



**VITOR JORGE
PALHAIS SOARES
PAULO**

**DETERMINAÇÃO DAS FORÇAS DE EXTRACÇÃO EM
MOLDES DE INJECCÃO DE TERMOPLÁSTICOS**



**VITOR JORGE
PALHAIS SOARES
PAULO**

**DETERMINAÇÃO DAS FORÇAS DE EXTRACÇÃO EM
MOLDES DE INJECCÃO DE TERMOPLÁSTICOS**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Prof. Doutor Carlos Alexandre Bento Capela, Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria e sob co-orientação científica do Prof. Doutor Fernando José Neto da Silva, Professor auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

O Júri

Presidente

Prof. Doutor Francisco Queirós de Melo

Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Fernando Jorge Ventura Antunes

Professor Auxiliar com Nomeação Definitiva do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra

Prof. Doutor Fernando José Neto da Silva

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Carlos Alexandre Bento Capela

Professor Adjunto da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria

Agradecimentos

A realização deste trabalho não seria possível sem a ajuda de Docentes, Amigos e Colegas, aos quais quero deixar aqui o meu agradecimento, e em especial:

Ao Professor Doutor Carlos Alexandre Bento Capela, por me conceder a possibilidade de desenvolver este trabalho, pelo seu contributo científico, pelo incansável apoio, compreensão, amizade e disponibilidade ao longo do trabalho;

Ao Professor Doutor Fernando Neto, pelo seu contributo e cooperação no trabalho;

Ao Professor Doutor Paulo Bártolo, pela sua amizade e apoio;

Ao Mestre Sérgio Santos, pela amizade e contribuições que enriqueceram este trabalho;

Ao Eng. Felisbelo Lisboa, pelo suporte e disponibilidade que contribuiu para o enriquecimento deste trabalho;

Aos que contribuíram de forma directa ou indirectamente neste trabalho;

A todos os meus Amigos que me apoiaram;

Aos meus Pais e Sogros;

À minha filha Joana e afilhada Mariana;

À minha Esposa Sónia Cruz, pelo seu incansável apoio e paciência ao longo destes anos.

A todos o meu OBRIGADO

Vítor Paulo

Palavras-chave

Moldes de injeção, materiais termoplásticos, forças de extração, modelos de previsão de forças de extração, parâmetros de processamento por injeção.

Resumo

Pretende-se com este trabalho, determinar as forças de extração em moldes de injeção de materiais termoplásticos.

No processo de moldação por injeção de materiais termoplásticos é necessário utilizar um molde com sistema de extração mecânico para remover a peça da bucha moldante. A extração da peça plástica do molde é realizada geralmente com recurso a extractores, aros ou barras extractoras. A força de extração é tanto mais importante quanto maior for a altura da bucha. A qualidade do acabamento superficial da peça moldada depende, do ângulo de saída, do acabamento superficial do molde, propriedades do material termoplástico e do tipo de sistema de extração. A força de atrito dificulta a remoção da peça plástica da zona moldante. O aumento da força de atrito resulta da contracção da peça plástica durante a fase de arrefecimento do ciclo de injeção, sendo mais crítica para peças mais profundas.

O trabalho será dividido em três fases. Na primeira recorrer-se-á ao levantamento bibliográfico e técnico relativo a sistemas de extração utilizados em moldes de injeção, aspectos tribológicos e parâmetros de processamento de materiais termoplásticos.

Na segunda fase será projectado e desenvolvido um molde de injeção que será instrumentado para determinação experimental das forças de extração.

Numa terceira fase proceder-se-á à determinação experimental das forças de extração e comparação com os modelos de previsão.

Keywords

Injection moulds, thermoplastic materials, ejection forces, ejection force prediction models, injection processing parameters.

Abstract

The purpose of this work is the determination of ejection forces in thermoplastic materials injection moulds.

In the thermoplastic materials injection moulding process it's necessary to use moulds with mechanical extraction to remove the part from the mould core. Generally, the ejection of the plastic part from the mould is done through ejector pins, ejector rings or ejection bars. The higher the core, the more important the ejection forces. The quality of the moulded part's surface finishing depends on the draft angle, the surface finishing of the mould, the properties of the thermoplastic materials used and the type of the ejection system. The forces due to friction difficult the removal of the plastic part from the mould core. The increase of friction results from the part contraction during the cooling phase of the injection cycle, being more critical for deeper parts.

The work will be divided into three phases. In the first, a bibliographical research will be done for ejection systems, tribological aspects and thermoplastic materials processing parameters.

In the second phase, an injection mould shall be designed and developed for the experimental determination of ejection forces.

In a third phase, the experimental determination of the ejection forces will be done, and compared with the calculated models.

Índice

Capítulo 1 - Introdução.....	20
1.1 Considerações iniciais.....	20
1.2 A indústria Portuguesa de moldes para termoplásticos	20
1.3 Incógnitas no projecto e produção de moldes.....	22
1.4 Enquadramento do presente trabalho.....	22
1.5 Objectivos do presente trabalho	22
1.6 Estrutura da Tese	23
Capítulo 2 - Revisão bibliográfica	25
2.1 Materiais Poliméricos.....	25
2.1.1 Materiais Plásticos.....	30
2.2 Processamento por injeção	32
2.2.1 Condições de Processamento	33
2.2.2 Ciclo de injeção	34
2.2.3 Máquina de injeção	39
2.3 Moldes de injeção para produção de componentes plásticos	41
2.3.1 Sistema de extracção e forças de extracção	47
2.3.2 Modelos de previsão de forças de extracção	48
2.3.3 Contraction das peças plásticas.....	53
2.4 Tribologia das superfícies moldantes	54
2.5 Extensometria	59
2.5.1 Extensómetros - Princípio de funcionamento	60
2.5.2 Tipos e constituição dos extensómetros.....	63
Capítulo 3 - Design do Produto: Análises reológicas e estruturais.....	66
3.1 Design do Produto	66
3.2 Simulações computacionais.....	68

3.3 Análises reológicas.....	69
3.4 Análises estruturais	77
Capítulo 4 - Projecto e fabrico do molde de injeção	82
4.1 O Molde.....	82
4.2 Materiais utilizados no fabrico do molde	82
4.3 Funcionamento do molde.....	84
4.4 Acabamento superficial das zonas moldantes	85
4.5 Sistema de injeção do molde	85
4.6 Sistema de extracção do molde	86
4.7 Sistema de refrigeração do molde.....	87
4.8 Desenhos de fabrico.....	89
4.9 Maquinação dos elementos do molde	89
4.10 Simulação de maquinação da bucha	90
4.11 Ajustamentos e montagem final do molde.....	91
4.12 Equipamentos utilizados na construção do molde	92
4.13 Custos envolvidos no fabrico do molde de injeção	93
Capítulo 5 - Procedimentos de ensaios ao molde.....	94
5.1 Materiais plásticos testados.....	94
5.2 Processo de injeção	95
5.3 Setup - Parâmetros de injeção	96
5.4 Primeiro ensaio do molde – Versão 1 [3 corpos]	96
5.5 Desempenho do molde de injeção: primeiras amostras	97
5.6 Instrumentação da haste.....	102
5.7 Sistema de aquisição de dados.....	105
5.8 Ensaio do molde – Versão 1 [3 corpos].....	108
5.9 Ensaio do molde – Versão 2 [2 corpos].....	110
5.10 Ensaio do molde – Versão 3 [1 corpo]	111
5.11 Amostras das peças plásticas	113

Capítulo 6 - Modelos e Simulações Numéricas -Previsão das forças de extracção.....	115
6.1 Previsão das forças de extracção nas peças	115
6.2 Resultados.....	120
Capítulo 7 - Análise e discussão de resultados	124
7.1 – Resultados dos ensaios de DMA.....	124
7.2 – Força de extracção com o molde em vazio	126
7.3 – Resultados da versão 1 [3 corpos]	129
7.4 – Resultados da versão 2 [2 corpos]	132
7.5 – Resultados da versão 3 [1 corpo]	135
7.6 – Discussão de resultados	137
Capítulo 8 - Conclusões e desenvolvimentos futuros.....	143
8.1 Conclusões	143
8.2 Desenvolvimentos futuros.....	144
Capítulo 9 - Referências Bibliográficas	145

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Fase de fecho rápido	33
Figura 2.2 – Fase de fecho lento	33
Figura 2.3 – Fase de enchimento	34
Figura 2.4 – Fase de compactação	34
Figura 2.5 – Fase de refrigeração	35
Figura 2.6 – Fase de plastificação	35
Figura 2.7 – Fase de abertura	35
Figura 2.8 – Fase de extracção	35
Figura 2.9 – Ciclo de processamento por injeção	36
Figura 2.10 – Escoamento do material fundido num canal de alimentação de um molde de injeção	37
Figura 2.11 – Perfil de temperaturas e viscosidade do material plástico fundido	38
Figura 2.12 – Velocidade do fluxo	38
Figura 2.13 – Máquina de injeção e componentes constituintes	39
Figura 2.14 – Exemplo 3D de um molde	41
Figura 2.15 – Desenho 3D do Molde do Funil (Versão 1) desenvolvido e fabricado para a realização deste trabalho	42
Figura 2.16 – Vista 3D explodida dos componentes do molde - parte de injeção	43
Figura 2.17 – Desenho 3D dos componentes do molde - parte de extracção	45
Figura 2.18 – Componentes do molde – Bucha, chapa e aro extractor	45

Figura 2.19 – Modelo para cálculo das forças de extracção	50
Figura 2.20 – Superfícies de contacto de dois corpos	54
Figura 2.21 – Força de Atrito entre 2 corpos num plano inclinado	55
Figura 2.22 – Perfil real em corte	56
Figura 2.23 – Gráficos de Tensão versus Deformação	59
Figura 2.24 – Curva tensão – deformação	61
Figura 2.25 – Deformação de um fio sob tracção	61
Figura 2.26 – Circuito em ponte de Wheatstone	62
Figura 2.27 – Esquema do extensómetro	62
Figura 2.28 – Interface entre o sistema de aquisição de dados e o equipamento de injeção	64
Figura 3.1 – Funil de laboratório	65
Figura 3.2 – Modelo inicial e revisão do modelo	66
Figura 3.3 – Modelo Final: Versão 1 [3 corpos]	66
Figura 3.4 – Modelo Final: Versão 2 [2 corpos]	67
Figura 3.5 – Modelo Final: Versão 3 [1 corpo]	67
Figura 3.6 – Malhas das 3 versões de peças	68
Figura 3.7 – Condições iniciais para as análises reológicas	68
Figura 3.8 – Simulação de enchimento com 1,2 e 4 pontos de injeção	69
Figura 3.9 – Peça da versão 1 com malha e respectivo gito	70
Figura 3.10 – Peça da versão 2 com malha e respectivo gito	70
Figura 3.11 – Peça da versão 3 com malha e respectivo gito	71
Figura 3.12 – Tempo de enchimento de cada uma das versões	71
Figura 3.13 – Previsão para a velocidade e temperaturas no final do enchimento	73
Figura 3.14 – Enchimento dos canais frios – gitos	73
Figura 3.15 – Solidificação das peças e gitos após o final do enchimento	73
Figura 3.16 – Pressões no enchimento das peças	74
Figura 3.17 – Tempo de solidificação do gito	75
Figura 3.18 – Previsão das linhas de soldadura das peças	76
Figura 3.19 – Constrangimentos no molde	77
Figura 3.20 – Malha do molde	77

Figura 3.21 – Deslocamentos do molde	78
Figura 3.22 – Tensões Von Mises	78
Figura 3.23 – Análise de deformações da bucha da versão 1	79
Figura 3.24 – Tensões Von Mises da bucha da versão 1	79
Figura 4.1 – Elementos da estrutura do molde	82
Figura 4.2 – Características do aço das zonas moldantes do molde	82
Figura 4.3 – Área de extracção da peça (base da peça)	85
Figura 4.4 – Extracção versão 1 recolhida	86
Figura 4.5 – Extracção versão 1 avançada	86
Figura 4.6 – Corte da bucha: versão1	87
Figura 4.7 – Refrigeração da bucha versão1	87
Figura 4.8 – Corte da cavidade	87
Figura 4.9 – Refrigeração da cavidade	87
Figura 4.10 – Desbaste da cavidade	88
Figura 4.11 – Simulação e extracto do código de maquinação da bucha	89
Figura 4.12 – Bucha e cavidade no centro de maquinação CNC (IPL-ESTG)	89
Figura 4.13 – Chapa da bucha e chapa da cavidade do molde	90
Figura 4.14 – Postiços das 3 buchas e cavidades	90
Figura 4.15 – Chapas de extracção	90
Figura 4.16 – Centro de maquinação CNC, rectificadora, fresadora e engenho de furar (Equipamentos do IPL-ESTG)	91
Figura 4.17 – Lay out de alguns dos equipamentos utilizados (Equipamentos do IPL-ESTG)	91
Figura 5.1 – Materiais plásticos	93
Figura 5.2 – Molde de injecção	95
Figura 5.3 – Molde montado na máquina de injecção: versão 1 [3 corpos]	96
Figura 5.4 – Sequência de enchimento das peças da versão 1	97
Figura 5.5 – Equipamento de medição de rugosidades: Perthometer M2 e bucha do molde: versão 1 (Equipamento IPL-ESTG)	98
Figura 5.6 – Bucha, cavidade e peças plásticas da versão 1	99
Figura 5.7 – Bucha da versão 1	99
Figura 5.8 – Perfil de rugosidade da bucha versão 1	100

Figura 5.9 – Haste de extracção	101
Figura 5.10 – Haste de extracção em repouso	101
Figura 5.11 – Haste de extracção actuada	102
Figura 5.12 – Extensómetro MM e ficha técnica	103
Figura 5.13 – Haste de extracção instrumentada	103
Figura 5.14 – Accionamento do sistema de extracção	104
Figura 5.15 – Sistema de aquisição de dados NicDaQ-9172 (IPL-ESTG)	104
Figura 5.16 – Diagrama de blocos para a aquisição de dados - LabView 8.2	105
Figura 5.17 – Interface gráfica para visualizar os extensómetros	105
Figura 5.18 – Sistema de aquisição de dados, molde e equipamento de injecção	106
Figura 5.19 – Interface do sistema de aquisição de dados (IPL-ESTG)	106
Figura 5.20 – Peça e gito da versão 1 do molde	107
Figura 5.21 – Peso das peças de plástico da versão 1	108
Figura 5.22 – Peças plásticas da versão 1	108
Figura 5.23 – Fases da extracção do molde (Versão 1)	109
Figura 5.24 – Peça e gito da versão 2	109
Figura 5.25 – Peso das peças de plástico da versão 2	109
Figura 5.26 – Peças plásticas da versão 2	110
Figura 5.27 – Ensaio do molde da versão 2 com extracção da peça e gito	110
Figura 5.28 – Peça e gito da versão 3 do molde	111
Figura 5.29 – Peso das peças de plástico da versão 3	111
Figura 5.30 – Ensaio do molde da versão 3 com extracção da peça e gito	111
Figura 5.31 – Amostras das 3 versões das peças e respectivos gitos	112
Figura 5.32 – Amostras das 3 versões das peças em ABS e PE	112
Figura 5.33 – Peso das peças das três versões	113
Figura 6.1 – Área de extracção da peça da versão 1	115
Figura 6.2 – Análise comparativa dos resultados experimentais e os obtidos pelo modelo de previsão (Versão 1)	115
Figura 6.3 – Análise comparativa dos resultados experimentais e os obtidos pelo modelo de previsão (Versão 2)	116
Figura 6.4 – Análise comparativa dos resultados experimentais e os obtidos pelo modelo de previsão (Versão 3)	117

Figura 6.5 – Análise comparativa dos resultados experimentais e os obtidos pelo modelo de previsão para as 3 versões	118
Figura 6.6 – Temperaturas de processamento para os materiais plásticos utilizados.	119
Figura 6.7- Módulo de elasticidade do PBT em função da temperatura (Ultradur B4520-CAMPUS® 5.1 - BASF)	120
Figura 6.8 - Curvas de variação do volume específico versus temperatura para diferentes pressões de pressurização para o material PBT (CAMPUS® 5.1 BASF)...	120
Figura 6.9- Curvas tensão-deformação do PBT (Ultradur B4520- CAMPUS® 5.1 - BASF)	121
Figura 7.1 – Equipamento DMA usado nos ensaios de caracterização	123
Figura 7.2 – Modos de operação de um equipamento DMA a) compressão /penetração; b) fadiga; c) oscilação com carga estática; d) tracção; e) flexão em três pontos.....	124
Figura 7.3 – Curvas de variação do módulo à flexão versus temperatura para os materiais termoplásticos ABS, ABS_PC, PP e PE	124
Figura 7.4 – Forças de movimentação do sistema de extracção em vazio	126
Figura 7.5 – Força de extracção total medida ao longo de 10 ciclos de injeção consecutivas (Versão1 em PP)	126
Figura 7.6 – Evolução da força de extracção ao longo do processamento de 25 amostras de peças plásticas em PP e ABS	127
Figura 7.7 – Forças de extracção experimentais da versão 1 [3 corpos]	128
Figura 7.8 – Forças de extracção experimentais para a peça da versão 1[3 corpos]	129
Figura 7.9 – Ângulos de saída dos três corpos [versão 1]	130
Figura 7.10 – Forças de extracção experimentais da versão 2 [2 corpos]	131
Figura 7.11 – Forças de extracção experimentais para a peça da versão 2[2corpos]	132
Figura 7.12 – Ângulo de saída dos dois corpos [versão 2]	133
Figura 7.13 – Forças de extracção experimentais da versão 3 [1 corpo]	134
Figura 7.14 – Forças de extracção experimentais para a peça da versão 1[1 corpo]	135
Figura 7.15 – Ângulo de saída do corpo 1 [versão 3]	135
Figura 7.16 – Valores experimentais das Forças de extracção para as peças plásticas das três versões	137
Figura 7.17 – Influência dos parâmetros do processo nas forças de extracção	139

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Matérias plásticas	29
Tabela 2.2 Análise comparativa entre materiais termoplásticos e termoendurecíveis	30
Tabela 2.3 – Equações de rugosidades	58
Tabela 2.4 – Especificações sobre tipos de extensómetros	63
Tabela 3.1 – Análise comparativa entre as diferentes soluções de injeção	69
Tabela 4.1 – Composição química e Normas do Aço Orvar	83
Tabela 4.2 – Características e aplicações dos aços	83
Tabela 5.1 – Temperaturas de secagem e processamento das matérias plásticas ...	94
Tabela 5.2 – Materiais e condições de processamento	94
Tabela 5.3 – Peso das peças de plástico da versão 1 (Material PE)	97
Tabela 5.4 – Tabela das acções a executar após 1º ensaio	98
Tabela 5.5 – Medições da rugosidade da bucha de 3 corpos	100
Tabela 5.6 – Propriedades da Liga de Alumínio	102
Tabela 5.7 – Peso das peças de plástico (material ABS)	107
Tabela 7.1 – Ângulos de saída dos três corpos para a versão 1 [3 corpos]	131
Tabela 7.2 – Ângulo de saída dos dois corpos da versão 2	133
Tabela 7.3 – Ângulo de saída do corpo da versão 3	136
Tabela 7.4 – Valores das Forças de extracção para as peças das três versões	136
Tabela 7.5 – Rugosidades da bucha da versão 1 [3 corpos]	137
Tabela 7.6 – Materiais e condições de processamento	138

Nomenclatura

Acrónimo¹	Descrição
CAD	Computer Aided Engineering
CAM	Computer Aided Manufacturing
CNC	Computer Numerical Control
DNA	Dynamic Mechanical Analysis
ESTG	Escola Superior de Tecnologia de Gestão
IPL	Instituto Politécnico de Leiria
UA	Universidade de Aveiro

¹ Listados por ordem alfabética

- A - Área da secção transversal do fio
- A - Área de contacto
- Ac - Área de contacto entre o plástico e o aço no instante da extracção
- C - Comprimento da peça em contacto com o bucha (núcleo) do molde
- C_i - Contração da peça na direcção i
- D_m - Dimensão da zona moldante do molde
- D_p - Dimensão da peça plástica
- D_m - Espessura do centro de coordenadas
- d - Diâmetro da circunferência em torno do núcleo/bucha
- D - Diâmetro exterior
- d - Diâmetro interior
- E (T) - Módulo elasticidade do material da peça plástica à temperatura de extracção
- E - Módulo de Elasticidade ou Módulo de Young
- F_{at} - Força de atrito (Newtons)
- Fext - Força de extracção
- FR - Força da extracção
- f - Coeficiente de atrito entre o molde e a peça plástica
- Fext.V1 - força de extracção da peça plástica para a versão 1
- Fext.V2 - força de extracção da peça plástica para a versão 2
- Fext.V3 - força de extracção da peça plástica para a versão 3
- Fc1 - Força de extracção atribuída ao corpo 1
- Fc2 - Força de extracção atribuída ao corpo 2
- Fc3 - Força de extracção atribuída ao corpo 3
- g - Aceleração da gravidade
- l - Comprimento original
- Lm - Linha média
- m - Massa do corpo
- N - Força que é normal à direcção do movimento
- Pc - Pressão de contacto
- P_c - Pressão do contacto da peça com o molde
- P - Força de extracção
- $\overline{P_s}$ - Pressão exercida na camada de polímero
- R - resistência eléctrica
- Ra - Rugosidade Média
- Rz - Parâmetro médio da Rugosidade
- Rmáx - Profundidade máxima da rugosidade
- Sm - Espessura da peça plástica

ΔT - Diferença de temperatura coeficiente de dilatação térmica entre o plástico e temperatura de extracção multiplicado por d

ΔT - Contração térmica do plástico em todo o diâmetro d

T_m - Temperatura de transição

T_e - Temperatura de extracção do termoplástico

t - Espessura

t - Espessura da peça plástica

t_e - Tempo de extracção

t_r^* - Tempo de solidificação

Δd_r - Mudança relativa no diâmetro da peça depois da extracção da peça

ν - Coeficiente de Poisson do plástico.

μ - Coeficiente de atrito

μ - Coeficiente de atrito entre o plástico e aço

ν - Coeficiente de Poisson do plástico

$\overline{\sigma_{\theta\theta}}$ - Tensão média circunferencial antes da extracção

β - Compressibilidade

δ_r - Contração da espessura da peça

μ_d - Coeficiente de atrito dinâmico

α - Ângulo de inclinação em relação à horizontal

σ - Tensão

ΔX - Variação dimensional

ρ - Resistividade do material do fio

X_0 - Dimensão inicial

Capítulo 1

Introdução

No presente capítulo, pretende-se efectuar uma breve síntese dos temas abordados e antever a estrutura do presente relatório.

1.1 Considerações iniciais

Na moldação por injeção de materiais termoplásticos é necessário utilizar um equipamento de injeção e um molde para obter peças plásticas.

Os moldes de injeção têm geralmente um sistema de extracção mecânico para remover a peça do interior do molde, mais concretamente da bucha que se encontra na parte da extracção do molde. No projecto do sistema de extracção de um molde é importante conhecer as forças de extracção envolvidas de forma a otimizar o sistema.

1.2 A indústria Portuguesa de moldes para termoplásticos

A Cefamol, é a Associação Nacional da Indústria de moldes [1], segundo esta, Portugal ocupa um lugar cimeiro, a nível mundial na Indústria de Moldes para plásticos. No decorrer dos últimos anos as grandes multinacionais (indústria automóvel, embalagem, electrónica/telecomunicações, electrodomésticos, etc.) escolhem empresas nacionais para o fabrico dos seus moldes, destinados a alguns dos melhores produtos de grandes marcas internacionais.

Factores como a experiência dos fabricantes de moldes portugueses, ao nível das normas de qualidade, assistência técnica, prazos de entrega, preços praticados e capacidade tecnológica, estão na base desta preferência [1].

A Indústria de Moldes para matérias plásticas teve o seu início em Portugal em 1943, na Marinha Grande, numa pequena empresa de moldes para vidro, por iniciativa de Aníbal H. Abrantes, mas sem a concordância do sócio e irmão Aires Roque, que por isso vendeu a sua posição na empresa, continuando a sua actividade na indústria

vidreira. Dois anos mais tarde, Abrantes produziu o primeiro molde de injeção para plástico [1].

Actualmente, o sector de moldes em Portugal possui cerca de 250 empresas com a dimensão típica de PME's (Pequenas e Médias Empresas), situadas na sua maioria na Marinha Grande e em Oliveira de Azeméis, empregando cerca de 7500 pessoas.

As empresas portuguesas de moldes encontram-se na vanguarda da utilização de máquinas-ferramentas de precisão inovadoras, controladas informaticamente, sendo vulgar a utilização de sistemas CAD/CAM/CAE na concepção e fabrico de moldes. Conceitos como Engenharia Simultânea ou Concorrente e Qualidade Total, são exemplos de conceitos que se começam a generalizar em algumas empresas do sector.

O futuro desta indústria está assegurado através do seu desenvolvimento tecnológico, do correcto planeamento da produção e controlo de qualidade, da modernização constante dos equipamentos em utilização e do investimento na formação profissional [1].

Algumas das empresas portuguesas de moldes têm vindo a desenvolver alguma especialização em áreas específicas, como produzir somente as cavidades ou bases de moldes, polimentos, moldes de grande porte e outras em moldes de maior precisão.

Ao longo dos anos a indústria portuguesa tem vindo a apostar na qualificação e especialização de técnicos profissionais. Institutos especializados concentraram-se na Marinha Grande e em Oliveira de Azeméis, evidenciando o desejo das empresas portuguesas de moldes reunirem os seus esforços num objectivo comum. Exemplo desta conjugação de esforços é a promoção de imagem do sector a nível externo, desenvolvida através da colaboração entre a CEFAMOL - Associação Nacional da Indústria de Moldes e o ICEP - Investimentos, Comércio e Turismo de Portugal [1].

O progresso e a vanguarda desta indústria devem-se, para além da sólida experiência e Know-how, ao cumprimento dos prazos de entrega, ao rigoroso controlo de qualidade, à elevada experiência, à competitividade, ao investimento em alta tecnologia, factores que asseguram a continuidade do fornecimento de moldes portugueses aos mercados mais exigentes no mundo [1].

1.3 Incógnitas no projecto e produção de moldes

No entanto, apesar dos avanços tecnológicos neste sector em particular, onde projectos de investigação e vários estudos deram contribuição nesta área, ainda existem naturalmente algumas incertezas no projecto de moldes, que algumas vezes levam a um dimensionamento ineficaz dos sistemas de extracção de moldes para o processamento de peças plásticas.

Conhecer e avaliar as várias variáveis associadas ao projecto/fabrico de moldes e produção de peças plásticas será uma tarefa morosa e complexa.

Na prática, por vezes surge a necessidade de corrigir os sistemas de extracção do molde após os primeiros ensaios, por diversas razões, entre as mais usuais o aparecimento de marcas, tensões e deformações nas peças plásticas, especialmente em zonas técnicas ou de aparência.

1.4 Enquadramento do presente trabalho

Face a uma série de incógnitas que envolve a temática das forças de extracção na moldação por injeção, surgiu a oportunidade de efectuar um estudo de avaliação das forças de extracção, projecto e fabrico de um molde, monitorização e ensaios que visam determinar as forças de extracção. Todas estas fases irão ser suportadas por diversos softwares na tentativa de comparar os resultados experimentais como os obtidos por modelos.

1.5 Objectivos do presente trabalho

Pretende-se desenvolver um molde de injeção de peças plásticas, de forma a avaliar as forças de extracção envolvidas do processo de extracção das peças plásticas desenvolvidas para o efeito. O objectivo principal deste trabalho é determinar as forças de extracção de peças plásticas processadas por injeção. Assim, serão objecto deste estudo:

- Levantamento técnico e bibliográfico relativamente a moldes para injeção de termoplásticos, sistemas de extracção, coeficientes de atrito estático e dinâmico, variáveis relativas ao processamento de materiais termoplásticos;
- Definição do produto final a obter, modelação e avaliação computacional (análise estrutural e análise reológica);

- Modelação e fabricação do molde de injeção para o produto definido;
- Instrumentalização e ensaios do molde de injeção;
- Determinação experimental de forças de extracção;
- Comparar os resultados experimentais com os resultados de modelos de previsão.

1.6 Estrutura da Tese

O trabalho relativo à tese de dissertação foi estruturado da seguinte forma:

- CAPÍTULO 1 – Introdução

- CAPÍTULO 2 – Revisão bibliográfica

Apresentação do estado da arte relativo aos materiais plásticos, processo de fabrico de moldes, processo de injeção e variáveis de processamento.

- CAPÍTULO 3 - Design do Produto: Análises reológicas e estruturais

Neste capítulo são apresentadas as fases do design da peça desenvolvidas e as análises reológicas e análises estruturais, relativas às peças e ao molde de injeção.

- CAPÍTULO 4 – Projecto e fabrico do molde

Neste capítulo são apresentadas as várias fases de construção do molde, o desenho preliminar, selecção de materiais, corte de aços, maquinações, ajustamentos e montagem final do molde de injeção.

- CAPÍTULO 5 - Procedimentos de ensaios ao molde

Neste capítulo são apresentados os ensaios de injeção realizados, os materiais processados e as condições de processamento, bem como as metodologias consideradas nos ensaios de avaliação das forças de extracção.

- CAPÍTULO 6 – Modelos de previsão das forças de extracção

Neste capítulo são apresentados os resultados do modelo de previsão de forças de extracção das peças plásticas.

◦ CAPÍTULO 7 - Análise e discussão de resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados experimentais das forças de extracção e as do modelo de previsão considerado.

◦ CAPÍTULO 8 – Conclusões e desenvolvimentos futuros

Neste capítulo são apresentadas as conclusões obtidas com a realização deste trabalho e os desenvolvimentos para trabalhos futuros.

◦ CAPÍTULO 9 – Referências bibliográficas

São apresentadas as fontes, autores e referências bibliográficas utilizadas no suporte ao trabalho.

Capítulo 2

Revisão bibliográfica

Neste capítulo irão ser abordados assuntos relacionados com o processo de injeção e materiais termoplásticos, variáveis de processamento e tribologia das superfícies dos materiais processados e superfícies moldantes.

No processamento de materiais termoplásticos, podem ser utilizados vários processos de transformação de plásticos, função do tipo de produtos que se pretendam obter: processamento por extrusão, injeção, sopro, filme e termoformação.

2.1 Materiais Poliméricos

Os polímeros são materiais leves, resistentes e versáteis, duráveis e relativamente baratos. Estes materiais são uma presença constante no nosso dia-a-dia, o que os torna muito importantes na actual sociedade de consumo. Muitos dos artigos utilizados tem componentes em material plástico. O desenvolvimento dos processos tecnológicos, tem possibilitado um notável nível de procura, descoberta e utilização de materiais plásticos. Sectores como os da produção de produtos domésticos, brinquedos, produtos para a área da construção civil, produtos para a área da saúde, produtos para a área de informática, electrónica, automóvel, militar e aviação, entre outros, têm vindo a utilizar cada vez mais os materiais plásticos.

Um polímero não é mais que uma substância constituída por moléculas de grandes dimensões (macromoléculas), caracterizadas pela repetição de uma ou mais unidades de dimensões inferiores, ligadas entre si por ligações covalentes. As unidades repetitivas dos polímeros unem-se de modo a formar uma estrutura linear ou ramificada. Estas podem ainda interligar-se e, deste modo, formar uma rede tridimensional reticulada.

Os materiais poliméricos podem ser classificados em homopolímeros, se tiverem apenas um tipo de unidade repetitiva de monómeros da mesma natureza, ou copolímeros, se tiverem duas ou mais unidades repetitivas. Podem obter-se diferentes

tipos de copolímeros em função da forma como as moléculas de monómeros se unem entre si. Deste modo, as unidades podem ser distribuídas aleatoriamente, alternadas, em blocos, ou ramificadas, permitindo que estas combinações, dêem origem a polímeros com diferentes propriedades baseados nas estruturas obtidas.

Em função da natureza química dos polímeros, e do processo de polimerização considerado, os polímeros podem exibir diferentes tipos de estruturas. Os mais comuns são os de estrutura linear, ramificada ou em rede.

Um outro tipo de estrutura que os polímeros podem apresentar é a estrutura ramificada. O impedimento espacial provocado pelas ramificações dificulta um "empilhamento" das cadeias poliméricas. Deste modo, as forças inter-moleculares que mantêm as cadeias poliméricas unidas, tendem a ser mais fracas em polímeros com estrutura ramificada. Consequentemente, o PEBD é bastante flexível e pode ser utilizado como filme plástico para embalagens, enquanto o PEAD é bastante duro e resistente, sendo utilizado em garrafas, brinquedos, etc.

Uma forma de classificar os materiais poliméricos é pela sua estrutura, como sendo amorfos ou cristalinos. Os polímeros amorfos apresentam uma baixa ou nenhuma ordenação das cadeias poliméricas. Os polímeros amorfos não apresentam cristalinidade e, portanto, não apresentam nenhum ponto de fusão cristalino, mas podem tornar-se num fluido suficientemente menos viscoso para que possa fluir e ser moldado. A temperatura em que isso começa a ocorrer é denominada por temperatura de transição vítrea, T_g . Um material polimérico tem uma temperatura de transição vítrea (T_g) característica e quanto mais alta esta for, maior será a temperatura de utilização do material considerado. Acima da T_g , as moléculas começam a mover-se e as propriedades do material modificam-se substancialmente. Os polímeros cristalinos, por outro lado, apresentam áreas onde há uma ordenação das cadeias poliméricas de modo a formarem estruturas regulares denominadas por cristais.

Os materiais poliméricos podem, também, ser classificados em materiais termoplásticos e em materiais termoendurecíveis, consoante a sua capacidade de ser reprocessado, sem perda significativa das suas propriedades fundamentais (polietilenos, polimetacrilato de metilo e policloreto de vinilo) ou, uma vez aquecidos, assumirem uma forma permanente (poliuretanos, resinas epoxy, poliéster, e fenolicas). Os termoplásticos são materiais capazes de passar por sucessivos ciclos de processamento, sem sofrerem degradações severas das suas propriedades. Os elastómeros (poliisopreno e polibutadieno) são um outro tipo de polímeros, de origem natural ou sintética, com elevado grau de elasticidade, isto é, quando submetidos a

uma carga, deformam-se significativamente. Esta deformação é reversível, dado que o material retoma as suas dimensões originais ao ser removida a carga [2].

Materiais Termoplásticos

Os termoplásticos são constituídos por moléculas longas, com um comprimento entre de 20 a 30 nm. Estes materiais podem ser repetidamente processados e, conseqüentemente, serem reciclados [3]. Os termoplásticos podem, também, ser divididos em dois grandes grupos: termoplásticos de utilização geral e termoplásticos de utilização em engenharia. Os termoplásticos de utilização geral, constituem a maioria dos plásticos utilizados actualmente, caso do polietileno, polipropileno e poliestireno que são materiais de custo relativamente baixo. As propriedades mecânicas destes materiais podem ser optimizadas (por exemplo, com adição de cargas ou fibras), tornando-os mais competitivos com outros materiais plásticos. Os termoplásticos de utilização em engenharia, podem oferecer um conjunto de propriedades de grande interesse, como boa resistência mecânica e rigidez, tenacidade e/ou resistência ao desgaste, boa resistência a produtos químicos e boa condutibilidade térmica. A utilização destes materiais constituem uma boa alternativa à utilização materiais metálicos, sendo os mais importantes desta categoria as poliamidas, poliacetais, policarbonatos, poliésteres termoplásticos e poli(óxido de fenileno) modificado.

Os termoplásticos, podem ser quimicamente obtidos por adição ou condensação. São plásticos que necessitam de calor para serem conformados (temperaturas demasiado elevadas podem causar a sua degradação) e que mantêm a forma adquirida durante o processamento, assim que ocorre o seu arrefecimento. Estes materiais podem, teoricamente, ser várias vezes reaquecidos e sofrerem um novo ciclo de processamento de forma a obterem novas formas, sem que ocorra alteração significativa das suas propriedades.

A polimerização por adição ocorre em compostos insaturados, os quais contem ligações duplas ou triplas [4]. Essas ligações rompem-se e originam ligações simples, logo, a polimerização ocorre sem a formação de subprodutos. A polimerização por condensação, consiste na formação de uma macro molécula a partir de monómeros que reagem entre si com a eliminação de água ou de outras pequenas moléculas que não participam de reacções posteriores.

Materiais Termoendurecíveis

Os materiais termoendurecíveis, são compostos cujas cadeiras poliméricas estão unidas quimicamente através da reacção denominada de cura. A reacção da cura e as características destes materiais termoendurecíveis, diferenciam-se dos outros polímeros devido à formação de uma ligação rígida com interligações químicas que restringem a mobilidade molecular. As cadeias poliméricas apresentam uma alta densidade de reticulações. As resinas, como comercialmente são conhecidos os materiais termoendurecíveis, apresentam várias vantagens relativamente aos materiais termoplásticos: elevada temperatura de distorção térmica, boa resistência a solventes, boa rigidez, o que permite a sua utilização em diversas aplicações. A utilização crescente e largamente difundida das resinas está relacionada com as suas boas propriedades, tais como: baixa massa molecular, resistência química e ao calor, estabilidade dimensional e adaptabilidade ao métodos de processamento.

Os termoendurecíveis mais económicos e mais utilizados são os poliésteres, poliuretanos, viniléster e resinas fenólicas. Estes são utilizados no processamento de materiais compósitos reforçados com fibras de vidro. As resinas epoxy são mais caras e são utilizadas em aplicações estruturais. São, também, muito utilizadas em aplicações aeroespaciais por possuírem melhores propriedades mecânicas e melhor resistência à humidade do que os poliésteres, poliuretanos e resinas vinílicas. Em aplicações em que requeridas temperaturas de serviço elevadas, são utilizadas resinas poliamidas .

O processo de cura das resinas termoendurecíveis é definido pela mudança irreversível nas propriedades químicas e físicas de uma determinada formulação, resina/iniciador/promotor, causado por uma reacção química. O processo de cura é altamente exotérmico, promovendo inicialmente uma queda da viscosidade, devido ao aumento da temperatura interna da resina e em seguida, o aumento da viscosidade, devido ao aumento da massa molecular.

O processo de cura das resinas termoendurecíveis pode ser dividido em três etapas. A gelificação (geltime), primeira etapa, é o período que vai desde a hora em que se mistura o catalisador até ao ponto em que a resina começa a ficar na forma de gel e se dá o aumento da temperatura. Geralmente, no caso das resinas poliéster, a temperatura máxima durante o processo de gel pode chegar aos 150°C. Esta temperatura denomina-se de pico exotérmico. Após este tempo de gel vem o tempo de endurecimento, segunda etapa, que corresponde ao período necessário para a resina obter uma parte significativa das suas propriedades mecânicas. A etapa final, corresponde ao tempo de maturação durante o qual o compósito desenvolve toda a

sua estabilidade e dureza. O processo de maturação é a parte vital do ciclo de cura, o que pode levar dias ou talvez semanas, dependendo da temperatura na qual o compósito for mantido. Quando é preciso obter melhores propriedades, poderá ser necessário proporcionar ao conjunto final uma pós-cura com temperaturas mais elevadas. Em geral, quanto maior for a temperatura, menor será o tempo necessário para se obterem as propriedades totais do material compósito [5].

Cargas para reforço dos polímeros

No processamento de componentes plásticos, os polímeros não são os únicos constituintes. Na maioria dos componentes plásticos são adicionados aditivos em varias concentrações (em função do material a processar pretendido), para melhoria das condições de processamento, propriedades mecânicas e aspecto visual do componente plástico. É necessário que os aditivos utilizados reúnam uma série de condições indispensáveis para a sua correcta aplicação, em especial a neutralidade e a compatibilidade com a resina e resistência dos agentes químicos [6].

