5.3.

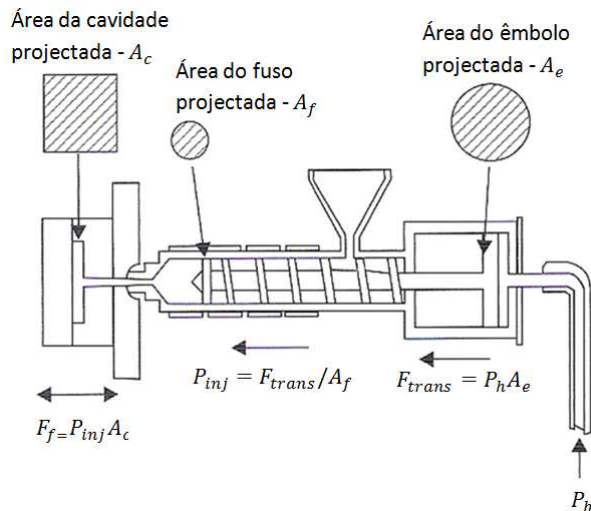


Figura 5.3 – Evolução da pressão e força na máquina injetora. (Beaumont, 2007)

Uma vez que a pressão hidráulica máxima, $P_{h,max}$, e a pressão de injeção máxima, $P_{inj,max}$, são conhecidas e que a área do fusão projectada, A_f , e a área do êmbolo projectada, A_e , podem ser determinadas através da Equação 5.1 é possível calcular a razão de intensificação da máquina injetora⁴, R_i , o diâmetro do êmbolo que actua na unidade hidráulica, D_e , e a força de fecho necessária, F_f , bastando neste último caso conhecer-se a área da cavidade projectada, A_c .

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (5.1)$$

O Quadro 5.2 apresenta o valor destes parâmetros, após o cálculo segundo a lógica descrita acima.

Quadro 5.2 – Parâmetros da máquina injetora.

ENGEL 500 Ton	
Razão de intensificação, R_i	8,1
Área do fusão projectada, A_f [mm ²]	5026,5
Área do êmbolo projectada, A_e [mm ²]	40664,4
Diâmetro do êmbolo, D_e [mm]	227,5
Razão entre diâmetros, D_h/D_f	2,8
Força de fecho necessária, F_f [N]	$F_f = P_{inj}A_c$

O valor da força de fecho, F_f , não é apresentado por ser variável ao longo de todo o ciclo de moldação, visto que depende da pressão que actua na cavidade do molde em cada instante.

⁴ Multiplicação da pressão desde a unidade hidráulica até à unidade de injeção.

Em relação ao molde, interessa ter o detalhe de todo o sistema de alimentação, ou seja, do gito, canais de alimentação e do ataque. Esta informação foi recolhida após a ejeção da moldação do interior do molde (Figura 5.4).

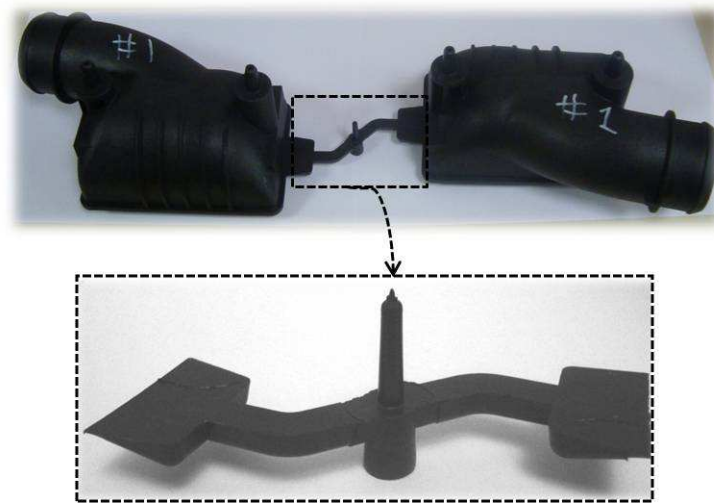


Figura 5.4 – Detalhe do sistema de alimentação após a ejeção da moldação.

Por inspeção, verifica-se que o ataque é em leque e que os canais de alimentação têm uma secção transversal em forma de U. Avaliando as dimensões características do sistema de alimentação, procedeu-se à sua modelação (Figura 5.5). Nesta fase estão reunidas as informações necessárias acerca das ferramentas utilizadas.

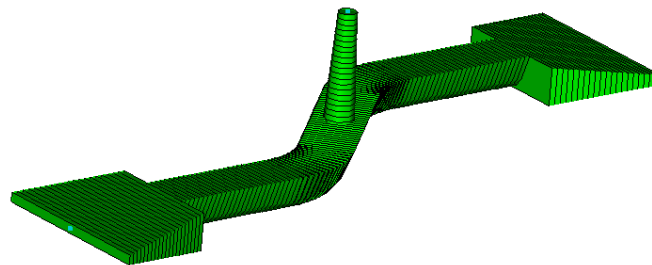


Figura 5.5 – Sistema de alimentação modelado.

Antes de considerar os parâmetros de controlo do processo é fundamental inteirar-se do material utilizado no fabrico da peça. Obteve-se a seguinte designação comercial: Stanyl TW200F6. O material em questão é uma poliamida 46 reforçada com 30% de fibra de vidro (PA46 GF30) e as suas propriedades, tal como o seu processamento recomendado, são facultados pelo fornecedor e apresentadas no Anexo (A).

As variáveis de controlo do processo de moldação por injeção foram registadas durante o decurso da produção da peça. Esta informação é exposta no Quadro 5.3.

Quadro 5.3 – Parâmetros de controlo do processo de injeção.

Comutação V/P	Por posição do fuso em 20mm
Controlo de compactação	% Pressão de injeção máxima vs tempo Duração = 6 segundos Pressão = 60%
Almofada [mm]	4,0
Temperatura da superfície do molde [°C]	115,0
Temperatura do fundido [°C]	315,0
Temperatura ambiente [°C]	25,0
Temperatura de entrada da água [°C]	80,0
Tempo de abertura do molde [s]	5,0
Tempo de arrefecimento [s]	20,0
Pressão hidráulica disponível [MPa]	10,0
Pressão disponível na câmara [MPa]	80,9

O controlo do enchimento realizou-se através de um perfil de velocidades do fuso definido em relação à sua posição, cujos valores são apresentados no Quadro 5.4 e ilustrados graficamente na Figura 5.6.

Quadro 5.4 – Controlo do enchimento.

Posição do fuso [mm]	Velocidade do fuso [mm/s]
95,0	70,0
56,8	70,0
49,5	28,0
38,0	25,0
30,6	21,0
18,9	18,0
11,3	15,0
0,0	15,0

A leitura do gráfico deve ser efectuada da direita para a esquerda, ou seja, inicialmente o fuso encontra-se na posição $x = 95\text{mm}$ e, ao iniciar-se a fase de injeção, o fuso desloca-se segundo um perfil de velocidades definido até à posição $x = 0\text{mm}$.

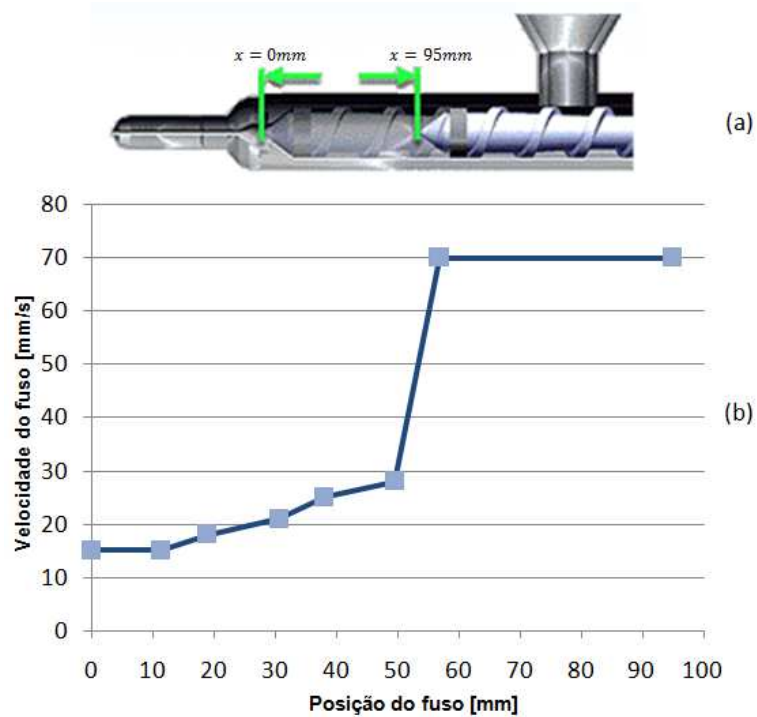


Figura 5.6 – (a) Curso do fuso. (b) Perfil de velocidades utilizado no controlo do enchimento.

Em relação ao sistema de arrefecimento, apesar de não haver garantia sobre a exactidão do seu desenho, foi disponibilizado um ante-projecto que tinha como objectivo sustentar o projecto do molde. Portanto, utilizou-se esse sistema como referência e a Figura 5.7 ilustra a respectiva distribuição dos canais de arrefecimento. Os canais de arrefecimento são representados a azul enquanto que as cascatas são representadas a amarelo (ver Secção 3.1.3.4) É de notar que nesta figura apenas se apresenta uma peça, visto que o sistema utilizado na outra é idêntico.

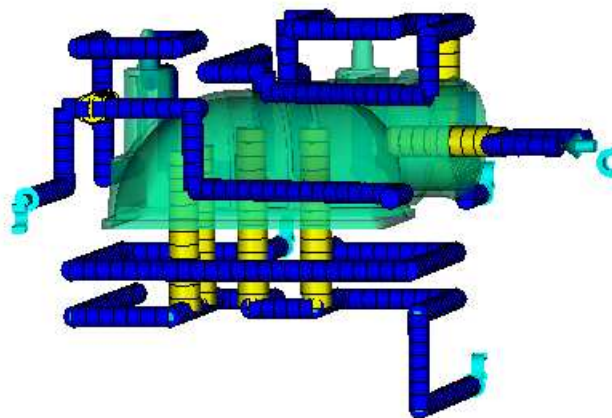


Figura 5.7 – Distribuição dos canais do sistema de arrefecimento.

Deste modo, estão reunidas todas as condições necessárias para se proceder à reprodução computacional do processamento elaborado pela empresa.

5.1.1 Base de Comparação das Condições de Processamento

Antes de apresentar a reprodução computacional é conveniente estabelecer uma base de comparação em relação aos resultados obtidos durante a produção da peça. O levantamento das condições de processamento foi já apresentado, no entanto ainda nada foi referido quanto aos resultados obtidos pela empresa.

5.1.1.1 Resultados Obtidos pela Empresa

Numa primeira abordagem é útil observar o aspecto do produto final. Considere-se a (Figura 5.8).



Figura 5.8 – Moldação ejectada após um ciclo.

Após cada ciclo de moldação são extraídas duas peças em simultâneo. Aparentemente existe simetria total na injeção da moldação, ou seja, ambas as peças deveriam possuir as mesmas características finais. No entanto, após uma análise mais atenta, encontram-se pequenas diferenças. Estas pequenas diferenças podem ser explicadas pelo simples facto das cavidades do molde ou do sistema de alimentação (Figura 5.9) não terem sido maquinados rigorosamente do mesmo modo em ambos os lados, uma vez que é difícil alcançar-se a perfeição.

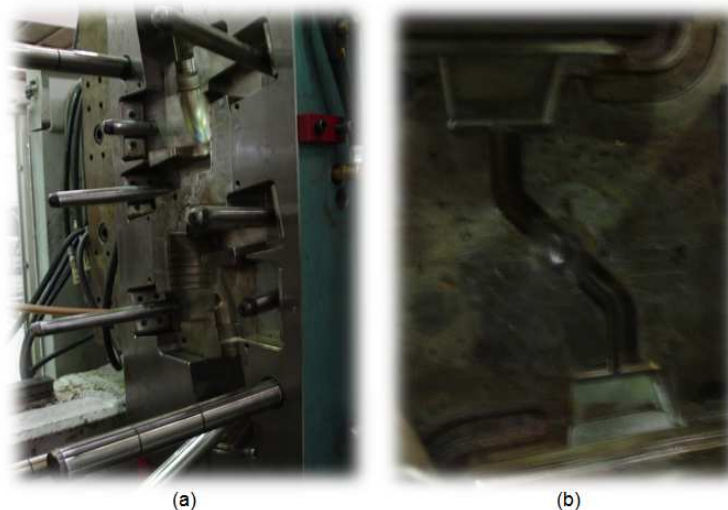


Figura 5.9 – (a) Cavidade do molde. (b) Ataque e canais de alimentação.

Esta situação é suficiente para que o escoamento se desenvolva de forma desigual para cada uma das duas peças moldadas em simultâneo. Observe-se, por exemplo, a diferença em uma linha de soldadura característica da peça (Figura 5.10). Este é um aspecto de interesse e por isso será posteriormente comparado na Secção 5.2.2.1 com a formação da respectiva linha de soldadura obtida na simulação computacional.



Figura 5.10 – (a) Peça extraída da cavidade #1. (b) Peça extraída da cavidade #2.

Contudo, estabeleceram-se também outros parâmetros de comparação dos resultados obtidos pela empresa com os obtidos recorrendo à reprodução computacional. Deste modo, registou-se o tempo de enchimento e a massa de cada peça após a ejeção da moldação. Estes valores são apresentados no Quadro 5.5.

Quadro 5.5 – Base de comparação dos resultados da empresa com os da reprodução.

Parâmetros de Referência	
Tempo de enchimento [s]	2,22
Massa por peça [g]	262

O tempo de enchimento obtido no processo real será ainda utilizado como referência na Seção 5.2.2 para justificar a opção tomada em relação à dimensão de entrada do gito utilizada na simulação computacional.

5.2 Simulação Computacional

A reprodução computacional do processo realizou-se com recurso às ferramentas do programa de simulação numérica *Autodesk Moldflow Insight®*. Antes de apresentar a simulação computacional é conveniente apresentar as decisões tomadas na sua execução.

5.2.1 Malha Utilizada no Programa *Autodesk Moldflow Insight®*

Para executar uma análise computacional no programa *Autodesk Moldflow Insight®* o modelo da peça deve ser importado para o ambiente de trabalho do *software* e seguidamente atribuir-lhe uma malha de elementos finitos adequada. Os elementos dividem a geometria da peça em um determinado número de pequenos domínios. O tipo de elemento utilizado na presente análise é constituído por três nós – elemento triangular (Figura 5.11).

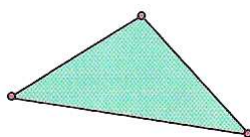


Figura 5.11 – Elemento triangular – 3 nós.

É também necessário definir o tipo de malha a utilizar na análise e, neste caso, a opção recaiu sobre a malha Dual-Domain (Figura 5.12) por se adequar à geometria da peça.

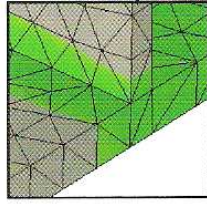


Figura 5.12 – Malha Dual-Domain.

5.2.1.1 Pressupostos da Malha *Dual-Domain*

Cada tipo de malha apresenta os seus pressupostos. Deste modo, para a malha *Dual-Domain* verificam-se os seguintes:

- Escoamento laminar de um fluido Newtoniano generalizado;
- Efeitos de inércia e da gravidade desprezados;
- Condução de calor no plano insignificante em comparação com a condução na direcção da espessura;
- Transferência de calor por convecção desprezada na direcção da espessura.

5.2.1.2 Pressupostos Específicos dos Elementos Triangulares na Malha *Dual-Domain*

A malha *Dual-Domain* com elementos triangulares simula uma peça em 3D com uma malha na superfície externa da peça. Os elementos são alinhados em toda a espessura da peça e combinados. A distância entre os elementos em lados opostos da parede define a espessura da peça. A densidade da malha é um factor importante para determinar com precisão a representação da espessura.

5.2.2 Reprodução das Condições de Processamento

Uma vez importada a geometria da peça para o ambiente de trabalho do programa *Autodesk Moldflow Insight®*, é gerada uma malha de elementos finitos de acordo com as características descritas na Secção 5.2.1.2. A malha a utilizar na análise necessita de satisfazer certos requisitos de forma ao cálculo computacional ser efectuado com maior rigor, ou seja, além de serem eliminados eventuais defeitos na geração da malha é fundamental refiná-la com o intuito de se obter uma convergência de resultados sem, no entanto, tornar lenta desnecessariamente a análise do ponto de vista computacional. Deste modo, obteve-se uma malha com 27828 elementos (Figura 5.13.)

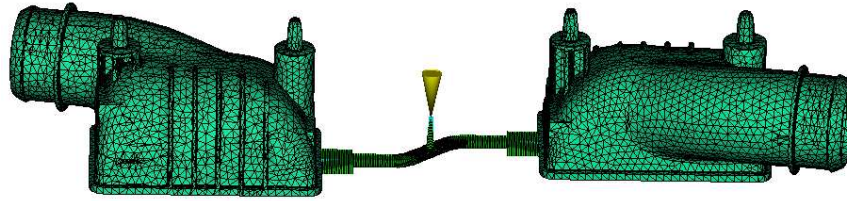


Figura 5.13 – Malha de elementos finitos.

Antes de executar a análise de simulação resta apenas incluir o sistema de arrefecimento (Figura 5.14).

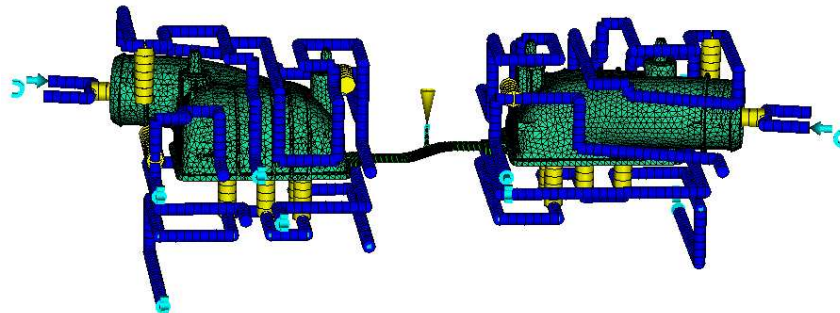


Figura 5.14 – Sistema de arrefecimento.

Através do assistente de definições do processo, introduziram-se os parâmetros reunidos aquando do levantamento das condições de processamento e extraíram-se os primeiros resultados. Porém, encontrou-se um aspecto crítico na forma como o software rege o processo. Ou seja, para o programa Autodesk Moldflow Insight®, interessa a pressão que se desenvolve na secção de entrada do gito de alimentação. Deste modo, é fulcral que o diâmetro de entrada do gito seja definido adequadamente, visto que essa dimensão vai condicionar todo o desenrolar da fase de enchimento do molde. Tal como se pode observar na Figura 5.15, é difícil distinguir a dimensão exacta da secção de entrada do gito de alimentação a partir da qual o processo é regido.



Figura 5.15 – Detalhe real da entrada do gito de alimentação.

Considerando todas as condições de processamento reunidas fez-se variar em cada análise o diâmetro de entrada do gito, D_i , e os respectivos resultados são apresentados no Quadro 5.6.

Quadro 5.6 – Resultados consoante a variação de D_i .

D_i [mm]	$P_{inj,max}$ [MPa]	t_{inj} [s]
0,4	159,7	3,22
0,6	78,4	2,67
0,8	56,4	2,55
1,0	48,8	2,50
1,2	45,7	2,45
1,4	42,3	2,37
1,6	39,6	2,33
2,0	35,8	2,27
3,0	30,7	2,20

Observe-se o gráfico da Figura 5.16 que representa a pressão de injeção máxima (localizada na secção de entrada do gito) em função do diâmetro de entrada do gito de alimentação.

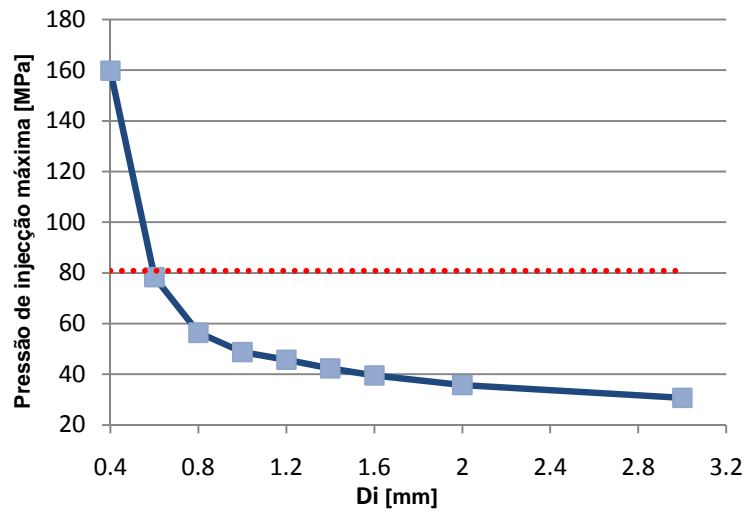


Figura 5.16 – Pressão de injeção máxima em função de D_i .

A linha a vermelho representa a pressão máxima disponível na câmara durante todo o processo. Logicamente, em nenhum momento a pressão de injeção máxima poderá ultrapassar esse valor, correspondente a $P = 80,9\text{MPa}$. Verifica-se, portanto, que a intersecção do gráfico a vermelho com o gráfico a azul define o diâmetro mínimo de entrada do gito, $D_{i,\text{min}}$, de acordo com o levantamento das condições de processamento efectuado.

Considere-se agora o gráfico da Figura 5.17 onde é ilustrado o tempo de injeção em função do diâmetro de entrada do gito, D_i .

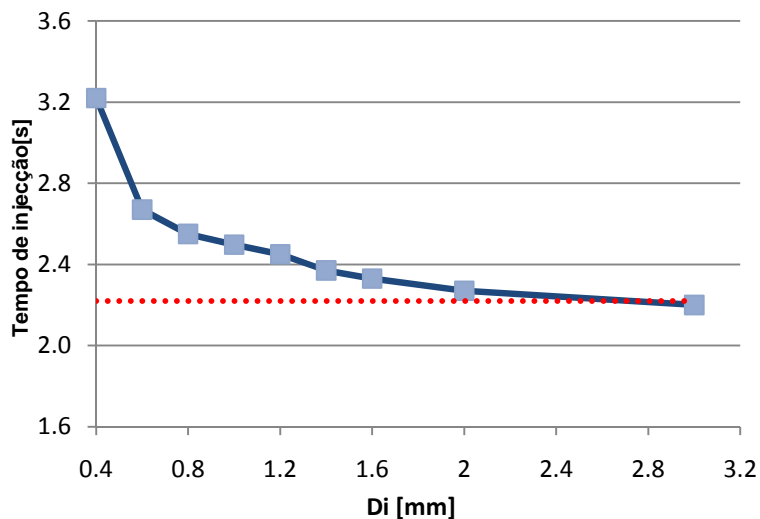


Figura 5.17 – Tempo de injeção em função de D_i .

Neste caso, a linha a vermelho representa o tempo de injeção obtido pela empresa, e que é utilizado como referência nesta reprodução. Observa-se que para valores o tempo de injeção vai se afastando gradualmente da referência, sendo por conseguinte descartados como hipótese.

Os resultados apresentados em função de auxiliam na decisão em relação ao valor a adoptar na simulação. Porém, é ainda necessária uma análise mais minuciosa do detalhe da entrada do gito. Realizada essa análise e efectuadas medições, é possível distinguir uma dimensão característica de na entrada do gito (Figura 5.18).

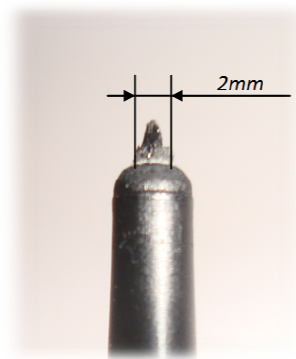


Figura 5.18 – Dimensão característica de entrada do gito.

Deste modo, adoptou-se o diâmetro de entrada do gito de na reprodução computacional do processo.

A reprodução do gito foi efectuada com as dimensões de referência do gito real. Porém, não é possível reproduzir a variação abrupta verificada na sua secção de entrada (Figura 5.18). Na modelação computacional considerou-se uma variação linear da secção do gito desde a sua entrada até à sua saída, a qual deu origem a um ângulo de conicidade do gito de (Figura 5.19). Contudo, o efeito desta simplificação é praticamente desprezável nos resultados, visto que o factor dominante nesta fase do processo é a pressão obtida no ponto de injeção e essa depende, essencialmente, da secção de entrada do gito.

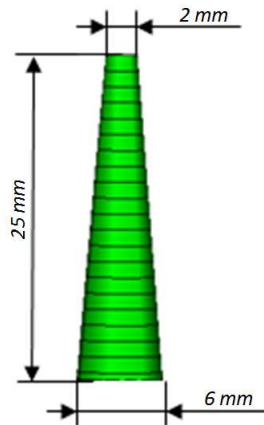


Figura 5.19 – Modelação e dimensionamento do gito.