Os vários aditivos a utilizar no processamento podem ser classificados em categorias, de acordo com a sua função. Os aditivos utilizados com maior frequência são os corantes ou pigmentos, os lubrificantes, os estabilizantes, os antioxidantes, os plastificantes, os retardadores de chama, os agentes antiestáticos, os agentes de formação de espumas, reforços e cargas. Os lubrificantes externos são utilizados para o processo de desmoldação entre o polímero e as zonas moldantes do molde. Os lubrificantes internos são utilizados para aumentar a mobilidade das moléculas do polímero para poderem deslizar umas sobre as outras. Os estabilizantes são aditivos utilizados para proteger o polímero da degradação provocada pela radiação, principalmente pela luz ultravioleta e pelo calor. Os retardadores de chama são aditivos incorporados nos plásticos com o objectivo de alterar o comportamento do plástico quando estes materiais são expostos à chama, dificultando a iniciação do fogo e a sua propagação da chama. Os agentes anti-estáticos são aditivos que têm por finalidade impedir a criação ou armazenamento de electricidade estática na superfície das peças ou produtos plásticos. Os reforços, são partículas de material com diversas granulometrias (e fracções volúmicas) ou fibras (curtas ou longas), adicionados aos materiais compósitos de matriz polimérica com o objectivo de melhorar as suas propriedades mecânicas. Exemplos de reforços que podem ser incorporados a compósitos de matriz polimérica são as fibras de vidro que promovem o aumento da rigidez e resistência à tracção. As cargas são incorporadas aos materiais poliméricos basicamente com o intuito de redução de custo do material.

2.1.1 Materiais Plásticos

Um material polimérico é, como já referido, constituído por inúmeras unidades (monómeros), ligadas quimicamente entre si. O processo químico pelo qual os monómeros se combinam quimicamente formando polímeros designa-se por polimerização.

Os materiais plásticos processados por injeção apresentam, em geral, como principais características: baixa densidade, baixa rigidez, boa resistência química, elevado coeficiente de expansão térmica, baixa condutibilidade térmica e eléctrica e baixa resistência mecânica. Na tabela 2.1, são apresentadas as principais vantagens e desvantagens dos materiais plásticos processados por injeção.

Tabela 2.1- Matérias plásticas

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Possibilidade de obter um produto final (texturas com cores e brilhos) ▪ Elevada relação resistência/peso ▪ Facilidade de processamento ▪ Coloração 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Temperatura de serviço baixa ▪ Elevada contracção

O plástico é um material higiénico e asséptico; sendo utilizado em embalagens de produtos alimentares. Estes materiais podem actuar como barreira protectora entre os alimentos e os possíveis contaminantes. É um material asséptico, por não permitir que nele se desenvolvam quaisquer microrganismos. O material plástico é um isolante térmico, diminui substancialmente as perdas energéticas, sendo utilizado como isolante térmico, contribuindo para a redução de gastos de energia. É, também, durável e fiável e requer menor manutenção do que qualquer outro material tradicional. É praticamente inquebrável. Podem, ainda, ser concebidos para ter uma durabilidade limitada (plásticos biodegradáveis). O plástico é, em geral, leve, reduzindo o peso dos resíduos. No caso veículos, a sua utilização pode traduzir-se num menor consumo de combustíveis (menor emissão de agentes poluentes).

Na tabela 2.2 é apresentada uma análise comparativa entre materiais termoplásticos e termoendurecíveis.

Tabela 2.2 - Análise comparativa entre materiais termoplásticos e termoendurecíveis

Termoplásticos	Termoendurecíveis
1. Necessitam de calor para serem enformados.	1. A temperatura ou um catalisador provoca uma reacção permanente
2. Reversíveis	2. Não podem ser refundidos e reenformados noutra forma ou molde
3. Recicláveis	3. Não são recicláveis
4. De maior utilização industrial	

Como já referido anteriormente, pode-se melhorar as propriedades de processamento e do material plástico com a adição de aditivos, tais como plastificantes que melhoram o processamento do plástico e capacidade de enformação do produto acabado; os agentes estabilizadores evitam a degradação dos plásticos por agentes físicos e químicos (calor, radiação UV, ...); os corantes e pigmentos permitem dar a cor pretendida; os agentes anti-estáticos e anti-choque, dão determinadas características a produtos mais específicos com o isolamento ou propriedades anti-estáticas; os retardantes de chama, entre outros permitem que os índices de inflamabilidade permaneçam baixos ou não haja mesmo ignição da chama, para reduzir os perigos de incêndios.

Os principais processos de transformação de materiais termoplásticos são o processo de extrusão, o processo de moldação por injeção, o processo moldação por sopro e processo de moldação por termoformação. No presente trabalho, pretende-se determinar as forças de extracção envolvidas no sistema de extracção de um molde de injeção (processamento por injeção). Foi desenvolvido para o efeito um molde de injeção, com três versões de peças plásticas processadas em vários materiais termoplásticos.

No mercado existe um vasto leque de materiais plásticos disponíveis e que podem ser utilizados no processamento por injeção, função do tipo de aplicações pretendido para o produto a processar. De seguida, são apresentados exemplos dos materiais plásticos mais utilizados no processamento por injeção:

- Plásticos Técnicos Amorfos - Policarbonato (PC)
- Plásticos Técnicos Semicristalinos - PBT, PA66 ou POM.

- Plásticos standard Amorfos - ABS
- Plásticos Semi-cristalinos Amorfos - PP ou PE.

Os materiais utilizados no processamento por injeção da peça plástica a processar, de forma a determinar as forças de extração, foram: PE, PP, ABS, ABS/PC e PBT. A avaliação destas forças de extração resulta do processamento de diferentes materiais termoplásticos, efeito de contração, acabamento superficial das zonas moldantes, diferentes condições de processamento por injeção utilizadas e a complexidade de cada geometria considerada em cada uma das três versões da peça desenvolvida para o efeito.

2.2 Processamento por injeção

O processo de moldação por injeção baseia-se, de uma forma simples, em injectar um material polimérico aquecido, a uma temperatura acima de T_g , sob pressão, para o interior de um molde que replica a geometria final da peça a processar. Este processo, consiste no processamento de materiais termoplásticos que se verifica durante um ciclo de moldação por injeção: injeção, pressurização, arrefecimento e extração da peça plástica processada. Cada uma destas fases desempenha um papel fundamental no processamento por injeção e podem ser optimizadas, para que o tempo de ciclo seja o mais curto possível. As variáveis relativamente ao processamento por injeção são: a geometria da peça plástica a processar, sistema e materiais considerados para o sistema de refrigeração, material plástico, acabamento superficial das zonas moldantes, sistema de injeção e condições de processamento [7,8]. Na fase de arrefecimento, a peça contrai e reproduz o acabamento superficial das zonas moldantes do molde de injeção.

A fase de extração do ciclo de injeção, corresponde à extração da peça plástica do interior do molde, geralmente é o elemento moldante bucha, elemento que se encontra do lado móvel do molde. Nesta fase, pretende-se extrair a peça plástica já com rigidez suficiente. A peça plástica, durante esta fase, está à temperatura de extração e vai, naturalmente, contrair até atingir a temperatura ambiente. Consequentemente devem ser tomados alguns cuidados durante a fase de extração, manuseamento e embalagem para não comprometer a qualidade final da peça plástica. A procura de tempos de ciclos de processamento rápidos, por vezes obriga a reduzir o tempo de arrefecimento da peça plástica no interior do molde,

comprometendo muitas vezes a qualidade da peça plástica devido a deformações ao extrair do molde, geração de tensões internas e variações dimensionais na peça.

No âmbito deste trabalho de tese, foi desenvolvido e fabricado um molde de injeção, com a possibilidade de processar três peças plásticas e poder avaliar as forças envolvidas na fase de extracção destas peças plásticas. Na avaliação destas forças foram utilizadas técnicas de extensometria, diferentes materiais e naturalmente diferentes condições de processamento.

O processamento por injeção é um versátil processo de produção de peças plásticas. Cerca de 30% do peso dos materiais plásticos transformados são processados por injeção. Este é um processo cíclico que compreende fundir um material plástico e introduzi-lo sob pressão para dentro dum molde com a forma final da peça plástica que se pretende obter. A forma da peça será conformada pela geometria da superfície da bucha, cavidade e outras zonas moldantes. Esta técnica, processamento por injeção, permite obter peças técnicas, com boa reprodutibilidade, com tolerâncias apertadas e com boa estabilidade dimensional, desde que o desenvolvimento e fabrico do molde bem como o processamento sejam bem executados. Este processo, permite ainda obter peças com formas e geometrias complexas, com um tempo de ciclo relativamente rápido e um elevado número de ciclos de produção, ou seja, grandes lotes de produção sem interrupção.

2.2.1 Condições de Processamento

Os parâmetros de processamento são função dos materiais plásticos a processar, tipo e capacidade da máquina de injeção a utilizar, equipamentos auxiliares, molde de injeção e complexidade da peça plástica a processar. No processamento por injeção podem-se considerar parâmetros operacionais e parâmetros de processo.

Os parâmetros operacionais são introduzidos antes do arranque do equipamento na fase de afinação (setup). Como exemplo, pode-se considerar a temperatura do molde, temperaturas do fuso (cilindro), temperatura e tempo de secagem/desumidificação do material, temperatura e humidade do meio envolvente, pressão de injeção e de compactação, velocidades de injeção, tempos e cursos de injeção.

Os parâmetros de processo são função das características específicas do equipamento, que não podem ser variados (espontaneamente) durante a produção (geometria do fuso, capacidade de carga, aspectos construtivos, etc.), que tem naturalmente influência no processo. Outros exemplos são a geometria da peça e

sistema de injeção (espessuras, comprimento dos canais, ponto ou pontos de injeção, canais frios ou canais quentes), soluções construtivas do molde (materiais utilizados no fabrico do molde, aços, sistema de arrefecimento, sistema de injeção, sistema de extracção) e as propriedades do material plástico de processamento (viscosidade, propriedades mecânicas,...).

2.2.2 Ciclo de injeção

O ciclo de moldação por injeção é uma sequência de fases que ocorrem durante a produção das peças plásticas. As fases do processamento por injeção convencional são esquematizadas na figuras 2.1 a 2.8 [9].

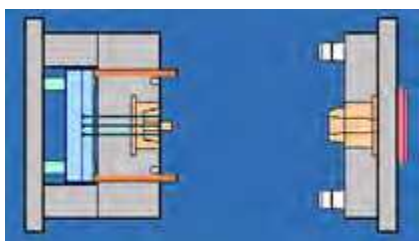


Figura 2.1 – Fase de fecho rápido [9]

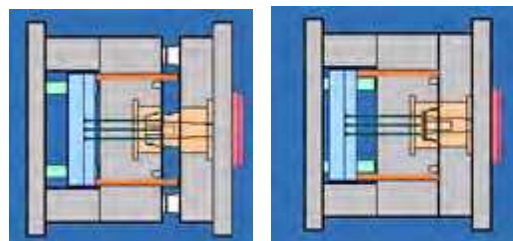


Figura 2.2 – Fase de fecho lento [9]

No fecho do molde pode-se definir duas fases, uma com velocidade de fecho rápida (fora das guias do molde) na figura 2.1 e outra de fecho lento na figura 2.2, onde existe uma menor velocidade de deslocação nos casquilhos e guias principais. Após o contacto entre as guias e os casquilhos a desaceleração é afinada na máquina para evitar danificar as superfícies moldantes (bucha, cavidade, elementos móveis entre outros componentes) e superfícies de ajustamento. Após o fecho do molde, contacto entre as duas partes do molde, a máquina de injeção aplicará a força de fecho. A força de fecho da máquina e a pressão de injeção que é exercida no material plástico para que este entre na cavidade do molde, são forças em sentido opostos. O objectivo da força de fecho é garantir que o molde não “abre” durante a fase de enchimento e pressurização para que não haja a formação de rebarbas na linha de junta da peça. Por outro lado, com forças de fecho muito superiores as pressões de pressurização, o ar que existe no interior do molde poderá não sair pelos escapes de gases do molde e ficar no interior das peças provocando defeitos nas peças plásticas. Existe então um compromisso entre esta força e as pressões de pressurização. O material plástico

processado é injectado por acção de um fuso/parafuso para o interior da cavidade do molde, figura 2.3.

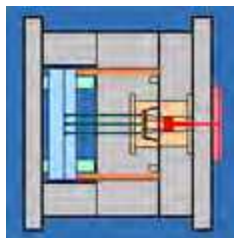


Figura 2.3 – Fase de enchimento [9]

Concluída a fase de injeção é aplicada uma segunda pressão, pressão de compactação (ou pressurização), de forma a peça plástica replique a geometria pretendida sem empenos ou chupados (marcas na superfície de peças plásticas), figura 2.4.

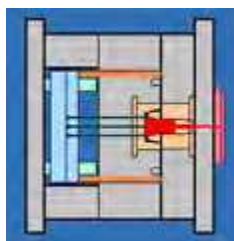


Figura 2.4 – Fase de compactação [9]

O sistema de refrigeração do molde tem como objectivo baixar a temperatura da peça plástica, de forma a garantir a sua extracção. Ao diminuir a temperatura da peça, o material plástico ganha rigidez e, deste modo, a peça plástica pode ser extraída (figura 2.5).

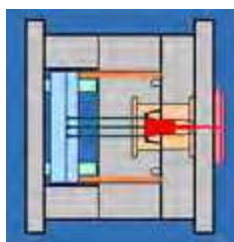


Figura 2.5 – Fase de refrigeração [9]

Durante a fase de refrigeração, a máquina de injeção inicia nova carga do fuso com uma nova dosagem de material para o próximo ciclo de injeção.

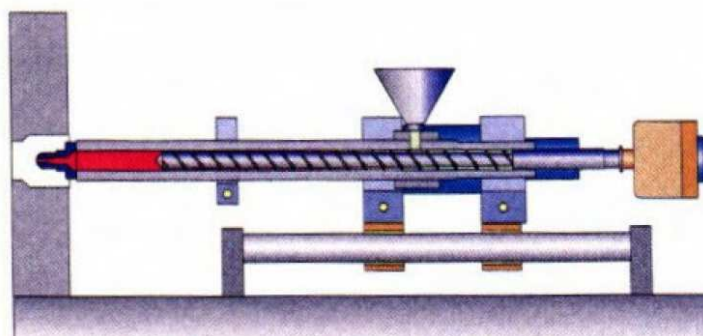


Figura 2.6 – Fase de plastificação

A fase de abertura e extracção finalizam o ciclo de processamento por injeção. Esta é uma fase de grande importância, pois pode ter consequências na qualidade da peça, em termos de empenos, deformações e marcas do sistema de extracção na peça plástica processada, figuras 2.7 e 2.8.

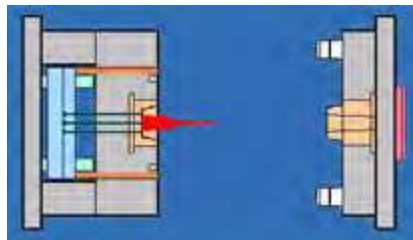


Figura 2.7 – Fase de abertura [9]

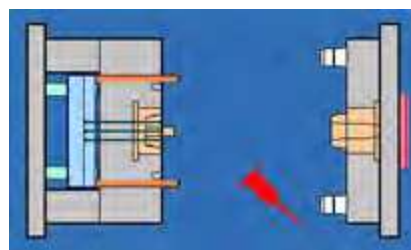


Figura 2.8 – Fase de extracção[9]

O fecho do molde é considerado o início do ciclo de injeção. O fecho do molde é efectuado dos através do accionamento prato móvel da máquina de injeção.

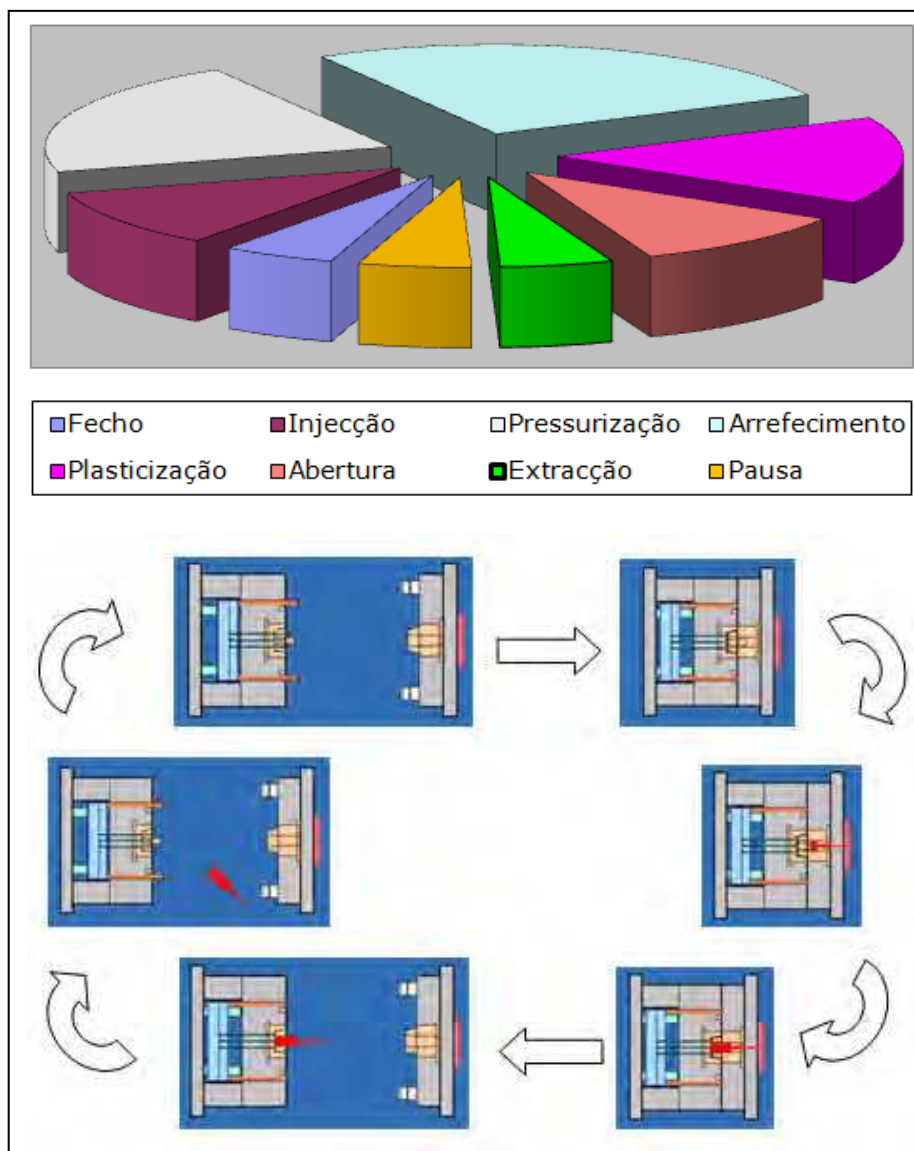


Figura 2.9 – Ciclo de processamento por injeção

A fase de injeção, durante a qual o material fundido (processado pela rotação do fuso) é introduzido através do movimento axial do fuso (parafuso) para dentro da cavidade do molde através do injetor. Concluída a fase de injeção é aplicada a pressão de compactação com o objectivo de compensar a contracção do material da peça plástica e garantir estabilidade dimensional das peças. Esta também permite evitar alguns defeitos como as faltas de enchimento, chupados e outros defeitos. Após a fase de injeção e compactação, segue-se a fase de refrigeração. Esta etapa é de grande importância, pois um bom sistema de refrigeração e (projecto e adequada selecção de materiais) permite um arrefecimento controlado do material da peça no

interior do molde, garantindo peças plásticas de boa qualidade e um baixo tempo de ciclo de moldação. O tempo de refrigeração poderá atingir de 75% do tempo de ciclo da moldação por injeção, figura 2.9.

Nas figuras 2.10 e 2.11 pode-se observar o fluxo de injeção de material plástico, ou seja o escoamento do material fundido dentro do molde bem com a interação com as paredes do molde [10]. O material plástico flui com maior velocidade no interior do fundido. O material que contacta com as paredes das zonas moldantes do molde solidifica rapidamente, uma vez que o molde está a uma temperatura muito inferior à do material que entra na cavidade do molde.

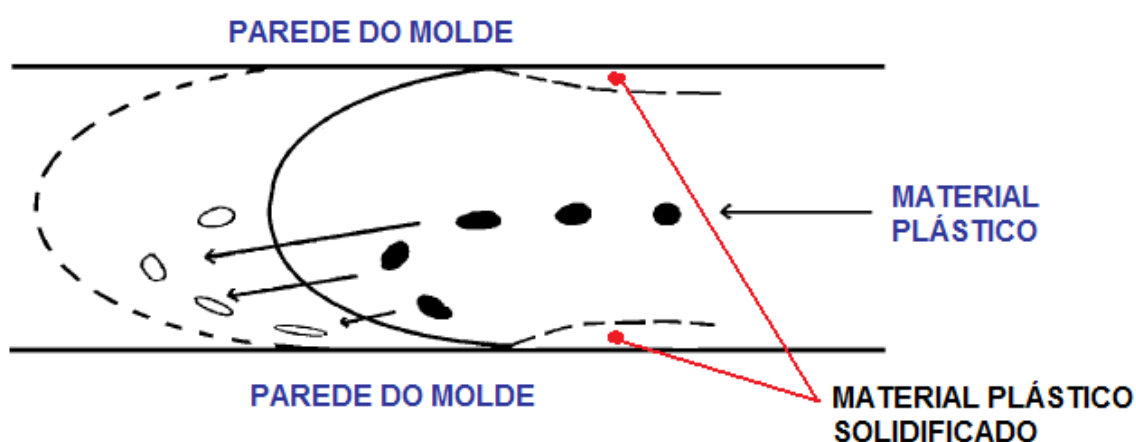


Figura 2.10 – Escoamento do material fundido num canal de alimentação de um molde de injeção

Na figura 2.10 pode-se observar que a frente do fluido irá tender a deslocar-se para as extremidades da superfície moldante e iniciar a solidificação, garantindo desta forma que o centro do fluxo esteja menos viscoso e permita continuar o enchimento [10]. As taxas de corte do material são elevadas junto à parede do molde e tende para zero no interior do fundido, tal como seria de esperar.

A figura 2.11 [10], apresenta o perfil de temperaturas na frente do material fundido no interior do molde, que são elevadas no núcleo do fluxo, descendo exponencialmente à medida que se aproxima das superfícies do molde. O perfil de viscosidades e a taxa de corte do material são dependentes, quando a viscosidade é mínima a taxa de corte é máxima.

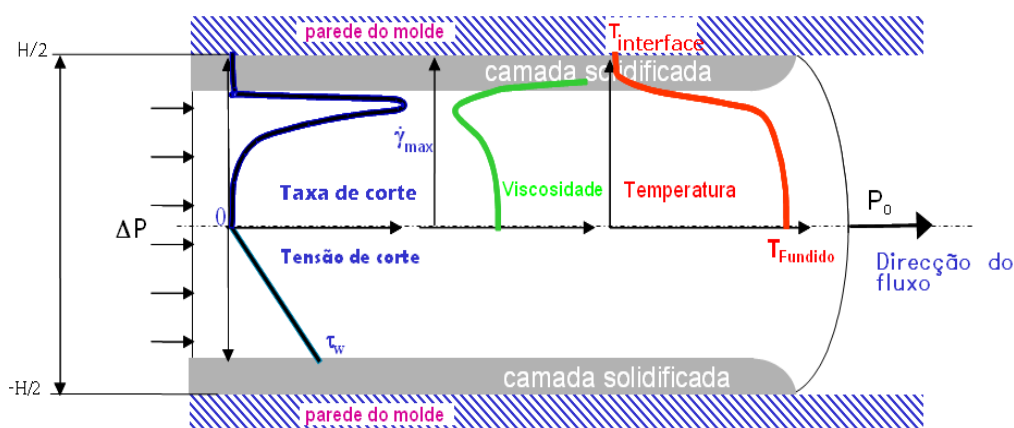


Figura 2.11 – Perfil de temperaturas e viscosidade do material plástico fundido

A velocidade do fluxo está representada na figura 2.12, onde a velocidade de fluxo máxima encontra-se no centro do escoamento e, nas paredes tende para zero pois junto às superfícies moldantes o material solidifica rapidamente (temperatura é mais baixa).

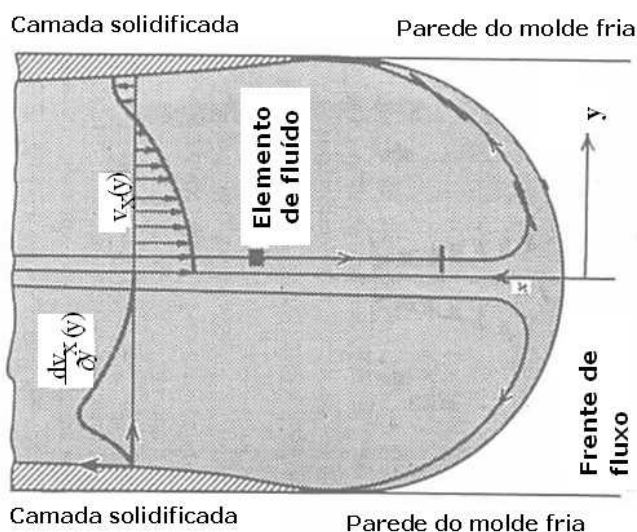


Figura 2.12 – Velocidade do fluxo

2.2.3 Máquina de injeção

Na figura 2.13, podemos observar a constituição de uma máquina de injeção [11]. As máquinas de injeção são constituídas pelos seguintes sistemas funcionais: sistema de plasticização, sistema de fecho, sistema de controlo e comando do molde. O sistema de plasticização é constituído por tremonha, cilindro de plasticização,

resistências eléctricas de aquecimento e bico de injeção. A tremonha é um componente em forma de funil onde é abastecido o material dos silos de secagem, por um processo automático ou manual.

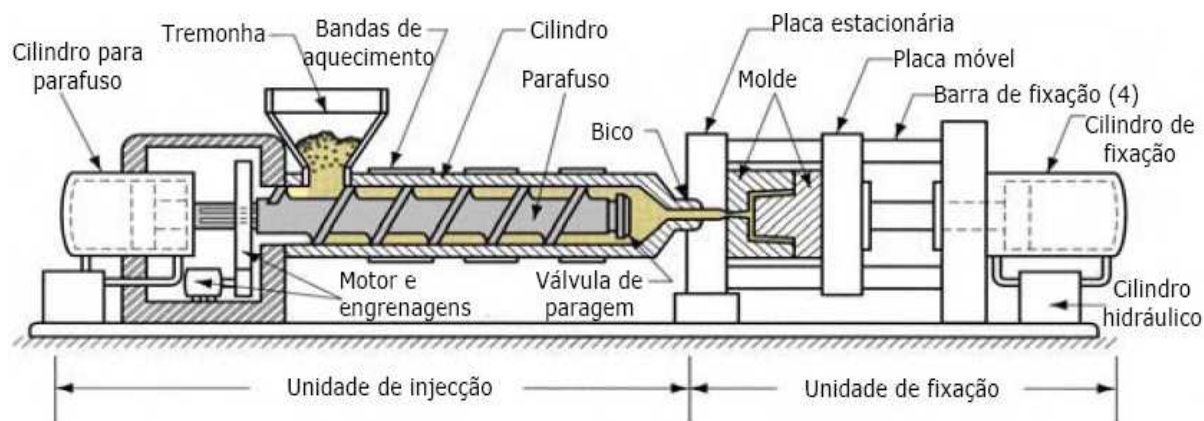


Figura 2.13 – Máquina de injeção e componentes constituintes

O fuso ou parafuso é essencialmente constituído por três zonas; a zona de alimentação, a primeira onde o material plástico é admitido e inicia o processo de aquecimento, passando de partículas sólidas para um massa fundida. A zona de compressão, onde o material é comprimido e passa para a terceira zona; zona de medição, o material deposita-se à frente do fuso, antes de ser “injectado” no interior do molde. O fuso tem um movimento de rotação, para misturar (homogeneizar) o material e um movimento de axial para introduzir o material no molde. O bico de injeção será um componente que está inserido no fuso e estabelece o canal de ligação do material entre o fuso e o molde, este poderá ser aberto ou com válvula de retenção de material.

A unidade de abertura e fecho é constituída pelos pratos fixos e pratos móveis: o prato fixo, encontra-se junto ao fuso, onde é fixa a parte de injeção do molde. O prato móvel, fixa a outra metade do molde, geralmente o lado da extracção. Neste está acoplado o sistema de extracção. É este componente que permite a abertura e fecho do molde.

O sistema mecânico de extracção, permite accionar o sistema de extracção do molde, e deste modo remover a moldação da zona moldante. O conhecimento das forças necessárias à remoção da moldação permite dimensionar de forma correcta este sistema e otimizar o ciclo de moldação.

As máquinas de injeção têm um conjunto de equipamentos auxiliares. Estes equipamentos auxiliares permitem efectuar o interface entre os diversos equipamentos nomeadamente, máquina de injeção e o molde. Algumas desses exemplos são, os equipamentos de refrigeração, os sistemas de fixação do molde à máquina, os sistemas de secagem de matérias-primas, os sistemas de abastecimento de matéria-prima, os sistemas de canais quentes e por fim os sistemas integrados de extracção e separação de peças. No processamento de peças plásticas deste trabalho foram utilizadas os seguintes equipamentos: Máquina de injeção EuroInj D80, refrigerador Termobox TB-M e o tremonha Yann Bang.

2.3 Moldes de injeção para produção de componentes plásticos

O molde, durante o processamento está sujeito a um conjunto de esforços mecânicos, nomeadamente, a força de fecho do molde, pressão de injeção, segunda pressão e força de extracção da peça plástica. Pormenorizamos de seguida as principais solicitações:

Força de fecho da máquina: Parâmetro que pode ser ajustado no processo, e que impede que o molde abra durante a fase de injeção, ou seja enchimento do molde e dê origem a fugas de material no interior do molde ou rebarbas na peça;

Pressões de injeção e pressurização: Pressões que são “transmitidas” ao material plástico que está na câmara do fuso fundido (estado viscoso), e que o obrigam a entrarem na cavidade do molde e preencher a zona moldante;

Forças de abertura: esforço no sentido longitudinal da máquina que é exercido sobre o prato fixo da máquina e que visa abrir o molde para se retirar a peça. Esta força geralmente é elevada pois a peça está bastante compactada no interior do molde, o que representa uma boa adesão à parede de cavidade que é a primeira a separar-se da peça.

Forças de extracção: Pressão exercida por uma haste ou KO na chapa de extracção do molde, que por sua vez transfere para os componentes de extracção/extractores. Estes “empurram” a peça da bucha liberta-a do molde; processo que se designa por extracção. No caso concreto deste projecto, esta pressão é exercida na peça por meio duma haste extractora associada a um aro extractor. Este é um dos objectivos deste trabalho, quantificar as forças envolvidas nesta fase do processo de injeção.

O molde de injeção, mais concretamente as zonas moldantes, estarão de igual modo sujeitas a solicitações devidas à injeção de material plástico. A injeção com o material plástico fundido faz-se, geralmente a uma temperatura superior a 200° C (função do tipo de material), seguindo-se o arrefecimento rápido, em que o fluido que circula nos circuitos de refrigeração do molde tem com objectivo baixar a temperatura das zonas moldantes. A temperatura do molde será programada para uma gama de temperaturas entre os 20° C e os 80° C, função do material plástico a processar. Consequentemente, devem ser utilizados materiais, nas zonas moldantes, com boa condutibilidade térmica. Um dos objectivos deste trabalho recai sobre o molde, nomeadamente sobre o sistema de extracção.



Figura 2.14 – Exemplo 3D de um molde

Fundamentalmente, o molde é constituído por duas partes injeção (parte fixa) e a parte de extracção (parte móvel). Estas são as nomenclaturas utilizadas nos moldes convencionais, uma vez que existem outros tipos de moldes, onde a extracção poderá estas estar acoplada na cavidade (a injeção e a extracção podem ser efectuadas no mesmo lado).

Neste trabalho, foi projectado e fabricado um molde para a peça desenvolvida. No projecto do molde pretendeu-se ter um molde com canais frios, com um sistema permutável de buchas cavidades e com um sistema de extracção eficaz, constituído por um sistema de aro extractor. Na figura 2.15, está representado o desenho 3D do molde com a versão 1 (3 corpos) montada na estrutura comum das três versões (versão 1, 2 e 3).

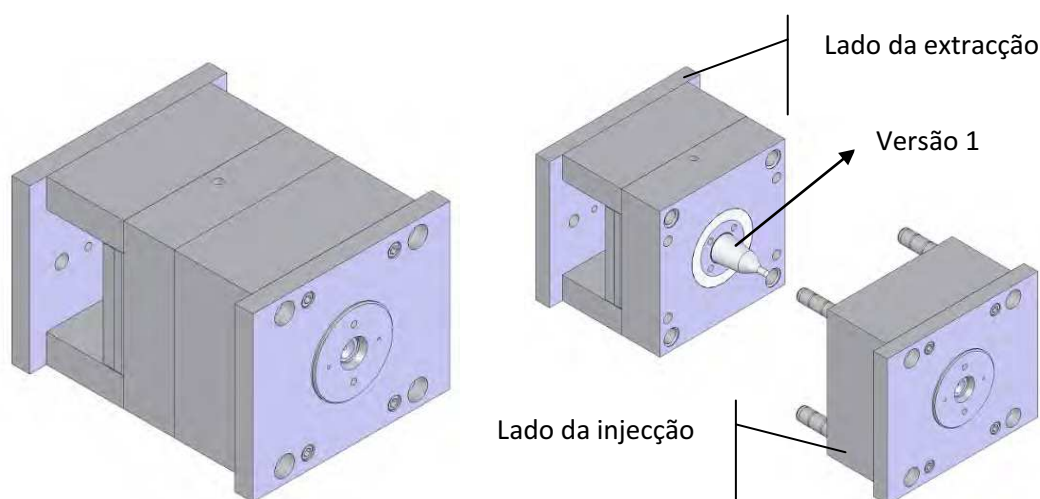


Figura 2.15 – Desenho 3D do Molde do Funil (Versão 1) desenvolvido e fabricado para a realização deste trabalho.

De seguida, são apresentados os principais componentes de um molde bem como a sua função. Pode-se considerar um molde de injeção como sendo constituído por duas metades, lado da injeção e lado da extracção.

Lado da injeção (parte fixa)

Injector – componente centrado (com o molde, lado da injeção) e com o bico injeção da máquina e por onde se efectua o escoamento do plástico para dentro da cavidade moldante do molde;

Anel de centragem - Componente circular que permite centrar o molde com a máquina de injeção, com o bico de injeção;

Cavidade - Um dos elementos mais importantes, pois nesta está definida a zona moldante mais visível das peças, com o textura ou acabamento superficial especificada;

Bico quente – Este componente só se encontra nos moldes com canais quentes. O bico de injeção permite que o fluido escoe no seu interior praticamente à mesma temperatura a que se encontrava no fuso, isto porque tem resistências eléctricas e termopares no seu interior que permitem controlar as temperaturas. Este pode “injectar” o material directamente na peça ou num canal (gito);

Gito – canal de condução do material fundido até ao ponto ou pontos de injeção da cavidade moldante da peça plástica a processar;

Carburador/distribuidor – situado perto da cavidade, substitui o injetor nos moldes chamados de bico quente. Este conduz o fluido plástico desde o bico de injeção da máquina até aos bicos quentes do molde. Este sistema é controlado por resistências e termopares;

Guias – permitem que o molde feche e abra sempre guiado para que a zona de ajustamento seja sempre a mesma, de forma a evitar desalinhamentos da junta;

Guias de deslize – Geralmente são quatro, uma a cada canto do molde e permitem que o molde seja guiado no seu movimento de abertura e fecho.

Placas isolantes – Permite isolar as chapas exteriores do molde dos pratos da máquina e desta forma mantêm o molde a temperatura constante sem dissipar calor por condução.

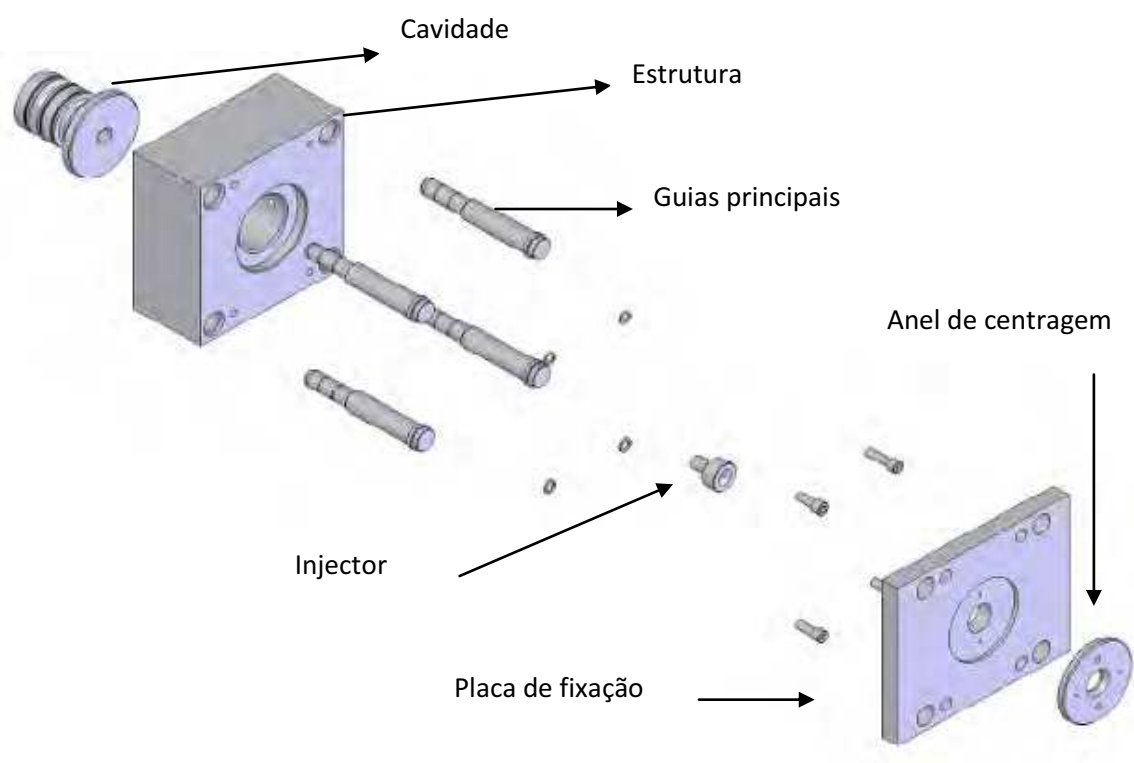


Figura 2.16 – Vista 3D explodida dos componentes do molde - parte de injeção

Lado da extracção (parte móvel)

Casquilhos – permitem o centramento com as guias;

Guias Inclínadas – permitem que os elementos móveis deslizem nas barras de deslize aquando a abertura/fecho do molde;

Bucha – elemento principal do lado da extracção, moldante, onde se situa a extracção. A moldação deve ficar neste elemento moldante para ser possível realizar o processo de extracção;

Extractores – Elementos que permitem desmoldar as peças da bucha. Poderão ser circulares, laminares ou tubulares;

Aro extractor – componente que substitui os extractores, e são fixos às chapas de extracção por pernos;

Postiços – componentes que estão embutidos na bucha que permitem moldarem zonas específicas;

Elementos móveis – elementos que permitem moldar zonas que não seriam possíveis apenas com bucha e cavidade (negativos). Estes permitem ter um movimento quando se dá a abertura do molde ou posteriormente por accionamento mecânico;

Pilares de suporte - permitem suportar o molde do lado da extracção de forma que a chapa da bucha tenha rigidez para suportar os esforços envolvidos no processo de injecção por moldação;

Chapas de extracção – são duas e são aparafusadas entre si, permitindo alojar os extractores ou haste extractora;

Haste de extracção ou KO – permite avançar e recuar as chapas de extracção;

Barra de transporte – permite transportar o molde em segurança;

Barra de fecho – permite “trancar” as duas metades do molde para se poder movimentar o molde sem que se abra;

Refrigeração – Sistema de furações realizados nas chapas moldantes (abaixo da superfície moldante), racores e mangueiras que permitem arrefecer ou aquecer o molde durante o processo de injecção. Ambos os lados do molde têm um sistema independente de refrigeração.

Na figura 2.17 pode-se observar os vários componentes acima descritos.

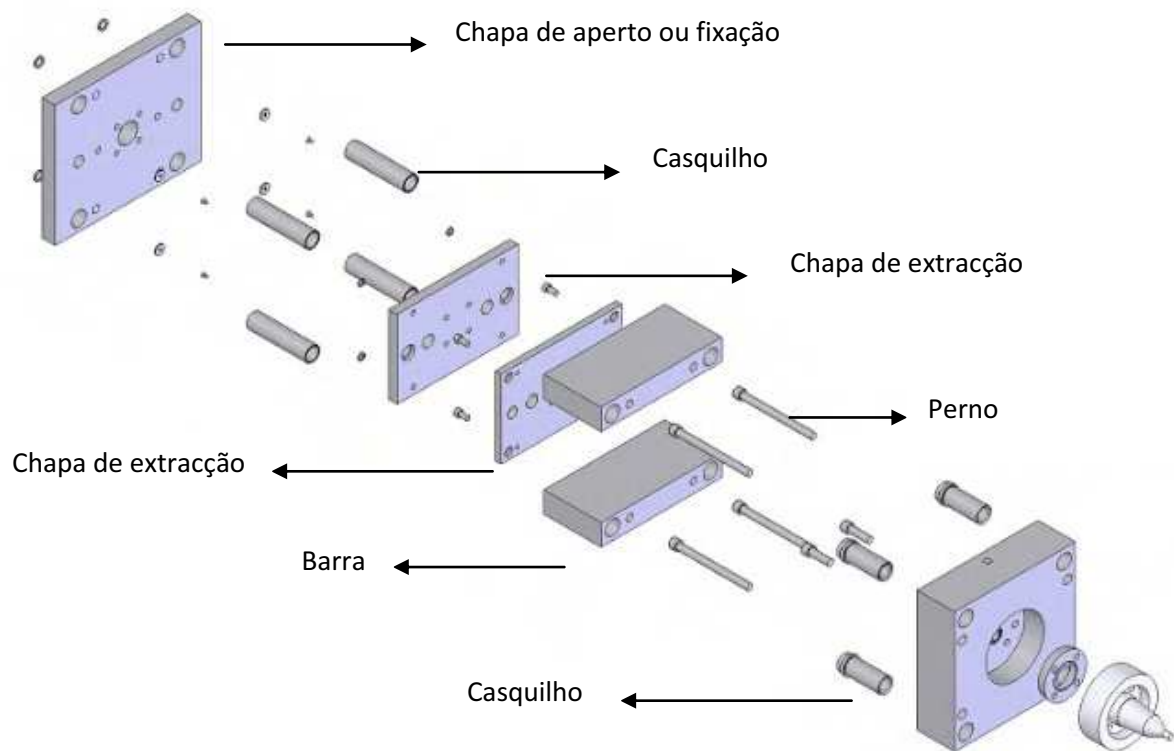


Figura 2.17 – Desenho 3D dos componentes do molde - parte de extracção

A estrutura da extracção do molde, a bucha (elemento moldante) e o aro extractor da versão 1 podem ser observados na figura 2.18.

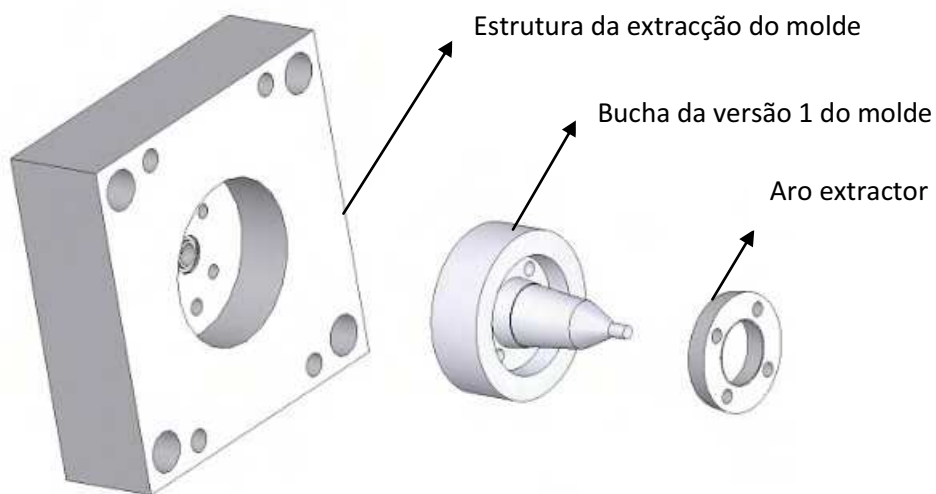


Figura 2.18 – Componentes do molde – Bucha, chapa e aro extractor

2.3.1 Sistema de extracção e forças de extracção

No projecto dum molde de injeção, é importante conhecer o valor das forças de extracção, para dimensionar de forma correcta o sistema de extracção. A determinação do valor destas forças de extracção poderá ter uma contribuição preciosa na selecção do sistema a adoptar para a extracção das peças plásticas processadas. O projecto e fabrico de moldes de injeção, para peças técnicas, envolvem conhecimentos do processamento de materiais por injeção, materiais plásticos, materiais utilizados no fabrico dos moldes, dimensionamento de sistemas de injeção e de extracção, de dimensionamento de sistemas de desenroscamento automático e elementos móveis. Estes sistemas mecânicos são geralmente actuados por sistemas hidráulicos ou pneumáticos, onde é importante conhecer as forças de extracção envolvidas no processo de extracção das peças plásticas processadas [12,13,14].

As forças de extracção são função de várias variáveis tais como: material plástico a processar; complexidade da peça plástica; condições de processamento por injeção; materiais utilizados na construção das zonas moldantes e acabamentos superficiais das zonas moldantes; qualidade geral de projecto e fabrico do molde [10,15,16,17]. No projecto de um molde de injeção é importante, como já referido, conhecer as forças envolvidas na extracção das peças plásticas. Uma abordagem para prever a força de extracção em geometrias simples [16,13], baseou-se em calcular a força de extracção (F_{ext}) como o resultado do produto da pressão de contacto (P_c) que actua sobre na superfície do núcleo, a área de contacto (A_c), entre o plástico e o aço no instante da extracção, e o coeficiente de atrito (μ). Esta abordagem é considerada em literatura técnica para o projecto e fabrico de um molde de injeção de materiais termoplásticos [16,18].

$$F_{ext} = \mu \times P_c \times A_c \quad (2.1)$$

De acordo com alguns estudos realizados [14,16], o coeficiente de atrito estático entre as superfícies em contacto plástico/aço é um factor muito importante a considerar no processo de extracção de peças plásticas processadas. Os primeiros investigadores Menges e Bangert [14,16], avaliaram o coeficiente de atrito estático em condições idênticas às que ocorrem durante o processo de extracção de peças plásticas. Nesse estudo, demonstrou-se que o coeficiente de atrito estático é influenciado pela rugosidade das superfícies moldantes, temperatura de extracção, tempo de arrefecimento, temperatura do fundido e pressão de compactação.

No virar do século, Wang, H.[8,16], apresentou uma abordagem numérica que efectuava uma previsão das forças envolvidas no processo de extracção de molde de injecção e optimização do posicionamento dos extractores no sistema de extracção [19,16], efectuando uma também uma abordagem às transferências térmicas que ocorrem durante o processo de injecção por moldação. O sistema de extracção de um molde de injecção de moldação, deve ser dimensionado para superar os esforços, que resultam do processo da extracção da peça [16]. Entre estas forças encontram-se; as forças de atrito e aderência geradas entre a zona moldante e peça plástica; a força de vácuo entre o sistema de extracção do molde e a peça plástica durante a fase de extracção e as forças de atrito entre os vários componentes do sistema de extracção do molde, dependendo principalmente das características tribológicas do sistema.

2.3.2. Modelos de previsão de forças de extracção

A moldação por injecção é um processo de transformação muito desenvolvido para a obtenção de peças em plástico, conforme já descrito anteriormente. A geometria das peças plásticas é concedida através de moldes fabricados para o efeito. Na fase de extracção do molde, as peças plásticas são obrigadas a separar-se das superfícies moldantes das buchas (machos). O êxito desta fase, está relacionado com parâmetros de processamento, ângulos de saída, acabamento das superfícies moldantes, propriedades do material à temperatura de extracção bem como o dimensionamento do sistema de extracção. Na fase de extracção de peças plásticas processadas por injecção, existe atrito entre o plástico (peça) e o material do molde (aço). O conhecimento das forças envolvidas neste processo é indispensável para o correcto dimensionamento dos sistemas de extracção do molde, para garantir a qualidade funcional e dimensional das peças não seja prejudicada [15].

O coeficiente de atrito plástico/aço está relacionado com o tipo de acabamento superficial das zonas moldantes do molde e da temperatura destas peças no momento da extracção.

De forma a obter-se uma boa produtividade em moldação por injecção, procura-se minimizar o tempo de arrefecimento, extraíndo as peças a temperaturas mais elevadas. Quando se inicia a fase de arrefecimento, o plástico contrai sobre a bucha e reproduz o acabamento da superfície moldante, pois o coeficiente de dilatação linear dos termoplásticos situa-se entre $0.6-1.4 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ e os dos aços empregues na construção das zonas moldantes situa-se na ordem de $12 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, em grandezas bastante diferentes [15].

Na desmoldação de peças em plástico, a aplicação de uma força tangencial ao contacto leva as peças a separarem-se das superfícies moldantes e ao início do movimento relativo de extracção. Deste modo, verifica-se uma situação de contacto tribológico entre as paredes das buchas moldantes e a peça moldada, em que o atrito estático deve ser vencido para se dar início ao deslizamento da peça. O coeficiente de atrito estático, em geral, é maior do que o coeficiente de atrito dinâmico. Caso as superfícies moldantes tenham uma rugosidade superficial com valores elevados existe o fenómeno de sulcagem, e caso contrário, valores de rugosidade superficial muito baixos tendem a facilitar a adesão entre o aço e a peça plástica. Então, deverá ser estabelecido um valor de rugosidade superficial no aço para que, função do tipo de material polimérico e condições de contacto, minimizará o coeficiente de atrito estático. Conhecidas as condições de contacto para cada tipo de polímero, as forças de extracção (em moldes injecção) podem ser previstas e o dimensionamento do sistema de extracção otimizado.

Vários investigadores [20], desenvolveram equações da força para a extracção de peças processadas por moldação por injecção baseados em modelos mecânicos ou termomecânicos. As maiorias destas equações derivam da equação 6.1.

$$F_R = f \times P_C \times A \quad (2.2)$$

Em que: F_R - força da extracção; f - coeficiente de atrito entre o molde e a peça; P_C - pressão do contacto da peça com o molde e A - área de contacto.

Quando a área é possível medir de forma directa, o coeficiente de atrito e a pressão de contacto podem ser estimados. Alguns modelos de previsão e variações desses modelos são apresentados de seguida.

Menges [19] desenvolveu uma equação da força de extracção num cilindro define a pressão do contacto como:

$$P_A = E(T) \times \Delta d_r \times S_m \quad (2.3)$$

Logo a força de injecção será dada por:

$$F_R = f \times E(T) \times \Delta d_r \times S_m \times 2\pi C \quad (2.4)$$

Em que: $E(T)$ - módulo elasticidade do material da peça plástica à temperatura de extracção, Δd_r - mudança relativa no diâmetro da peça imediatamente depois da extracção da peça; S_m - espessura da peça plástica e C - comprimento da peça em

contacto com a bucha do molde, de acordo com Menges, Michaeli, & Mohren 2001 [21].

Na base desta expressão está a contracção das superfícies das peças plásticas em contacto com a zona moldante (aço), em que as tensões se acumulam nas secções transversais da peça e como resultado surgem forças normais às superfícies contraídas. A variação no diâmetro da peça plástica, imediatamente após a extracção, será usada como uma medida da tensão elástica na secção transversal da peça quando está ainda na bucha. A tensão multiplicada pelo módulo de elasticidade, a área de superfície em contacto, e um coeficiente de atrito considerado, dará uma força estimada da força necessária para a remover da bucha do molde.

Malloy e Majeski (1989) [22], incluíram na equação da força da extracção, usada por Menges, e, a versão mais detalhada dada Glanvill [22], em que foram analisadas as variáveis de extracção das peças plásticas, no projecto de um sistema de extracção de molde de injecção.

Burke e Malloy (1991) [19] analisam aspectos relativos à pressão do contacto e coeficientes de atrito. Estes, observaram que a força da extracção é influenciada pelo tempo de refrigeração, pelo revestimento da superfície moldante, pela direcção de polimento das superfícies moldantes e pelos ângulos de saída.

Glanvill (1971) [23], é uma outra referência na análise das forças da extracção. No seu modelo define a pressão do contacto como:

$$P_c = \frac{\alpha \times (T_m - T_e) \times E}{\frac{1}{2 \times t} - \frac{\nu}{4 \times t}} \quad (2.5)$$

Em que: T_m - temperatura de transição; T_e - temperatura de extracção do termoplástico; t - espessura e ν - coeficiente de Poisson do plástico.

Assim a equação da força de extracção seria dada por:

$$F_R = \frac{\alpha \times (T_m - T_e) \times E \times \pi C \times f}{\frac{1}{2 \times t} - \frac{\nu}{4 \times t}} \quad (2.6)$$

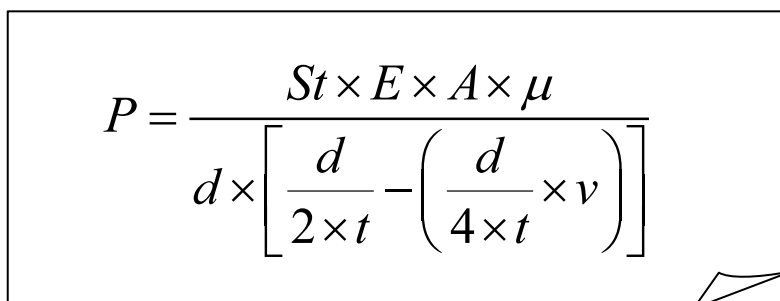
Em que: f - coeficiente de atrito entre o molde e a peça; C - comprimento da peça em contacto com o bucha (núcleo) do molde.

No "Manual de moldagem por injeção; Dominick V. Rosato, Donald V. Rosato, Marlene G. Rosato. 3 ed. ISBN 0-7923-8619-1" [24], é apresentado o modelo (equação 2.7) para o cálculo da força de extracção.

$$P = \frac{St \times E \times \mu \times A}{d \times \left[\frac{d}{2 \times t} - \left(\frac{d}{4 \times t} \right) \times \nu \right]} \tag{2.7}$$

Em que: *P* - Força de extracção; *E* - Módulo de elasticidade; *A* - Área total de contacto entre o molde e a superfície que contrai na direcção da extracção; μ = coeficiente de atrito entre o plástico e aço; *d* - diâmetro da circunferência em torno do núcleo/bucha; *t* - espessura da peça plástica; ν - coeficiente de Poisson do plástico; *St* - contracção térmica do plástico em todo o diâmetro *d*; *St*- diferença de temperatura coeficiente de dilatação térmica entre o plástico e temperatura de extracção multiplicado por *d*.

Na figura 2.19 pode-se observar o modelo para cálculo das forças de extracção. Esta expressão, tem por base o modelo de Glanvill [23] para a força de extracção e pode ser encontrada no guia da Unlimited DSM; Design Guide - performance and value with engineering plastics [26,27].



$$P = \frac{St \times E \times A \times \mu}{d \times \left[\frac{d}{2 \times t} - \left(\frac{d}{4 \times t} \right) \times \nu \right]}$$

Figura 2.19 - Modelo para cálculo das forças de extracção [27]

No modelo de Glanvill, para a força de extracção, assume-se que o núcleo/bucha não tem rugosidade (é liso) e que a peça contrai em contacto com este elemento moldante. Esta equação, para determinar a força de extracção só se aplica em algumas geometrias de peças plásticas, já que não entra em conta com as propriedades e características dos moldes de injeção. Estes aspectos alertaram para a necessidade de se desenvolver um modelo que fosse versátil e mais preciso. Um modelo para determinar a força de extracção deverá ter em conta as contribuições de factores tais como a contracção e o perfil de rugosidades das superfícies moldantes.

Pontes et al 2001, Pontes, Brito and Pouzada 2002, Pontes, et al 2002 [12,15], desenvolveram um modelo termo-mecânico para materiais amorfos. O modelo assume que as tensões em cada camada da peça plástica se iniciam quando as camadas solidificam, e a relaxação da peça plástica será insignificante por causa da velocidade de arrefecimento elevada.

$$\bar{\sigma}_{\theta\theta} = \frac{E(T_e)}{1-\nu} \times (-\beta \bar{P}_s + \alpha(T_s - \bar{T}_e)) - \frac{E(T_e)}{1-\nu^2} \times \frac{t}{D_m} \times \delta_r \Big|_{t_r}^{t_e} \quad (2.8)$$

Em que: $\bar{\sigma}_{\theta\theta}$ - tensão média circunferencial antes da extracção, β é compressibilidade, \bar{P}_s - pressão exercida na camada de polímero, o D_m - espessura do centro de coordenadas, δ_r - contracção da espessura da peça, t_e - tempo de extracção e t_r^* - tempo de solidificação.

O primeiro termo desta equação, representa os efeitos induzidos pela pressão exercida no polímero, o segundo termo representa contracção e o terceiro termo representa a contracção da espessura da peça. Os autores, deste modelo, concluíram que a força de extracção diminuía com o aumento da temperatura da superfície de extracção da peça (poliestireno). Aumentando a pressão de compactação (ou pressurização) diminui no caso dos materiais utilizados, Poliestireno, polipropileno e policarbonato. Os resultados experimentais obtidos por Pontes [16] estão de acordo com o modelo por este apresentado.

De acordo com Pontes 2002 [16], existe uma ligeira variação do diâmetro resultante do ângulo de desmoldação/saída, para permitir a extracção da peça da bucha do molde de injeção. No instante de extracção, há um campo de pressão, P_c , que actua na superfície interna da peça plástica. Quando a peça é extraída da bucha do molde, a força de extracção F_e , deve superar a força de atrito μN , onde μ é o coeficiente de atrito considerado como uma constante, gerados pela pressão de contacto que actua na peça plástica.

A força normal N , pode ser obtida pela integração da pressão de contacto com base na área total de contacto entre a peça plástica e o núcleo. Assim, considerando que o ângulo de projecto é pequeno, a força de extracção pode ser calculado como:

$$F_e = \mu \int P_c \cdot dA \quad (2.9)$$

$$dA = \frac{2\pi r(x) dx}{\cos(\alpha)} \quad (2.10)$$

$$Fe = \mu \frac{2\pi H_{part}}{1-\nu} e^{\overline{(Te)}} \int_0^L \left(-\frac{1}{3} \ln \left(\frac{V(x,r,te)}{Vs(X,r)} \right) - \frac{H}{(1+\nu)2Rm} Sh_{r(t)} \Big|_{r'} \right) dx \quad (2.11)$$

A partir da equação 6.11 Pontes [16], pode-se observar que a força de extracção está directamente dependente do módulo de elasticidade à temperatura de extracção, do coeficiente de atrito que é aqui considerado como uma constante, da espessura da peça e da variação média do valor de contracção (volume da peça entre a solidificação e o tempo de extracção). O último termo do integral é incluído, se a peça contrair na direcção da espessura. Pode surgir devido a tempos ou pressões de compactação baixas, levando à redução da força necessária para extrair a peça plástica.

Kabanemi, et al [28], desenvolveram um modelo numérico de previsão da tensão residual, contracção e empenamento para materiais processados por injeção.

Wang, Kabanemi e Salloum [8], apresentaram uma abordagem numérica para prever as forças de extracção da peça e as forças de atrito envolvidas. Este estudo incluiu uma análise do processo de solidificação por elementos finitos (termoviscoelásticos) para avaliar as tensões relaxação de polímeros em condições de estrangimento, tais como as verificadas nas cavidades, e previu a distribuição de força de extracção pelo número de extractores, bem como o seu posicionamento. O modelo funcionou bem para um polímero rígido (policarbonato), mas para o PEAD teve uma significativa pós-contracção e o empeno não foi tido em conta.

2.3.3 Contracção das peças plásticas

Para projectar no molde as dimensões nominais da peça plástica é necessária uma previsão da contracção da peça plástica. O tipo de material plástico a ser processado, é um dos aspectos a ter em conta no projecto do molde. Em peças de elevada precisão, o valor de contracção terá de ser bem conhecido uma vez que as tolerâncias são apertadas e qualquer variação no processo induz variações dimensionais, que pode implicar peças fora de especificação e a sua rejeição. É importante poder estimar com exactidão as dimensões finais das peças técnicas processadas por injeção. Williams e Pacoast [29,16] em 1967, analisaram o efeito das variáveis de processamento por injeção, moldes e concepção das peças assim como a contracção das peças plásticas.

Existem dois tipos de contracção das peças plásticas; dentro do molde, ainda sob o efeito das zonas moldantes, e após a extracção, já sem qualquer contacto com o molde e arrefecimento em temperatura ambiente, esta conhecida por pós-contracção. A contracção é função da geometria da peça a processar, tipo de material termoplástico, tipo de sistema de refrigeração considerado, condições de processamento, pressurização ou segunda pressão durante a fase de compactação da peça plástica [16].

No projecto de moldes para injeção de materiais termoplásticos, é necessário conhecer o valor da contracção, não só para calcular as dimensões das zonas moldantes, mas também para projectar o sistema da extracção. A contracção da peça sobre as zonas moldantes, tem naturalmente influência no valor das forças de extracção da peça plástica. No presente trabalho, os valores da contracção das peças são analisadas com base nas dimensões finais das peças processadas. O efeito do tempo e da pressurização no valor da contracção, será outro dos itens de análise.

A contracção é geralmente caracterizada após a extracção da peça plástica do molde e estabilizada à temperatura ambiente.

$$C_i = \frac{D_m - D_p}{D_m} \quad (2.12)$$

A expressão para calcular a contracção da peça na direcção i , 2.12, será dada por (C_i) , em que (D_m) representa a dimensão da zona moldante do molde e (D_p) a dimensão da peça plástica.

2.4 Tribologia das superfícies moldantes

O atrito resulta da interacção entre as superfícies de dois corpos. Pela figura 2.20, pode-se observar as superfícies de contacto entre dois corpos, onde as áreas de contacto não correspondem exactamente à área teórica.

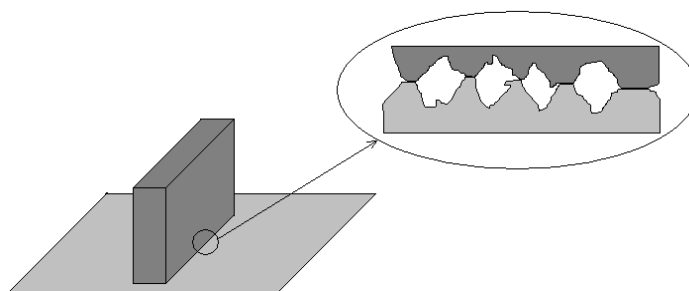


Figura 2.20 – Superfícies de contacto de dois corpos

O Coeficiente de atrito (μ) é o grau de rugosidade entre dois corpos. É uma grandeza adimensional, ou seja, não apresenta unidade. O atrito pode ser dinâmico ou estático. O Atrito dinâmico (μ_d) ocorre quando o corpo já está em movimento. É uma força contrária ao movimento, que aumenta conforme a pressão que é colocada entre o corpo e a superfície onde ocorre o atrito. Para iniciar o movimento de um objecto com velocidade constante, basta aplicar uma força que supere a força de atrito. Para acelerar o movimento, basta fazer uma força maior que a do atrito, de modo a gerar uma força resultante no mesmo sentido do movimento. Essa força de atrito pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$F_{at} = \mu_d \times N \quad (2.13)$$

Onde: F_{at} - Força de atrito (Newtons); μ_d - Coeficiente de atrito dinâmico e N - Força que é normal à direcção do movimento.

No caso de o corpo estar num plano horizontal, tem a mesma intensidade do peso do corpo (equação 2.14), ou seja,

$$N = m \times g \quad (2.14)$$

Onde: m - Massa do corpo e g - Aceleração da gravidade.

Ao movimentar um corpo desde o seu estado de repouso, observa-se que dependendo da força que é aplicada sobre ele, este não se desloca. Assim, há uma força que actua contra o movimento, denominada por atrito estático (μ_e). Se for exercida uma força igual ao atrito estático num corpo, ele não se irá mover pois as forças anulam-se. Então, pode concluir-se que a força de atrito estático é maior que a

de atrito dinâmico. Porém, na maioria dos casos, os seus valores são tão próximos que podemos considera-las aproximadamente iguais.

$$F_{at} = \mu e \times N \quad (2.15)$$

A expressão para o atrito estático é análoga à do atrito dinâmico (equação 2.15). Quando um corpo está sobre um plano inclinado e sob acção da gravidade, a intensidade da Força Normal que se usa para calcular a Força de Atrito corresponde à componente perpendicular ao plano de contacto. Atrito no plano inclinado, que pode ser calculada segundo a expressão:

$$N = P \times \text{sen}(\alpha) \quad (2.16)$$

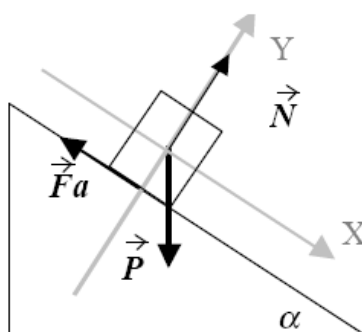


Figura 2.21 – Força de Atrito entre 2 corpos num plano inclinado

Em que: α - Ângulo de inclinação em relação à horizontal.

A Força Normal é uma força de reacção que a superfície faz num corpo que esteja em contacto com esta, essa força é normal à superfície. Face às actuais exigências dos mercados, são impostos determinados acabamentos superficiais para se atingirem não só a qualidade pretendida, mas também cumprirem com as funções para os produtos foram especificados. Desta forma, torna-se inevitável o estudo e a análise do estado de superfícies. Todas as superfícies dos mais variados produtos, que resultam dos diversos processos de fabrico apresentam sempre irregularidades. Estas podem ser classificadas por irregularidades de *Forma*, de *Ondulação* e *Rugosidade*.

Os erros de Forma e Ondulação são erros controláveis com recurso a instrumentos convencionais de medição tais como micrómetros, parquímetros, relógios comparadores, pórticos de medição, projectores de perfis, entre outros. Dentro destes erros estão as divergências de circularidade, de linearidade, ondulações, circularidade, entre outros.

Os erros de Rugosidade representam um conjunto de irregularidades que não são verificáveis de forma convencional. Estas irregularidades podem ser analisadas com aparelhos electrónicos, tais como o rugosímetro. A rugosidade desempenha um papel importante no comportamento dos componentes mecânicos nomeadamente na qualidade do movimento entre dois corpos, resistência ao desgaste, resistência à corrosão e resistência à fadiga. O acabamento de uma superfície maquinada é influenciado por uma série de factores, nomeadamente: variáveis de maquinação (parâmetros de corte), tipo de ferramenta, geometria da ferramenta, tipo de lubrificação e estratégias de maquinação (CAM). Outros factores podem contribuir para a ocorrência de defeitos nas superfícies maquinadas Huynh & Fan, 1992 [10].

Alguns conceitos definidos nas várias normas ISO e DIN permitem estudar e criar sistemas de avaliação do estado da superfície. Os conceitos mais importantes passam a ser descritos seguidamente.

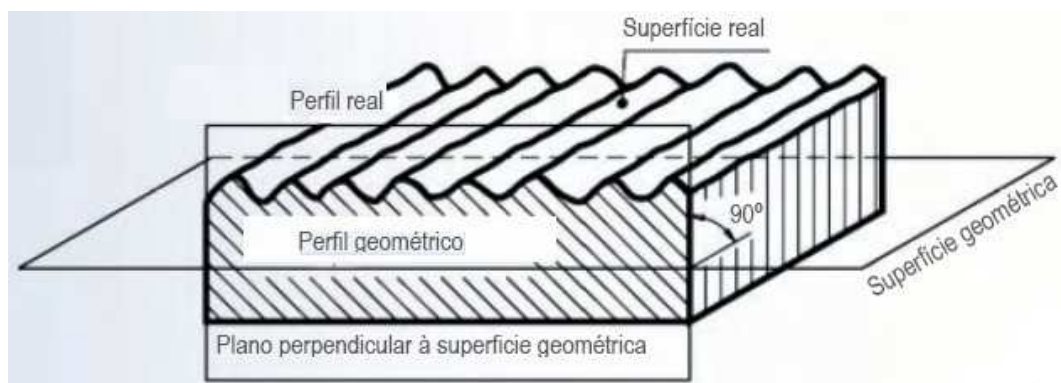


Figura 2.22 – Perfil real em corte [17]

Para tal, apresenta-se a figura 2.22 que representa um perfil em corte onde se poderão esclarecer estes conceitos [17]:

A superfície geométrica - é a superfície ideal projectada onde não existem erros de forma e acabamento, ou seja, sem imperfeições. Na realidade, a superfície geométrica é apenas uma referência. A *superfície real* - é a superfície que limita o corpo e o separa do meio envolvente, será esta que realmente observamos e medimos. É a superfície que resulta do método utilizado na sua produção; maquinação CNC, torneamento, rectificação, fresagem, electroerosão. A *Superfície efectiva* - é a superfície avaliada pela técnica de medição com formas

aproximadas da superfície real duma peça. É a superfície apresentada e analisada pelo aparelho de medição. Diferentes sistemas e condições de medição dão origem a diferentes superfícies efectivas. O *perfil geométrico* - é a intersecção da superfície geométrica com um plano perpendicular. Por exemplo, uma superfície plana perfeita cortada por um plano perpendicular, originará um perfil geométrico que será uma linha recta. O *perfil real* - é a intersecção da superfície real com um plano perpendicular. Neste caso, o plano perpendicular cortará a superfície que resultou do método de maquinação e originará uma linha irregular. O *perfil efectivo* - é a imagem aproximada do perfil real, obtido por um meio de avaliação ou medição.

Existem vários sistemas de medir a rugosidade sendo o sistema de linha média, o mais usado. A *linha média* (2.7) l_m - serve de base à definição de todas as grandezas de rugosidade. A Rugosidade média, é um dos conceitos mais antigos de rugosidade ainda em aplicação, normas DIN 4768/1, sendo definida como o desvio médio de um perfil em relação à linha média. A *Rugosidade Média* (2.8) R_a - não permite identificar a variabilidade dos valores locais da rugosidade ao longo da superfície medida.

Outro parâmetro médio da Rugosidade é o R_z (2.9), que de acordo com a norma ISO 468 e 4287, permite conhecer a distância média entre os cinco pontos mais altos dos picos e os cinco pontos mais baixos dos vales, encontrados no comprimento de base medido a partir de uma linha paralela à linha média.

A norma DIN 4768 define a média aritmética da profundidade individual da rugosidade de cinco comprimentos de base sucessivos. A profundidade máxima da rugosidade (2.10) - $R_{máx}$ - na DIN 4768/1 é definida como o valor máximo da profundidade individual da rugosidade detectada no comprimento de cálculo (l_m).

O Parâmetro R_k , DIN 4776, é gerado com base na curva de Abbot e Firestone com o recurso a uma técnica de filtragem que minimiza a distorção residual e permite avaliar a altura do núcleo dos perfis de rugosidade das superfícies analisadas. Permite relacionar o desgaste de uma superfície rugosa com o aumento da real de contacto [30].

As Normas Portuguesas - NP - que remetem para os acabamentos superficiais e estados de superfícies são a NP 3915-1:1994 (1ª Edição) Rugosidade de superfícies e a NP 3915-2:1994 (1ª Edição) Rugosidade de superfícies [30].

Na tabela 2.3. são apresentadas as principais expressões aplicadas nas medições das rugosidades.

Tabela 2.3 – Equações de rugosidades

Parâmetro	Abreviatura	Expressão	item
<i>Linha média</i>	<i>lm</i>	$lm = \min \int_0^1 Z(x)^2 \partial x$	(2.7)
<i>Rugosidade Média</i>	<i>Ra</i>	$Ra = 1 / lm \int_0^1 Z(x) \partial x$	(2.8)
<i>Parâmetro médio da Rugosidade é</i>	<i>Rz</i>	$Rz = 1 / 5 \left(\sum_{i=1}^5 Zpi - \sum_{i=1}^5 Zvi \right)$	(2.9)
<i>Profundidade máxima da rugosidade</i>	<i>Rmáx</i>	$Rz = 1 / 5 \left(\sum_{i=1}^5 Rzi \right)$	(2.10)

O estado de superfície das zonas moldantes das buchas do molde fabricado, foi avaliado com base nestes parâmetros.

2.5 Extensometria

Os extensómetros eléctricos fornecem um método excelente de converter deformações em quantidade eléctrica. Devido à precisão de medida e capacidade de monitorar a curva tensão-extensão, por exemplo, em ensaios destrutivos e não destrutivos, têm uma ampla utilização em trabalhos de investigação e de engenharia. As características das medidas com extensómetros podem ser resumidas no seguinte: alta precisão de medição, extensómetros com pequena dimensão, excelentes respostas aos fenómenos dinâmicos, fácil utilização; medições possíveis de realizar numa ampla faixa de temperatura, podem ser utilizados em ambiente com água e em atmosfera com gás corrosivo desde que tenham tido tratamento adequado. São, também, utilizados como elementos transdutores para medidas de várias quantidades físicas (forças, pressão, torque, aceleração, deslocamento).

2.5.1 Extensómetros - Princípio de funcionamento

A Lei de Hooke rege o comportamento mecânico dos materiais quando sujeitos a esforços. Quando uma força de tracção ou compressão é aplicada, gera-se no material uma tensão que provoca uma deformação, antes da rotura. Na maioria dos materiais, esta resposta é inicialmente elástica, isto é, a deformação sofrida desaparece quando a força deixar de actuar, deformação elástica. Nesta fase aplica-se a Lei de Hooke, onde a tensão é proporcional à deformação. Com o acréscimo dessa força, irá ter lugar uma deformação que já não será recuperada - trata-se de uma deformação plástica - descrita pela sua irreversibilidade. No caso da força se manter, o material irá deformar-se até à rotura. Estes três estágios da relação entre tensão e deformação, estão representados na figura 2.23 [31]:

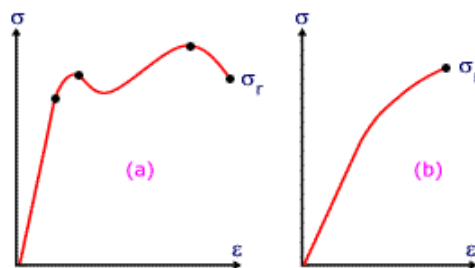


Figura 2.23 – Gráficos de Tensão versus Deformação [31]

A Lei de Hooke refere-se exactamente à resposta do material no domínio elástico. Segundo esta lei, existe uma proporcionalidade entre a força de resposta do material, F , e a variação dimensional ΔX , sendo esta proporcionalidade uma característica do material que quantifica a sua rigidez. A Lei de Hooke pode então ser representada pela expressão (2.17) e (2.18).

$$F = -k \times \Delta x \tag{2.17}$$

Considerando a área A onde está aplicada a força F e X_0 a sua dimensão inicial, podemos descrever;

$$\sigma = E \times \varepsilon \tag{2.18}$$

A esta característica chama-se Módulo de Elasticidade ou Módulo de Young (E). A tensão (σ) é a força aplicada por unidade de superfície:

$$\sigma = \frac{F}{A}; \text{ (N/m}^2\text{=Pa)} \quad (2.19)$$

A deformação é uma grandeza adimensional,

$$\varepsilon = \frac{\Delta X}{X_0}; X_0 \text{ é a dimensão inicial} \quad (2.20)$$

Assim, E pode ser descrito como;

$$E = \frac{(F \times X_0)}{(A \times \Delta x)} \quad (2.21)$$

Quando um dado material é traccionado, a força aplicada no material é proporcional á deformação causada na região elástica, mantendo uma relação constante entre a força externa e a deformação. Isto implica que a força para compensar a força externa é gerada internamente no material. A força por unidade de área é a tensão. Como símbolo da tensão, σ é usada para indicar tensões verticais e δ para as tensões de corte. Os materiais têm a propriedade de se alongarem quando traccionados e de se contraírem quando comprimidos. Supondo que um material é traccionado, e a quantidade de alongamento seja dada por Δl enquanto que o comprimento original seja l . A relação de alongamento $\Delta l/l$ é chamada deformação, não apresentando dimensão.

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (2.21)$$

Na figura 2.24, é apresentada a relação entre tensão e deformação de um provete de aço submetido a um carregamento de tracção. A tensão é proporcional à deformação entre a origem e ponto **a**, onde uma inclinação aproximadamente linear é obtida. Esta é a chamada região elástica onde se aplicam as leis de Hooke.

A relação tensão - deformação na região elástica é dada pela seguinte equação:

$$\frac{\sigma}{\varepsilon} = E \quad (2.23)$$

Onde: E é a constante de proporcionalidade, a qual é referida como módulo de elasticidade longitudinal ou módulo de Young.

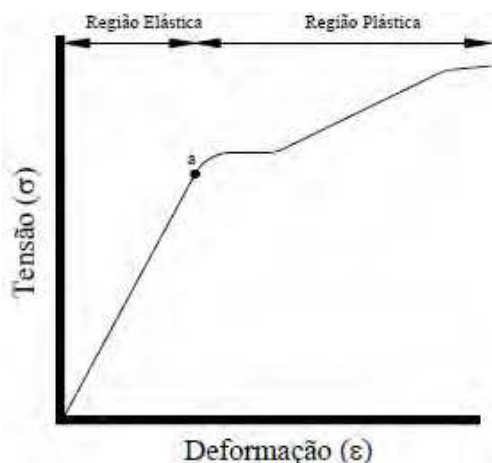


Figura 2.24 – Curva tensão - deformação

O extensómetro é baseado no facto de que os metais mudam a sua resistência eléctrica quando sofrem uma deformação.