5.2.2.1 Resultados

Resolvida a questão do diâmetro da secção de entrada do gito, executou-se a análise computacional que reproduz o mais fielmente possível o processamento efectuado pela empresa. O Quadro 5.7 expressa os primeiros resultados obtidos.

Quadro 5.7 – Primeiros resultados obtidos na reprodução computacional.

Parâmetros	Reprodução	Referência	Erro [%]
Comutação V/P [%Vol.]	87,17	–	–
Tempo de enchimento [s]	2,27	2,22	2,25
Massa por peça [g]	232,40	262,00	11,29

Em relação ao tempo de enchimento, verifica-se que o erro obtido em comparação com o da empresa é de apenas 2,25%. Porém, quanto à massa obtida por peça, resulta um erro de 11,29%. Esta discrepância obtida no resultado da massa por peça será analisada e discutida (Secção 5.2.2.2) após a apresentação dos restantes resultados.

Observe-se a Figura 5.20 onde se ilustra a evolução da pressão máxima em função do tempo de enchimento.

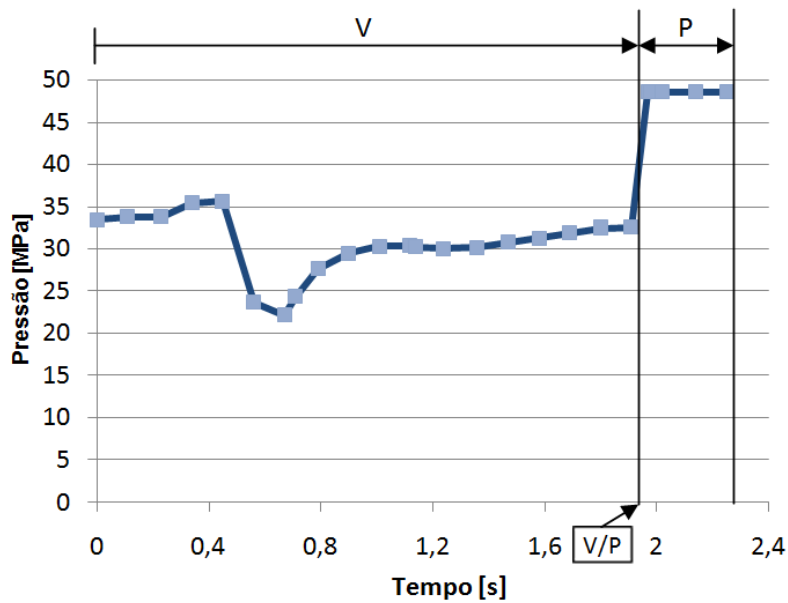


Figura 5.20 – Pressão máxima de injeção em função do tempo de enchimento.

A comutação V/P decorre no instante de injeção, o qual corresponde à percentagem de preenchimento da cavidade de 87,17%. Antes desse instante, o controlo do enchimento é efectuado através de um perfil de velocidades definido em relação à posição do fuso. Após a comutação V/P o o enchimento passa a ser controlado através de um perfil de pressão. Recorde-se que, de acordo com o levantamento efectuado, o perfil de pressão utilizado nesse controlo é constante e igual a 60% da pressão de injeção máxima disponível na câmara, ou seja, de

Relembre-se a discussão em torno da linha de soldadura característica da peça apresentada na Figura 5.10. Compare-se agora com o que sucede na simulação computacional. A Figura 5.21 ilustra em três etapas a formação dessa linha de soldadura na fase final do enchimento.

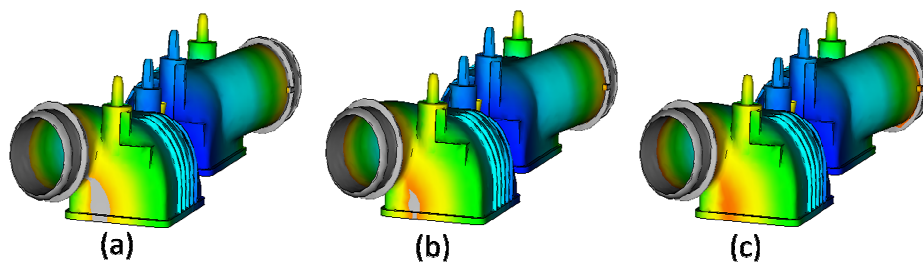


Figura 5.21 – Formação da linha de soldadura na fase final do enchimento.

Resulta que a linha de soldadura obtida na reprodução computacional é comparável com a peça apresentada na Figura 5.10b (correspondente à peça extraída da cavidade #2 do molde), conforme se verifica na Figura 5.22.

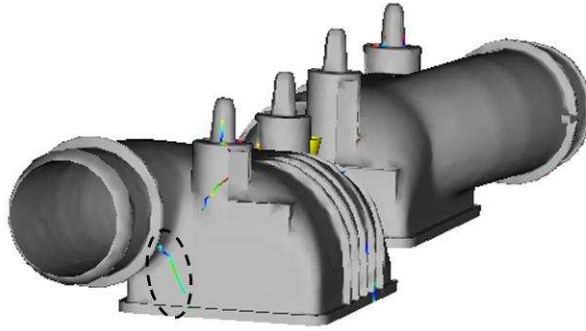


Figura 5.22 – Linha de soldadura obtida na reprodução computacional.

A Figura 5.23 representa a evolução do enchimento da peça durante o tempo de injeção.

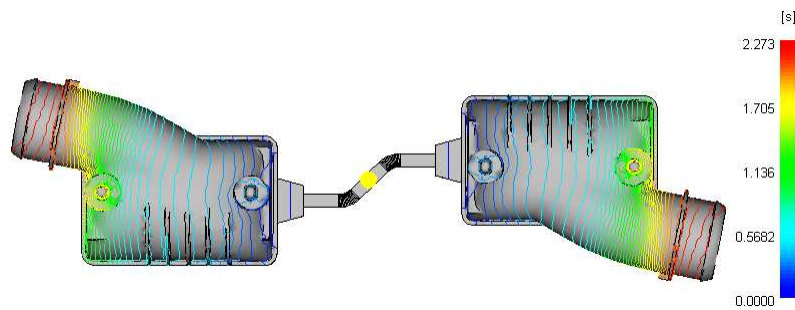


Figura 5.23 – Tempo de enchimento.

Constata-se que a velocidade na frente de escoamento é variável, uma vez que perante a observação das isolinhas⁵ verifica-se que o espaçamento entre elas não é uniforme (ver Secção 4.9).

A Figura 5.24 representa a orientação local do fluxo de material durante a fase de enchimento.

⁵ linhas que correspondem a um mesmo tempo de enchimento.

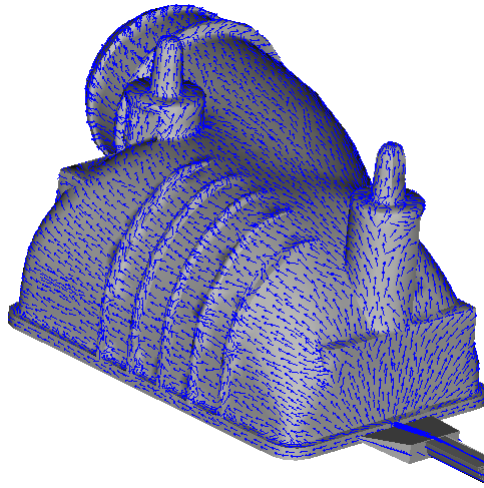


Figura 5.24 – Orientação local do fluxo de material durante a fase de enchimento.

As Figuras 5.25 e 5.26 apresentam uma estimativa do Módulo de Young em toda a extensão da peça na primeira e segunda direcção principal, respectivamente.

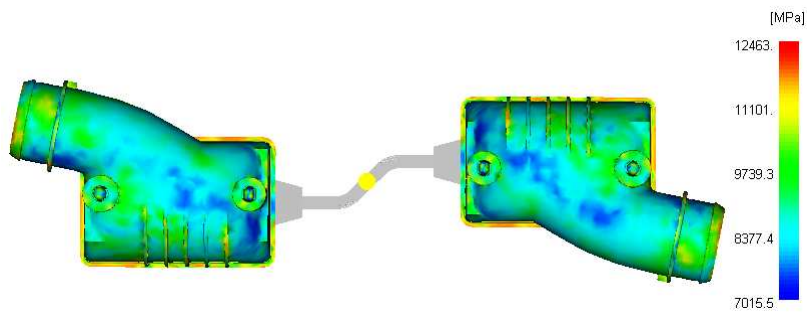


Figura 5.25 – Módulo de Young na primeira direcção principal.

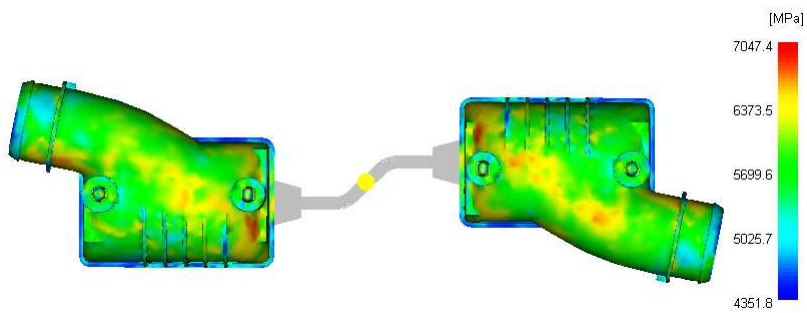


Figura 5.26 – Módulo de Young na segunda direcção principal.

Finalmente, a Figura 5.27 indica uma estimativa da deflexão contabilizando todos os efeitos.

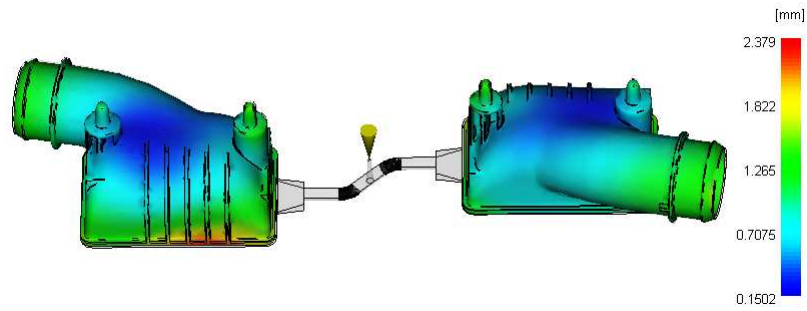


Figura 5.27 – Deflexão, todos os efeitos.

O efeito da deflexão pode ser observado com um factor de escala de 5 na Figura 5.28 para uma melhor percepção da sua localização. Verifica-se que a zona mais afectada é a das nervuras em virtude do arrefecimento diferencial que apresenta devido às suas diferentes espessura e condições de arrefecimento quando comparada com a do resto da peça.

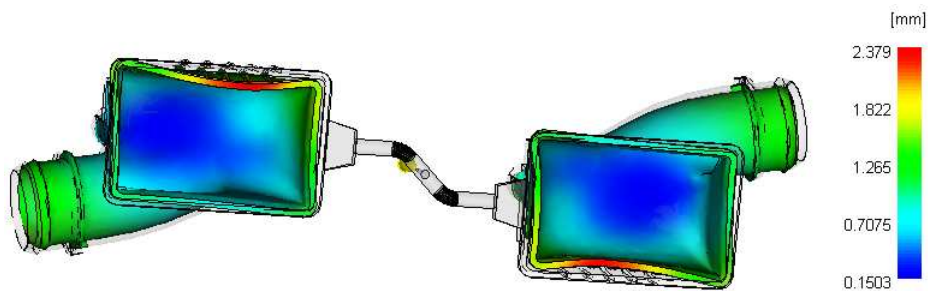


Figura 5.28 – Deflexão, todos os efeitos com factor de escala de 5.

Os resultados anteriores são agrupados no Quadro 5.8, visto que serão posteriormente utilizados como meio de comparação para com aqueles obtidos em análises com parâmetros modificados, no sentido de melhorar a qualidade final do produto.

Quadro 5.8 – Resultados finais obtidos na reprodução computacional.

Resultados	
E_1 médio [GPa]	9,74
E_2 médio [GPa]	5,70
Deflexão máxima [mm]	2,38

5.2.2.2 Avaliação da Massa por Peça Obtida na Reprodução

Nesta secção, pretende-se avaliar e compreender o motivo da discrepância verificada no resultado da massa obtida através da reprodução computacional. Deste modo, realizaram-se duas experiências em ambiente industrial e registaram-se as respectivas massas por peça. Estas

experiências foram realizadas de acordo com todas as definições das condições de processamento utilizadas na reprodução computacional, excepto para um parâmetro específico em cada caso.