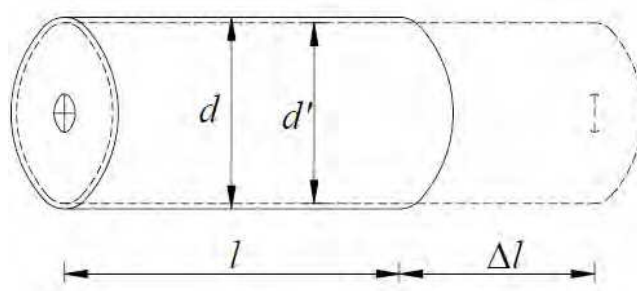


Figura 2.25- Deformação de um fio sob tracção

Na figura 2.25, a linha contínua mostra parte de um fio metálico, usado nos extensómetros, onde o l é o comprimento original antes da deformação, e este apresenta uma resistência eléctrica R . A linha descontinua apresenta o fio metálico alongado, o seu comprimento agora é igual a $l + \Delta l$ e resistência igual a $R + \Delta R$. A resistência eléctrica R é dada por:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} \tag{2.24}$$

Onde: A é a área da secção transversal do fio; ρ é a resistividade do material do fio.

OS circuitos eléctricos são aplicados para medidas de deformação com extensómetros montados em provetes, para medir as variações de resistência dentro de um circuito eléctrico. O circuito é geralmente chamado de ponte de *Wheatstone*.

Este é o circuito mais frequentemente usado e o que apresenta maior precisão para medidas de pequenas variações de resistência.

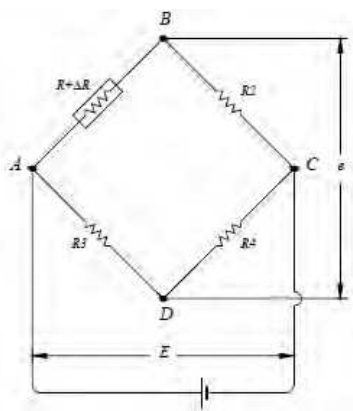


Figura 2.26- Circuito em ponte de Wheatstone

Tendo por base as noções de Física em que as resistências em série são divisoras de tensão, e que a tensão entre as resistências em paralelo não varia existindo uma variação de corrente.

2.5.2 Tipos e constituição dos extensómetros

Um tipo comum de extensómetro é mostrado na Figura 2.27. Uma lâmina metálica resistiva de espessura de alguns microns é fixada num material electricamente isolado chamado base. Porções desnecessárias do material da lâmina são eliminadas pelo processo de foto-gravação, de acordo com o padrão desejado do extensómetro. De seguida faz-se a soldadura dos fios de saída. Geralmente, os extensómetros são feitos para ter uma resistência de 120Ω , mas existem extensómetros disponíveis com resistências de 350Ω , 500Ω , 1000Ω .

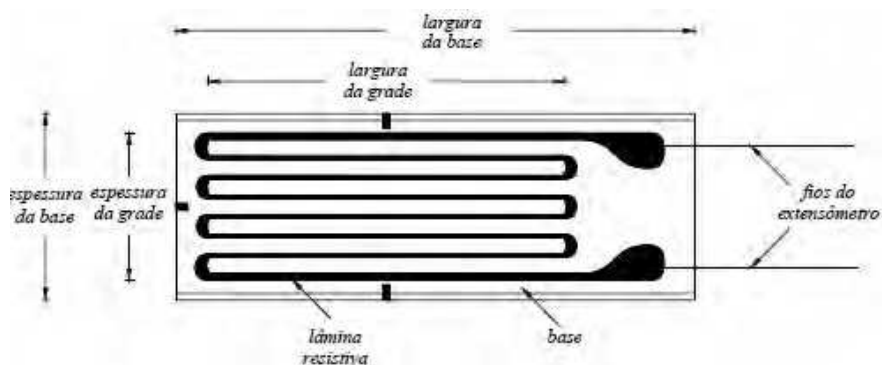


Figura 2.27- Esquema do extensómetro

O extensómetro exhibe uma mudança de temperatura devido á deformação nele causada, assim como a resistência também é alterada pela mudança de temperatura. Diferentes métodos de medição são disponíveis para eliminar tais efeitos, mas muitos dos extensómetros disponíveis hoje em dia apresentam uma auto-compensação, feitos para sofrerem menos os efeitos da temperatura. Existem muitos tipos de extensómetros disponíveis dependendo dos propósitos de aplicação, tamanhos e materiais, e eles são geralmente classificados por:

Classificação de acordo com o material resistivo: fios resistivos; lâmina; semiconductor; semiconductor por difusão.

Classificação de acordo com o material de base: base de papel; base de baquelita; base de poliéster; base de poliamida;

Classificação de acordo com a sua configuração: uniaxiais; biaxiais; múltiplos eixos (roseta); padronização especial.

Na tabela 2.4 são apresentadas algumas das especificações a considerar na selecção de extensómetros.

Tabela 2.4 – Especificações sobre tipos de extensómetros.

Tipo (base)	Temperatura de operação (°C)	Alongamento máximo (%)	Corrente máxima (mA)	Mudança da resistência do extensómetro com a idade	Principais aplicações
Lâmina (Phester)	-50 ~ +180	2	30 ou menos	Pequena	Medidas gerais de tensão, transdutores, medidas de tensões residuais.
Lâmina (poliamida)	-50 ~ +200	2	30 ou menos	Pequena	Medidas gerais de tensão, transdutores, medidas de tensões residuais.
Lâmina (poliamida para grandes deformações)	-10 ~ +120	8 ~ 10	30 ou menos	Pequena	Medidas de deformações plásticas
Fios * (papel)	-50 ~ +80	1,2	25 ou menos	Ligeira variação	Medidas usuais de tensões
Fios (poliéster)	-50 ~ +170	1	25 ou menos	Pequena	Medidas usuais de tensão em estruturas no campo

No caso de medidas de deformações dinâmicas o extensómetro deve apresentar materiais resistentes à fadiga, devido ao número repetitivo das variações das grandezas. Os extensómetros mais usados apresentam alongamento máximo de 2%, porém extensómetros de finalidade especial pode apresentar limites maiores que este. A ligação dos fios pode ser feita directamente nos terminais dos extensómetros, ou

por intermédio de terminais de ligação colados nos provetes. A soldadura dos fios no extensómetro é feita com solda de estanho sem o uso de pastas comuns ou ácidos para facilitar a soldadura. Podem ser utilizados os ferros de solda para ligação dos fios nos extensómetros, porém, o ideal é a utilização de estações de soldadura com temperatura controlada. Todos os equipamentos de leitura de deformações disponíveis baseiam-se no circuito em ponte de Wheatstone. De forma, que é possível montar tais circuitos com resistências de precisão para fechar a ponte nos casos de ligações em 1/4 e 1/2 pontes, bastando um multímetro de precisão para realizar as leituras de variação de tensão para os incrementos de carga. Geralmente, em multímetros digitais mais modernos é possível reajustar a leitura em zero antes da introdução de cargas. Assim, estes fornecem o valor da variação de tensão para cada incremento de carga. O mesmo multímetro que fará a leitura de saída pode ser usado para verificar a tensão de entrada na ponte. Tendo o circuito montado, sabe-se da Equação 2.24, que a deformação total de saída será por:

$$-\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4 = e \cdot \left(\frac{4}{K.E} \right) \quad (2.25)$$

O valor entre parênteses da última equação é constante e, portanto é um factor multiplicativo da variação de tensão e que transforma esta em deformação.



Figura 2.28 – Interface entre o sistema de aquisição de dados e o equipamento de injeção

Na figura 2.28 é apresentado o sistema de aquisição de dados e o equipamento de injeção. O sistema de aquisição de dados efectua a leitura das extensões e regista-os na base de dados. Posteriormente efectua-se o tratamento de dados e obtêm-se as de forças de extracção das peças plásticas processadas. O sistema de aquisição de dados é conectado com o software labview 8.1, que monitoriza os valores das extensões.

Capítulo 3

Design do Produto: Análises reológicas e estruturais

Com este capítulo pretende-se dar a conhecer os passos efectuados e as etapas do design da peça através do software de modelação e as consequentes análises reológicas e estruturais.

3.1 Design do Produto

No design e desenvolvimento do produto foram elaborados vários esboços antes de se obter a geometria final da peça, com base nas especificações e requisitos pretendidos.

A peça que serviu de base para o desenvolvimento do produto final foi um funil de laboratório, figura 3.1. Procurava-se um sólido de revolução com corpos de diferentes ângulos, e que fosse possível reproduzir utilizando um processamento por injeção.



Figura 3.1 – Funil de laboratório

Foram usadas técnicas de digitalização 3D para obtenção do primeiro modelo, e técnicas de prototipagem rápidas para obtenção dum modelo inicial.

O modelo 3D foi construído utilizando-se os software de Design; CATIA V5R16 e o SolidWorks 2007.

A figura 3.2 representa o modelo inicial e a evolução da geometria da peça até se atingir a forma final desejada.

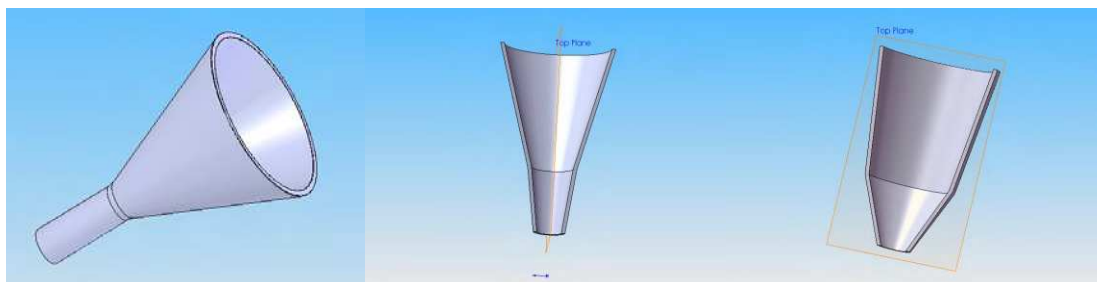


Figura 3.2 - Modelo inicial e revisão do modelo

A peça apresentada tem a forma de um funil, figura 3.3, constituída por 3 corpos. A finalidade seria permitir obter por injeção cada uma das formas individualmente. Avaliando a contribuição de cada peça para o valor da força de extracção. Desta forma, será possível comparar a força de extracção da peça constituída pelos vários corpos e a força de extracção de cada corpo.

O objectivo desta geometria será então, avaliar a contribuição de cada um destes corpos na fase de extracção da peça e por conseguinte a sua influência na força de extracção total.



Figura 3.3- Modelo Final: Versão 1 [3 corpos]

A versão 2 da peça plástica têm 2 corpos, figura 3.4. Esta versão corresponde à versão 1 sem o corpo de maior diâmetro, mantendo-se as dimensões das geometrias comuns.

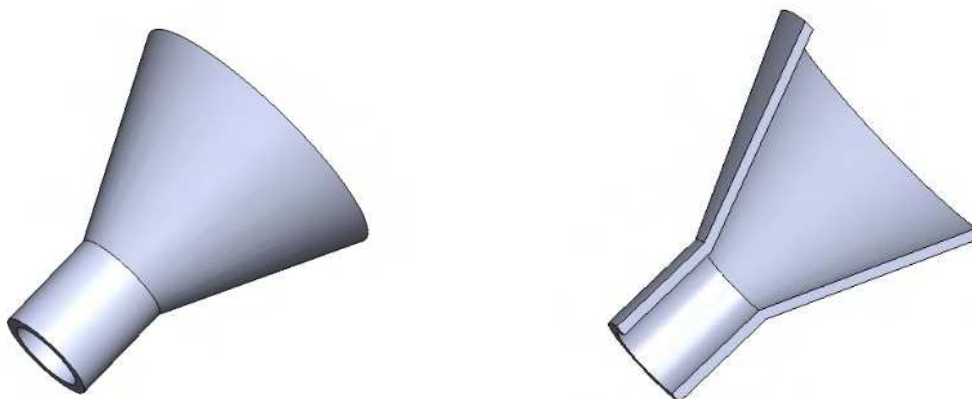


Figura 3.4- Modelo Final: Versão 2 [2 corpos]

Quanto à versão 3, figura 3.5, apenas tem um corpo. Este, será o de diâmetro inferior, partilha das dimensões com os restantes e terá uma inclinação muito pequena.

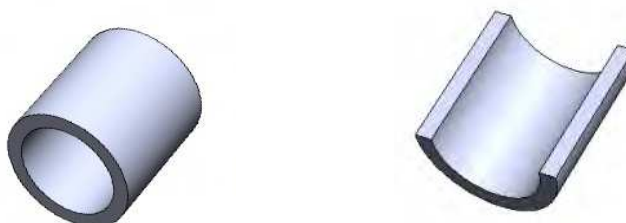


Figura 3.5 - Modelo Final: Versão 3 [1 corpo]

3.2 Simulações computacionais

Após o modelo Virtual definido, iniciaram-se as análises reológicas recorrendo-se ao software Moldflow Plastics Insight 5.0.

As Malhas, figura 3.6, que irão servir para as simulações reológicas iniciais, serão malhas do tipo Fusion. Para a versão 1 com 3 corpos, a primeira "mesh" gerou 7159 elementos, que posteriormente refinou-se para 14062 elementos, figura 3.7.

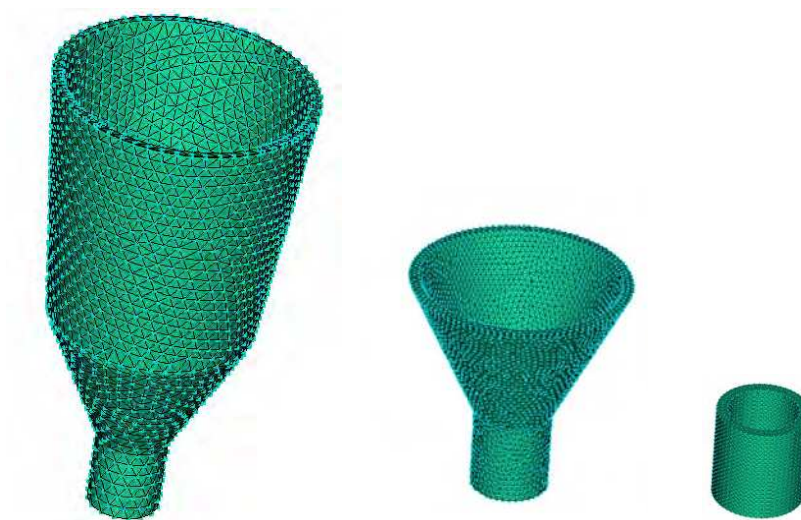


Figura 3.6 - Malhas das 3 versões de peças

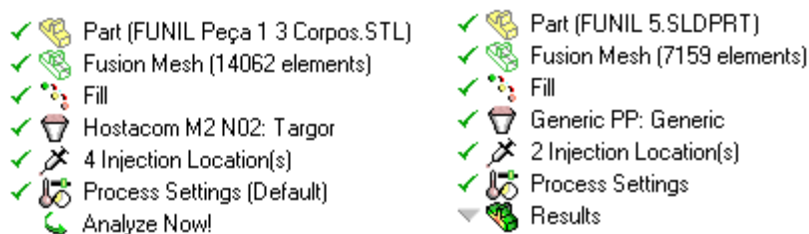


Figura 3.7 – Condições iniciais para as análises reológicas

As primeiras análises foram efectuadas tendo em conta um material plástico genérico, um Polipropileno – PP, e os parâmetros de processo automáticos. Relativamente ao nº de pontos de injeção e a sua localização, foram efectuadas simulações para eliminar algumas dúvidas, sobretudo na versão 1.

3.3 Análises reológicas

A versão 1 por ser a mais complexa, com 3 corpos, será aquela em que recaem o maior número de estudos de simulação. Na figura 3.8, compara-se o tempo de enchimento da versão 1 com a quantidade de pontos de injeção (gates) e a sua localização.

Pode-se concluir que no enchimento da peça, não existe diferenças significativas em termos de tempo de injeção. No entanto na tabela 3.1, podemos comparar outros pontos como as pressões de injeção e a previsão para o peso da peça com base nas diferentes soluções para a injeção.

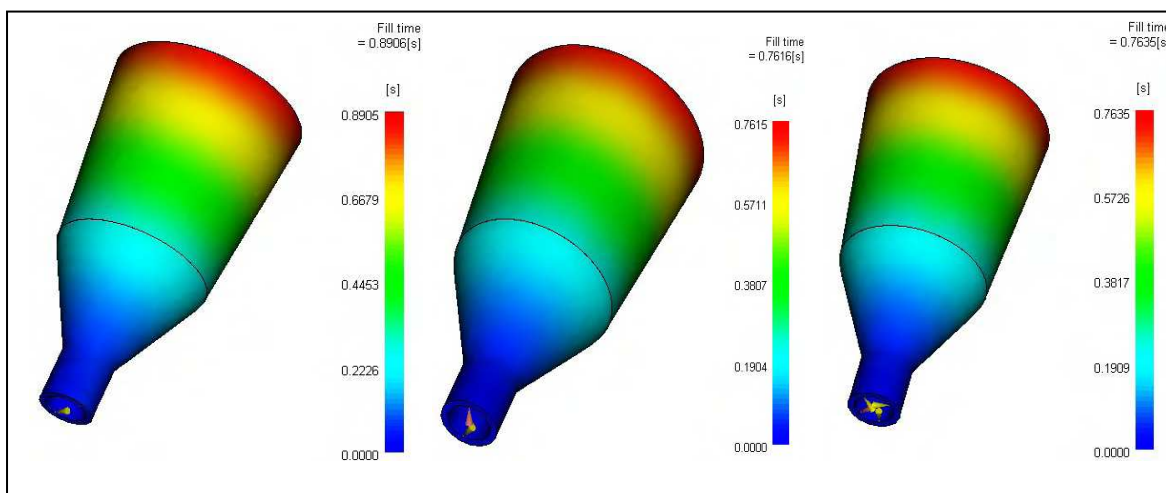





Figura 3.8 – Simulação de enchimento com 1,2 e 4 pontos de injeccção

Desta simulação, pode-se verificar que a nível de tempo de injeccção, a solução com 2 pontos de injeccção tem um enchimento mais rápido, no entanto a solução de 4 pontos de injeccção também não será de eliminar, pois a nível de pressões poderá ser vantajoso para alguns materiais plásticos, já que teremos necessidade de menores pressões para encher e compactar as peças.

Tabela 3.1 – Análise comparativa entre as diferentes soluções de injeccção

Pontos de injeccção	Tempo de injeccção [s]	Pressão de injeccção máxima [MPa]	Força de fecho necessária [Ton]	Peso da peça [g]
1 	0.847	17.26	1.27	10.22
2 	0.736	17.03	1.28	10.16
4 	0.737	16.78	1.28	10.16

Relativamente às pressões de injeção e a força de fecho os valores não parecem fora dos valores esperados e as diferenças entre as várias possibilidades não são relevantes. Quanto ao peso expectável para a peça também não existem diferenças significativas face ao valor projectado.

Na fase de ensaios do molde, irão ser validadas estas opções, pois poderão existir algumas dificuldades para encher totalmente as peças, sobretudo com alguns materiais. De realçar, que no molde iremos projectar apenas dois pontos de injeção, com a opção de outros dois, caso se confirme essa necessidade.

Como tal, iremos simular o pior cenário para versão 1, com 4 pontos de injeção, desfasados 90° entre si, figura 3.9. Segue a análise da moldação completa, isto é, a peça e o respectivo gito para as três versões.

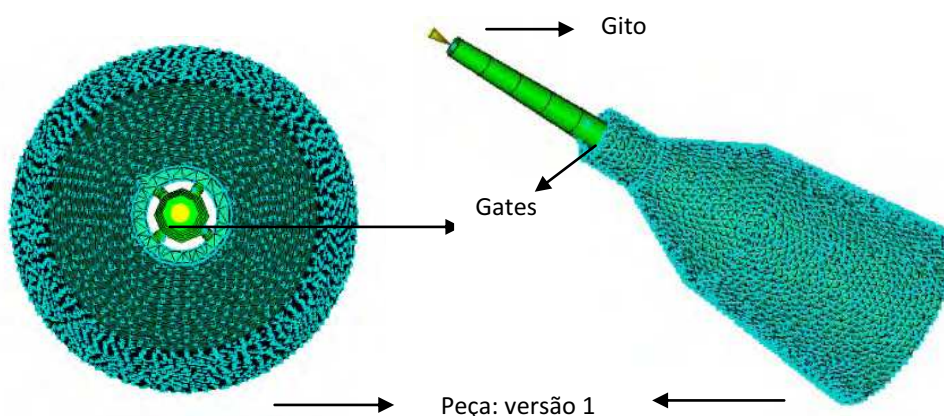


Figura 3.9 – Peça da versão 1 com malha e respectivo gito

Para a versão 2, com 2 corpos, foi efectuada a mesma análise. Na figura 3.10, ilustra-se o gito bem mais comprido que na versão anterior e a peça.

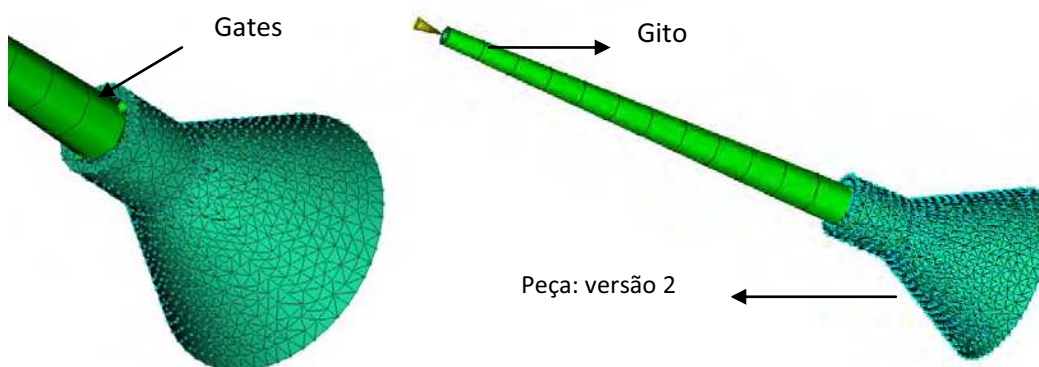


Figura 3.10 – Peça da versão 2 com malha e respectivo gito

A figura 3.11 apresenta a versão 1, de 1 corpo, onde se evidencia o gito da peça.

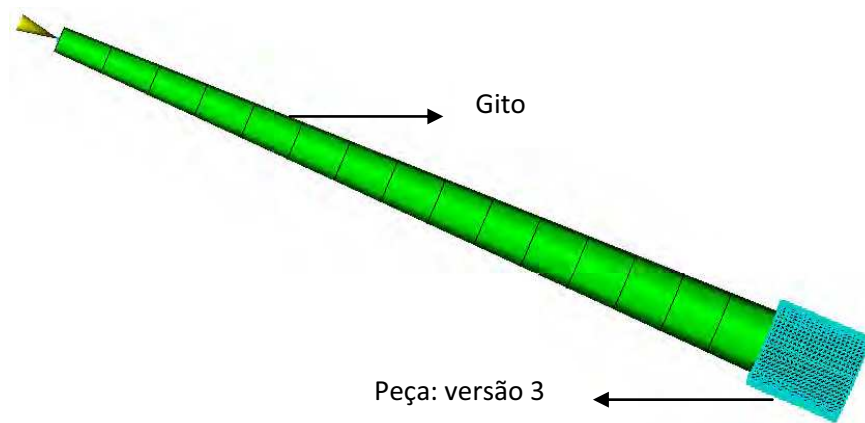


Figura 3.11 – Peça da versão 3 com malha e respectivo gito

Comparando os valores obtidos na simulação da figura 3.12, pode-se concluir que os resultados obtidos apenas com a simulação da peça individual e peça com o gito, são influenciados pelo volume de cada gito.

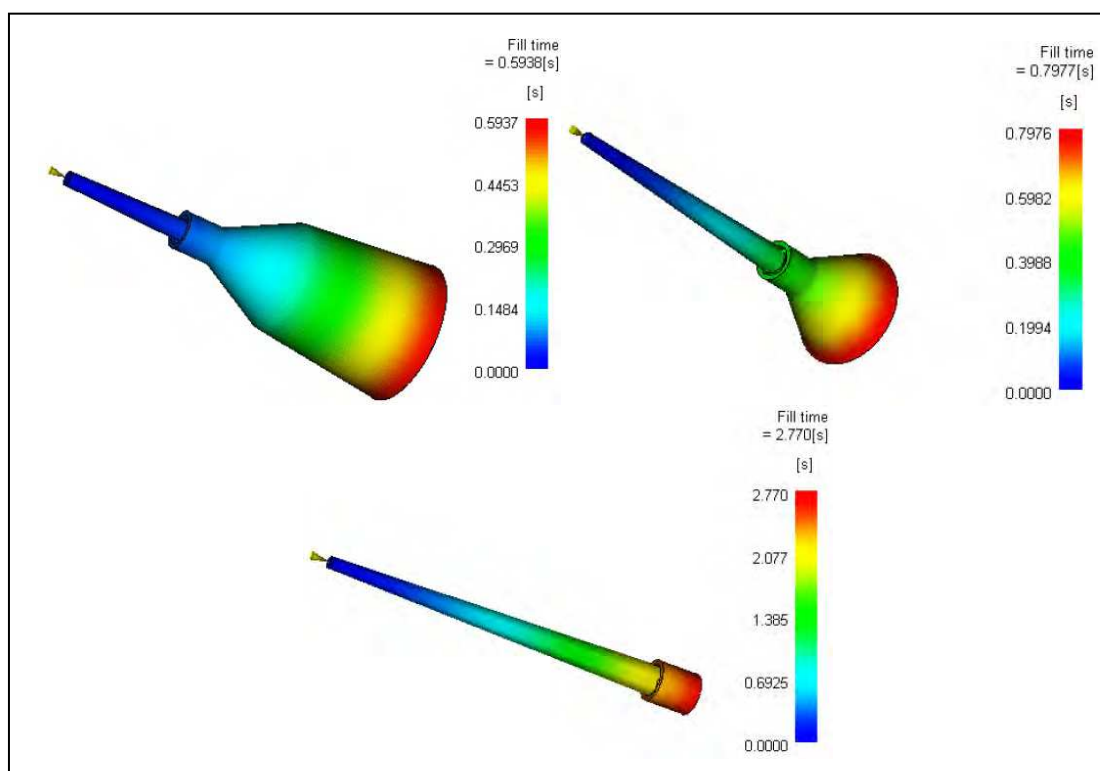


Figura 3.12 – Tempo de enchimento de cada uma das versões

As temperaturas das peças na simulação de injeção, figura 3.13, variam entre os 200°C e os 235°C. A zona mais quente será a mais perto dos pontos de injeção,

sendo por outro lado a zona mais fria o lado oposto, no lado em que se efectua a extracção da peça.

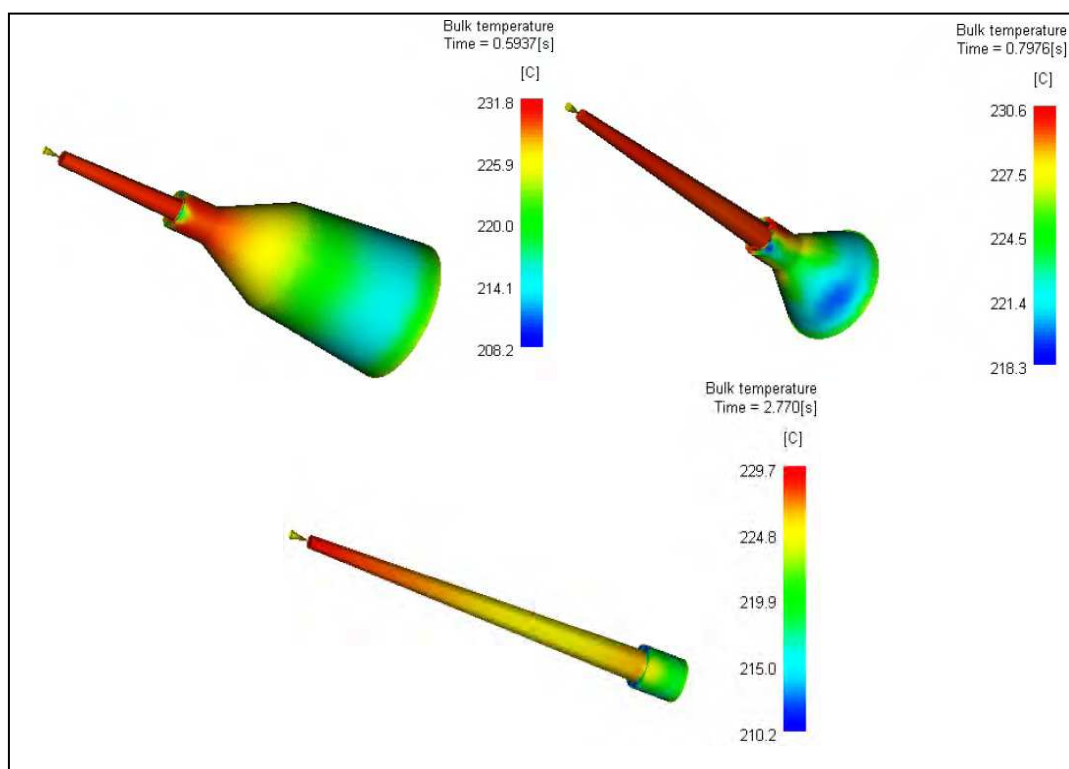


Figura 3.13 – Previsão para a velocidade e temperaturas no final do enchimento

Como o mesmo molde partilha três versões, com três buchas e três cavidades distintas, em que as peças têm geometrias e dimensões completamente distintas, por sua vez, os comprimentos dos gitos também irão ter comprimentos diferentes. Este facto implica grandes diferenças entre versões quer a nível de velocidade de escoamento do fundido para o interior do molde quer mesmo no tempo de “congelamento” das gates, uma vez que existe uma grande quantidade de material plástico a solidificar em simultâneo.

Na figura 3.14, pode observar-se a velocidade média de escoamento para cada uma das versões e o tempo de enchimento. Na solidificação da peça e respectivos gitos, pela figura 3.15, pode observar-se que a “solidificação” ou arrefecimento do material plástico das peças após o final do enchimento se efectua normalmente, onde a primeira zona a solidificar será a zona da base da peça onde será feita a extracção, o que será vantajoso na redução de deformações ou empenos. Em relação aos gitos, prevê-se um problema na solidificação do gito da versão 3, que por ser demasiado volumoso poderá ser ter necessidade de mais tempo para solidificar completamente sobre pena de ficar preso do lado da injecção.

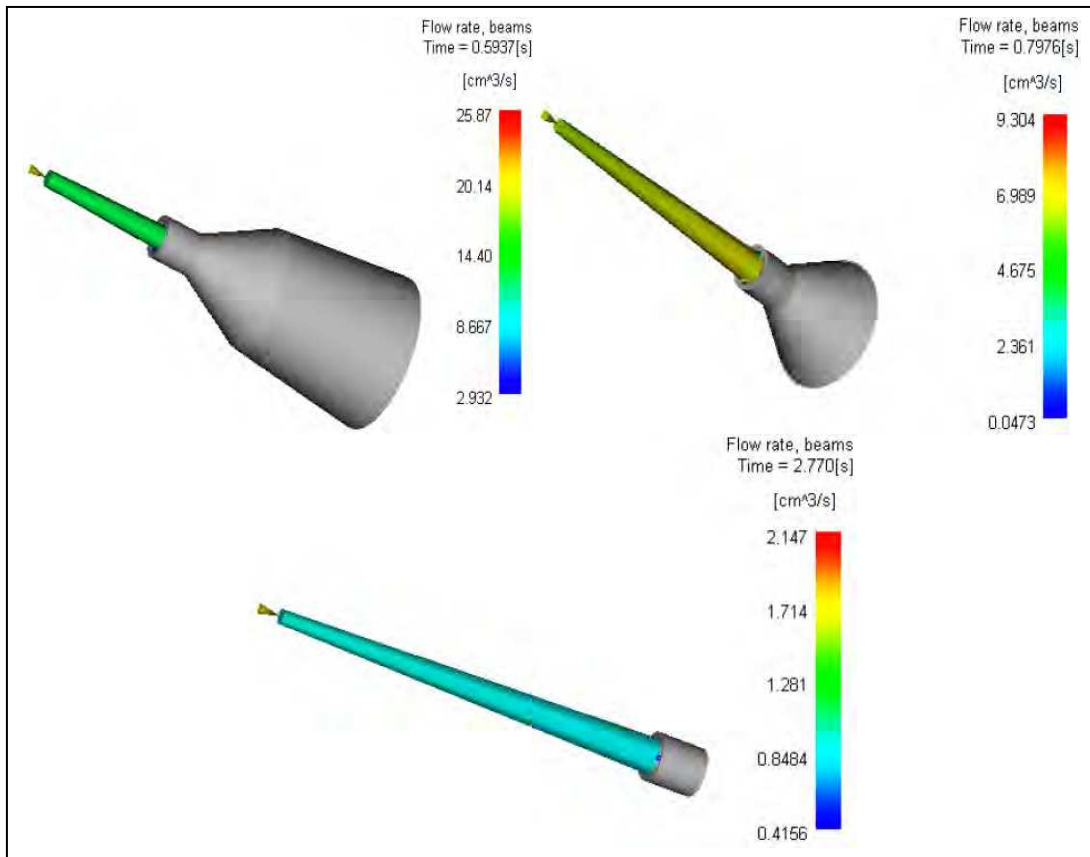


Figura 3.14 – Enchimento dos canais frios – gitos

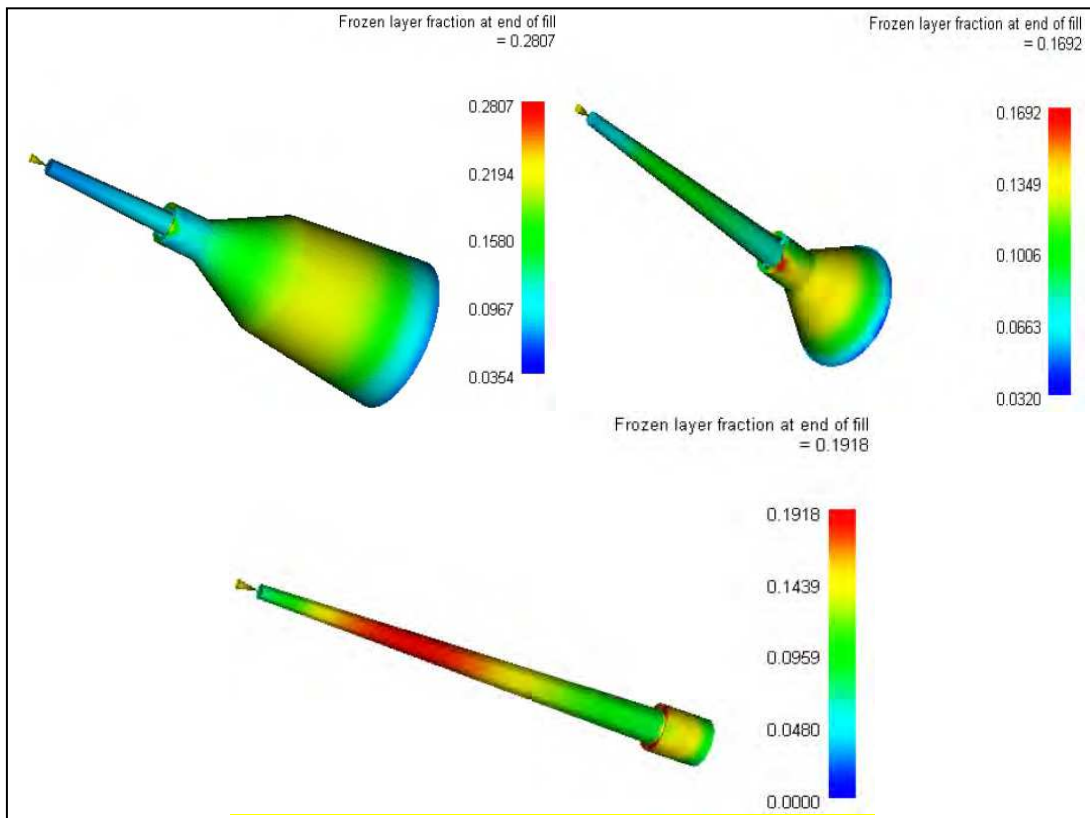


Figura 3.15– Solidificação das peças e gitos após o final do enchimento

Quanto às pressões de enchimento das peças, como seria de prever, a versão 1 apresenta valores mais elevados, uma vez que a peça possui dimensões e um volume de material muito superior que as restantes. No entanto pelo facto de ter um gito mais curto também será vantajoso face às restantes.

Na figura 3.16, pode-se observar que tempo de enchimento previsto para a versão 1, agora de 0,594 segundos, menor que a simulação sem gito na figura 3.8, enquanto que para a versão 2 é de 0,798 segundos, superior que a versão 1, e a versão 3 mais pequena é de 2,770 segundos que se justifica apenas pelas dimensões do gito associado a esta peça.

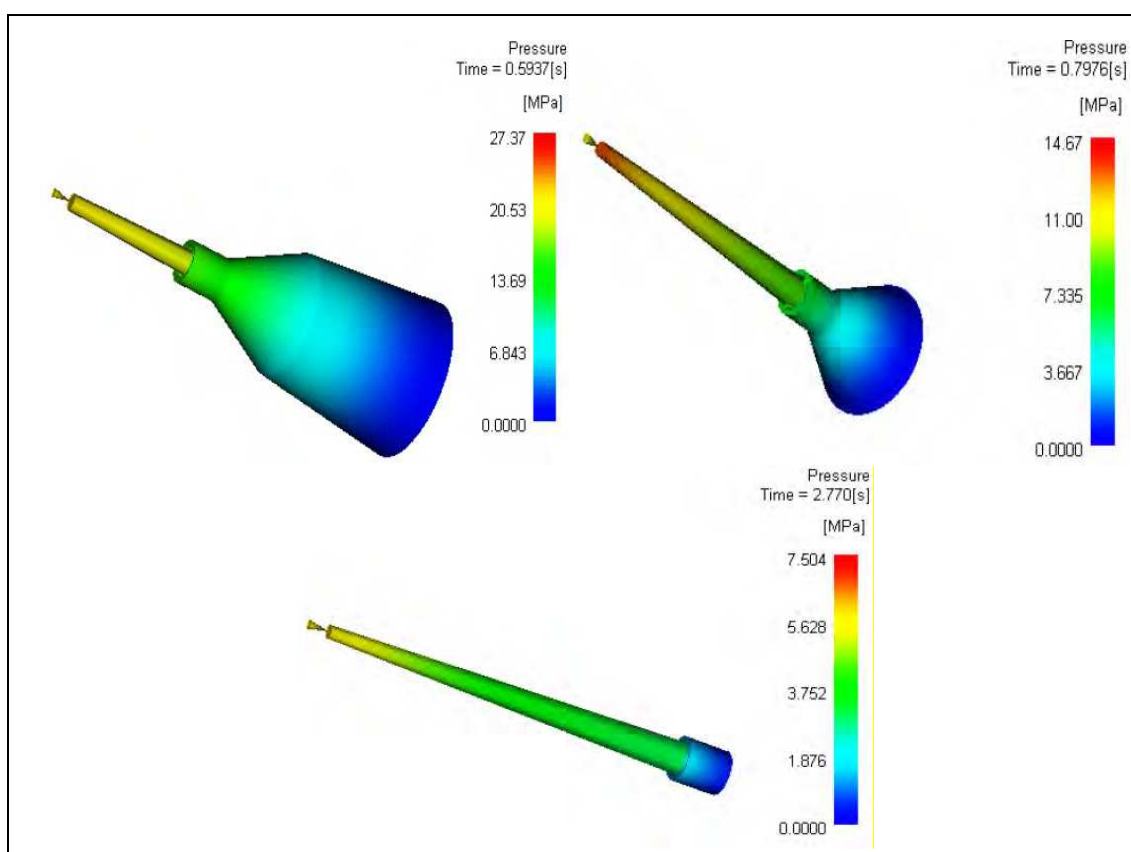


Figura 3.16 – Pressões no enchimento das peças

Pelas simulações a nível de arrefecimento do gito, pela figura 3.17, espera-se um tempo de refrigeração exagerado, praticamente o dobro do seria de esperar. Neste caso terá de existir especial atenção na refrigeração do postigo da cavidade, que implica melhorar a capacidade de arrefecimento também das gates e do gito.

Caso não se encontre uma boa solução para refrigerar o postigo da cavidade do molde, então terá que haver algum cuidado nas temperaturas de refrigeração do molde, temperaturas do fundido e sobretudo nos tempos de refrigeração.

A nível de extracção da peça, poderão existir alguns empenos ou deformações se a peça não estiver já solidificada, mas a maior preocupação recai sobre o gito que poderá partir e ficar agarrado à cavidade, do lado da injeção.

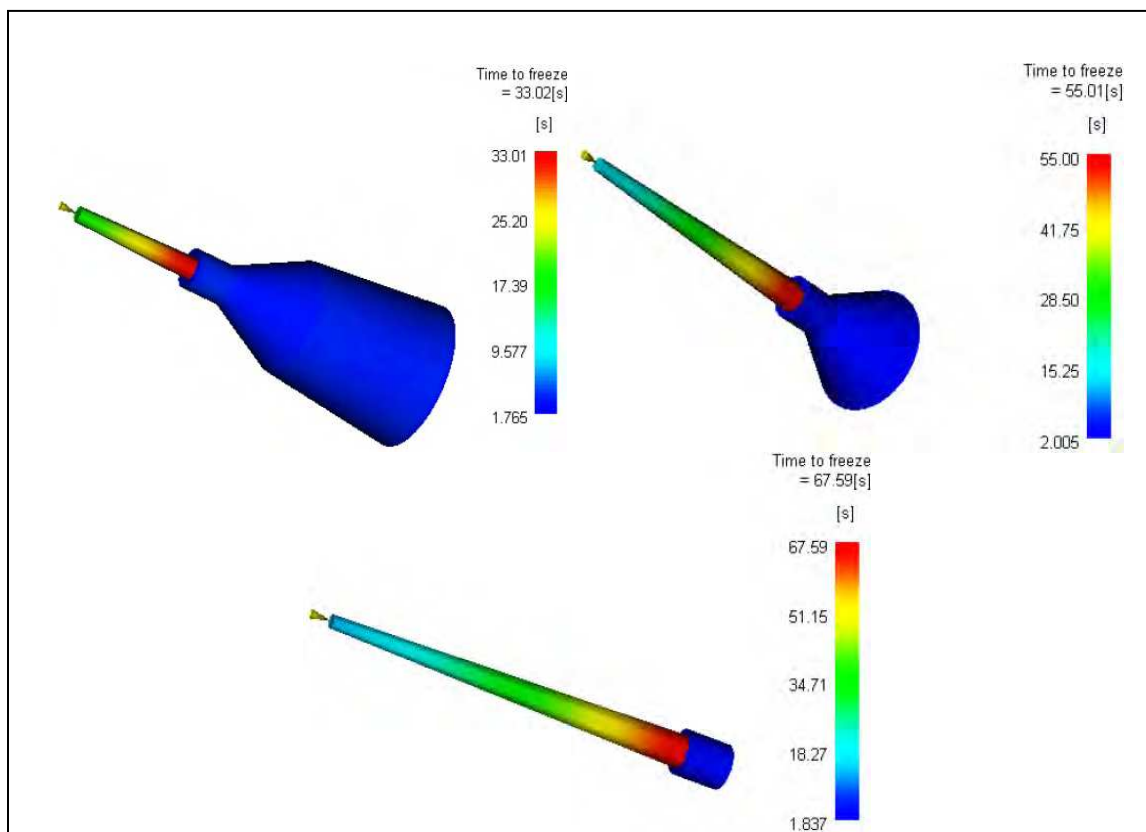


Figura 3.17 – Tempo de solidificação do gito

Mesmo não existindo grande relevância nos aspectos de aparência das peças, será sempre interessante antever a localização das linhas de soldadura ou união de material. Pela figura 3.18, estas linhas não carecem de preocupações de maior.

Tendo por base estas previsões apresentadas, existe confiança a nível de injeção para avançar para a modelação e fabricação do molde sem alterações no produto.



Figura 3.18 - Previsão das linhas de soldadura das peças

3.4 Análises estruturais

Torna-se importante antever o comportamento dos componentes do molde de injeção mais solicitados, devido aos esforços exercidos no molde. Utilizando os softwares Soliworks – CosmosXpress e CATIA, foram efectuados algumas análises tendo por base comprovar os esforços suportados.

Na análise estática, destacam-se a bucha, cavidade, chapas, anel de centragem, calços, e as respectivas chapas de aperto, que estão sujeitos às solicitações de abertura/fecho do molde e injeção do material e pressões de compactação.

A análise cinemática é efectuada aos elementos; aro extractor, guias e casquilhos da chapa de extracção e chapas de extracção.

As análises foram elaboradas tendo em conta a distribuição da pressão, seguindo as seguintes condições fronteiras; simulação das 'Garras' de aperto: extremidades fixas – Placas de aperto do lado da injeção e extracção; simulação do contacto (ajustamento do molde): superfície da bucha/aró extractor e cavidade; simulação do sistema de extracção; sistema de extracção da máquina, haste instrumentada e sistema de extracção do molde.

Na figura 3.19, validam-se os constrangimentos que se aplicaram no molde para se efectuar as análises.

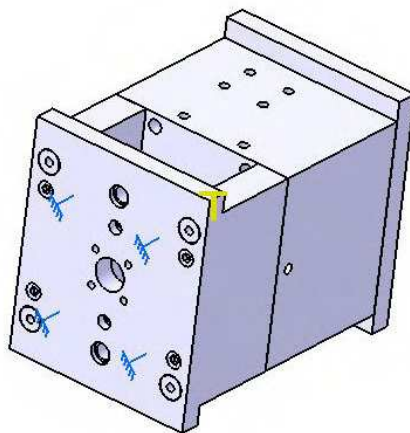


Figura 3.19 – Constrangimentos no molde

Para as análises efectuadas foram definidos as seguintes condições; temperatura do molde 60-80°C; Fixação da placa fixa e móvel e pressão no interior – bucha e cavidade de 75 MPa e 100 MPa de força de fecho.

A malha do molde para simulação foi gerada automaticamente pelo software, figura 3.20, tendo sido originados 38098 nós e 176008 elementos.

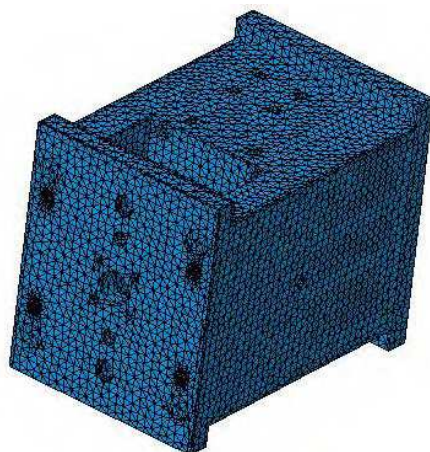


Figura 3.20 – Malha do molde

Com base nos resultados da simulação da figura 3.21, pode-se verificar que na zona de ajustamento entre o injector e a bucha temos um deslocamento máximo de 0,012 mm, que não irá comprometer o ajustamento ou seja, formação de rebarbas.

Na linha de junta, ajustamento entre a bucha/aro extractor e cavidade poderá existir um deslocamento máximo de 0,02-0,03 mm.

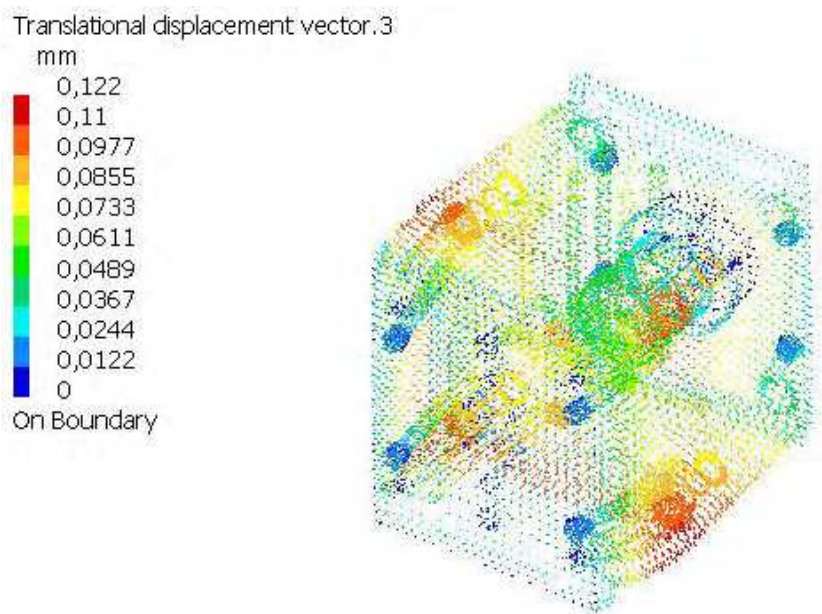


Figura 3.21 – Deslocamentos do molde

A nível de tensões podemos verificar pela figura 3.22, que o molde projectado suporta os esforços submetidos sem comprometer o funcionamento do molde.

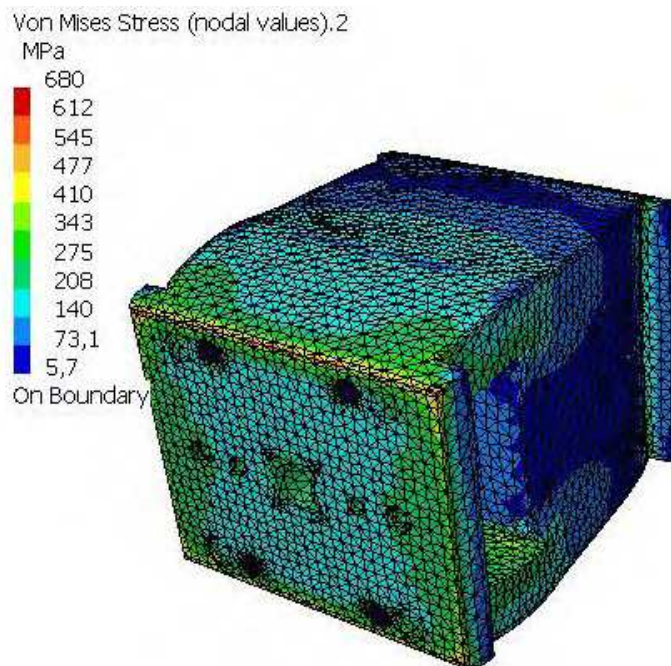


Figura 3.22 – Tensões Von Mises

A nível de estrutura temos garantias, pela simulação, que o molde projectado suporta as solicitações que o molde irá estar sujeito durante a fase de ensaios.

Torna-se necessário avaliar em detalhe o elemento que irá estar sujeito às maiores pressões de injeção e compactação – a bucha da versão 1.

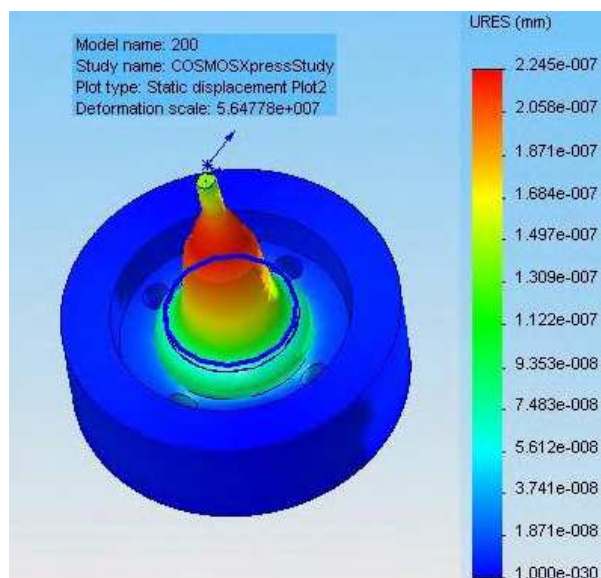


Figura 3.23 – Análise de deformações da bucha da versão 1

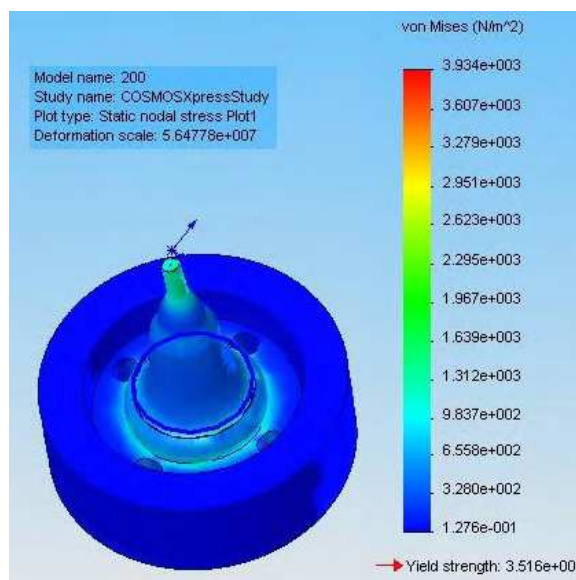


Figura 3.24 – Tensões Von Mises da bucha da versão 1

Pelas simulações elaboradas no COSMOSxpress, representas nas figuras 3.23 e 3.24, podemos concluir que as deformações apresentadas estão claramente no domínio do expectável e abaixo da simulação efectuada com todos os componentes integrados.

As análises computacionais efectuadas demonstraram que o CAD 3D do molde cumpre com a função, ou seja não existem nem deformações nem tensões consideráveis, o que implica que não sejam expectáveis problemas durante a fase de ensaios na máquina de injeção, aquando a imposição de forças e pressões tal como simulado.

De realçar apenas a refrigeração dos postigos das três cavidades, de forma a evitar os tempos de refrigeração elevados. Com base nestes resultados, não será necessário efectuar modificações no projecto do molde e procedeu-se à sua fabricação.

Capítulo 4

Projecto e fabrico do molde de injeção

Este capítulo pretende dar a conhecer as diferentes fases de construção do molde de injeção, desde o desenho preliminar definido no capítulo anterior, à selecção de materiais, processos de maquinações de aços por corte, arranque de aparas, rectificações, ajustamentos e montagem final dos componentes do molde.

4.1 O Molde

O molde foi fabricado com base em normas e regras de Projecto de moldes, de forma a cumprir os prazos e objectivos estabelecidos.

Nas especificações de projecto do molde foram considerados os seguintes itens: materiais a utilizar no fabrico do molde (tipos de materiais e propriedades), complexidade do funcionamento do molde, processo de injeção (pressões de injeção e temperaturas envolvidas), tipo de matérias-primas (termoplásticos) a processar, acabamento superficial das zonas moldantes (bucha e cavidade); sistema de injeção, sistema de extracção (tipos de forças envolvidas), sistema de refrigeração, equipamentos auxiliares/periféricos disponíveis para ensaios do molde, tipo e características da máquina de injeção a utilizar.

Após o design da peça, Funil, foram efectuadas as análises estruturais e reológicas ao 3D do molde e peças, algumas delas já demonstradas, com a finalidade de verificar a sua resistência mecânica e a sua capacidade para superar as condições de ensaio na máquina de Injeção.

4.2 Materiais utilizados no fabrico do molde

No projecto do molde foram considerados dois tipos de aços a utilizar no fabrico do molde. A estrutura foi adquirida com as dimensões normalizadas; a bucha e a cavidade foram obtidas em varão circular, pois a geometria do produto permitia operações de torneamento CNC. Consequentemente, a estrutura normalizada foi a

OXA Ref. 9120-246x246 (1.1730-1.2312) para a chapa da bucha e chapa da cavidade. Os outros componentes têm as referências mencionadas na Figura 4.1.

As maquinações, furacões e rectificações foram efectuadas nestes componentes para alojar os outros elementos como; guias, casquilhos, parafusos, pernos e extractores e aro extractor.

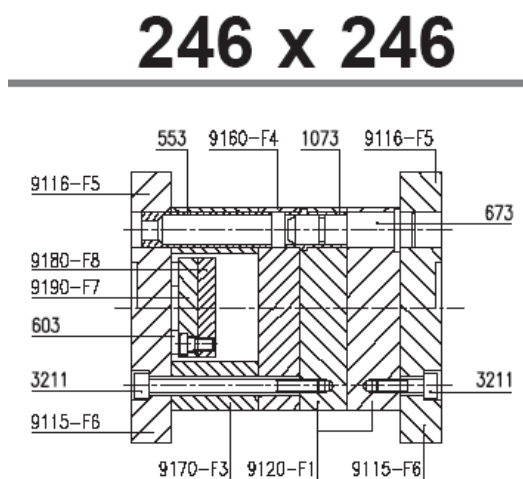


Figura 4.1 – Elementos da estrutura do molde

Ao nível da bucha e cavidade foi utilizado neste molde foi um aço de construção, AISI H13 comercialmente conhecido por ORVAR Supreme (1.2344 AISI H13). Este aço, tem características bastante semelhantes ao 1.2344 ESR, nomeadamente na composição química. O objectivo foi utilizar uma boa condutibilidade térmica, boas características para maquinação e permitir um bom acabamento superficial.

O aço das zonas moldantes apresenta uma densidade de 7.8 g/cm, uma condutividade térmica de 24.6 W/m°C e um módulo de elasticidade de 200000 MPa, conforme podemos confirmar na figura 4.2.

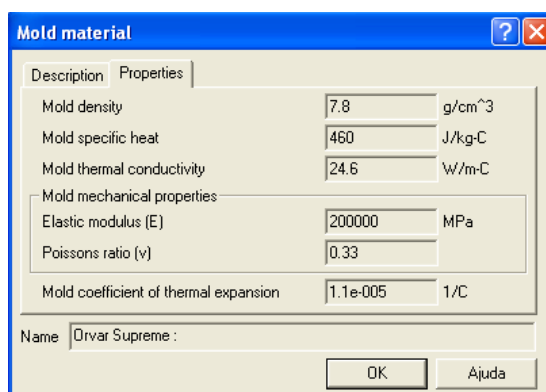


Figura 4.2 – Características do aço das zonas moldantes do molde

A composição química, e as correspondentes normas são apresentadas na tabela 4.1, onde se pode observar as diferenças entre estes dois aços.

Tabela 4.1 – Composição química e Normas do Aço Orvar

Marca	Perfis Disponíveis	Composição Química %								
		C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	W	Outros
MG 50 Orvar Supreme	∅∅	0,39	1,00	0,40	5,20	1,40		1,00		
ORVAR 2M	∅∅	0,39	1,00	0,40	5,30	1,30		0,90		
Marca	Perfis Disponíveis	Normas								
		EuroNorm	AISI	SS	AFNOR	DIN	W.Nr.			
MG 50 Orvar Supreme	∅∅		Premium H 13					1.2344		
ORVAR 2M	∅∅	X40CrMoV5-1-1	H 13	2242	Z 40 CDV 5	X 40 CrMoV 5 - 1		1.2344		

Na tabela 4.2, são apresentadas as principais características, tratamentos térmicos e indicação das principais aplicações destes aços na indústria de moldes de injeção e extrusão.

Tabela 4.2 – Características e aplicações dos aços

Marca	Perfis Disponíveis	Cores de	Fornecimento		Características Mecânicas			
		Identificação	Estado	Dureza (HB) Máx.	R _m Kg/mm ²	R _{p0,2} Kg/mm ²	A (%) L ₀ =5d ₀	
MG 50 Orvar Supreme	∅∅	VERMELHO-BRANCO-VERMELHO	RECOZIDO	255				
ORVAR 2M	∅∅	VERMELHO-AMARELO-VERMELHO	RECOZIDO	255				
Marca	Perfis Disponíveis	Forjamento e Tratamento Térmico						
		Forjam. (°C)	Recozim. (°C)	Redução Tensões °C	Cement. (°C)	Têmpera (°C)	Meio de Arrefec.	Revenido (°C)
MG 50 Orvar Supreme	∅∅	1100	850	650		1020	1 2	180
		900				1050	3 4	700
ORVAR 2M	∅∅		850	650		980	1 2	180
						1030	3 4	700
Marca	Perfis Disponíveis	Aplicações Principais						
MG 50 Orvar Supreme	∅∅	Moldes de Injeção e Compressão de Boa Estabilidade Dimensional e Dureza, quando são Utilizadas Temperaturas de Trabalho Relativamente Elevadas						
ORVAR 2M	∅∅	Fieiras para Extrusão de Alumínio. Moldes para Termoplásticos.						

4.3 Funcionamento do molde

Com objectivo de avaliar as forças de extracção de peças plásticas, foi construído um molde de canais frios. O projecto do molde exigiu alguns cuidados, nomeadamente no dimensionamento do sistema de extracção de forma a garantir a extracção correcta

das peças plásticas e ser possível medir as forças envolvidas na actuação deste sistema.

Como tal, simplificou-se todo o mecanismo e funcionamento do molde à excepção do sistema de extracção. Este sistema necessitou de uma extracção eficaz das peças, e o mínimo de forças de trabalho em vazio, de forma a não existir interferência nos resultados a obter.

4.4 Acabamento superficial das zonas moldantes

Os elementos moldantes da bucha e cavidade foram maquinados por torneamento e fresagem (CNC e convencional). No acabamento das superfícies moldantes foram utilizados processos manuais de polimento com lixa e pedra de grão fino.

A peça não deverá ficar presa na cavidade do molde uma vez que não existe qualquer sistema para a remover da cavidade (parte da injeção). Naturalmente, as superfícies moldantes da cavidade têm um melhor acabamento que as superfícies da bucha, pois a peça plástica terá de ficar neste elemento quando o molde abrir, para a extracção mecânica poder remover a peça da bucha.

Geralmente, a zona visível das peças de plástico apresentam sempre o melhor acabamento superficial e usualmente são moldadas pela cavidade. A zona posterior, zona técnica, pode apresentar acabamentos de maquinação ou electroerosão, pois na generalidade dos produtos obtidos por injeção por moldação, esta zona não é visível.

No caso do funil como se trata de um componente onde não irá ter qualquer montagem posterior, terá um acabamento polido em ambos os lados da peça.

4.5 Sistema de injeção do molde

No projecto do molde de injeção, considerou-se que o sistema de injeção seria de canais frios, utilizando-se um injector com possibilidade de 2 ou 4 ataques, originando em cada ciclo de injeção um gito de material, cujas dimensões dependeria da versão. Ficando agarrado às peças após a abertura do molde. O gito terá de ser separado manualmente da peça.

4.6 Sistema de extracção do molde

No dimensionamento do sistema de extracção, optou-se por utilizar um aro extractor de forma a ter-se uma melhor distribuição das forças de extracção, e para garantir uma melhor superfície final da peça na zona de contacto.

Uma das alternativas a este sistema seria utilizar o sistema convencional de extractores laminares.

O aro extractor garante o contacto em todo o diâmetro da peça embora numa pequena faixa da espessura da peça. Com a utilização do aro extractor tem-se um contacto constante em todo o diâmetro e uma maior área de contacto entre a peça plástica e o elemento actuador do sistema de extracção, dando origem a uma melhor distribuição dos esforços de extracção na peça.

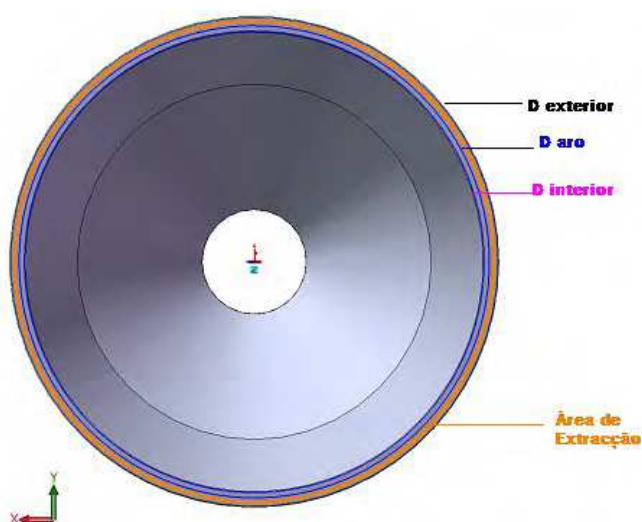


Figura 4.3 – Área de extracção da peça (base da peça)

Pela análise da figura 4.3, podemos visualizar a área de contacto do aro extractor e a base da total peça. Segue o cálculo da área do aro extractor para a peça da versão 1 – 3 corpos.

$$A = \frac{\pi}{4} \times (D^2 - d^2) \quad (4.1)$$

Em que: A - Área; D - diâmetro exterior; d - diâmetro interior;

Dimensões da peça: $D=46.88$ mm; $d=44.74$ mm; \varnothing Aro = 45.25 mm.

Pela fórmula (4.1), pode concluir-se que área do aro extractor para a versão 1 será de 117.95 mm². Se comparar este sistema com um sistema em que sejam utilizados extractores, por exemplo 10 extractores laminares com área 3 x 1mm, obtêm-se uma área total de 30 mm². A adopção do aro extractor permite ter uma área de contacto de praticamente 4 vezes superior, para além de garantir que a peça não deforma com a extracção pois como referido está “guiada” em toda a revolução da peça.

O Aro está apoiado através de 4 hastes, que estão aparafusadas às chapas de extracção que se movimentam sobre 2 guias para um perfeito alinhamento, redução do atrito e das forças de movimentação do sistema de extracção no vazio. Na realidade, devido a atrito interno de deslizamento dos componentes do sistema de extracção irá existir sempre um valor considerável desta força. Esse valor irá ser quantificado no Capítulo 7.

A haste ou KO foi posteriormente instrumentada com extensómetros para se quantificarem as forças. Este tema será pormenorizado no Capítulo 5.

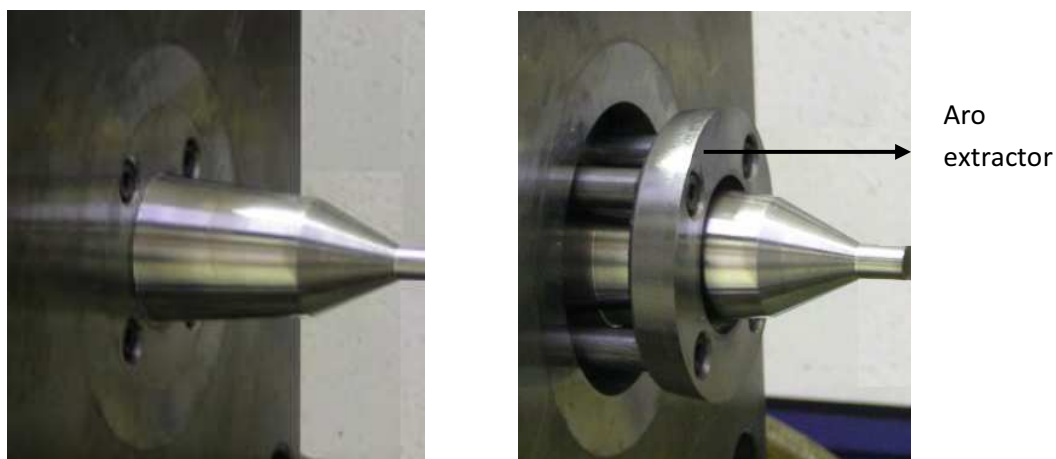


Figura 4.4 – Extracção versão 1 recolhida Figura 4.5– Extracção versão 1 avançada

As figuras 4.4 e 4.5 apresentam a bucha da versão 1, com o molde aberto em que se pode observar o sistema de extracção recolhido e avançado, com o aro extractor numa posição intermédia do curso de extracção.

4.7 Sistema de refrigeração do molde

A nível da refrigeração foram adoptadas duas estratégias diferentes; na parte móvel - lado da extracção, foi adoptado um circuito que permite refrigerar a bucha através de uma cascata que entra no núcleo da bucha.

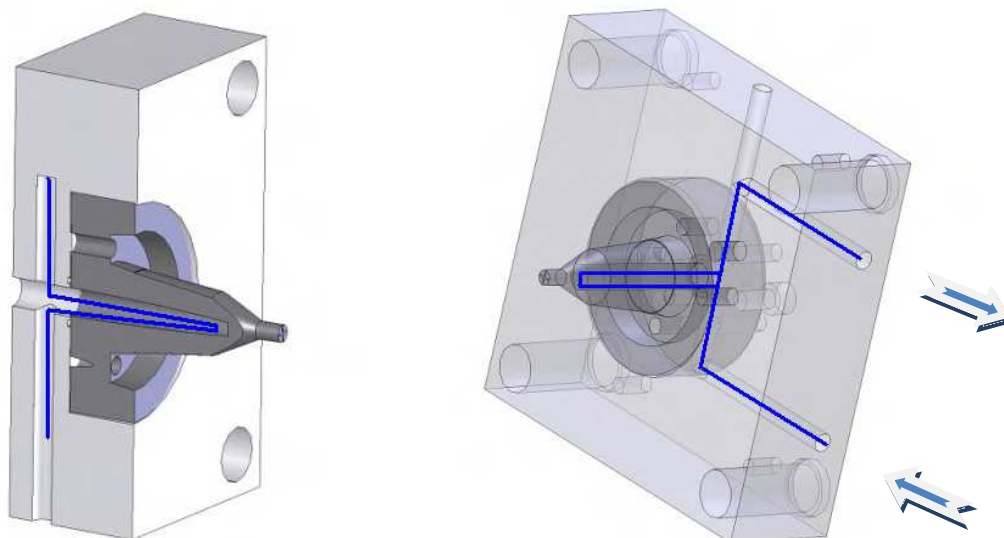


Figura 4.6 – Corte da bucha: versão1 Figura 4.7 – Refrigeração da bucha versão1

Nas figuras 4.6 e 4.7, podem ser observados o percurso das águas no interior da bucha e chapa do molde do lado da extracção. A água entra na estrutura percorre o circuito interior e sai novamente pela estrutura. O objectivo desta circulação será retirar o calor das zonas moldantes, neste caso da bucha de versão 1. Para as outras duas versões a solução encontrada foi semelhante.

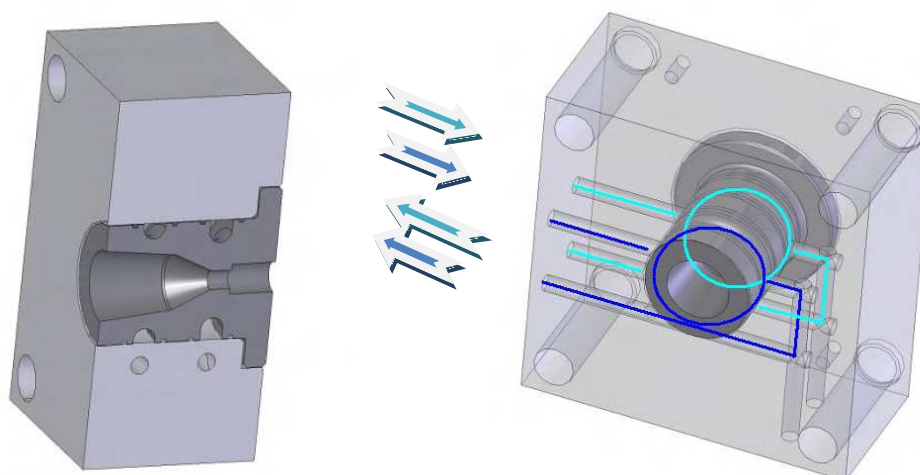


Figura 4.8 – Corte da cavidade

Figura 4.9 – Refrigeração da cavidade

Em relação à cavidade, foram definidos dois circuitos paralelos independentes, em dois níveis, que permitem que o líquido de refrigeração contorne a cavidade circular e

efectue o retorno ao circuito. As figuras 4.8 e 4.9 esquematizam esses circuitos, em que o primeiro nível é apresentado a azul claro e o segundo nível a azul-escuro.

Com estes dois circuitos, pretende-se solucionar o problema de arrefecimento das peças e do gito, detectado no capítulo anterior de simulações. O objectivo será reduzir o tempo de arrefecimento do molde e por consequência o tempo de ciclo do processo de injeção para as três versões.

4.8 Desenhos de fabrico

Com base no modelo CAD 3D da peça e do molde foram efectuados os desenhos 2D, que serviram para a maquinação das peças individuais. Nos desenhos 2D, podemos encontrar informações gerais que complementam o 3D, não só a nível de cotas e dimensões mas também secções e tolerâncias.

Definidos os planos de trabalho com o planeamento de tarefas, processos e equipamentos a utilizar, avançou-se com a encomenda e corte de aços.

4.9 Maquinação dos elementos do molde

Como já referido, as chapas que alojam a cavidade e bucha foram adquiridas já com as dimensões exteriores standard no entanto foi necessário proceder a maquinações na abertura nas caixas, furos para guias e casquilhos.

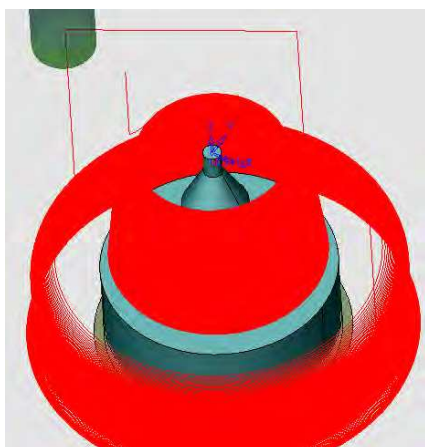
Seguem alguns detalhes que pretendem dar a conhecer as etapas de cortes e maquinação. Após o corte de aços da bucha e cavidade podemos visualizar o desbaste ao torno mecânico da cavidade.



Figura 4.10 – Desbaste da cavidade

4.10 Simulação de maquinação da bucha

A bucha foi maquinada na CNC, neste equipamento foi necessário outro tipo de operações, como gerar os programas de maquinação e uma escolha das ferramentas adequada, figura 4.11.



```

Programa Funil
#MAquinação bucha 1#
N10 :G90 G71 G40 G94
N11 :T20M06
N12 (MSG, FERRAMENTA TR33)
N13 S3500 M3
N14 G0 Z50.
N15 G0 X-28.873 Y-48.095 Z50.
N16 Z-78.417
N17 G1 Z-80.417 F2000.0 M8
N18 Z-81.417
N19 X-31.117 Y-48.021 Z-82.911
N20 X-33.447 Y-47.57 Z-84.191
N21 X-35.801 Y-46.756 Z-85.225
N22 X-38.116 Y-45.599 Z-85.983
N23 X-40.331 Y-44.131 Z-86.446
N24 X-42.385 Y-42.391 Z-86.603
    
```

Figura 4.11 – Simulação e extracto do código de maquinação da bucha

Após o desbaste e acabamento das buchas por CNC, procedeu-se à abertura das caixas das chapas da bucha e cavidade e respectivo controlo dimensional.

Podemos observar nas figuras 4.11 e 4.12, a geração do programa de maquinação e a maquinação automática das peças.



Figura 4.12 – Bucha e cavidade no centro de maquinação CNC (IPL-ESTG)

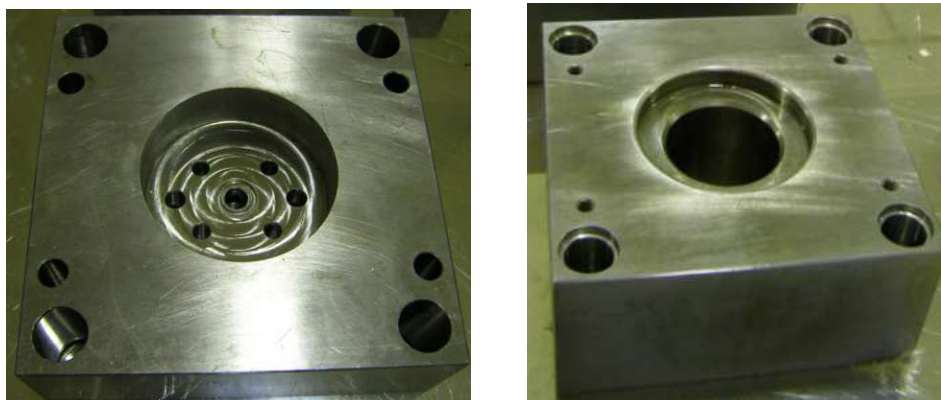


Figura 4.13 – Chapa da bucha e chapa da cavidade do molde

Nas figuras 4.13 e 4.14 podemos já visualizar as chapas da bucha e cavidade já controladas aptas para se iniciar a fase de ajustamento entre os diversos componentes.

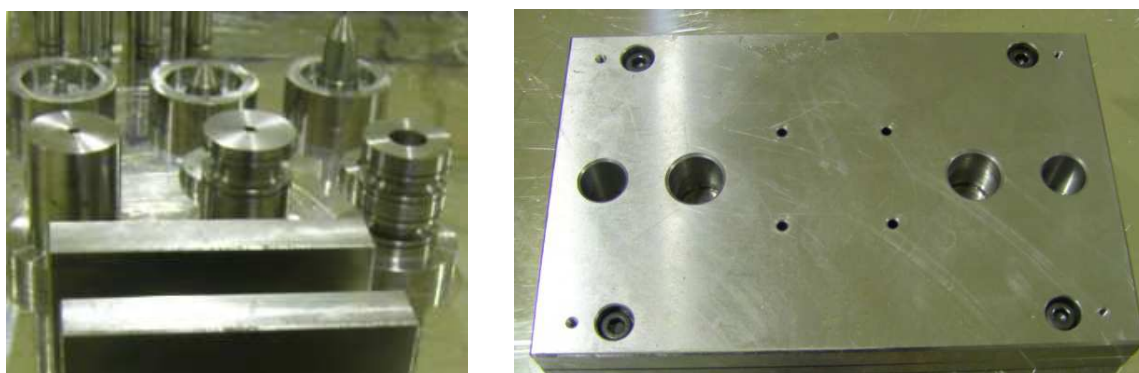


Figura 4.14 – Postiços das 3 buchas e cavidades Figura 4.15 – Chapas de extracção

As chapas de extracção, figura 4.15 necessitam das furações para os casquilhos e pernos, como os furos roscados para os parafusos.

4.11 Ajustamentos e montagem final do molde

A fase de ajustamento e montagem final, é a ultima fase da construção do molde, mas também uma das mais morosas e delicadas. É nesta, que todos os componentes vão “encaixar” e interagir entre si, com pequenas folgas de centésimas de milímetros.

O ajustamento do molde consiste fundamentalmente em afinar todos os componentes fixos e móveis para que estes se possam interagir entre si, sem se danificarem aquando a abertura e fecho do molde, durante o processo de injeção e extracção da peça.

Geralmente, na indústria de moldes, “pinta-se” uma superfície usando-se o zarcão, e posteriormente fecha-se (“bate-se”) o molde e abre-se. A partir daí verifica-se se toda a superfície encosta uniformemente ou se toca a penas em pontos. Na situação menos favorável, terá que se afinar cortando com o lado mais “forte”.