Na primeira experiência, definiu-se a pressão de compactação com um perfil constante, correspondente à pressão de injeção máxima disponível na câmara. Na segunda experiência, alterou-se o tempo de compactação para dois segundos. Para cada situação, anotou-se a massa da peça após a extracção da moldação. As mesmas experiências foram reproduzidas computacionalmente e os resultados são apresentados no Quadro 5.9.

Quadro 5.9 – Resultados obtidos nas experiências de avaliação da massa das peças.

Experiência	Alteração	Massa real [g]	Massa reprodução [g]	Erro [%]
Nominal	–	262	232,40	11,29
#1	$P_{compactação}=80,9\text{MPa}$	264	235,60	10,80
#2	$T_{compactação}=2\text{s}$	258	226,10	12,30

Convém referir que a precisão da balança utilizada na empresa para pesar as peças era de um grama, apresentando por isso apenas valores inteiros e arredondando sempre o resultado para o valor par mais próximo.

Avaliando os resultados, verifica-se que tanto no processo real como na reprodução computacional a tendência de evolução da massa é sempre a mesma. Além disso, obtém-se que o erro relativo entre o valor real e o valor da simulação numérica é sempre da mesma ordem de grandeza e numa gama bem definida. Recorde-se novamente o que se discutiu acerca da Figura 5.10. Nessa altura constatou-se que havia uma pequena diferença nas cavidades do molde, uma vez que para cada duas peças moldadas em simultâneo obtiveram-se diferenças na então designada linha de soldadura característica da peça. Quer isto dizer que a diferença encontrada na comparação das peças real e reproduzida computacionalmente pode ser também consequência, por exemplo, do facto da espessura da peça usada na simulação numérica não ser exactamente a do molde, consequência do processo de maquinaria e da compensação do mesmo. Deste modo, a diferença encontrada na comparação das massas é plausível.

5.2.2.3 Tempo de Ciclo Obtido

Recorde-se que o tempo de ciclo é determinado pela Equação 3.1, onde são somadas as contribuições dos tempos de fecho do molde, de injeção, de compactação, de arrefecimento e de ejeção da moldação da cavidade do molde. É conveniente somar-se as parcelas dos tempos de fecho do molde, t_f , e do tempo de ejeção, t_{ej} , definindo-se assim o tempo de abertura do molde, t_a , através da Equação 5.2.

$$t_a = t_f + t_{ej} \quad (5.2)$$

Verifica-se que o tempo de ciclo obtido na reprodução computacional é de $t_c \approx 33s$ e que a contribuição de cada parcela de tempo é apresentada na Figura 5.29.

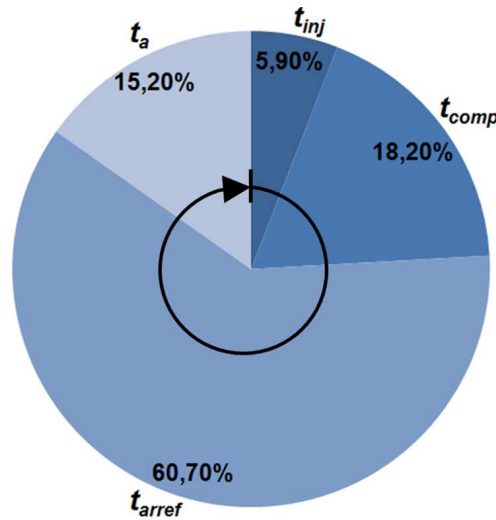


Figura 5.29 – Contribuição das várias parcelas no tempo de ciclo obtido na reprodução computacional.

Constata-se que a parcela de tempo referente ao tempo de arrefecimento representa a maior fatia do tempo de ciclo com $t_{arref} = 60,70\%$ do tempo total. Se o objectivo fosse minimizar o tempo de ciclo do processo tendo em conta uma perspectiva de gestão da produção, seria esta a primeira parcela a ser melhorada (com um sistema de arrefecimento mais eficiente) devido à sua maior influência e assim sucessivamente até à parcela com menor significado. Porém, o próximo objectivo neste caso de estudo é ajustar as variáveis de controlo do processo de modo a obter-se um produto final com melhor qualidade ao nível da sua estabilidade dimensional e da sua rigidez. Portanto, este estudo focar-se-á nas parcelas de injeção e de compactação, uma vez que são nestas fases que actuam as variáveis mais influentes nesse sentido. Em relação à fase de arrefecimento, além de garantir que o seu tempo seja adequado para a peça adquirir rigidez suficiente para ser extraída, interessa simplesmente neste âmbito que o sistema utilizado conduza a um arrefecimento uniforme sobre toda a peça de forma a que eventuais fenómenos de arrefecimento diferencial não condicionem a qualidade da peça.

5.3 Melhoria do Controlo das Variáveis do processo

Na injeção de peças poliméricas existe uma determinada série de variáveis que influenciam a qualidade da moldação. A forma como as peças se contraem e deformam é consequência de um conjunto de factores que podem ser divididos em três grupos:

1. Material
2. Geometria da peça
3. Definições do processo

Não obstante, o efeito conjunto entre os diferentes factores é complexo e frequentemente difícil de prever. Os parâmetros pertencentes a cada um dos grupos estão expostos no Quadro 5.10.

Quadro 5.10 – Factores que influenciam a contracção e deformação das peças moldadas por injeção.

Material	Geometria da peça	Processo
Propriedades P-v-T	Espessura	Velocidade de injeção
Viscosidade	Comprimento da peça	Níveis de Pressão
Características mecânicas	Cantos	Temperatura do fundido
Cristalinidade	Posição do ponto de injeção	Temperatura do molde
Reforços	–	–

Para além da contracção, constata-se que existem outros efeitos que contribuem também para a deformação ou deflexão total da peça. Recorde-se a Figura 5.28 onde é visível a deflexão total da peça com o valor máximo de $\delta = 2,379\text{mm}$, após a reprodução computacional das condições reais de processamento. Essa deflexão apresentada contabiliza o contributo dos vários efeitos inerentes ao processo de injeção, os quais se passam a enumerar:

1. Efeitos de contracção diferencial
2. Efeitos de arrefecimento diferencial
3. Efeitos de orientação das fibras
4. Efeito de canto

De modo a se determinar os efeitos mais preponderantes no efeito global de todos os contributos, repare-se nos resultados da Figuras 5.30, 5.31, 5.32 e 5.33.

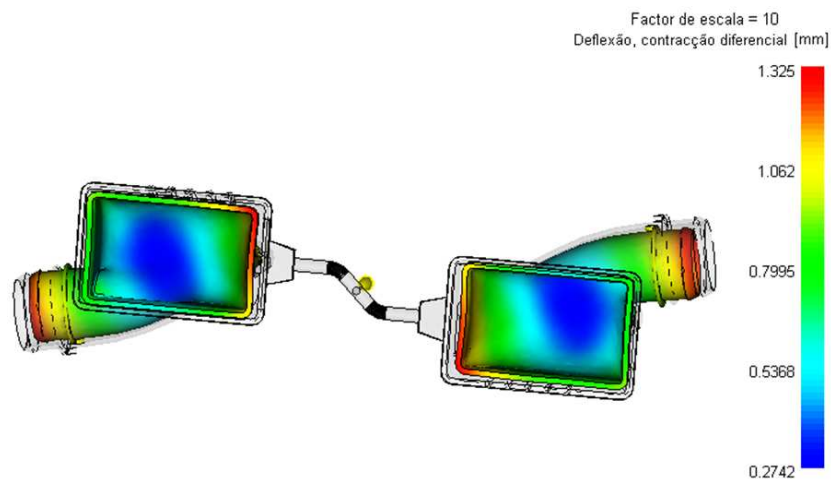


Figura 5.30 – Efeitos de contracção diferencial.

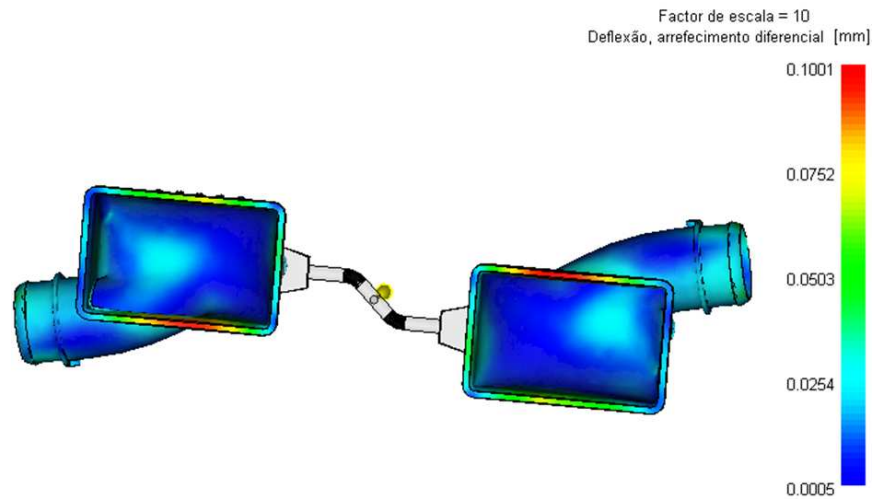


Figura 5.31 – Efeitos de arrefecimento diferencial.

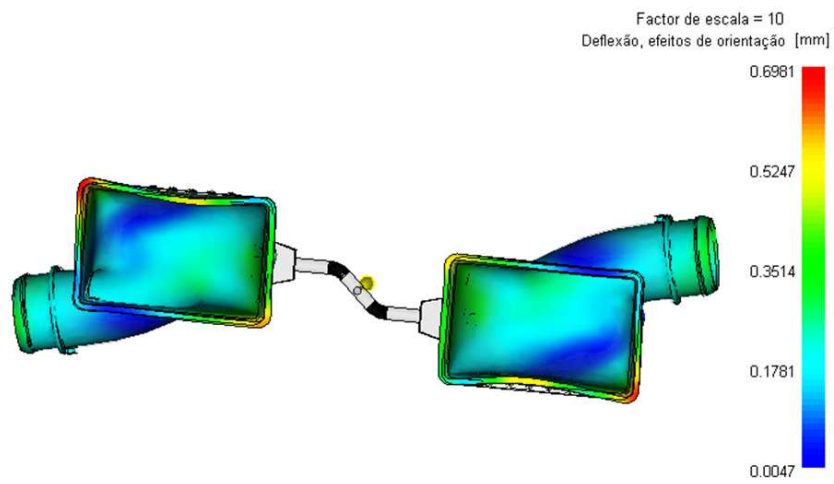


Figura 5.32 – Efeitos de orientação das fibras.

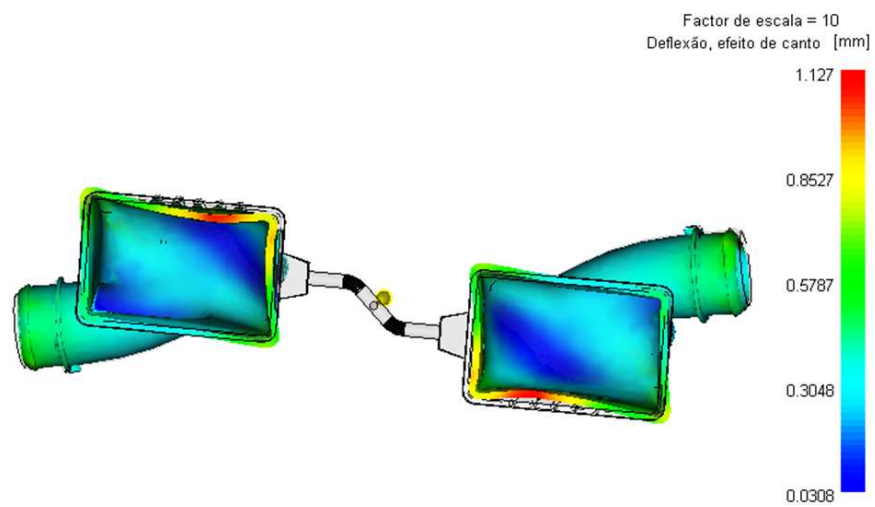


Figura 5.33 – Efeitos de canto.