No caso do molde do funil, as superfícies eram planas nas três versões, com linha de junta plana, o que permitiu que esta fosse rectificadora, logo sem este processo de ajustamento manual.

4.12 Equipamentos utilizados na construção do molde

Segue a apresentação, figura 4.16 e figura 4.17, de alguns dos equipamentos estiveram na base da fabricação dos componentes que constituíram o molde.



Figura 4.16 – Centro de maquinação CNC, rectificadora, fresadora e engenho de furar (Equipamentos do IPL-ESTG)



Figura 4.17 – Lay out de alguns dos equipamentos utilizados (Equipamentos do IPL-ESTG)

4.13 Custos envolvidos no fabrico do molde de injeção

Os custos associados a este trabalho estão de certa forma diluídos por material e maquinações cedidas por várias empresas e pela ESTG (IPLeiria), pelo esforço e horas de trabalho de elementos que ajudaram a executar o presente projecto.

No entanto como estimativa de custos para a construção do molde, podemos avançar com um custo final de aproximadamente 18.000€. Este valor não espelha o custo real nem deve servir de base para qualquer orçamentação, uma vez que foi fabricado em condições particulares.

Capítulo 5

Procedimentos de ensaios ao molde

O presente capítulo, pretende dar a conhecer os testes de injeccção efectuados, os materiais processados, as condições de processamento, bem como as metodologias empregues nos ensaios da determinação das forças de extracção.

5.1 Materiais plásticos testados

Os objectivos da selecção de materiais são; permitir avaliar o comportamento de diferentes termoplásticos a nível de atritos, contracções e forças de extracção.

Os termoplásticos utilizados nos ensaios/testes foram divididos em 3 grupos:

Plásticos Técnicos Semicristalinos: PBT (Polibutadieno de teraftalato) – Ultradur B4520

Plásticos Standard Amorfos: ABS (Acrilonitrilo butadieno estireno) – Cicolac X37

ABS/PC (Acrilonitrilo butadieno estireno policarbonato) – Cicoloy C1100 HF

Plásticos Standard Semicristalinos: PP (Polipropileno) – Hostacom HC G2N01 Basell

PE (Polietileno) - Flexirene MT40A

A figura 5.1 mostra o posicionamento dos principais materiais plásticos mais utilizados na indústria de injeccção mundial, tendo em conta o desempenho e preço dos materiais.

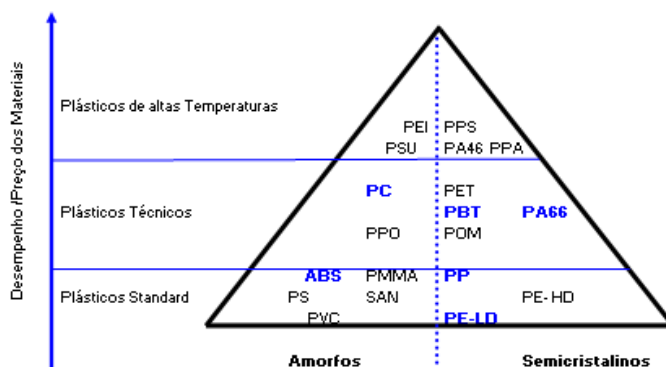


Figura 5.1 – Materiais plásticos

5.2 Processo de injeção

Recorrendo às fichas técnicas dos materiais plásticos processados foi criada a Tabela 5.1. Nesta tabela, constam os dados que são os recomendados pelos fabricantes de matérias-primas, nomeadamente as temperaturas de secagem, as temperaturas a que o molde deve estar refrigerado e as temperaturas do fuso (cilindro) da máquina de injeção.

Tabela 5.1 – Temperaturas de secagem e processamento das matérias plásticas

Material			Secagem		Temperaturas	
			Temperatura [°C]	Tempo [h]	Cilindro [°C]	Molde [°C]
1	PE	Flexirene MT 40A	-	-	160-200	10-40
2	PP	Hostacom HC G2 N01	-	-	160-200	15-40
3	ABS	Cycolac X37	80-110	2-4	240-280	60-80
4	ABS/PC	Cycoloy C1100 HF	100-110	2-4	240-280	60-80
5	PBT	Ultradur B4520	100	4	250-275	40-70

Com a definição dos vários parâmetros de injeção foi possível construir a tabela 5.2, com as principais variações de parâmetros para cada material plástico testado. Esta, apresenta três variações dos parâmetros de injeção para cada material plástico.

Estes valores são meramente indicativos pois em cada versão foram efectuados os ajustes necessários para obter um produto com qualidade e um processo de injeção estável.

Tabela 5.2 - Materiais e condições de processamento

Material		Fase de Doseamento		Força de Fecho [bar]	Fase Enchimento		Fase de Compactação			Temperatura do molde [°C]	Fase Extração			Tempo ciclo [s]
		Pressão [bar]	Velocidade [%]		P.Inj. [bar]	V. Inj. [%]	PP [bar]	T PP [s]	Tempo Refrigeração [s]		Pressão [bar]	Velocidade [%]	Curso [mm]	
PE	Flexirene MT 40A	5	15	20	20	60	15	2	4	20	5	30	15	18-32
			20	30	25	70	20	3	6	25	5	50		
			25	40	30	75	25	5	10	30	10	60		
PP	Hostacom HC G2 N01		15	20	20	60	15	2	4	20	5	30		
			20	30	25	70	20	3	6	25	5	50		
			25	40	30	75	25	5	10	30	10	60		
ABS	Cycolac X37		15	20	35	60	25	2	4	60	5	30		
			20	30	40	70	30	3	6	70	5	50		
			25	40	45	80	35	5	10	80	10	60		
ABS/PC	Cycoloy C1100 HF	15	20	40	60	25	2	4	60	5	30			
		20	30	45	70	30	3	6	70	10	50			
		25	40	50	80	35	5	10	80	15	60			
PBT	Ultradur B4520	15	20	35	60	25	2	4	40	5	30			
		20	30	40	70	30	3	6	50	10	50			
		25	40	45	80	35	5	10	60	15	60			

5.3 Setup - Parâmetros de injeção

Tendo em conta a informação técnica dos fornecedores de materiais testados, foram efectuados vários ajustes nos parâmetros de injeção de forma a obter uma “janela” de processo de forma a garantir um processo estável de injeção durante o ensaio.

Após a definição de cada Setup (processo) foi gerada uma carta de parâmetros para cada um dos materiais testados.

5.4 Primeiro ensaio do molde – Versão 1 [3 corpos]

Os primeiros ensaios do molde permitiram avaliar o funcionamento do molde, figura 5.2, quer a nível de enchimento das peças, quer a nível mecânico (funcionamento do molde).

Os equipamentos utilizados para os ensaios foram; Máquina de injeção: Euroinj D80; Aquecedor: Thermobox tb-M; Silo: Yann Bang e o Material plástico: PE-Flexirene MT40A 3723633/4320.

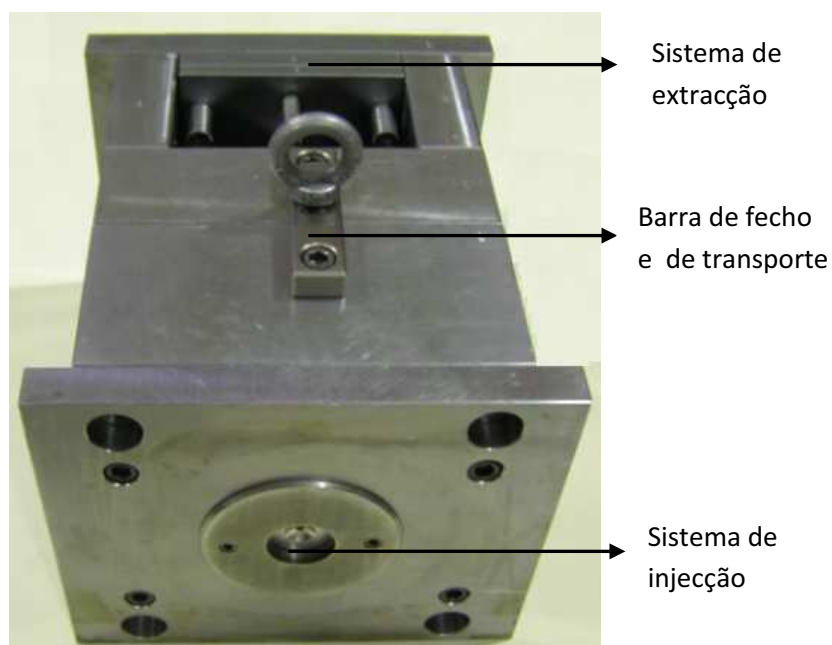


Figura 5.2 – Molde de injeção

A figura 5.3 apresenta o molde, com a versão 1 de 3 corpos instalado na máquina de injeção e preparado para os ensaios. A extracção está avançada, o que permite visualizar o aro extractor assim como as hastes que guiam o aro extractor. O molde encontra-se ainda com as ligações de águas em funcionamento.

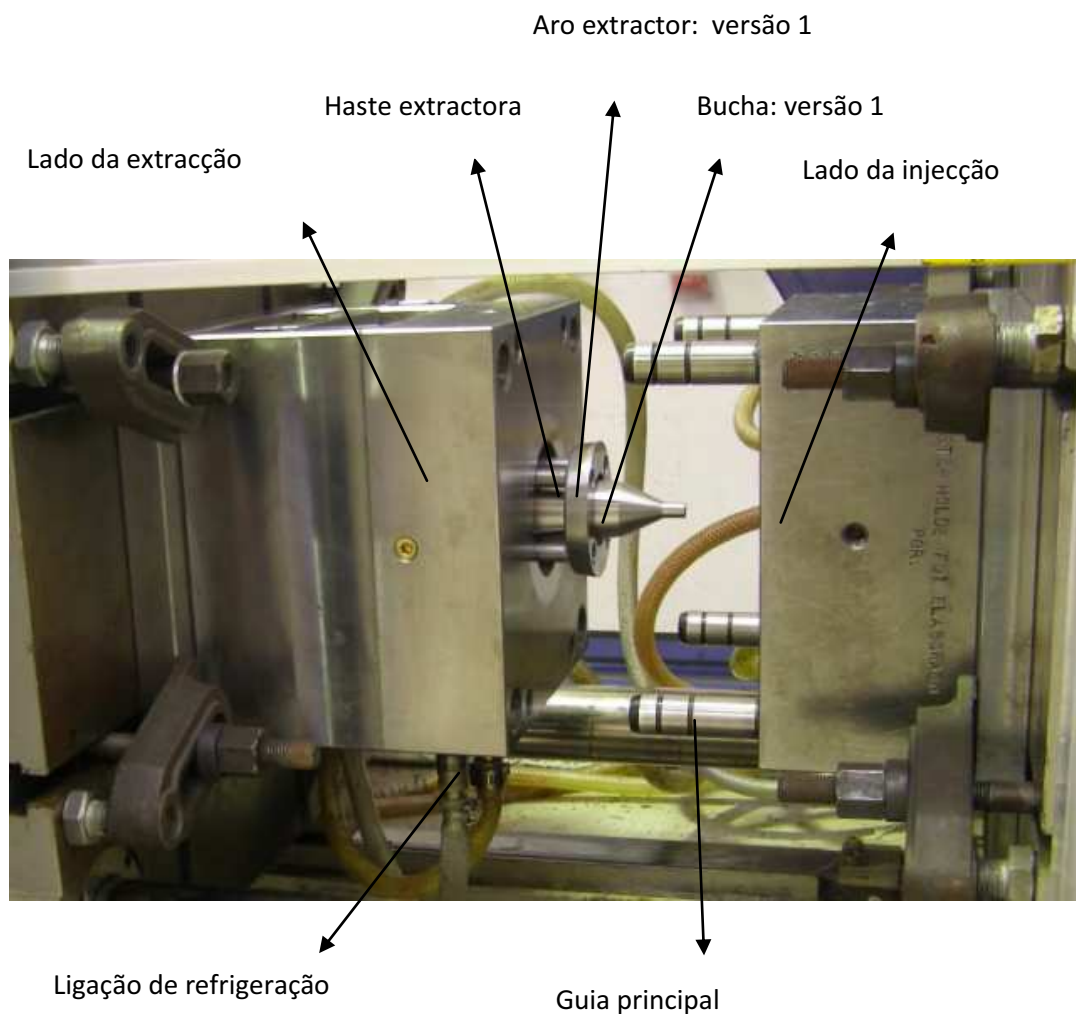


Figura 5.3 – Molde montado na máquina de injeção: versão 1 [3 corpos]

5.5 Desempenho do molde de injeção: primeiras amostras

Na primeira experiência pôde-se constatar que o injector necessitava de um polimento, pois o gito ficava “preso” ao injector.

A nível de sequência de enchimento das peças, figura 5.4, revelou estar de acordo com as simulações reológicas.



Figura 5.4 – Sequência de enchimento das peças da versão 1

O primeiro enchimento efectuou-se com apenas com 2 pontos de injeção. Mas para injectar materiais plásticos mais “rígidos”, foi necessário abrir 2 gates adicionais, ficando com 4 pontos de injeção pois era difícil acabar de encher a peça, como inicialmente se previa.

Tabela 5.3 – Peso das peças de plástico da versão 1 (Material PE)

AMOSTRA	COMPONENTE	PESO [gr]
1	Peça	12,85
2	Gito	1,25
3	Moldação	14,10

As primeiras peças apresentavam com marcas de maquinação na textura, reflexo do acabamento por maquinação sem polimento fino. A tabela 5.3 apresenta os pesos das peças de plástico da versão 1 em PE, polietileno. A tabela 5.4 apresenta a lista de acções a executar no molde, tendo em conta o primeiro ensaio do molde, para otimizar os acabamentos superficiais, ajustamento e fugas de gases.

A cavidade, lado fixo ou lado da injeção, foi maquinada por torneamento e posteriormente polida com grão fino, que garantiu que a peça e gito ficavam do lado da bucha, aquando a abertura do molde para posterior extracção.

Tabela 5.4 – Tabela das acções a executar após 1º ensaio

ITEM	COMPONENTE	ACÇÃO
1	Injector	Polimento geral no sentido de desmoldação
2	Injector	Abertura para 4 pontos de injeção
3	Cavidade	Polimento fino
4	Bucha	Polimento fino
5	Geral	Abertura de escapes de gases e ajustamentos

Na bucha onde a peça irá ficar “presa” aquando a abertura do molde, foi medida a rugosidade superficial após a sua maquinação.

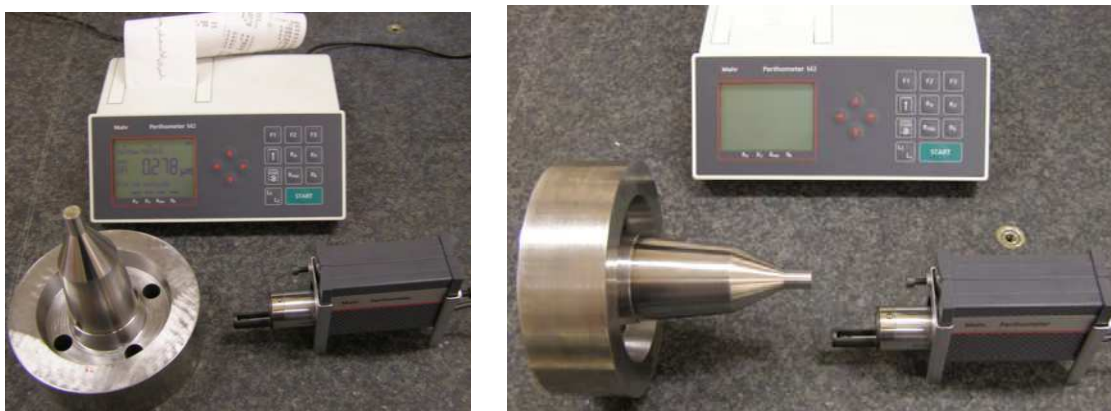


Figura 5.5 – Equipamento de medição de rugosidades: Perthometer M2 e bucha do molde: versão 1 (Equipamento IPL-ESTG)

Verificou-se pela análise de rugosidades, figura 5.5, algumas marcas de maquinação na peça e que as zonas moldantes necessitavam de um polimento.

Após o polimento das peças, as zonas moldantes foram controladas, onde obteve-se o estado de superfície final dos componentes (buchas e cavidades).



Figura 5.6 – Bucha, cavidade e peças plásticas da versão 1

Na figura 5.6 pode-se observar os elementos moldantes, bucha e cavidade da versão 1 – 3 corpos e as respectivas amostras plásticas.



Figura 5.7 – Bucha da versão 1

A bucha da versão 1 com 3 corpos foi sujeita a um polimento de forma a melhorar o estado de superfície, após o qual foi novamente medida a rugosidade superficial, figura 5.7.

Na tabela 5.5, pode-se observar a apresenta a leitura das rugosidades do elemento moldante da versão 1 do molde de injecção.

Tabela 5.5 – Medições da rugosidade da bucha de 3 corpos

VERSÃO 1- 3 Corpos	CORPO MAIOR		CORPO INTERMÉRDIO		CORPO MENOR	
	INICIAL	ACTUAL	INICIAL	ACTUAL	INICIAL	ACTUAL
Ra (µm)	0,325	0,204	0,957	0,278	0,622	0,264
Rz (µm)	1,92	1,87	4,89	2,58	2,85	2,35
Rz Max (µm)	2,16	2,12	6,09	2,90	3,68	2,87
Rt (µm)	2,29	2,25	6,09	3,40	3,68	2,87

Pode-se concluir pela tabela 5.5, que existe uma melhoria substancial no acabamento superficial após o polimento da bucha da versão 1.

A listagem e o perfil de rugosidades podem ser visualizados na figura 5.8, no qual se nota que existem variações no estado de superfície da zona moldante – bucha.



Figura 5.8– Perfil de rugosidade da bucha versão 1

5.6 Instrumentação da haste

A haste de extracção ou KO teve um papel fundamental neste trabalho, pois esta permitiu quantificar os esforços na fase da extracção da peça.

Nos primeiros ensaios ao molde usou-se uma haste convencional, esta serviu para avaliar a operacionalidade do molde e os pontos a necessitar de optimizações.

Após garantir um bom funcionamento de molde e definidos o parâmetros de processo, procedeu-se então aos testes finais. Nesta fase, foi aplicada ao molde uma haste instrumentada. A haste, figura 5.9, foi especialmente projectada para ter uma secção fina onde foram introduzidos 2 extensómetros (um por lado).



Figura 5.9 – Haste de extracção

Segue a análise efectuada à haste de extracção para validar a capacidade de resistir com sucesso aos esforços na extracção da peça aplicados durante o ensaio.

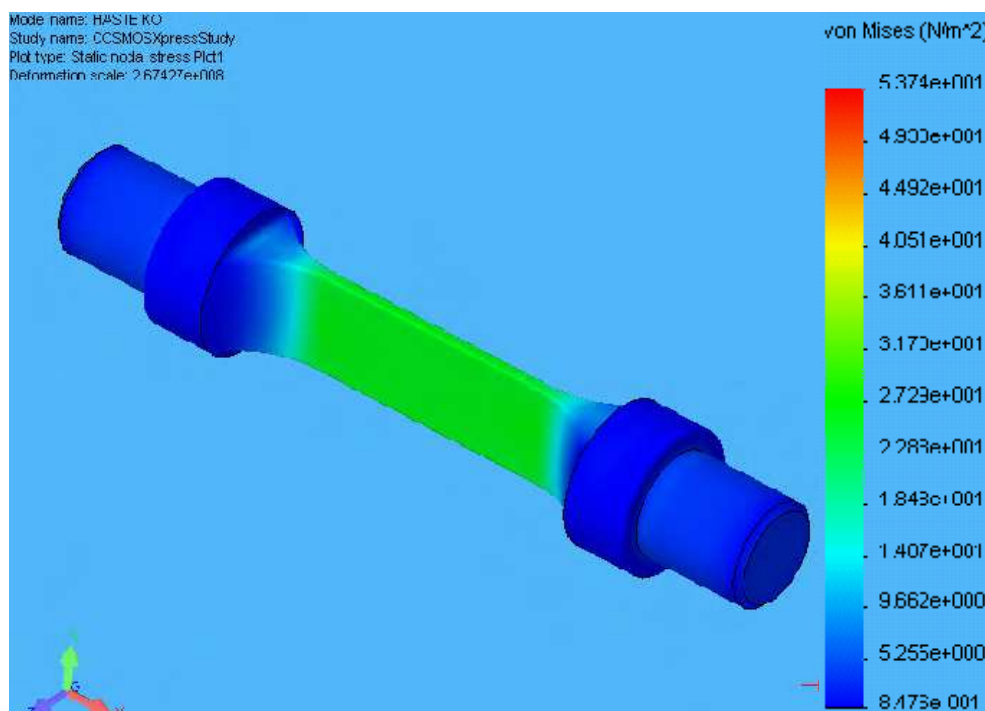


Figura 5.10 – Haste de extracção em repouso

Na simulação da haste nas condições de acoplamento ao molde, mas sem esforços aplicados, figura 5.10, podemos visualizar a zona de espessura menor nas condições normais de esforço com valores de tensão de Von Mises na ordem de 18N/m². Aquando o accionamento do sistema de extracção, podemos esperar pequenas deformações com valores de Von Mises na ordem de 40.5N/m². Tendo em conta que necessitamos que exista deformação na haste para que esta possa transmitir esse valor aos extensómetros, o valor parece aceitável.

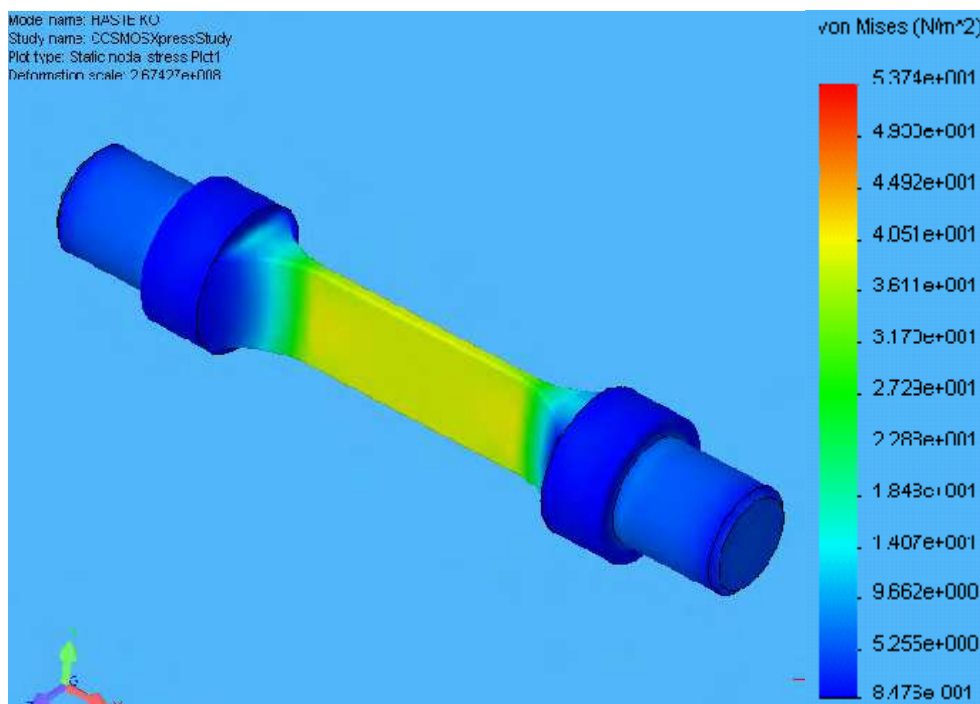


Figura 5.11 – Haste de extracção actuada

O material seleccionado para a construção da haste foi uma liga de alumínio Alloy 2011, ref^a dur AL 2011 T3 red 25 h11, com as seguintes propriedades:

Tabela 5.6 – Propriedades da Liga de Alumínio

Item	Unidade
Densidade	2.82g/cm ³
Módulo de Elasticidade	71 GPA
Condutividade térmica	138 W/m.k
Expansão Térmica	23x10 ⁻⁶ /K

A haste tem uma área de 60 mm² na secção central, foi instrumentada com dois extensómetros, da marca MM: Type Ea-13-250BF-350 option LE, lote R-A48AF19, com 350.0 Ω ± 0.3%, que permitiram enviar sinal para o sistema de aquisição de dados. A figura 5.12, ilustra e pormenoriza as características técnicas destes extensómetros.

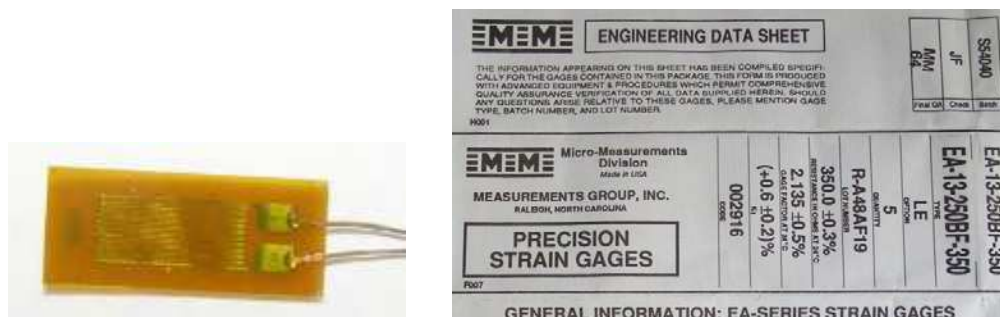


Figura 5.12 – Extensómetro MM e ficha técnica

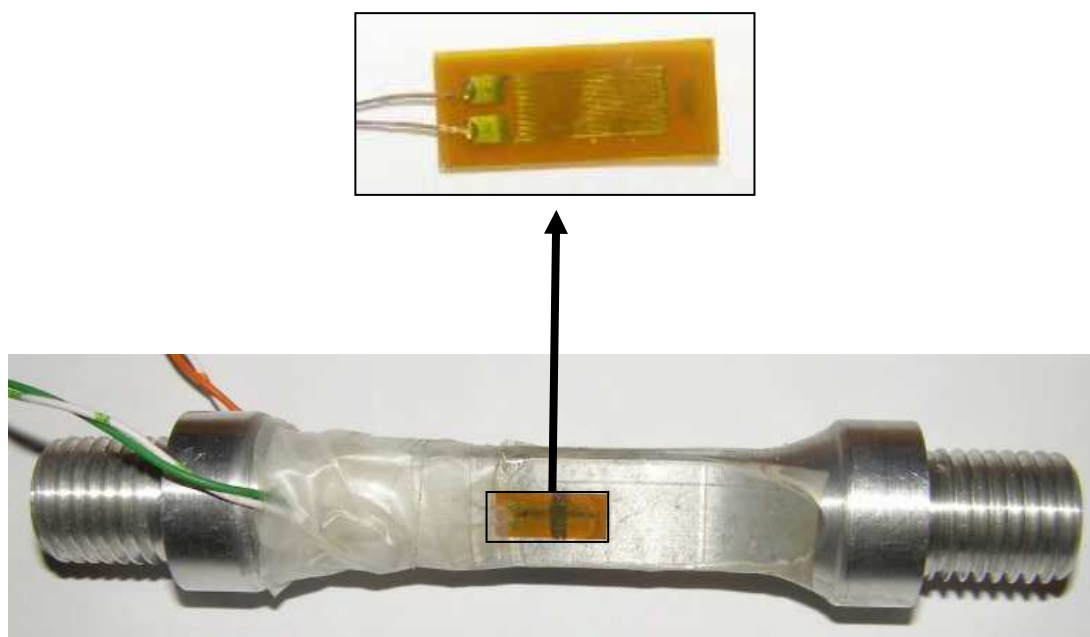


Figura 5.13 – Haste de extracção instrumentada

A figura 5.13 apresenta a haste de extracção instrumentada, com dois extensómetros MM, um de cada lado da haste.

A nível de funcionamento do sistema de extracção, a haste de extracção está acoplada ao cilindro hidráulico da máquina de injeção (KO) e às chapas de extracção do molde, figura 5.14. Estas, por sua vez estão ligadas às hastes e aro extractor,

deslizando sobre 2 guias lubrificadas. Portanto o sistema interage entre si e movimenta-se em conjunto no avanço e recuo da extracção da peça.



Figura 5.14 – Accionamento do sistema de extracção

5.7 Sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados utilizado para efectuar o registo dos valores durante os ensaios de injecção, foi o Ni cDaQ-9172 National Instruments com recurso ao software labView 8.2., que pode ser observado na figura 5.15.



Figura 5.15 – Sistema de aquisição de dados NicDaQ-9172 (IPL-ESTG)

O sistema é constituído por uma base aquisição de sinal, que efectua o interface entre o molde e um computador com software labView.

Foi desenvolvido um diagrama com os componentes necessários à aquisição e gravação de dados por parte do sistema, figura 5.16. Nesta aplicação foram definidos

2 extensómetros efectuavam a leitura das extensões da haste de extracção, uma sonda para medir a temperatura de extracção e o contador de tempo.

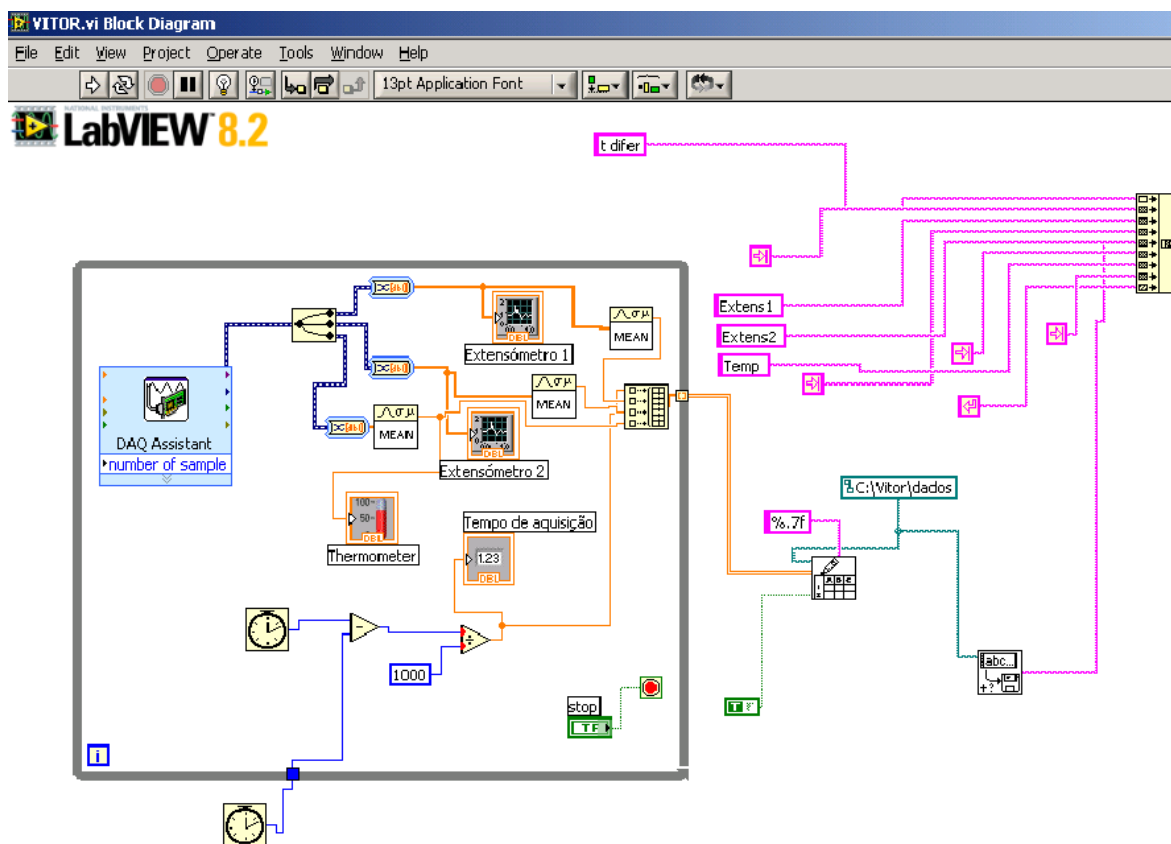


Figura 5.16 – Diagrama de blocos para a aquisição de dados - LabView 8.2

Em paralelo foi criada uma interface gráfica, figura 5.17, que permitiu visualizar em tempo real os valores dos extensómetros na haste de extracção. A temperatura de trabalho foi também validada com recuso a sonda externa.

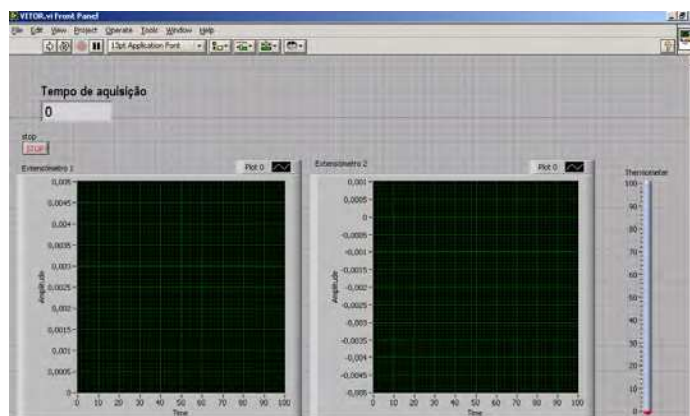


Figura 5.17 – Interface gráfica para visualizar os extensómetros

Na figura 5.18, pode encontrar-se o sistema de aquisição de dados que esteve ligado directamente ao molde através da haste instrumentada, e em simultânea a um computador que efectuava a leitura e o registo dos dados por intermédio do diagrama e interface gráficos criados.



Figura 5.18 – Sistema de aquisição de dados, molde e equipamento de injecção

Na máquina de injecção estava instalado o molde com a versão 1, como podemos observar na figura 5.19. Nesta, pormenorizamos alguns dos componentes mais importantes dos ensaios efectuados.



Figura 5.19 – Interface do sistema de aquisição de dados (IPL-ESTG)

Os dados obtidos no decorrer dos ensaios de injeção, terão de ser tratados, uma vez que a informação obtida directamente da base de dados são o tempo e as extensões. Estas terão de ser convertidas em forças de extracção.

5.8 Ensaio do molde – Versão 1 [3 corpos]

Como referido nos capítulos anteriores, a versão 1 é constituída por 3 corpos, segue-se então uma apresentação das peças e características mais relevantes.



Figura 5.20 – Peça e gito da versão 1 do molde

A tabela 5.7 mostra o peso da moldação, da peça e do gito da versão 1 no material plástico ABS/PC preto.

Tabela 5.7 – Peso das peças de plástico (material ABS/PC)

AMOSTRA	COMPONENTE	PESO [gr.]
1	Peça	12.85
1	Gito	1,25
1	Moldação	14.10

O gito representa 8% e a peça 92% do peso total da moldação. A peça apresenta um aumento de peso em função dos parâmetros de injeção definidos, ou seja com ajustes no processo de injeção quer a nível de variações de quantidade de material, tempos e pressões de enchimento e temperaturas pode-se variar os pesos aqui apresentados.

Para a versão 1 do molde de injeção, a figura 5.21 apresenta os pesos da moldação, da peça e dos respectivos gito para cada um dos materiais testados.

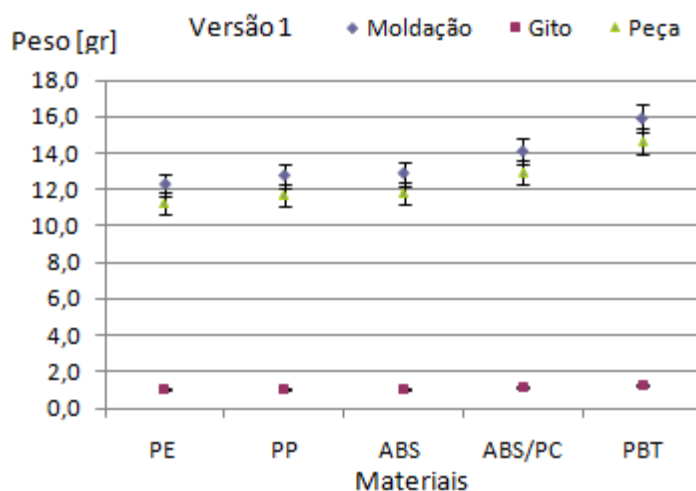


Figura 5.21 – Peso das peças de plástico da versão 1

A figura 5.22 mostra duas amostras da versão 1 em materiais diferentes.



Figura 5.22 – Peças plásticas da versão 1

A figura 5.23 apresenta o sistema de extracção recuada, ponto intermédio e a avançado para a versão 1. Esta última posição do curso de extracção da peça plástica é suficiente para remover completamente a peça da bucha.



Figura 5.23 – Fases da extracção do molde (Versão 1)

5.9 Ensaio do molde – Versão 2 [2 corpos]

Como já apresentado nos capítulos, o molde está preparado para três versões, a versão 2 apresenta 2 corpos. A figura 5.24 apresenta a peça e o gito, que tem um tamanho superior ao da versão 1.



Figura 5.24 – Peça e gito da versão 2

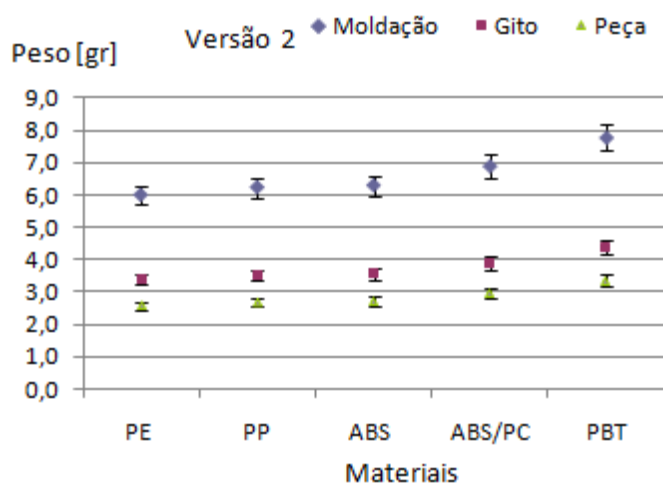


Figura 5.25 – Peso das peças de plástico da versão 2

A figura 5.25, apresenta os pesos das moldações nos diversos materiais plásticos, bem como o peso das peças e gitos. Para cada material, representa-se na figura o respectivo desvio padrão dos pesos tendo em conta as variações do processo.

O gito representa 57% e a peça 43% do peso total da moldação. A peça e o gito aumentam de peso em função do material injectado.



Figura 5.26 – Peças plásticas da versão 2

A figura 5.26 mostra duas amostras da versão 2 em materiais diferentes sem gito, enquanto que a figura 5.27 apresenta o sistema de extracção da versão 2 com uma peça e gito a serem removidos da bucha do molde.