Verifica-se assim que os efeitos de contracção diferencial são os mais relevantes tendo em conta o seu valor máximo de deflexão apresentado, $\delta_{cd} = 1,325\text{mm}$. Comparando com este valor, o efeito máximo resultante do arrefecimento diferencial, $\delta_{ad} = 0,100\text{mm}$, é pouco significativo. Isto quer dizer que o sistema de arrefecimento utilizado na reprodução computacional do processo conduz a um arrefecimento praticamente uniforme de toda a superfície da peça até ao momento da sua extracção do interior da cavidade do molde. Em relação ao efeito da orientação das fibras, temos um valor máximo na deflexão de $\delta_{of} = 0,698\text{mm}$, o qual é já relativamente significativo. Finalmente, os efeitos de canto inerentes à geometria da peça induzem um efeito máximo de $\delta_c = 1,127\text{mm}$. Deste modo, por ordem crescente de influência dos efeitos temos a seguinte precedência:

$$\delta_{ad} < \delta_{of} < \delta_c < \delta_{cd}$$

É de notar que estes valores apresentados contabilizam as três direcções do espaço (x, y, z) , isto é, estes valores são na verdade a norma do vector deslocamento, $\vec{\delta}(x, y, z)$, desde a coordenada do ponto de origem de deslocamento máximo, $P_i(x, y, z)$, até à coordenada desse mesmo ponto após a deformação, $P_f(x, y, z)$, representando assim a deflexão máxima pontual.

Devido à preponderância da contracção diferencial no rigor dimensional da peça moldada, a minimização deste efeito será o objectivo principal. O efeito da orientação das fibras será também objecto de estudo, uma vez que através do perfil de velocidades usado no enchimento é possível induzir maior ou menor orientação. Contudo, ajustando apenas essa variável, a diminuição dos efeitos negativos da orientação das fibras está limitada devido à localização do ataque, ou seja, a localização actual não é a mais favorável no que diz respeito à orientação induzida às fibras, tal como se ilustrará posteriormente. Assim sendo, uma outra localização será considerada para elucidar sobre a importância deste factor, principalmente nos casos em que o material polimérico é reforçado com fibras. Em relação ao efeito de canto, nenhuma melhoria será apresentada uma vez que este aspecto implicaria uma alteração na geometria da peça. Finalmente, o mesmo sucederá com o efeito de arrefecimento diferencial que, além de neste caso se apresentar pouco relevante na deflexão total, não faz parte do objectivo do trabalho projectar um sistema de arrefecimento mais eficiente.

Em relação ao presente caso de estudo, avaliaram-se as condições de processamento e os resultados obtidos, permitindo assim assinalar os aspectos alvos de eventuais modificações com o intuito de atribuir maior qualidade à peça. Neste sentido, os pontos críticos encontrados na reprodução computacional do processamento da peça foram:

1. Ataque: dimensionamento irregular do ataque em leque (não mantém a secção com área constante) e opção por uma localização desfavorável tendo em conta o efeito de orientação das fibras, o que provoca maiores empenos.

2. Perfil de velocidades: perfil desequilibrado na medida em que não confere uma velocidade de frente de fundido constante durante a fase de enchimento, dando origem a diferentes orientações das fibras ao longo da peça.
3. Comutação V/P: comutação sucede-se com 87,17% do volume preenchido, o que corresponde a uma comutação precoce visto que isso dá origem a que cerca de 13% do volume seja preenchido em condições diferentes do resto da peça, isto é, com velocidade da frente do fundido variável.
4. Pressão de compactação: pressão de compactação excessiva, o que pode colocar em causa a integridade do equipamento, provocar uma força de fecho elevada e dar origem a defeitos na peça. Além disso, verifica-se uma variação brusca da pressão na passagem da fase de enchimento para a fase de compactação, o que não deveria suceder.

O primeiro ponto crítico mencionado é uma variável relacionada com a fase de projecto do molde, uma vez que após concebido não pode ser modificado através do sistema de controlo do processo, ao contrário do que acontece com os restantes parâmetros enumerados. Por esse motivo, o projecto de um ataque bem dimensionado e o estudo da relação custo-benefício da opção por uma outra localização não fazem parte do âmbito deste trabalho. Contudo, para se alertar sobre a importância dessa variável de projecto, será efectuada uma comparação entre o ponto de injeção real e um ponto de localização recomendado pelo *software* como sendo mais favorável tendo em conta a variação da deflexão máxima da peça.

Em relação aos outros três pontos críticos, será efectuada um estudo mais detalhado de modo a se ilustrar o efeito individual de cada uma das variáveis. Esta avaliação será realizada sempre de acordo com as variáveis de processamento utilizadas na simulação numérica de reprodução das condições reais, ou seja, em cada estudo será modificado apenas o parâmetro em questão e em função dele apresentar-se-á o efeito final na qualidade da peça.

5.3.1 Localização do Ataque

Recorrendo a uma simulação numérica, é possível extrair-se informação acerca das regiões das peças que apresentam maior aptidão para a localização do ataque (Figura 5.34). Uma localização adequada proporciona uma orientação favorável das fibras ao mesmo tempo que dá origem a um enchimento equilibrado na medida em que diminui, por exemplo, a susceptibilidade ao aparecimento de linhas de soldadura.

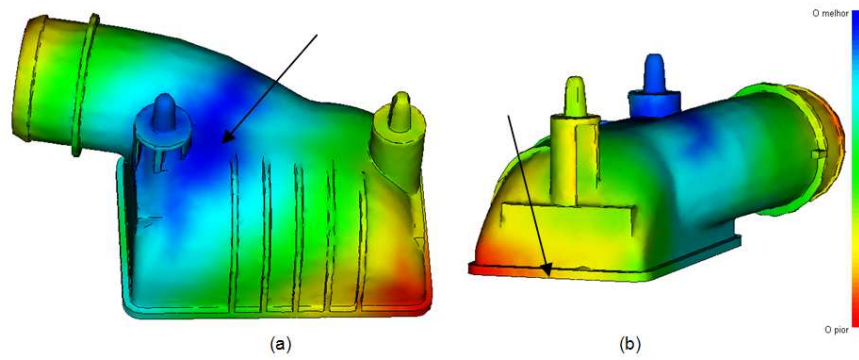


Figura 5.34 – (a) Localização do ataque favorável. (b) Localização do ataque real.

É de realçar mais uma vez que qualquer decisão final acerca da localização do ataque requer a ponderação de outros factores, principalmente o factor económico relacionado com o custo do molde. De modo a se comparar as regiões assinaladas na Figura 5.34, mantiveram-se em ambos os casos as mesmas definições base do processo.

O benefício obtido na deflexão, optando por uma localização favorável do ataque, foi uma diminuição de 18% no seu valor máximo conforme a relação dos resultados obtidos nas Figuras 5.35 e 5.36.

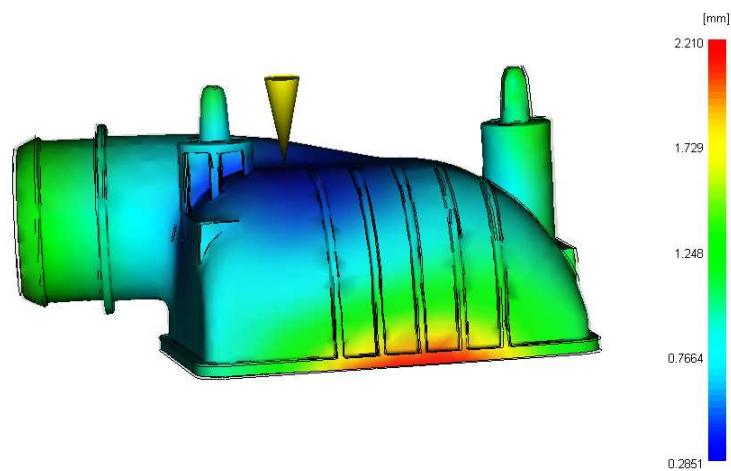


Figura 5.35 – Deflexão total obtida na localização favorável do ataque.

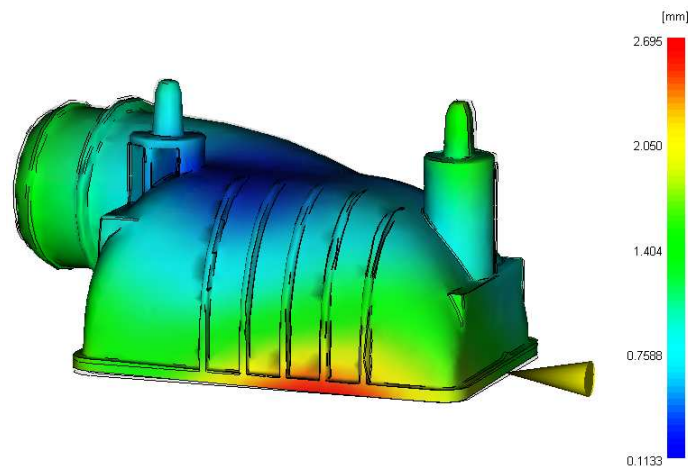


Figura 5.36 – Deflexão total obtida na localização desfavorável do ataque.

A diferente orientação das fibras em cada peça (Figura 5.37) é o principal motivo desta melhoria na deflexão. Pretende-se que esta orientação sofra a menor variação possível ao longo de toda a peça e que essas mesmas variações sejam suaves. Observando-se na Figura 5.37 (b) a face da peça perpendicular ao ataque, por exemplo, nota-se que a orientação das fibras não está de acordo com o que foi dito anteriormente, isto é, existem grandes e bruscas variações que podem prejudicar a qualidade final da peça. Pelo contrário, na Figura 5.37 (a) verifica-se que efectivamente as variações na orientação das fibras são, na sua generalidade, bastante suaves, estando de acordo com o pressuposto acima referido.

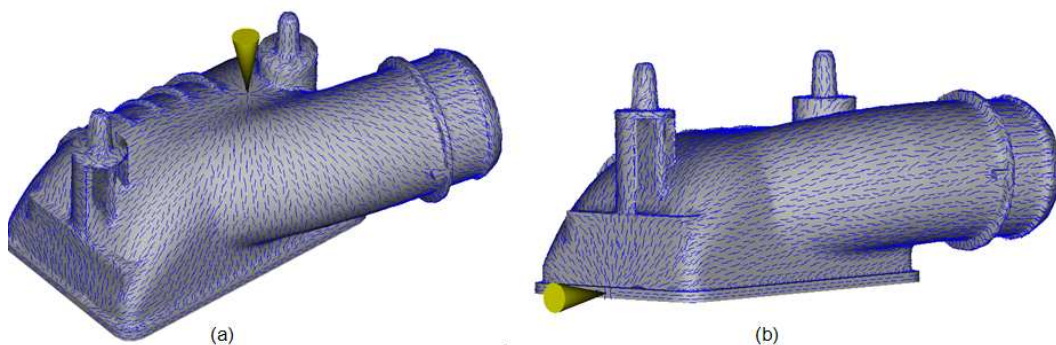


Figura 5.37 – (a) Orientação favorável das fibras. (b) Orientação desfavorável das fibras.

Esta secção serviu para realçar a importância do estudo da localização do ataque na fase de projecto do molde de injeção. Contudo, todo o estudo que se segue apresenta como referência o ataque e a localização original.

5.3.2 Perfil de Velocidades

O perfil de velocidades do fuso deve ser programado de modo a que a velocidade da frente de fundido seja constante durante o enchimento da cavidade, de acordo com a Secção 4.9. Com esse objectivo, optou-se pelo perfil de velocidades recomendado pelo programa *Autodesk Moldflow Insight®*, uma vez que assim esse requisito é satisfeito. Convém referir que o software apenas fornece este perfil através da percentagem de volume preenchido em função da percentagem do caudal nominal especificado. É possível, no entanto, converter esse perfil para um equivalente definido através da velocidade do fuso em função da sua posição, tal como sucede no controlo do processo da empresa. Contudo, essa conversão apenas será efectuada no fim do estudo de modo a simplificar a execução de todas as análises necessárias.

Considerando a análise onde foram reproduzidas as condições reais de processamento, retirase o perfil recomendado, o qual foi iterado até obter-se a convergência de valores que se apresenta na Figura 5.38:

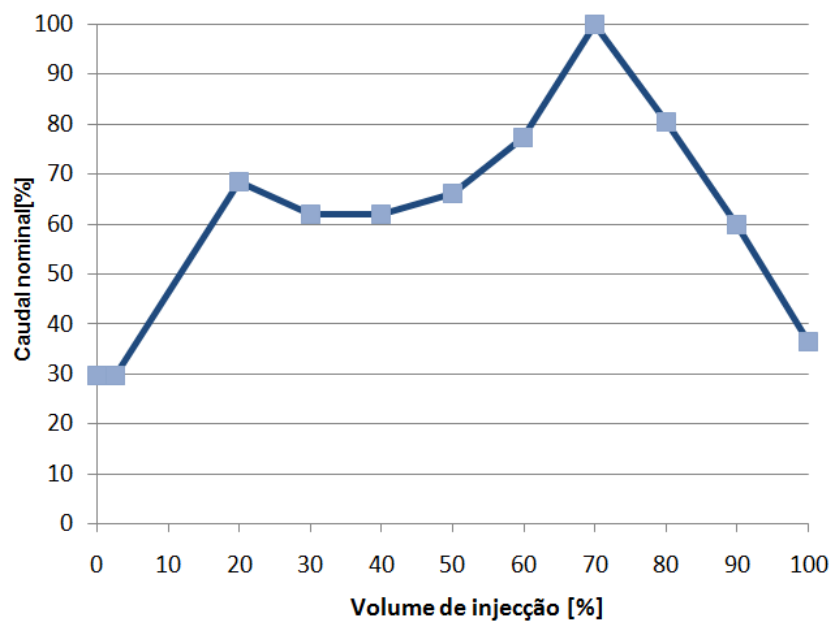


Figura 5.38 – Perfil de velocidades do fuso recomendado: caudal nominal [%] vs volume de injeção [%].