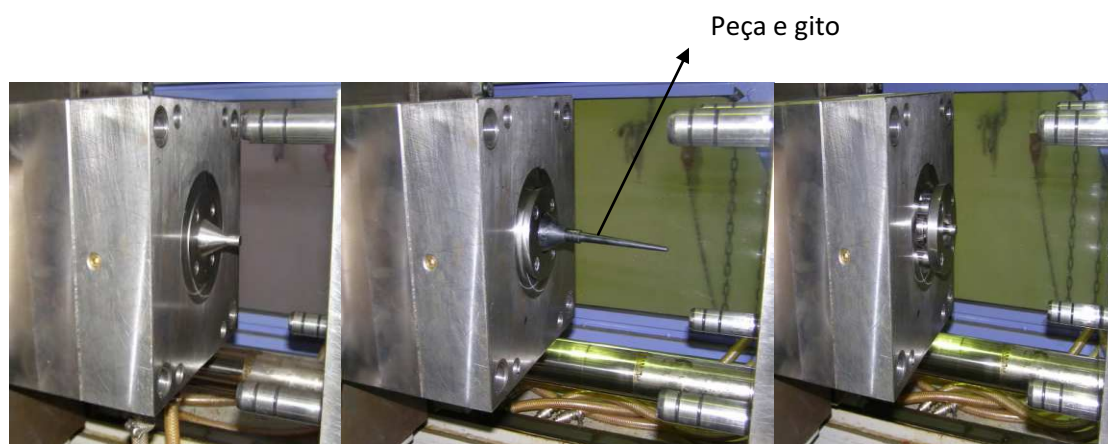


Figura 5.27 – Ensaio do molde da versão 2 com extracção da peça e gito

5.10 Ensaio do molde – Versão 3 [1 corpo]

A última versão do molde, a versão 3, apresenta apenas 1 corpo. A figura 5.28 apresenta a peça e o gito. Como a peça da versão 3 é muito pequena, então o gito terá de compensar o comprimento para se poder usar o mesmo molde de injeção.



Figura 5.28 – Peça e gito da versão 3 do molde

O gito representa 88% e a peça 12% do peso total da moldação. O gito tem a maior influência no aumento de peso em função do material injectado. A peça tem uma pequena variação de peso em função do material injectado. Os parâmetros de injeção não provocam variações significativas no peso da peça, ver figura 5.29.

O gito apresenta um desperdício muito elevado. Para reduzir os custos de modo a ter um custo de produção competitivo, deveria reduzir-se o tamanho do gito ou reprocessar.

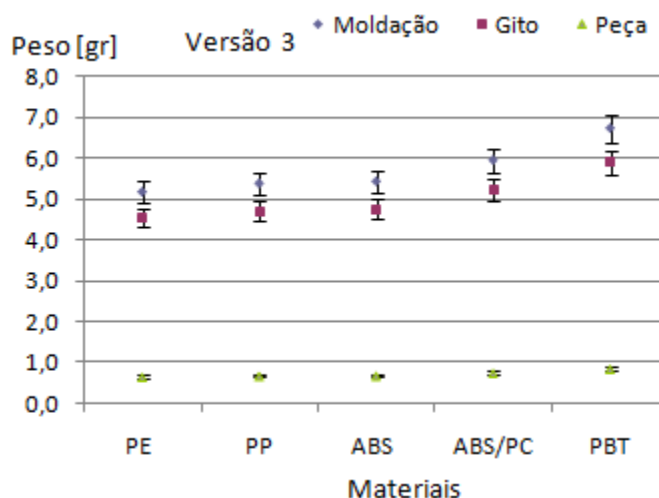


Figura 5.29 – Peso das peças de plástico da versão 3

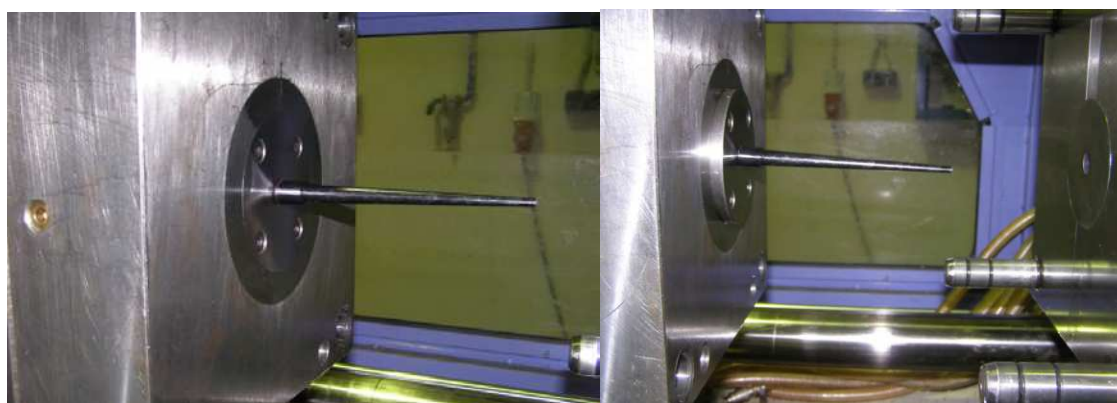


Figura 5.30 – Ensaio do molde da versão 3 com extracção da peça e gito

5.11 Amostras das peças plásticas

As moldações das três versões são apresentadas na figura 5.31, a qual possibilita a comparação entre as peças e os respectivos gitos.



Figura 5.31 – Amostras das 3 versões das peças e respectivos gitos



Figura 5.32 – Amostras das 3 versões das peças em ABS e PE

A figura 5.32 apresenta as peças nas três versões, em dois tipos diferentes de materiais plásticos; ABS e PE.

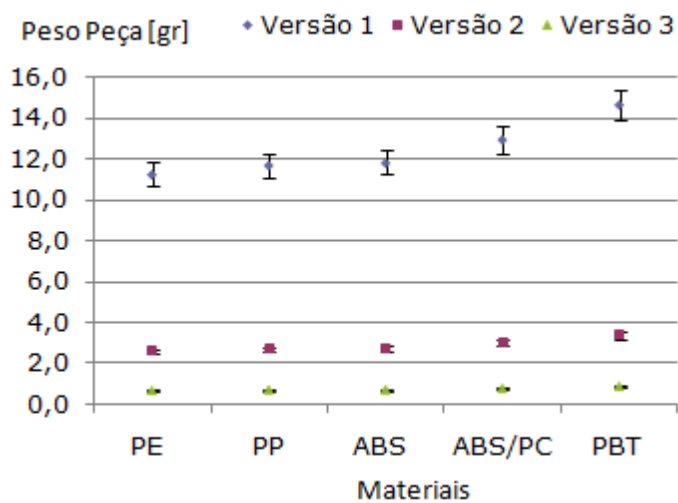


Figura 5.33 – Peso das peças das três versões

Pode-se observar na figura 5.33, a variação de peso das peças de cada versão processadas em diferentes materiais, e a diferença de peso entre as três versões da peça plástica.

Capítulo 6

Modelos de previsão das forças de extracção

As simulações numéricas são um instrumento importante na previsão de resultados, com base não só em modelos já existentes, mas na criação de novos modelos para desenvolvimento de produtos de engenharia.

Os resultados expectáveis poderão ser comprovados com recurso a peças protótipos, ensaios e testes de validação.

6.1 Previsão das forças de extracção nas peças

No capítulo da revisão bibliográfica foram descritos vários modelos para estimar as forças de extracção. Muitos investigadores têm utilizado os modelos de Menges ou Glanvill, enquanto outros desenvolveram os seus próprios modelos. Foram também apresentados os efeitos dos vários parâmetros envolvidos na determinação das forças de extracção, realçando outras variáveis que precisam de ser tomadas em consideração.

O presente trabalho tem como objectivo determinar as forças de extracção e também avaliar os efeitos dos vários parâmetros de injeção no cálculo das forças de extracção para as três versões da peça plástica com recurso ao mesmo molde de injeção. Neste trabalho foram determinadas as forças de extracção de peças processadas com cinco materiais termoplásticos.

Na figura 6.1, pode-se observar que a área de contacto do aro extractor e da base da total da peça plástica para a versão 1 [3 corpos], onde será efectuado o contacto para a extracção da peça plástica.

Foram obtidos resultados experimentais relativos às forças de extracção, para as 3 versões e para os materiais testados. Os resultados experimentais obtidos foram comparados com os resultados da previsão para as forças de extracção.

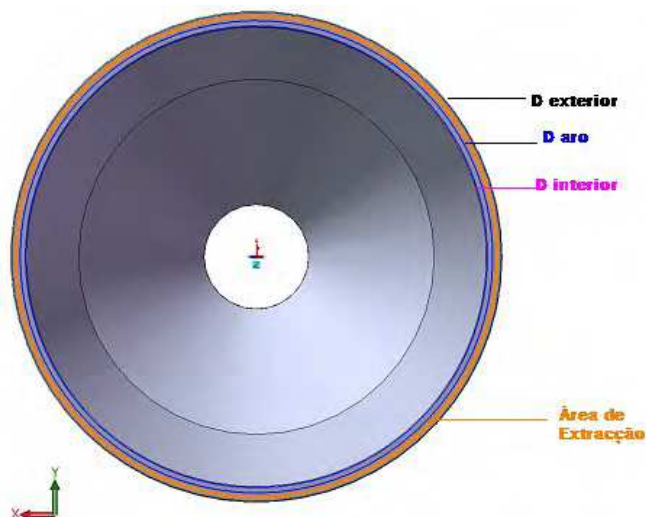


Figura 6.1 – Área de extracção da peça da versão 1

A análise foi realizada com base no modelo de Glanvill, para as três versões do molde de injecção. Na figura 6.3, é apresentada uma análise comparativa dos resultados experimentais e os do modelo de previsão para a versão 1.

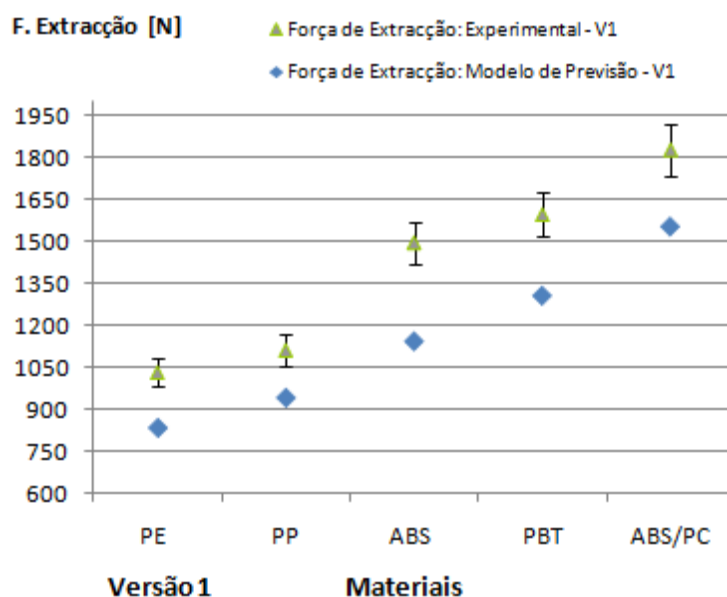


Figura 6.2 – Análise comparativa dos resultados experimentais e os obtidos pelo modelo de previsão (Versão 1)

A partir da figura 6.2, pode-se observar que as forças experimentais são superiores às do modelo de previsão. Com o Polipropileno (PP) os resultados experimentais obtidos são próximos dos resultados do modelo experimental.

Na figura 6.3 é apresentado uma análise comparativa entre os resultados experimentais, de forças de extracção, e os obtidos com o modelo de previsão para a versão 2.

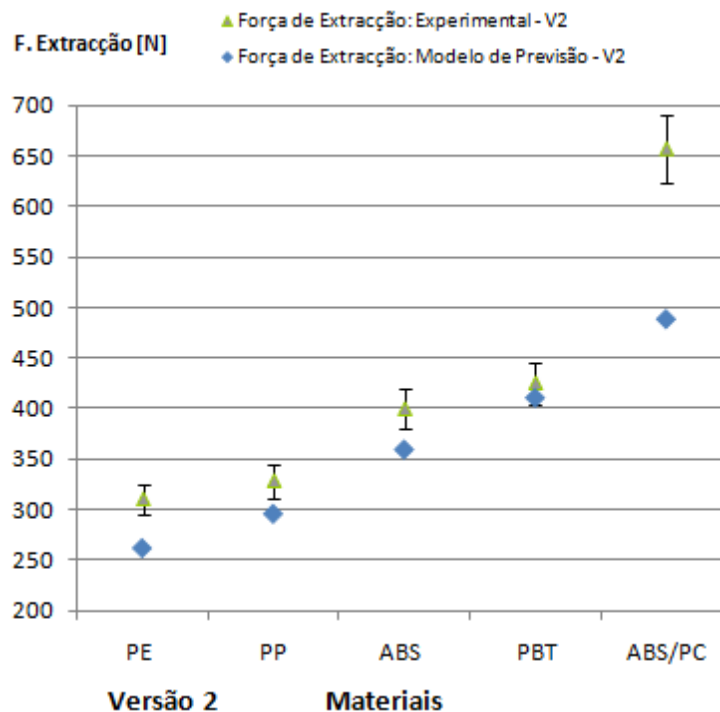


Figura 6.3 – Análise comparativa dos resultados experimentais e os obtidos pelo modelo de previsão (Versão 2)

Os valores obtidos com base no modelo de previsão são inferiores aos resultados experimentais. O PP e o PBT são os materiais plásticos a maior aproximação de resultados. O ABS/PC apresenta a maior discrepância de valores.

Relativamente à versão 3, de apenas 1 corpo, pela figura 6.4 pode-se observar um comportamento diferente aos obtidos nas versões para o PBT e ABS/PC, ou seja os valores do modelo de previsão são superiores aos resultados experimentais, com uma diferença inferior a 10N.

Para os materiais plásticos; PE, PP e ABS os valores das forças de extracção pelo modelo de previsão são muito próximas dos resultados experimentais. A versão 3 valida o modelo utilizado para os materiais plásticos: PP, PE e ABS.

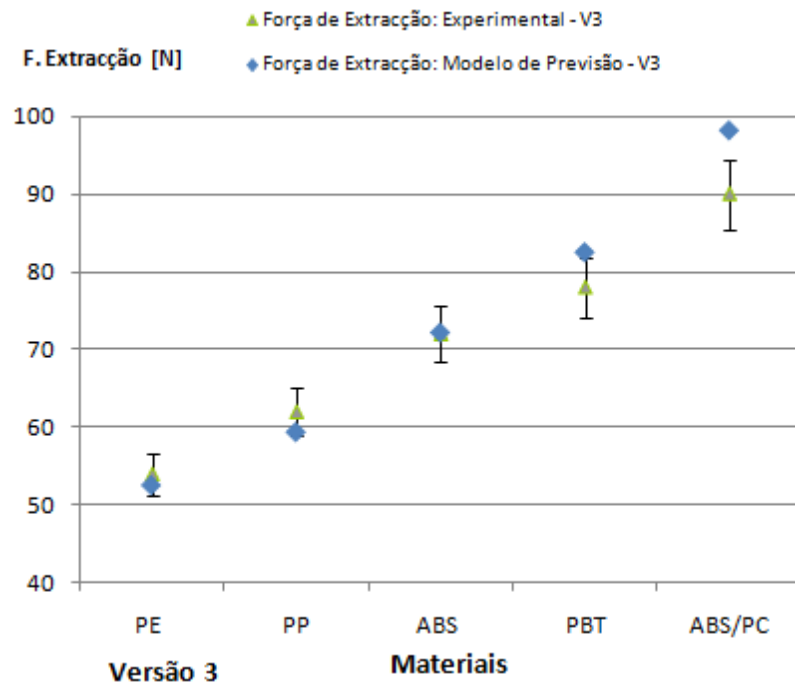


Figura 6.4 – Análise comparativa dos resultados experimentais e os obtidos pelo modelo de previsão (Versão 3)

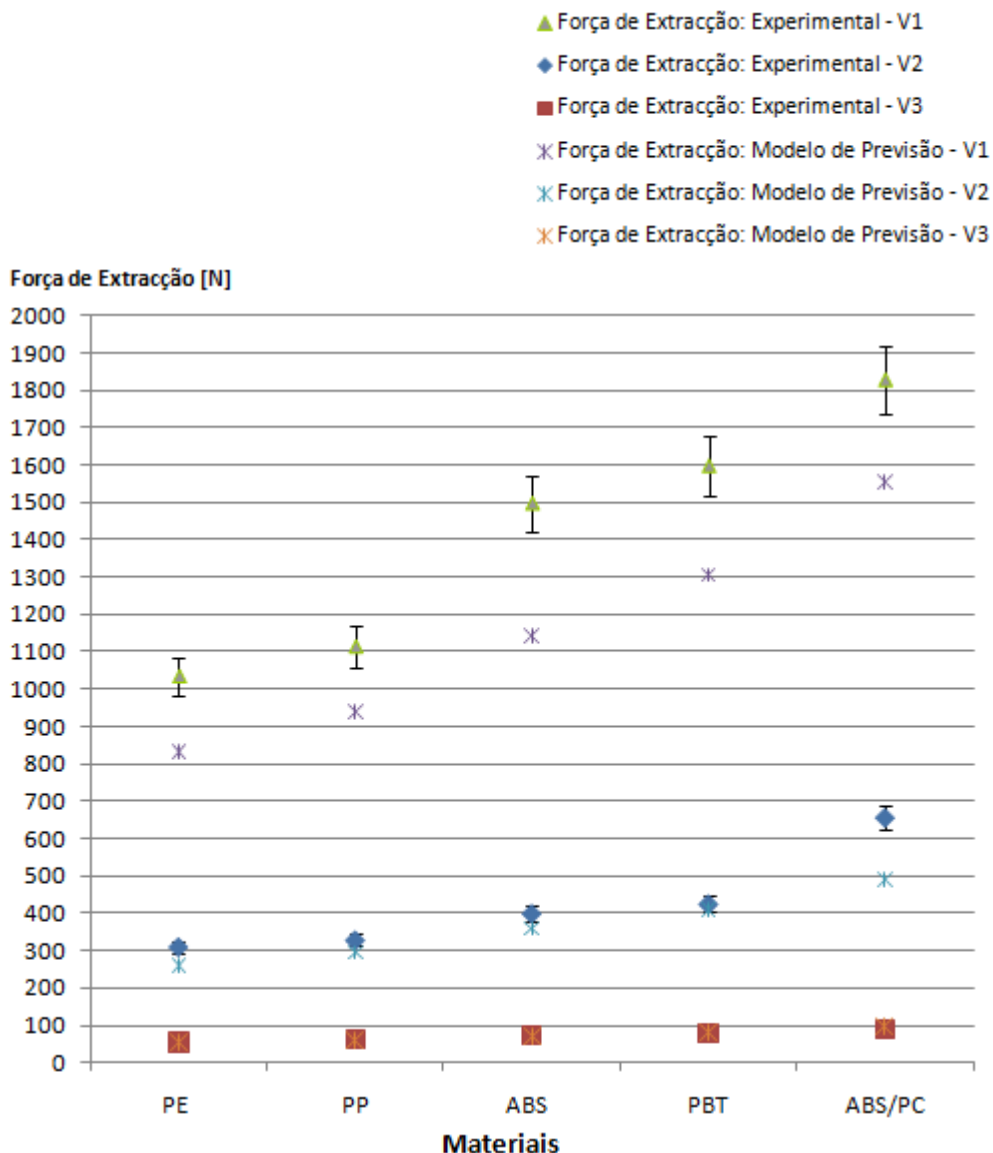


Figura 6.5 – Análise comparativa dos resultados experimentais e os obtidos pelo modelo de previsão para as 3 versões

Na figura 6.5, pode-se observar a análise comparativa dos resultados experimentais e os obtidos pelo modelo de previsão para as 3 versões em simultâneo. V1 representa a versão 1 [3 corpos], a V2 a versão 2 [2 corpos] e V3 a versão 3 [1 corpo].

6.2 Resultados

Conforme já referido em capítulos anteriores, os materiais termoplásticos utilizados no processo de injeção têm propriedades e características diferentes e, naturalmente, os parâmetros de processamento são distintos.

Consequentemente, nos testes de injeção foi necessário efectuar afinações nos parâmetros para a mesma versão do molde de injeção. Os principais ajustes incidiram, naturalmente, sobre as pressões de injeção, pressurização, temperaturas de processamento, cursos de extracção e temperaturas de refrigeração do molde.

Na figura 6.6, são apresentadas as diferentes temperaturas de processamento por injeção (temperaturas do cilindro de plasticização e molde) para os diferentes materiais termoplásticos utilizados.

Material			Temperaturas	
			Cilindro [°C]	Molde [°C]
1	PE	Flexirene MT 40A	160-200	10-40
2	PP	Hostacom HC G2 N01	160-200	15-40
3	ABS	Cycolac X37	240-280	60-80
4	ABS/PC	Cycoloy C1100 HF	240-280	60-80
5	PBT	Ultradur B4520	250-275	40-70

Figura 6.6 – Temperaturas de processamento para os materiais plásticos utilizados

As diferentes temperaturas, têm como consequência diferentes coeficientes de expansão térmica do aço (buchas), diferentes coeficientes de expansão térmica dos materiais plásticos e diferentes contracções das peças plásticas.

O sistema tribológico bucha/peça plástica, através do coeficiente de atrito, interage de forma diferente no momento de extracção da peça, em função do material a processar e condições de processamento.

A gama de temperaturas de processamento, temperatura de extracção, temperatura de solidificação do material associado ao tempo de arrefecimento (eficiência do sistema de refrigeração do molde), tempo de ciclo, são factores que podem explicar os desvios verificados entre resultados experimentais como os teóricos.

As propriedades físicas e mecânicas dos materiais plásticos (resistência mecânica e módulo de elasticidade) são naturalmente, função de temperatura de serviço e tipo de material, conforme pode ser observar na figura 6.7. O Módulo de Elasticidade dos materiais plásticos apresenta também ajustamentos em função da temperatura.

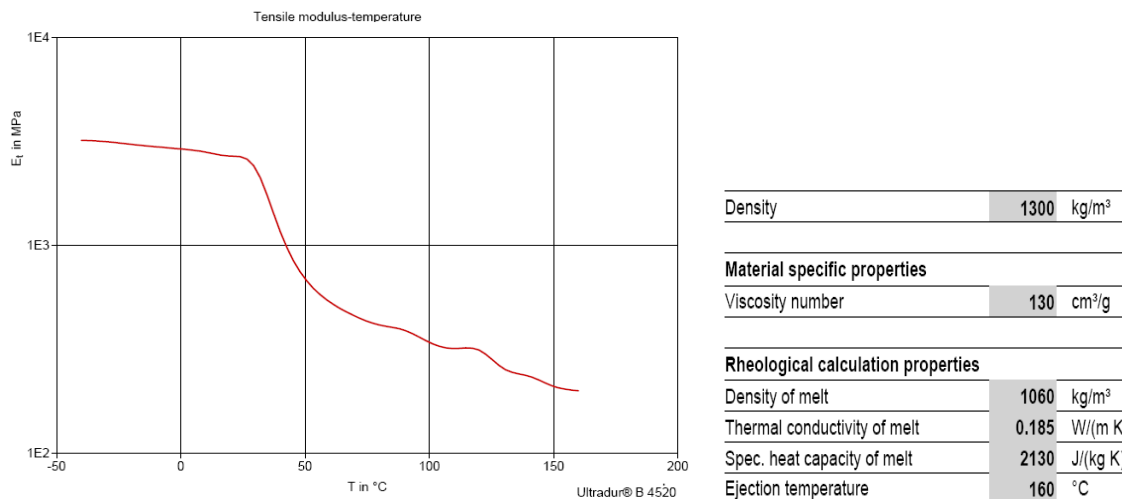


Figura 6.7- Módulo de elasticidade do PBT em função da temperatura (Ultradur B4520-CAMPUS® 5.1 - BASF)

O volume específico do material PBT varia naturalmente em função da temperatura. Na figura 6.7 pode-se observar a variação do volume específico versus temperatura para várias condições de pressurização do material.

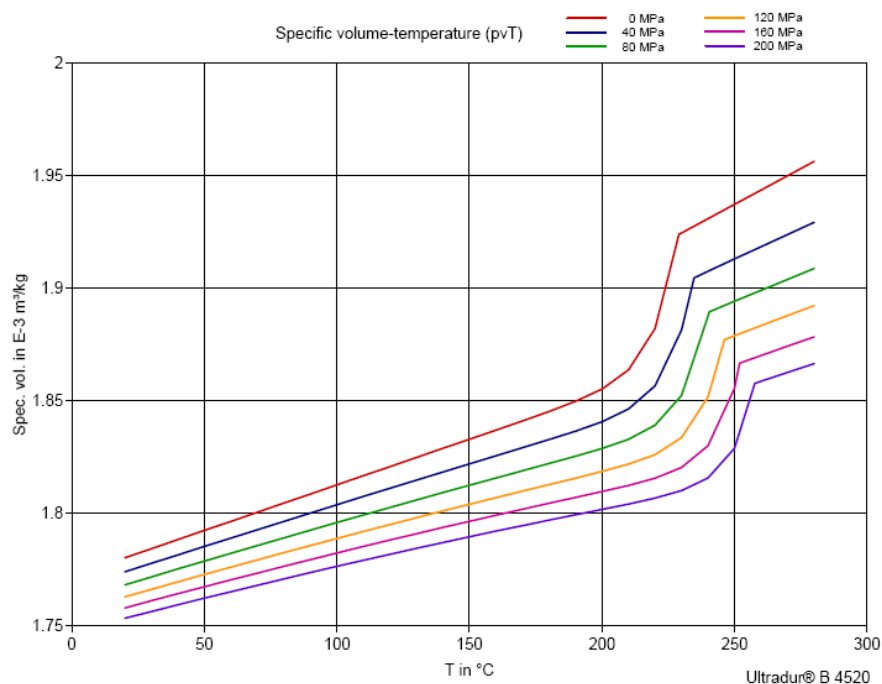


Figura 6.8 - Curvas de variação do volume específico versus temperatura para diferentes pressões de pressurização para o material PBT (CAMPUS® 5.1 - BASF)

Na figura 6.8 pode-se observar o andamento das curvas de tensão-deformação para diferentes temperaturas de serviço. Para temperaturas baixas pode-se observar que as deformações são naturalmente baixas e tensões relativamente altas. Para temperaturas mais elevadas as deformações são consideravelmente elevadas com valores de resistência mecânica mais baixas.

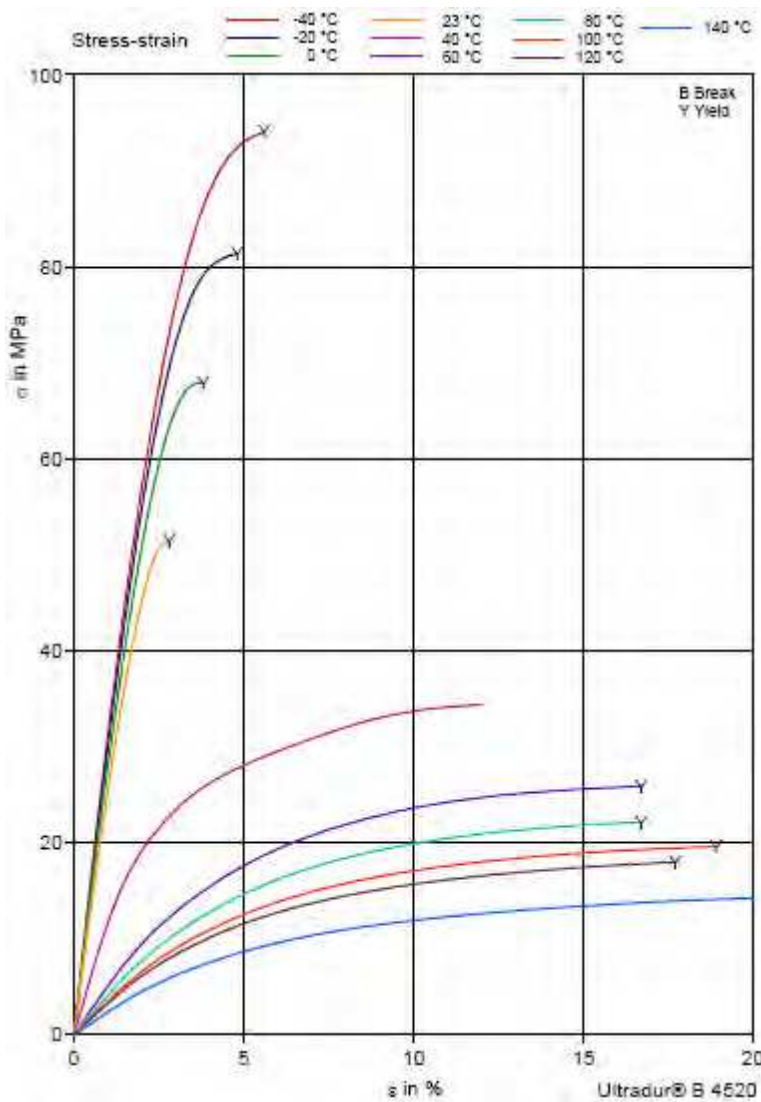


Figura 6.9- Curvas tensão-deformação do PBT (Ultradur B4520- CAMPUS® 5.1 - BASF)

A temperatura a que é extraída a peça plástica da zona moldante (temperatura de extracção) é um aspecto muito importante a ter em conta , pois esta condiciona as propriedades físicas e mecânicas do material da peça a extrair. Se a temperatura for relativamente elevada o material da peça plástica pode não ter suficiente rigidez para

ser extraída. Por outro lado, se a temperatura for relativamente baixa, o tempo de ciclo aumenta naturalmente.

Uma extracção com ciclo de extracção rápido pode trazer deformações, empenos e contracções elevadas à peça plástica. No caso oposto, a peça plástica já se encontra solidificada, com maior contracção mas irá conserteza apresentar forças de extracção superiores.

Capítulo 7

Análise e discussão de resultados

Pretende-se neste capítulo, analisar e discutir os dados obtidos, com o objectivo de avaliar as forças de extracção, envolvidas no processo de injeção das três versões da peça desenvolvidas para o efeito, utilizando diferentes materiais termoplásticos.

7.1 – Resultados dos ensaios de DMA

Foram realizados ensaios de DMA de materiais termoplásticos, utilizados no processamento das peças plásticas das versões (V1, V2 e V3). Os valores considerados na determinação da variação do módulo à flexão com a temperatura pois estes valores são considerados nos vários modelos de previsão das forças de extracção. O equipamento de análise DMA (Dynamic Mechanical Analysis) permite avaliar o comportamento mecânico de um material quando sujeito a um programa de temperatura controlada e sob o efeito de uma força mecânica que se altera com o tempo (figura 7.2). Com este tipo de equipamento é possível, para além de obter o módulo de elasticidade, determinar a temperatura de transição vítrea (T_g). A transição vítrea é um parâmetro importante nas áreas de processamento, pesquisa e desenvolvimento de materiais, devido à grande importância com relação às mudanças das propriedades, podendo-se estudar o comportamento deles em função da temperatura.

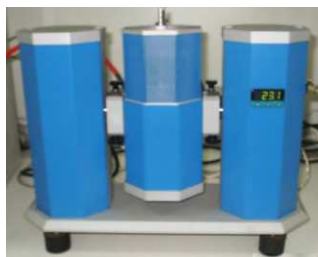


Figura 7.1 – Equipamento DMA usado nos ensaios de caracterização

Geralmente, uma análise de DMA é função do modo de operação, como se pode verificar na figura 7.1.

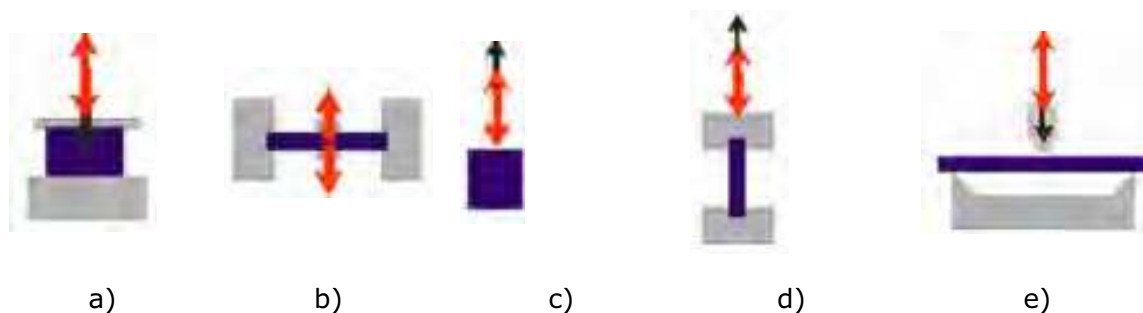


Figura 7.2 – Modos de operação de um equipamento DMA a) compressão /penetração; b) fadiga; c) oscilação com carga estática; d) tracção; e) flexão em três pontos.

Os ensaios dos materiais termoplásticos foram realizados em flexão em 3 pontos, com variação de temperaturas entre os 20°C e os 120°C, tendo como base a norma alemã DIN53457. Os provetes de material plástico foram ensaiados com dimensões de 42 mm de comprimento, 4 mm de largura e altura variável de amostra para amostra. Após a montagem do provete de material plástico no equipamento de DMA, previamente preparado com o sistema para flexão em 3 pontos, programou-se o equipamento para realizar o ensaio com uma gama de temperaturas entre 20 e 120°C. O software que acompanha o equipamento de DMA regista todos os valores necessários para a análise. Foram também realizados ensaios de DMA com os seguintes materiais: ABS, ABS-PC, PP e PE. Durante os ensaios, foi imposta uma variação da temperatura numa gama entre 30 e 100°C, com uma taxa de aquecimento de 5°C/minuto.

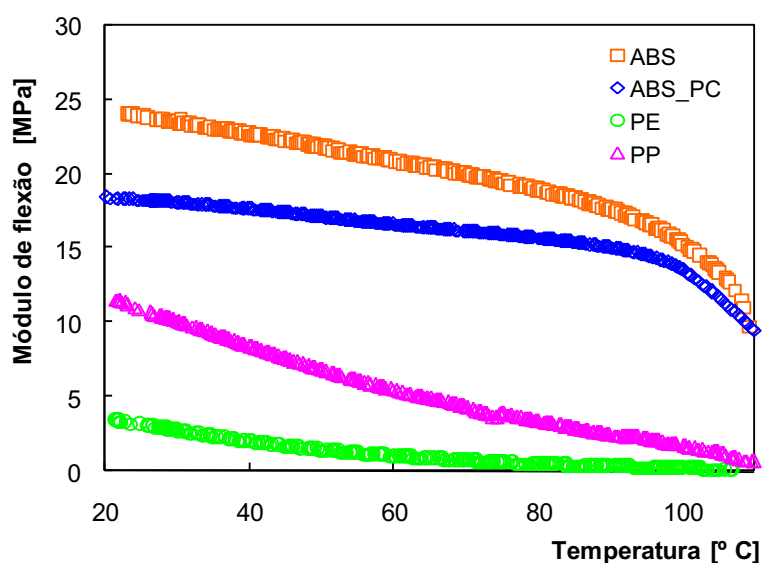


Figura 7.3 – Curvas de variação do módulo à flexão versus temperatura para os materiais termoplásticos ABS, ABS/PC, PP e PE.

Na figura 7.3, estão representadas as curvas relativas à evolução do módulo em flexão versus a temperatura para os vários materiais os materiais termoplásticos, utilizados no processamento das peças plásticas das versões (V1, V2 e V3). A partir da figura, é possível observar, como era esperar, que com o aumento da temperatura diminui o valor do módulo à flexão.

7.2 – Força de extracção com o molde em vazio

O molde tal como anteriormente referido, apresenta 3 versões da peça plástica. Para cada uma das versões foi determinada a força de extracção (média) em vazio, ou seja, a força resultante da movimentação do sistema de extracção (avango e recuo) sem se iniciar o novo ciclo de injeção.

O sistema de extracção foi dimensionado de forma a minimizar as forças envolvidas na movimentação destes sistemas de extracção em vazio mas, como existe contacto os vários componentes da extracção do molde, tem-se naturalmente uma força de atrito.

Os valores da força de movimentação em vazio são função da versão montada no molde, já que cada versão tem componentes específicos, tal como buchas, cavidades e aro extractor. Como estes componentes têm dimensões e formas diferentes, tem-se logicamente, forças em vazio diferentes.

Os valores das forças de extracção em vazio foram obtidos com recurso a técnicas de extensometria. Foram utilizados dois extensómetros (um de cada lado, figura 5.13), com o accionamento do sistema de extracção da máquina de extracção, registando os valores de extensão do KO instrumentado.

Com base na lei de Hooke, e no valor do módulo de elasticidade do alumínio usado no KO, para as temperaturas de actuação do sistema de extracção, foi determinada a força de extracção em vazio.

Consequentemente, para cada ensaio foram efectuadas os registos das forças em vazio. Na figura 7.1, pode-se ver os valores das forças de extracção em vazio para as três versões das peças plásticas.

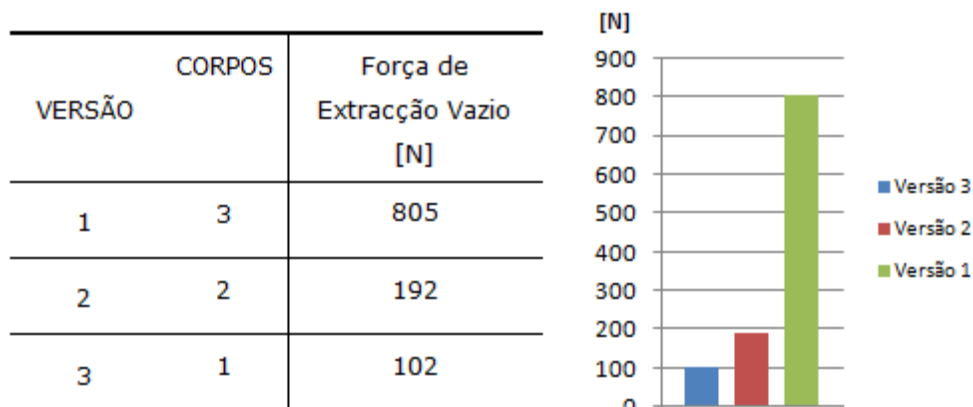


Figura 7.4 – Forças de movimentação do sistema de extracção em vazio.

Com base nos resultados apresentados, na figura 7.4, pode-se dizer que o valor obtido na versão 1 é o maior, consequência dos componentes da versão 1 com 3 corpos, terem formas e dimensões muito superiores.

Por simplificação do cálculo, considerou-se que a força de extracção da peça plástica será a diferença entre a força de extracção total e a força de extracção em vazio.

$$F_{ext} = F_{total} - F_{vazio} \tag{7.1}$$

Na figura 7.5, pode-se observar o comportamento da curva de extracção ao longo de 10 ciclos de injeção consecutivos (em processo automático). As forças de extracção medidas dizem respeito à força total de extracção.

O fecho do molde inicia o primeiro ciclo de injeção. Existe uma tensão residual do sistema, em que o sistema de acoplamento da máquina e o sistema de extracção do molde estão em tensão, o que provoca uma tensão residual permanente, esta tensão surge devido aos extensómetros estarem a ser solicitados.

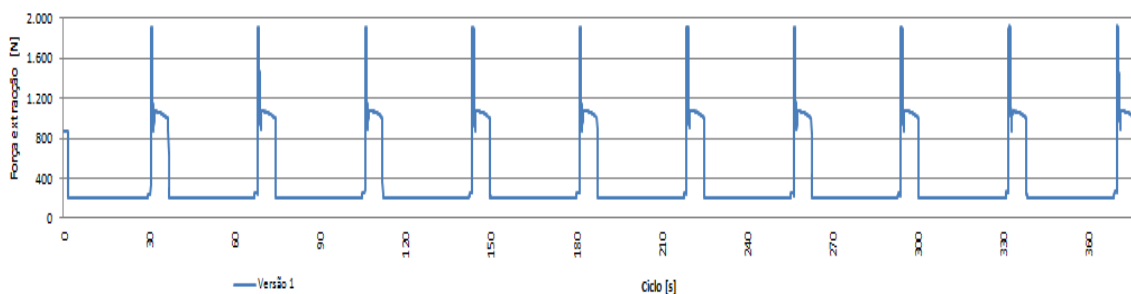


Figura 7.5 – Força de extracção total medida ao longo de 10 ciclos de injeção consecutivos (Versão1 em PP).