A Figura 5.39 constata que deste modo a velocidade da frente de fundido é constante durante a fase de enchimento, visto que o espaçamento entre as isolinhas é uniforme.

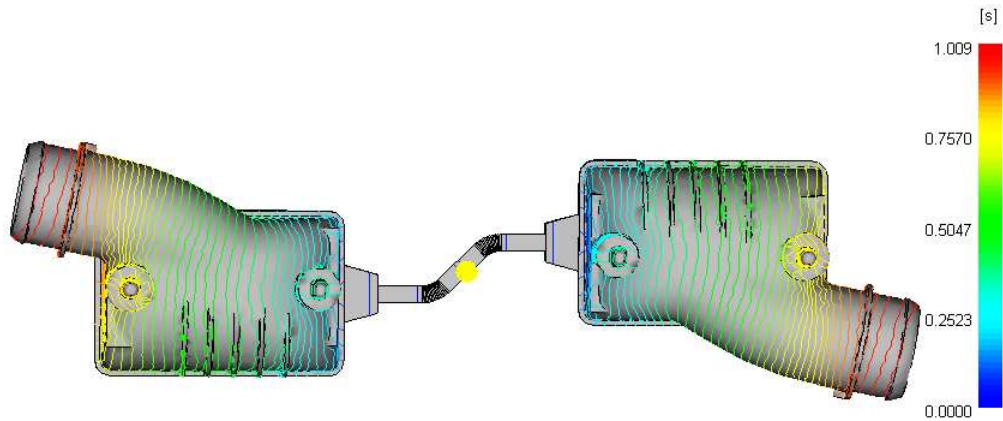


Figura 5.39 – Evolução do enchimento durante o tempo de injeção.

Utilizando o perfil de velocidades recomendado e mantendo inalteráveis todas as outras definições do processo, fez-se variar o caudal nominal em análises sucessivas de forma a determinar-se o valor para o qual a deflexão total é mínima. Através deste procedimento, obteve-se o gráfico exposto na Figura 5.40, que ilustra a deflexão total em função do caudal nominal. Da sua observação, estima-se que o caudal nominal que permite minimizar a deflexão total é da ordem de $Q_n \approx 390\text{cm}^3/\text{s}$.

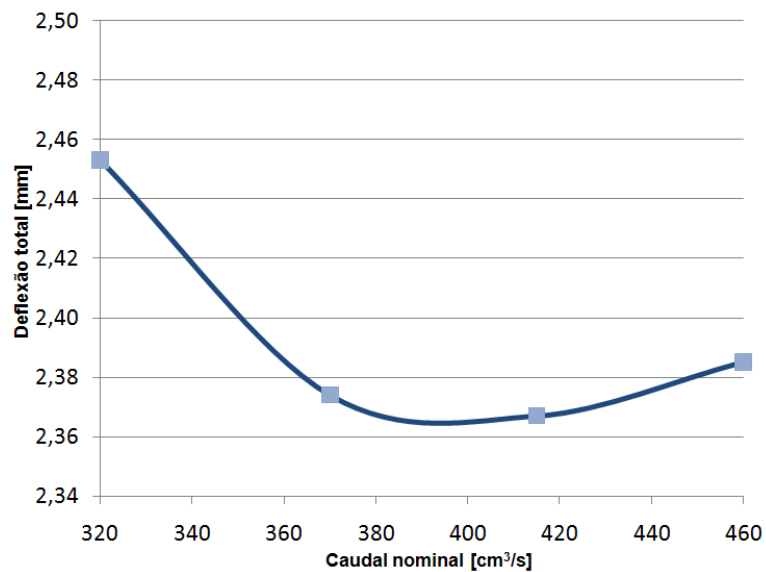


Figura 5.40 – Gráfico da deflexão total em função do caudal nominal.

5.3.3 Comutação V/P

A comutação V/P deve ser efectuada antes do volume da peça estar 100% preenchido, de modo a poder-se suavizar a transição da fase de enchimento para a fase de compactação. Porém, recorde-se que esta comutação não deverá suceder-se com muita antecedência devido ao facto de isso dar

origem a que uma percentagem significativa do enchimento se realize em condições diferentes do resto da peça, ou seja, com velocidade da frente do fundido variável. Se isso acontecer, as fibras nessa região da peça tendem a adquirir uma orientação diferente da restante e isso, como já foi visto, é geralmente prejudicial para a deflexão total da peça. Perante estes factos, a gama recomendada para se efectuar a comutação V/P é de 95 a 99% do volume da peça preenchido (Beaumont, 2007). De modo a se analisar a influência deste factor na deflexão total da peça, fez-se variar a percentagem de volume preenchido na comutação em análises sucessivas e os resultados deram origem ao gráfico da Figura 5.41.

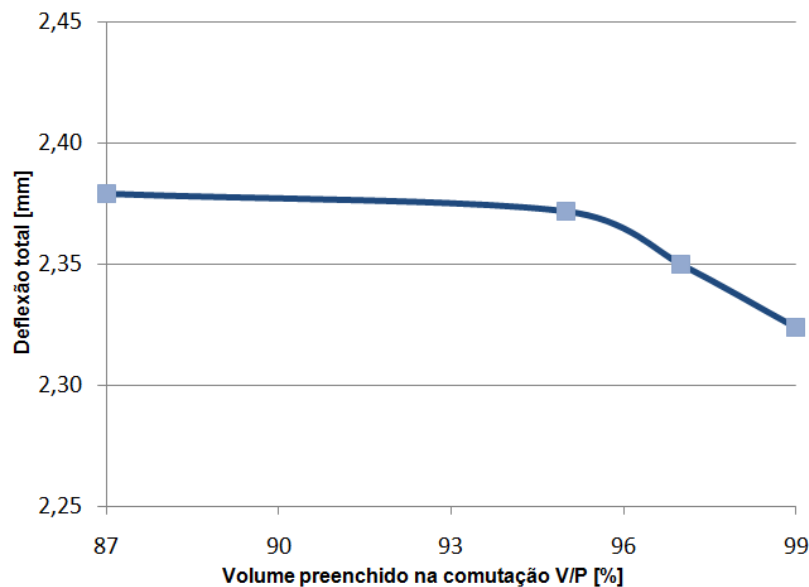


Figura 5.41 – Gráfico da deflexão total em função do volume preenchido na comutação V/P.

O primeiro ponto do gráfico da Figura 5.41 corresponde ao resultado da simulação numérica das condições originais de processamento, enquanto que os três restantes se encontram na gama recomendada. Verifica-se que, para este caso, a tendência da deflexão é diminuir com o aumento da percentagem de volume preenchido no momento da comutação V/P.

5.3.4 Pressão de Compactação

A pressão de compactação deve ser suficiente para que a contracção do material no interior do molde possa ser compensada com mais material. Contudo, existem outros factores que contribuem para a regulação desta pressão, nomeadamente as consequências ao nível da força de fecho do molde resultante e a integridade do equipamento. Deste modo, a gama recomendada para a pressão de compactação varia de 40 a 80% da pressão de injeção no instante imediatamente antes da comutação V/P (©Autodesk, 2010). Porém, no processo real de produção da peça verifica-se que a compactação é efectuada a 48,5MPa, o que corresponde a cerca de 150% da pressão no instante

imediatamente antes da comutação (32,56MPa). É de realçar que este procedimento é formalmente errado, visto que dessa maneira a integridade do equipamento pode ser colocada em causa, as forças de fecho originadas são muito elevadas, o molde fica sujeito a um maior desgaste e eventuais fugas de material podem ocorrer entre as juntas do mesmo.

De modo a analisar-se a influência da pressão de compactação no ponto de deflexão máxima da peça, fez-se variar o seu valor na gama recomendada. Porém, ao se manterem todas as outras condições de processamento, tal não foi possível porque a pressão na fase de pressurização (Secção 4.1) apresentou-se insuficiente para terminar o enchimento da cavidade do molde. Este facto resulta da comutação precoce verificada na análise do processo (a 87,17% do volume preenchido). Para ultrapassar esta contrariedade ajustou-se a comutação para um volume preenchido de 95% e desse modo foi possível extrair os resultados pretendidos (Figura 5.42).

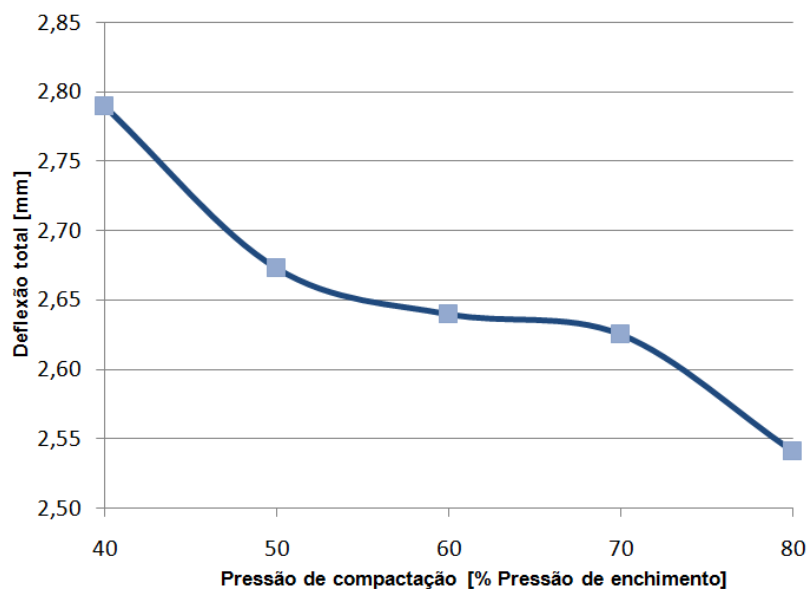


Figura 5.42 – Gráfico da deflexão total em função da pressão de compactação.

Fica evidente que a deflexão total apresenta uma tendência a diminuir com o aumento da pressão de compactação. É de notar que, pelo contrário, a massa volúmica da peça, ρ , aumenta com o incremento da pressão de compactação, uma vez que dessa forma mais material é introduzido na cavidade do molde.

5.4 Alterações Sugeridas para o Controlo do Processo

De acordo com o estudo efectuado acerca do efeito individual das variáveis consideradas, resta agora sugerir um conjunto de definições com vista a melhorar o processo e, por conseguinte, a qualidade da peça. Contudo, o efeito global de todas as variáveis é complexo e difícil de prever. Por

esse motivo, de modo a ajustar-se cada variável, realizaram-se várias análises numéricas iterativas de tentativa-erro com o intuito de se obter a menor deflexão possível.

5.4.1 Apresentação e Discussão de resultados

Dos vários resultados obtidos dessas análises, chegou-se a um conjunto de modificações ao nível de algumas variáveis de controlo do processo que são apresentadas Quadro 5.11.

Quadro 5.11 – Modificações sugeridas para o controlo do processo.

Modificações no Controlo do Processo	
Perfil de velocidades	Perfil do Quadro 5.12
Comutação V/P	Por posição do fuso em 11mm
Controlo da Compactação	% Pressão de injeção vs tempo
	Pressão = 80% da pressão de injeção

Portanto, além do novo perfil de velocidades apresentado no Quadro 5.12, a comutação V/P passa a realizar-se no instante em que o fuso atinge a posição 11mm (correspondente a 98,5% do volume da cavidade preenchida) e a compactação com uma pressão igual a 80% da pressão do instante imediatamente antes da comutação, ou seja, a 30,73MPa.

Quadro 5.12 – Perfil de velocidade do fuso sugerido.

Posição do fuso [mm]	Velocidade do fuso [mm/s]
95,0	17,8
92,7	17,8
77,8	41,0
69,2	37,0
60,6	37,0
52,0	39,5
43,4	46,0
34,8	59,7
26,2	47,9
17,6	35,7
0	21,7

Para uma melhor visualização, o perfil de velocidades determinado é também apresentado graficamente na Figura 5.43.

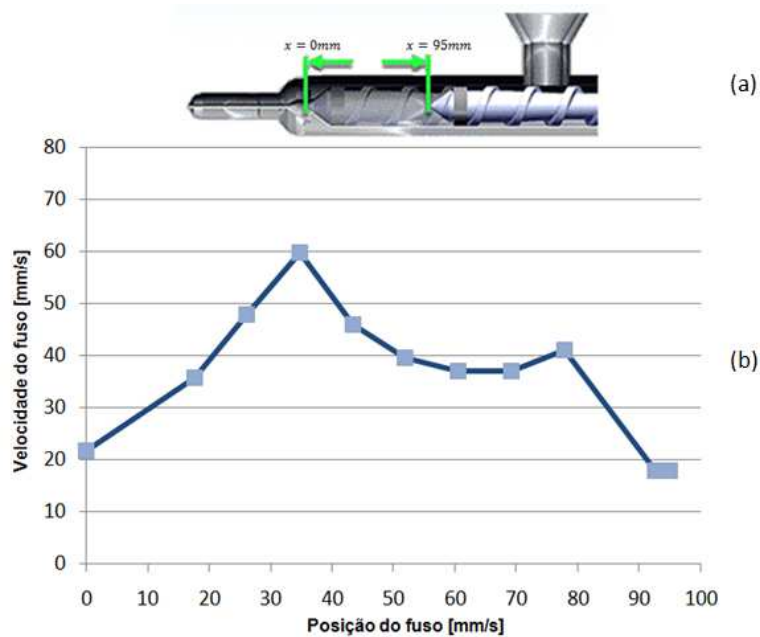


Figura 5.43 – (a) Curso do fuso. (b) Perfil de velocidades sugerido para o controlo do enchimento.

Com as referidas alterações no controlo do processo, obteve-se a pressão máxima solicitada à unidade de injeção em função do tempo de enchimento (Figura 5.44). Consta-se que a pressão máxima de injeção em cada instante localiza-se sempre no ponto de injeção, conforme se ilustrou na Secção 4.5 (Figura 4.7).

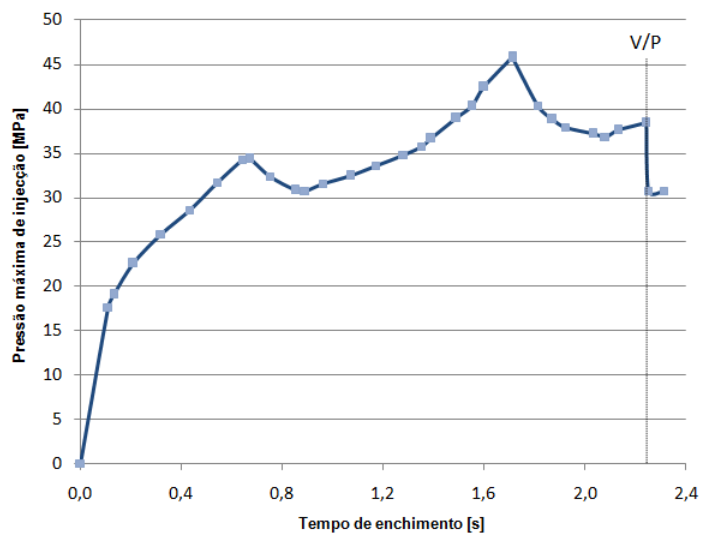


Figura 5.44 – Gráfico da pressão máxima de injeção em função do tempo de enchimento.

Observe-se agora a Figura 5.45 onde se apresenta a deflexão total obtida.

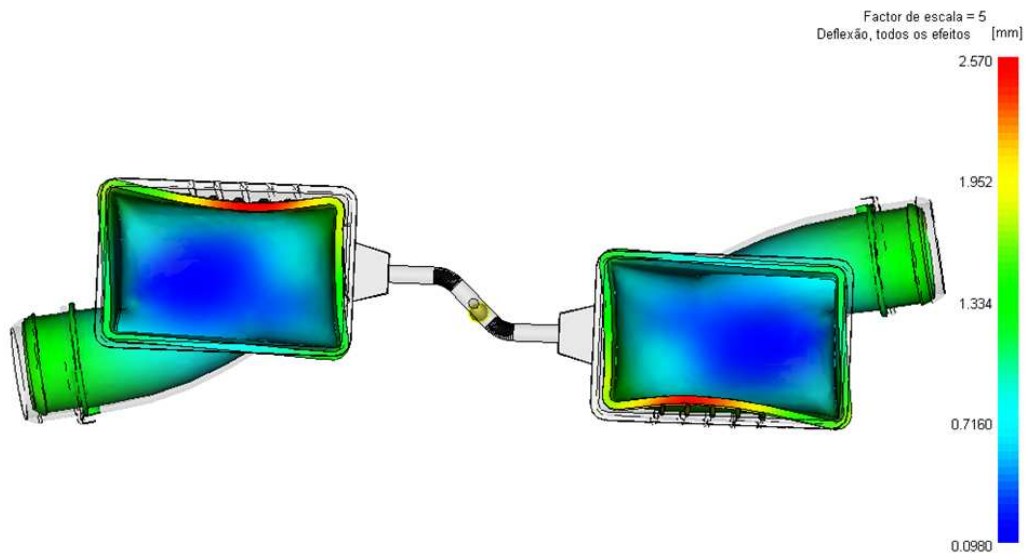


Figura 5.45 – Deflexão total obtida no perfil recomendado.

Considerando o efeito conjunto de todas as variáveis, obtém-se que a deflexão total neste caso é de $\delta = 2,57\text{mm}$, ou seja, mais $0,19\text{mm}$ do que sucede em relação ao valor de referência. A questão que surge agora é o porquê de este valor ter aumentado, sendo que as variáveis do processo foram estudadas no sentido de minimizar os efeitos da deflexão. A explicação deve-se ao facto de no processo real a pressão de compactação ser 150% da pressão de injeção no instante antes da comutação V/P (portanto, fora da gama recomendada de 40 a 80%) e, tal como se pode observar na Figura 4.42, a tendência da deflexão total é diminuir com o aumento da pressão de compactação. Porém, este procedimento é consensualmente considerado uma má prática na moldação por injeção e por isso não foi colocado como hipótese para a melhoria do controlo das variáveis do processo.

Apenas a título ilustrativo, executou-se uma análise com todas as condições sugeridas acima alterando-se apenas a pressão de compactação para o valor de referência ($48,5\text{MPa}$). É de referir novamente que esta hipótese não deve ser considerada para o fabrico da peça, no entanto repare-se na Figura 5.46 onde se apresenta os respectivos resultados da deflexão total.

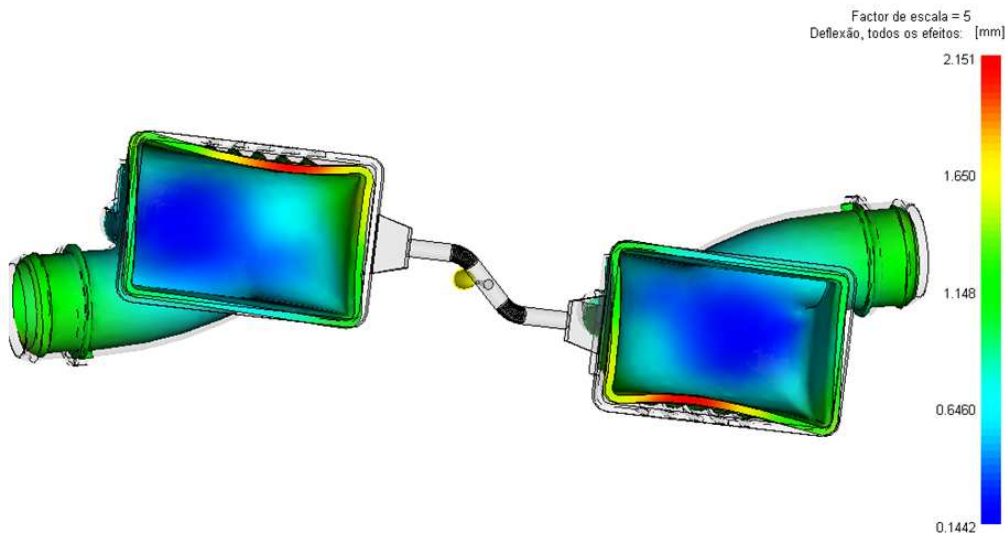


Figura 5.46 – Deflexão total obtida com a pressão de compactação de 48,5MPa.

Verifica-se que para esta situação a deflexão total seria $\delta = 2,15\text{mm}$, ou seja menos 0,23mm do que o valor de referência, o que de certa forma permite concluir que a melhoria sugerida para o ajustamento das variáveis de controlo do processo foi adequada.

No decorrer da análise de todos os gráficos de deflexão apresentados ficou evidente que a região de deformação máxima corresponde sistematicamente à zona de localização das nervuras. Confirma-se assim que a geometria da peça é também um factor preponderante a ter em conta na fase de projecto da mesma. Se em alternativa à disposição actual das nervuras fossem, por exemplo, adicionadas outras perpendiculares às existentes (formando quadrículas) o efeito da geometria da peça na deflexão total da peça poderia eventualmente ser menor.

Observe-se agora como varia a força de fecho durante as fases de enchimento e de compactação dos resultados obtidos com as alterações propostas em comparação com o que sucede através das definições utilizadas no processamento real (Figura 5.47).

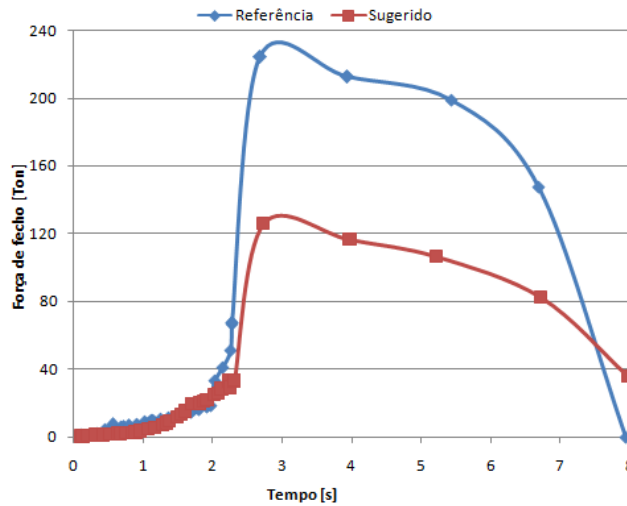


Figura 5.47 – Gráfico das forças de fecho em função do tempo.

Consta-te assim que utilizando as variáveis sugeridas para a melhoria do processo, necessita-se de uma força de fecho máxima de *125 toneladas*, enquanto que no processamento real a força máxima solicitada é de *224 toneladas*, ou seja, significa um aumento de cerca de 80%. Este aspecto pode ser considerado uma grande vantagem na medida em que, além de representar uma redução significativa no consumo de energia, a peça podia ser produzida numa injectora de menor capacidade.

Finalmente, apresentam-se os resultados relacionados com a rigidez mecânica das peças (Figuras 5.48 e 5.49), os quais são apresentados no Quadro 5.13.

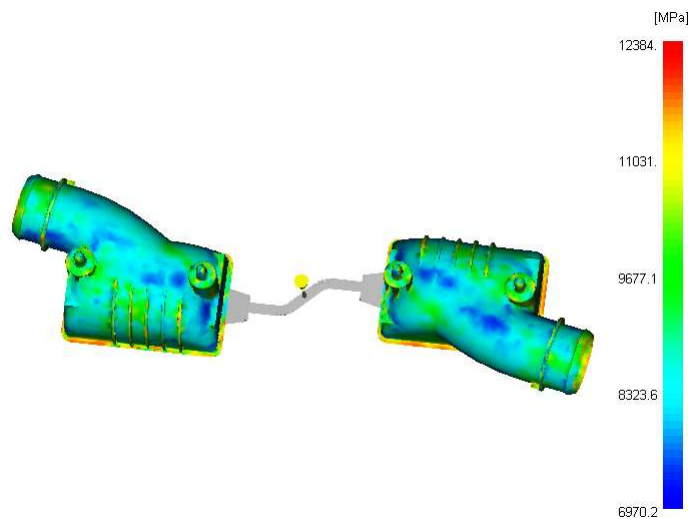


Figura 5.48 – Módulo de Young na primeira direcção principal, controlo sugerido.

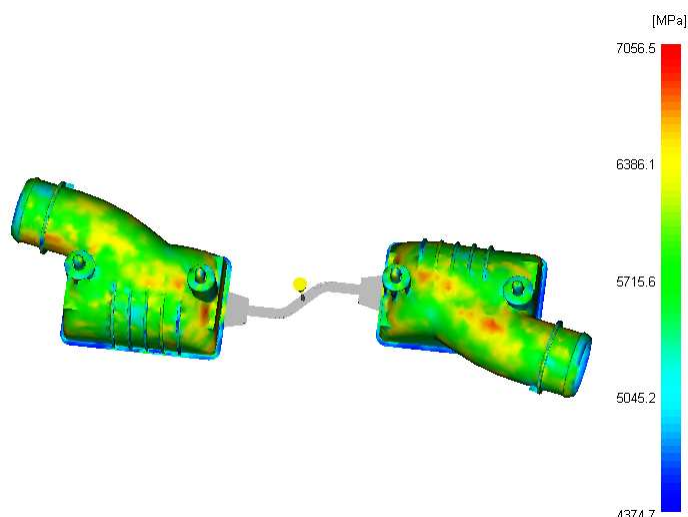


Figura 5.49 – Módulo de Young na segunda direcção principal, controlo sugerido.

Quadro 5.13 – Resultados de rigidez obtidos, controlo sugerido.

Resultados	
E_1 médio [GPa]	9,68
E_2 médio [GPa]	5,72

Comparativamente aos *Módulos de Young* obtidos no processo real, verifica-se que aqueles obtidos computacionalmente são da mesma ordem de grandeza. Apesar de neste caso de estudo os valores de rigidez da peça não terem sido considerados como factor decisivo na optimização dos parâmetros de controlo do processo, esta não deixa de ser um atributo importante nas peças obtidas por injeção. Contudo, para um estudo rigoroso deste aspecto, que já está fora do âmbito desta Dissertação, seria necessário o cálculo estrutural em um programa apropriado de elementos finitos, onde as características da peça resultantes do processamento por injeção deveriam ser exportadas para esse programa de forma a se poderem obter resultados mais consistentes.

É de notar que no decorrer dos estudos efectuados mantiveram-se inalteradas as definições das temperaturas de superfície do molde e da temperatura do fundido, uma vez que foram inicialmente definidas de acordo com a recomendação do fabricante do material (Anexo A). Contudo, a variação destes parâmetros pode revelar-se útil em determinadas circunstâncias. Por exemplo, o aumento da temperatura do fundido tende a diminuir o efeito negativo resultante das linhas de soldadura. No entanto, esta alteração pode eventualmente originar outro tipo de problemas, por exemplo, aumentar os efeitos negativos do arrefecimento diferencial. Esta pequena abordagem serve para realçar que a generalidade das opções tomadas durante a execução do projecto apresenta prós e contras.

Capítulo 6

Conclusões

O estudo realizado acerca do processo de moldação por injeção permitiu perceber a influência dos principais parâmetros de controlo. Utilizando o *software Autodesk Moldflow Insight®*, foi possível reproduzir com eficiência as condições reais de processamento de uma peça polimérica. Deste modo, foi possível fazer uma avaliação das respectivas condições de processamento e destacar os pontos críticos relacionados com as decisões de controlo adoptadas pela empresa.

De acordo com o objectivo do trabalho, expressou-se graficamente a influência das principais variáveis do processo recorrendo a sucessivas análises numéricas e tendo sempre como referência as condições reais de fabrico. Assim, foi possível compreender-se o efeito individual de cada parâmetro.

Um dos factores mais importantes no controlo do processo de injeção é a definição adequada do perfil de velocidades do fuso. Encontrar este perfil deve ser, por regra, o primeiro passo no que diz respeito à programação de variáveis na unidade de controlo da injectora. Não existindo uma sistemática para a determinação desse perfil, sentiu-se a necessidade de criar uma metodologia com esse fim. Considerou-se então o perfil de velocidades recomendado pelo *software* de elementos finitos definido pela percentagem de volume do molde preenchido em função da percentagem de caudal. Tendo em conta esta forma de controlo da velocidade do fuso, fez-se variar o caudal nominal de modo a detectar-se qual o mais vantajoso para a qualidade da peça. Após a determinação desse caudal, converte-se o perfil anteriormente determinado para outro equivalente, por intermédio de simples cálculos analíticos, mas agora definido pela velocidade do fuso em função da sua posição, de modo a ser comparável com o perfil utilizado no processamento real. Esta metodologia revelou-se bastante consistente na medida em que proporcionou um enchimento do molde com a velocidade da frente do fundido constante, conforme o pretendido.

Constatou-se que os parâmetros sugeridos para o controlo do processo foram adequados, visto que os resultados finais apresentaram uma série de benefícios.

Além de se realçar a importância de uma correcta definição das variáveis do sistema de controlo do processo, alertou-se também para a importância de um projecto consistente do molde e para factores relacionados com a geometria da peça, uma vez que estes podem ser determinantes na deflexão total da peça. Comprovaram-se os benefícios de uma localização favorável para o ataque tendo em consideração a orientação induzida às fibras. Apesar disso, existem outros factores preponderantes nessa decisão, nomeadamente os aspectos construtivos do molde e o factor económico. Convém referir também que a simulação numérica não é por si só a solução de todos os problemas, mas é uma ferramenta poderosa que pode gerar uma grande vantagem para as empresas e permitir a sua rápida evolução tecnológica.

Com esta Dissertação verificou-se que quando surge a necessidade de se obterem soluções para a fase de projecto e programação de variáveis, não se encontram agrupados conhecimentos acumulados de uma forma simplificada e eficaz, uma vez que a tecnologia de moldação por injeção é uma área muito vasta e com fenómenos complexos e interdisciplinares. Deste modo, os estudos desenvolvidos durante este trabalho permitiram de certa forma criar metodologias tendo em vista uma abordagem consistente dos principais factores inerentes a esta tecnologia de transformação de plásticos.

6.1 Trabalho Futuro

Um projecto completo para o fabrico de uma peça polimérica por injeção necessita contemplar estudos de diversas naturezas. Em primeiro lugar é preciso considerar todos os factores envolvidos no processo de moldação por injeção. Além do estudo detalhado de todas as variáveis de controlo do processo, é necessário obter-se a melhor localização possível do ataque fazendo um estudo aprofundado tendo em conta a relação custo-benefício mais adequada. Além disso, deverá ser efectuada uma selecção correcta, de entre os vários tipos de ataques existentes, daquele que melhor se adequa à localização pretendida.

Não se realizou nenhum estudo acerca da influência da geometria dos canais de alimentação, sendo que este é também um factor a considerar futuramente.

Seria também importante estudar o efeito que as diferentes buchas disponíveis no mercado dos moldes têm em todo o processo de injeção e, dessa maneira, ser-se capaz de seleccionar a mais adequada para este caso de estudo.

O projecto para o sistema de arrefecimento é também ele, e como já foi referido neste trabalho, de enorme importância e ao mesmo tempo de enorme complexidade. Tal como noutros aspectos, aqui também não existe uma sistematização que permita ao projectista seguir uma metodologia de trabalho. Seria de grande importância se no futuro se conseguisse fazer essa mesma sistematização, baseando-se fundamentalmente no saber e na experiência dos projectistas de moldes que,

devidamente compilados e organizados, fizessem com que cada vez menos se recorresse à improvisação.

Depois de se dar por concluído o estudo efectuado no software Autodesk Moldflow Insight®, o próximo passo seria definitivamente exportar os resultados daí extraídos para um programa de cálculo estrutural que recorresse igualmente ao Método dos Elementos Finitos de forma a dar maior consistência a todo o projecto.

Referências Bibliográficas

Autodesk (2010). ©Autodesk Navisworks Services & Support. URL <http://usa.autodesk.com/adsk/servlet/index?siteID=123112&id=11621516>

Avery, J. (1998). *Injection Molding Alternatives: A Guide for Designers and Product Engineers*. Hanser Gardner Publications. Munich.

Beaumont, J.P. (2007). *Runner and Gating Design Handbook: Tools for Successful Injection Molding*. Carl Hanser Verlag, 2^o edição. Munich.

Cruz, S. (2002). *Moldes de Injeção*. Hemus S.A. Curitiba.

Demar (2010). *Cristalinidade de Polímero*. URL <http://www.demar.eel.usp.br/polimeros>

Dym, J.B. (1987). *Injection Molds and Molding: A practical manual*. Van Nostrand Reinhold Company,; 2^a edição.

Fischer, J.M. (2003). *Handbook of Molded Part Shrinkage and Warpage*. Plastic Design Library / William Andrew, Inc. United States of America.

Georgia Institute of Technology. (2010). *Injection Molding*. URL <http://www.me.gatech.edu/jonathan.colton/me4793/>

Hassan,H., Regnier, N. e Defaye, G. (2009). A 3D study on the effect of gate location on the cooling of polymer by injection molding. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, **30**: 1218-1229.

Hassan,H., Regnier, N., Lebot, C. e Defaye, G. (2010). 3D study of cooling system effect on the heat transfer during polymer injection molding. *International Journal of Thermal Sciences*. **49**: 161-169.

Hassan,H., Regnier, N., Lebot, C., Pujos, C. e Defaye, G. (2009). Effect of cooling system on the polymer temperature and solidification during injection molding. *Applied Thermal Engineering*. **29**: 1786-1791.

Hassan,H., Regnier, N., Pujos, C. e Defaye, G. (2010). Modeling the effect of cooling system on the shrinkage and temperature of the polymer by injection molding. **30**: 1547-1557.

Harada, J. (2004). *Moldes para Injeção de Termoplásticos: Projetos e Princípios Básicos*. Artiliber. São Paulo.

- Harper, C.A. (2000). *Modern Plastics Handbook*. Mc Graw Hill. United States of America.
- LEPCom. (2010). *Laboratório de Engenharia de Polímeros e Compósitos*. URL <http://www.demet.ufmg.br/docentes/rodrigo/processamento.htm>
- Olmsted, B.A. e Davis, M.E. (2001). *Practical Injection Molding*. Marcel Dekker, Inc.; 1ª edição.
- Osswald, T.A., Turng, L. S. e Gramann, P. J. (2008). *Injection Molding Handbook*. Hanser Gardner Publications. Munich.
- Paiva, M.C.J.R. (2010). *Propriedades Mecânicas de Polímeros*. URL <http://www.dep.uminho.pt/mcpaiva/>
- Pantani, R., Coccorullo, I., Speranza, V. e Titomanlio, G. (2005). Modeling of morphology evolution in the injection molding process of thermoplastic polymers. *Progress in Polymer Science*. **30**: 1185-1222.
- Pötsch, G. e Michael, W. (2008). *Injection molding: An introduction*. Hanser Gardner Publications, 2nd Edition. Munich.
- Rosato, D.V. e Rosato, M.G. (2000). *Injection Molding Handbook*. Kluwer Academic Publishers, 3ª edição. USA.
- Rosato, D.V. Schott, N.R. e Rosato, M.G. (2001). *Plastics Engineering, Manufacturing & Data Handbook / Plastics Institute of America*. Academic Publishers. USA.
- Shoemaker, J. (2006). *Moldflow Design Guide: A Resource for Plastics Engineers*. Hanser Gardner Publications. USA.
- Smith, W.F. (1998). *Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais*. Mc Graw Hill, 3ª edição.
- Sors, L., Bardócz, L., Radnóti, I. (2002). *Plásticos: Moldes e Matrizes*. Hemus S.A. Curitiba.
- Tang, S.H., Kong, Y.M., Sapuan, S.M., Samin, R. e Sulaiman, S. (2006). Design and thermal analysis of plastic injection mould. *Journal of Materials Processing Technology*. **171**: 259-267.
- Torres Networking (2010). Programação e Ajuste das Variáveis de Controle da Máquina Injetora. URL <http://www.torresnetworking.com/>
- Vegt, A.K. van der (2006). *From Polymers to Plastics*. VSSD.

Anexo A

As propriedades do material *Stanyl TW200F6* são apresentadas no Quadro A.1.

Quadro A.1 – Propriedades do material *Stanyl TW200F6*.

Material: <i>Stanyl TW200F6</i>	
Módulo de Young [Mpa]	
E₁	9123,42
E₂	5534,42
Coefficiente de Poisson	
v₁₂	0,4126
v₂₃	0,4608
Módulo de Corte [Mpa]	
G₁₂	2349,74

Tal como para todos os materiais poliméricos, existem determinadas condições de processamento inerentes a este material. O processamento recomendado é igualmente disponibilizado pelo fornecedor e apresentado no Quadro A.2.

Quadro A.2 – Características de processamento do material *Stanyl TW200F6*.

Material: <i>Stanyl TW200F6</i>	
Temperatura da superfície do molde [°C]	115
Temperatura do fundido [°C]	313
Intervalo da temperatura do molde [°C]:	
Mín.	80
Máx.	150
Intervalo da temperatura do fundido [°C]:	
Mín.	305
Máx.	320
Temperatura do fundido máxima absoluta [°C]	355
Temperatura de extracção [°C]	265
Tensão de corte máx. [MPa]	0,5
Taxa de corte máx. [1/s]	60000