No instante em que é accionado o sistema de extracção, o sistema de aquisição de dados inicia o registo das extensões, medidas no KO do actuador do sistema de extracção instrumentado (figura 5.13) que, com base na lei de Hooke, dá aproximadamente 1900N da força de extracção total.

Após a peça sair da bucha a extracção continua o seu deslocamento até atingir o curso programado, de forma que a peça saia completamente da bucha e possa cair por gravidade para o tapete transportador.

O movimento de avanço e recuo da extracção é bem visível na figura 7.2, com valores na ordem dos 1000N, que ao retirar o valor de pressão permanente, obtêm-se o valor de 820N de força de vazio. Sendo então a força de extracção da peça plástica de aproximadamente 1080N para este caso em concreto.

É de salientar, que neste ensaio se obteve um ciclo de processamento por injecção de 34 segundos, e o tempo de extracção da peça da bucha foi de 0.58 segundos (580 ms). O tempo total de extracção da peça, desde a abertura do molde, avanço da extracção, pausa, recuo da extracção e fecho do molde foi de aproximadamente 5 segundos.

Como o processo de moldação por injecção é um processo cíclico, existindo no entanto variações entre cada ciclo. A recolha de amostras de peças plásticas foi efectuada após o processo de injecção estar estabilizado, o que pressupõe a rejeição das primeiras 10 moldações.

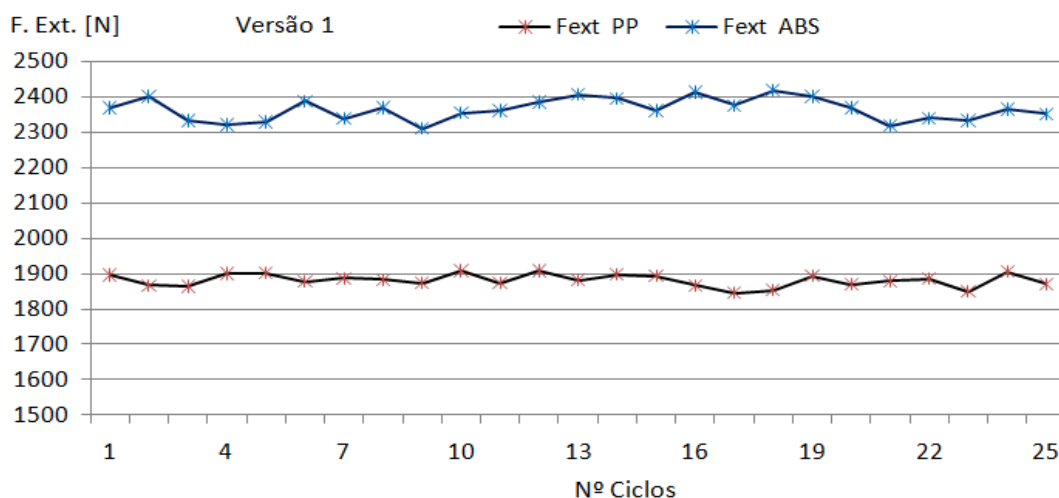


Figura 7.6 – Evolução da força de extracção ao longo do processamento de 25 amostras de peças plásticas em PP e ABS.

Na recolha de dados para a determinação das forças de extracção, foi efectuado um estudo com 25 ciclos em automático e após o processo estabilizado, para avaliar a reprodutibilidade do sistema no processamento das amostras de peças plásticas. As variações associadas ao processo de injeção podem ser observadas na figura 7.6.

A variação das forças de extracção nas amostras analisadas situa-se entre 3 e 6% dependendo do material e respectivos parâmetros de injeção.



7.3 – Resultados da versão 1 [3 corpos]

As forças de extracção envolvidas no processamento por injeção da peça plástica da versão 1 (3 corpos), versão mais completa, apresentam o maior valor da força total de extracção e da força de extracção da peça, como era expectável.

A força de extracção em vazio ao longo dos diferentes ensaios não apresentou uma variação significativa, mesmo com os ajustes necessários nos parâmetros de processamento quando se procedeu à troca de matéria-prima a processar.

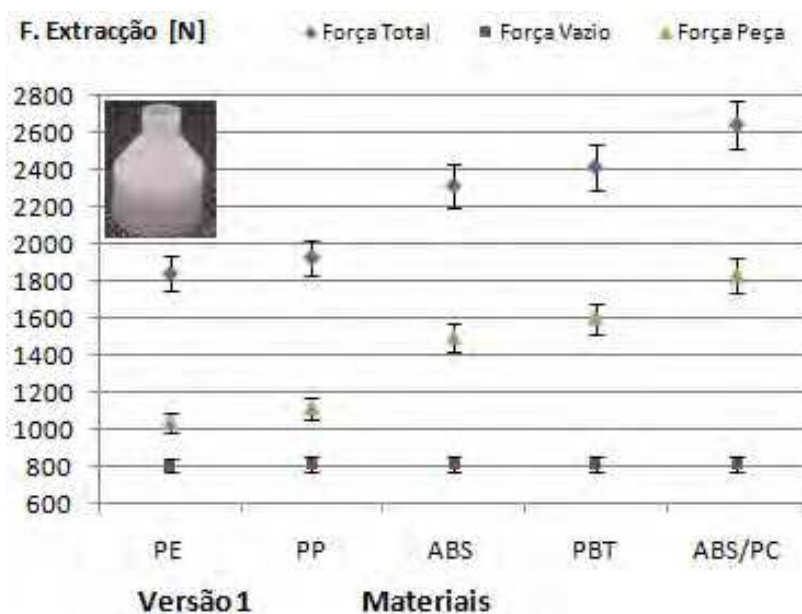


Figura 7.7 – Forças de extracção experimentais da versão 1 [3 corpos]

Relativamente à força de extracção da peça plástica, tal como podemos observar pela figura 7.7, obteve-se valores com diferenças significativas para cada tipo de material como era de esperar. Os resultados obtidos são função do tipo de material a processar e consequente ajuste nos parâmetros no processamento por injeção.

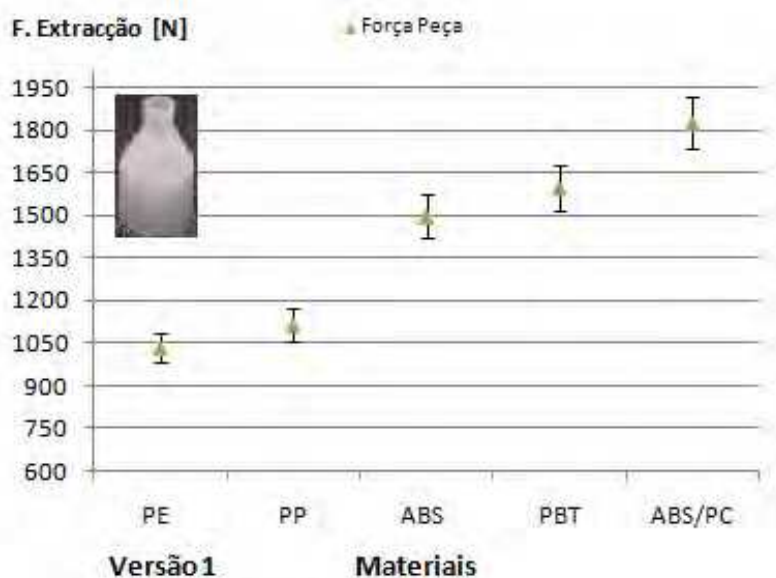


Figura 7.8 – Forças de extracção experimentais para a peça da versão 1 [3 corpos]

Os resultados são influenciados pelos parâmetros de processamento por injeção, sendo os mais significativos a pressão e tempo de compactação da peça plástica. Os valores obtidos para a força de extracção da peça plástica, variam entre os 1000N para o material PE e 1900 N no caso do material ABS/PC.

A força de extracção total da peça será o somatório da força de extracção do corpo 1, com o corpo 2 e corpo 3, equação (7.1).

$$F_{ext} \cdot V1 = F_{c1} + F_{c2} + F_{c3} \tag{7.1}$$

Em que: $F_{ext.V1}$ – força de extracção da peça plástica para a versão 1; F_{c1} – Força de extracção atribuída ao corpo 1; F_{c2} – Força de extracção atribuída ao corpo 2 e F_{c3} – Força de extracção atribuída ao corpo 3.

A geometria da peça, a saída dos diferentes corpos, o tipo de acabamento superficial da bucha, o material plástico e os parâmetros de processamento por injeção, têm naturalmente um papel importante na determinação das forças de extracção.

Na figura 7.9 estão representados os desenhos em CAD 3D, do elemento moldante bucha, com os respectivos ângulos de saída de cada um dos corpos.

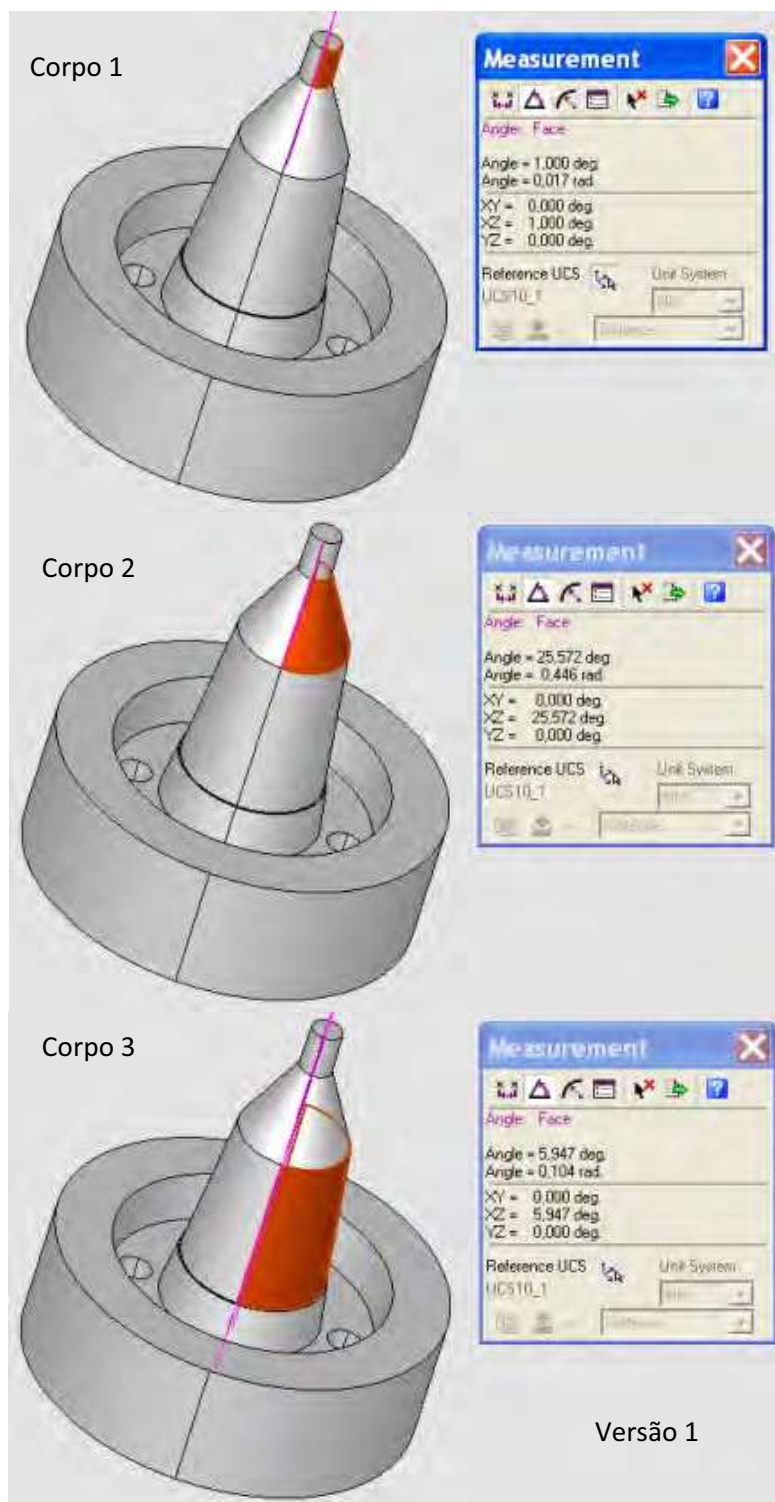


Figura 7.9 – Ângulos de saída dos três corpos (versão 1)

O corpo 3 tem um ângulo de saída de 6°, o corpo 2 uma saída de 25°, enquanto o corpo mais pequeno, corpo 1, tem 1° de saída o que correspondente à saída mínima

para este tipo de geometria. Saídas inferiores a 1º comprometem a desmoldação da peça da bucha e conseqüentemente a qualidade da peça a obter, uma vez que podem ocorrer arrastos, empenos ou deformações permanentes na peça.

Na tabela 7.1 são indicados os ângulos de saída dos três corpos da versão 1 do molde.

Tabela 7.1 – Ângulos de saída dos três corpos para a versão 1 [3 corpos]

VERSÃO	CORPO	Ângulo de saída [º]
1	3	6º
	2	25º
	1	1º



7.4 – Resultados da versão 2 [2 corpos]

Tal como na versão 1, na versão 2 não foram observadas variações significativas ao longo dos vários ciclos de processamento nos valores da força de extracção em vazio (figura 7.10).

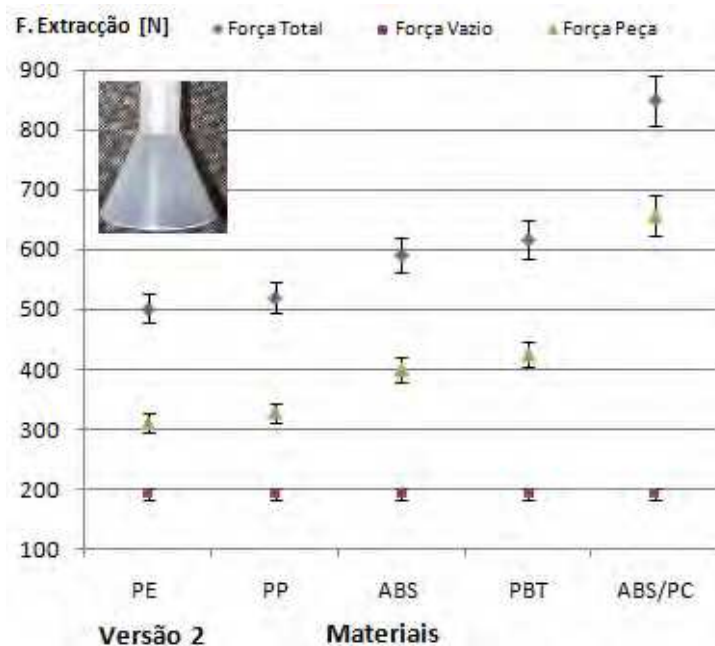


Figura 7.10 – Forças de extracção experimentais da versão 2 [2 corpos]

Conforme se pode observar a partir da figura 7.10 (versão 2), foram obtidos valores de extracção de 300N, para o processamento do material PE e e 650 N no caso do processamento com ABS/PC.

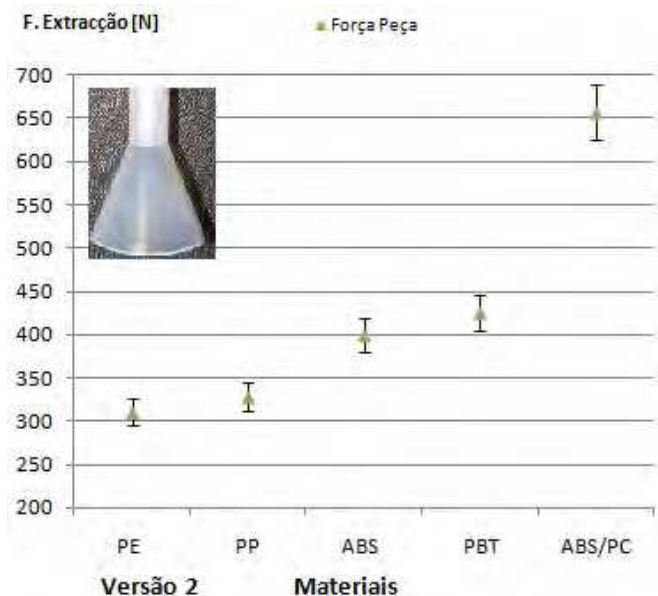


Figura 7.11 – Forças de extracção experimentais para a peça da versão 2 [2 corpos]

Os valores relativos às forças de extracção obtidos para a versão 2 são bastante inferiores aos da versão 1. As peças processadas nas duas versões (1 e 2) são muito diferentes, tanto em termos de geometria como de peso. A peça 1 tem um peso médio de 12 gramas, enquanto que a peça 2 tem apenas 3 gramas, sendo 4 vezes mais leve.

A equação (7.2), define a força de extracção total da peça como o somatório da força de extracção do corpo 1 com o corpo 2:

$$F_{ext} \cdot V2 = F_{c1} + F_{c2} \tag{7.2}$$

Em que: $F_{ext} \cdot V2$ – força de extracção da peça plástica para a versão 2; F_{c1} – Força de extracção atribuída ao corpo 1 e F_{c2} – Força de extracção atribuída ao corpo 2.

A peça plástica da versão 2 é constituída por dois corpos, tendo o corpo 1 um ângulo de saída mínimo para poder ser desmoldado, enquanto que o segundo corpo apresenta um ângulo de inclinação bastante acentuado.

Na figura 7.12, estão representados os desenhos CAD 3D dos elementos moldantes (bucha) com os respectivos ângulos de saída de cada um dos corpos.

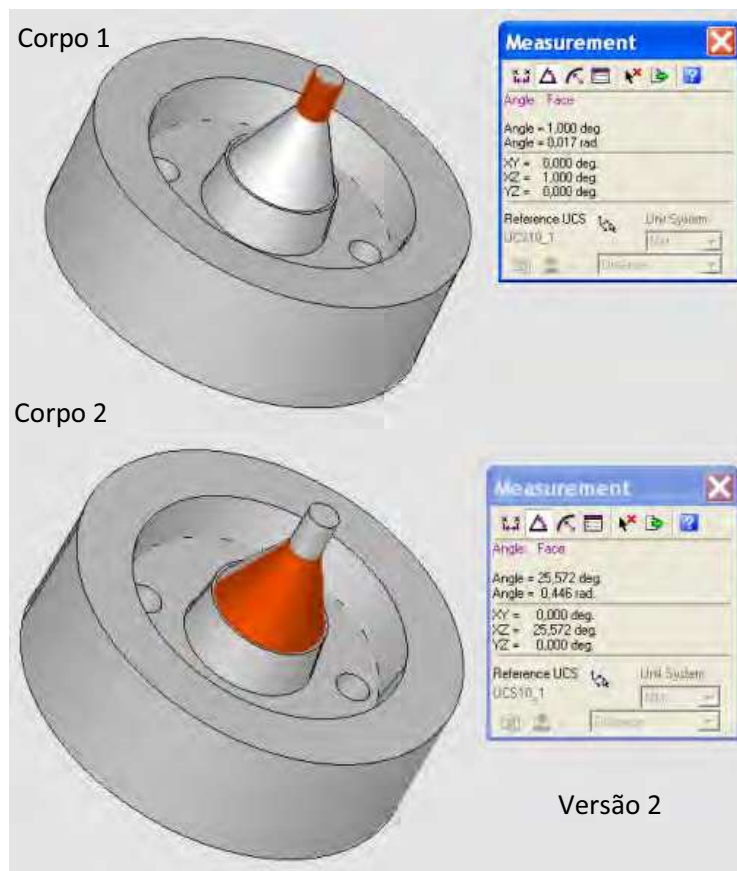


Figura 7.12 – Ângulo de saída dos dois corpos (versão 2)

Na tabela 7.2 são indicados os ângulos de saída dos dois corpos da versão 2 do molde de processamento por injeção.

Tabela 7.2 – Ângulo de saída dos dois corpos da versão 2

VERSÃO	CORPO	Ângulo de saída [°]
2	2	25°
	1	1°



7.5 – Resultados da versão 3 [1 corpo]

Na análise das forças de extracção envolvidas no processamento por injeção da peça plástica, Versão 3 (1 corpo), também não foram observadas variações significativas ao longo dos diferentes ensaios para a determinação da força de extracção em vazio.

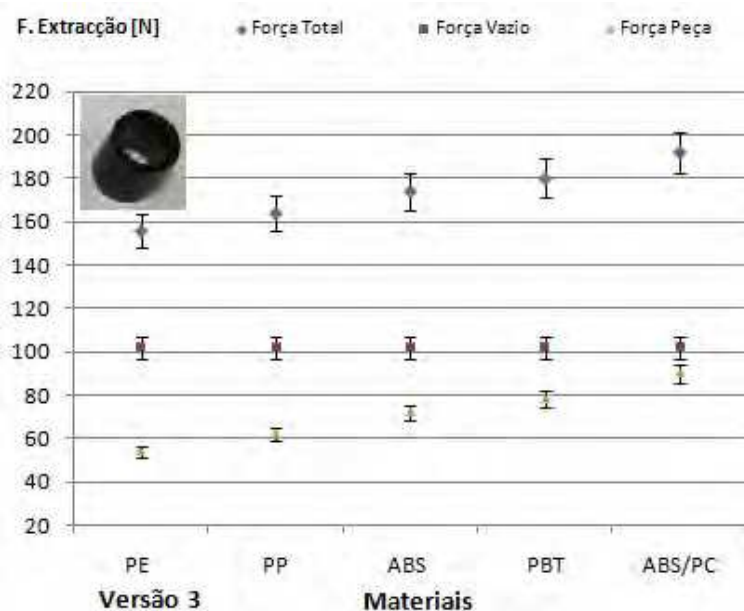


Figura 7.13 – Forças de extracção experimentais da versão 3 [1 corpo]

Na figura 7.13 são apresentados os resultados relativos às forças de extracção para cada um dos materiais utilizados no processamento da peça plásticos da versão 3. O valor da força de extracção em vazio obtido, para a versão 3 (1 corpo), é de cerca de 100N.

Pode-se observar, na figura 7.11 os valores relativos à força de extracção para os diferentes materiais termoplásticos utilizados no processamento da peça plástica da versão 3 (1 corpo). Os valores obtidos situam-se entre 50N, para o PE e os 100N no caso do ABS/PC.

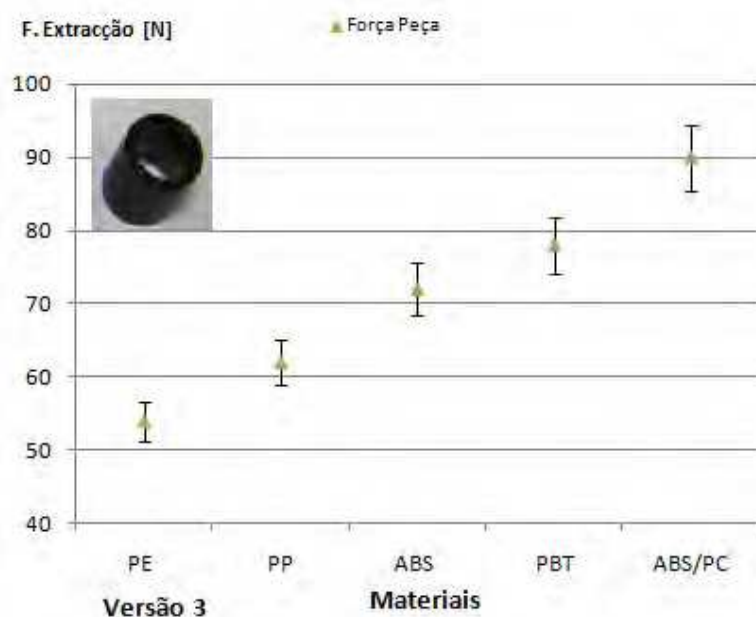


Figura 7.14 – Forças de extração experimentais para a peça da versão 1 [1 corpo]

A equação (7.3), define a força de extração total da peça como a força de extração do corpo 1:

$$F_{ext} \cdot V3 = F_{c1} \tag{7.3}$$

Em que: $F_{ext.V3}$ – força de extração da peça plástica para a versão 3; F_{c1} – Força de extração atribuída ao corpo 1.

A peça plástica, de apenas um corpo, tem um ângulo de saída mínimo de 1º para poder ser possível desmoldar da zona moldante (bucha).

Na figura 7.15, está representado o desenho CAD 3D do elemento moldante (bucha) com ângulo de saída do corpo.

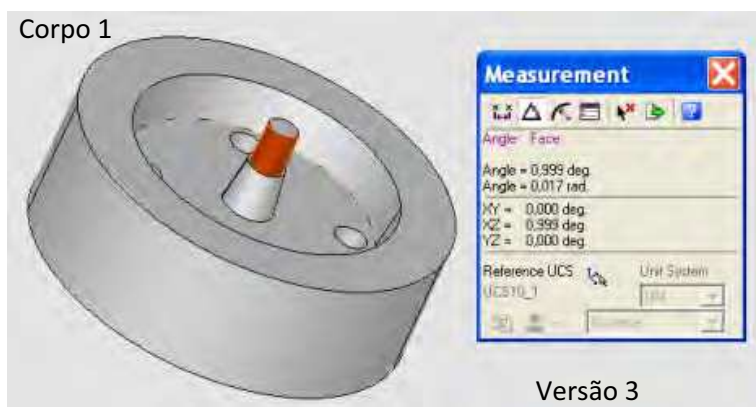


Figura 7.15 – Ângulo de saída do corpo 1 [versão 3]

Na tabela 7.3 é indicado o ângulo de saída do corpo da versão 3.

Tabela 7.3 – Ângulo de saída do corpo da versão 3

VERSÃO	CORPO	Ângulo de saída [°]
3	1	1°

7.6 – Discussão de resultados

Na tabela 7.4, pode-se observar os dados obtidos nos ensaios das três versões da peça plástica, assim como os resultados calculados através do modelo de previsão de forças de extracção de peças plásticas (modelo de Glanvill).

Tabela 7.4 – Valores das Forças de extracção para as peças das três versões

VERSÃO	Versão 1		Versão 2		Versão 3		
Nº CORPOS	3 Corpos		2 Corpos		1 Corpo		
EQUAÇÃO	$F_{ext} \cdot V1 = F_{c1} + F_{c2} + F_{c3}$		$F_{ext} \cdot V2 = F_{c1} + F_{c2}$		$F_{ext} \cdot V3 = F_{c1}$		
FORÇA DE EXTRACÇÃO DA PEÇA [N]	Resultados Experimentais [N]	Resultados Calculados [N]	Resultados Experimentais [N]	Resultados Calculados [N]	Resultados Experimentais [N]	Resultados Calculados [N]	
Material	PE	1034	833	310	262	54	53
	PP	1114	941	328	296	62	59
	ABS	1497	1143	399	360	72	72
	PBT	1597	1307	425	411	78	83
	ABS/PC	1827	1554	657	489	90	98

Na figura 7.16 estão representadas as forças de extracção, obtidas com recurso a técnicas de extensometria, para os cinco materiais plásticos utilizados no processamento das peças plásticas referentes às três versões consideradas. Naturalmente, as forças de extracção de maior valor obtidas, no processamento dos cinco materiais termoplásticos utilizados no processamento por injeção, são as referentes à peça plástica da versão 1 (V1). As forças de extracção de menor valor obtidas no processamento dos cinco materiais termoplásticos, são as referentes à peça plástica da versão 3 (V3). Na extracção da peça plástica referente à versão 2 (V2), foram obtidos valores de forças de extracção acima dos valores obtidos na versão 3 (V3), conforme seria de esperar.

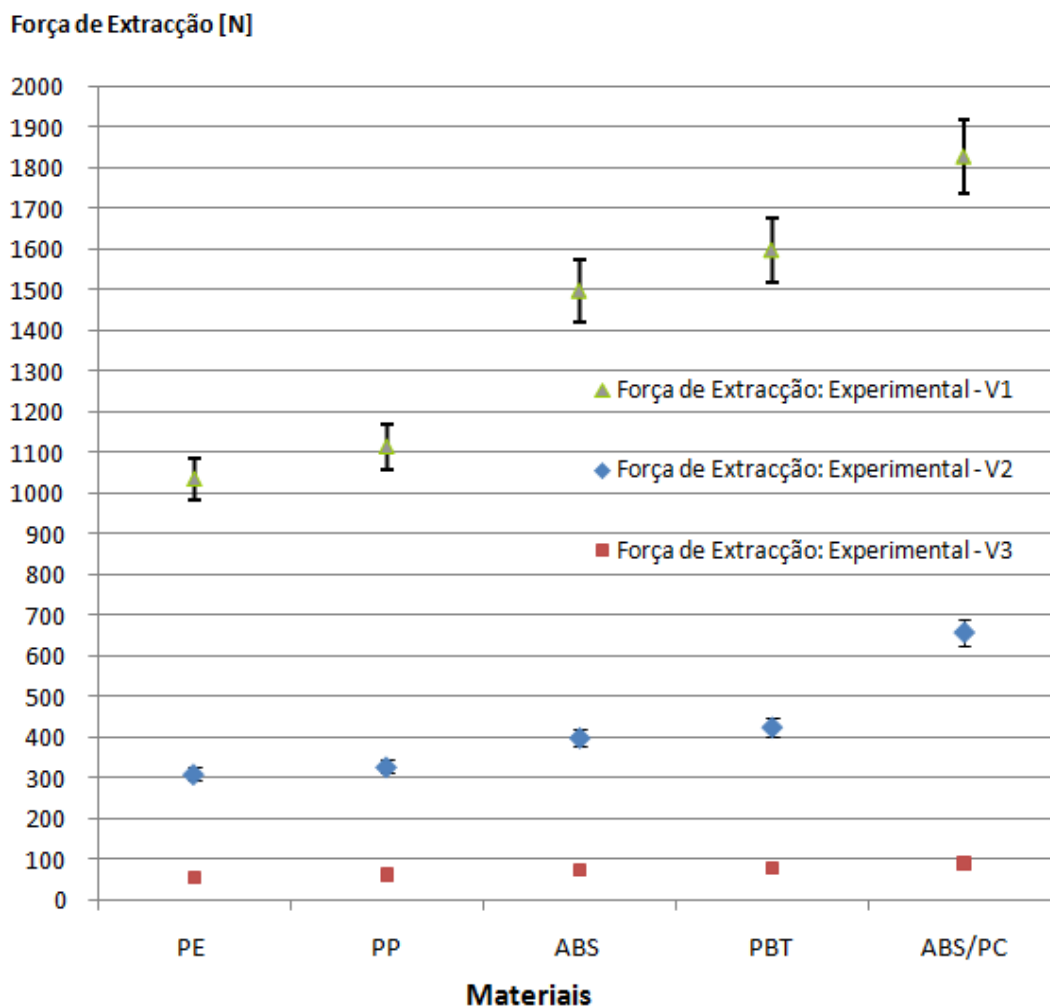


Figura 7.16 – Valores experimentais das Forças de extração para as peças plásticas das três versões

Na tabela 7.5 são apresentados os dados referentes aos valores de rugosidades da superfície moldante (bucha) da versão 1 (3 Corpos) no estado inicial, que corresponde à maquinação CNC e os valores medidos após o polimento com lixa de grão fino (estado actual).

Tabela 7.5 – Rugosidades da bucha da versão 1 [3 corpos]

VERSÃO 1- 3 Corpos	CORPO 3		CORPO 2		CORPO 1	
	INICIAL	ACTUAL	INICIAL	ACTUAL	INICIAL	ACTUAL
Ra (µm)	0,325	0,204	0,957	0,278	0,622	0,264
Rz (µm)	1,92	1,870	4,890	2,580	2,850	2,350
Rz Max µm)	2,160	2,120	6,090	2,900	3,680	2,870
Rt (µm)	2,290	2,250	6,090	3,400	3,680	2,870

Na tabela 7.6 são apresentados os dados referentes aos parâmetros de processamento por injeção utilizados, na produção das peças plásticas, referentes às três versões (V1, V2 e V3) consideradas neste trabalho.

Tabela 7.6 - Materiais e condições de processamento

Material	Pressão [bar]	Velocidade [%]	Fase de Doseamento		Fase de Enchimento		Fase de Pressurização		Tempo Refrigeração [s]		Temperatura do molde [°C]		Fase de Extracção	
			Força de Fecho [bar]	P.Inj.[bar]	V. Inj.[%]	PP [bar]	T PP [s]	Temperatura do molde [°C]	Pressão [bar]	Velocidade [%]	Curso [mm]	Tempo ciclo [s]		
PE Flexirene MT 40A	15	20	20	60	15	2	4	20	5	30	15	18-36		
	20	30	25	70	20	3	6	25	5	50				
	25	40	30	75	25	5	10	30	10	60				
PP Hostacom HC G2 N01	15	20	20	60	15	2	4	20	5	30				
	20	30	25	70	20	3	6	25	5	50				
	25	40	30	75	25	5	10	30	10	60				
ABS Cicolac X37	15	20	35	60	25	2	4	60	5	30				
	20	30	40	70	30	3	6	70	5	50				
	25	40	45	80	35	5	10	80	10	60				
ABS/PC Cicoloy C1100 HF	15	20	40	60	25	2	4	60	5	30				
	20	30	45	70	30	3	6	70	10	50				
	25	40	50	80	35	5	10	80	15	60				
PBT Ultradur B4520	15	20	35	60	25	2	4	40	5	30				
	20	30	40	70	30	3	6	50	10	50				
	25	40	45	80	35	5	10	60	15	60				

MATERIAL	Pressurização				Refrigeração		Temperatura do molde [°C]	
	Pressão de Pressurização [bar]	Força de Extracção da Peça: Tendência Verificada	Tempo de Pressurização [s]	Força de Extracção da Peça: Tendência Verificada	Tempo Refrigeração [s]	Força de Extracção da Peça: Tendência Verificada	Temperatura do molde [°C]	Força de Extracção da Peça: Tendência Verificada
PP	15	DIMINUI	2	DIMINUI	4	AUMENTA	20	AUMENTA
	20		3		6		25	
	25	AUMENTA	5	AUMENTA	10	AUMENTA	30	DIMINUI
ABS	25	DIMINUI	2	DIMINUI	4	AUMENTA	60	AUMENTA
	30		3		6		70	
	35	AUMENTA	5	AUMENTA	10	AUMENTA	80	DIMINUI
PBT	25	DIMINUI	2	DIMINUI	4	AUMENTA	40	AUMENTA
	30		3		6		50	
	35	AUMENTA	5	AUMENTA	10	AUMENTA	60	DIMINUI

Com base nos dados relativos às condições de processamento por injeção, das peças plásticas referentes às três versões (tabela 7.6), pode-se tirar algumas conclusões referentes à sua influência no valor das forças de extracção.

Os efeitos considerados terem influência foram os seguintes: tempo de compactação, tempo de refrigeração, pressão de compactação, temperatura do molde de injeção, acabamento superficial e temperatura de extracção (figura 7.17).

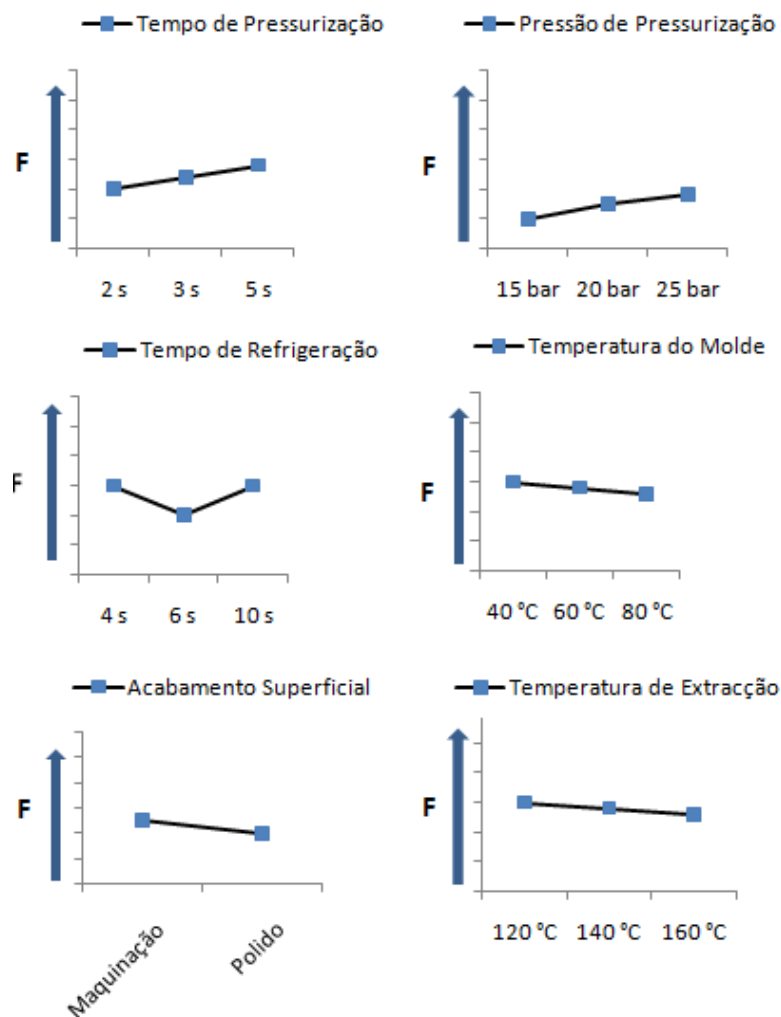


Figura 7.17 – Influência dos parâmetros do processo nas forças de extracção

Tempo de compactação

Pode-se concluir, com base nos dados referentes ao processamento por injeção, que o aumento do tempo de compactação da peça plástica provoca um natural aumento da força de extracção (figura 7.17). O tempo de compactação só pode ter efeito até aos ataques (pontos de injeção) estarem solidificados. A partir desse momento deixam, naturalmente, de ter influência sobre a peça plástica e consequentemente influência no valor de extracção da peça.

Tempo de refrigeração

O tempo de refrigeração tem influência no valor da força de extracção mas de forma não linear. A partir dos dados experimentais, pode-se observar que para um tempo de 4 segundos, as forças de extracção foram superiores que com um tempo de

6 segundos. Para um tempo de 10 segundos as forças de extração tem já um valor ligeiramente superior ao obtido para um tempo de 6 segundos. A justificação para este efeito poderá ser que para um tempo 4 segundos, o material da peça plástica mantém uma aderência à superfície moldante, uma vez que o material plástico ainda não está completamente solidificado. Para um tempo de 6 segundos de refrigeração o material plástico tem já alguma rigidez e começa a contrair a sobre a superfície moldante. Para um tempo de refrigeração de 10 segundos, a peça plástica está a contrair sob o núcleo (bucha), aumentando a resistência para a sua desmoldação.

Pressão de compactação (Pressurização)

A partir da figura 7.17, pode-se observar com o aumento da pressão de compactação aumenta a força necessária à extração da peça plástica. Por outro lado, uma maior pressão de compactação da peça implica uma maior quantidade de material a injectar na cavidade do molde, aumentando o peso da peça plástica e diminuindo a contração da peça processada, o que tem como consequência o aumento da força de extração.

Temperatura do molde

Os resultados obtidos indicam que a temperatura do molde tem influência no valor das forças de extração. Estas forças variam inversamente com o aumento da temperatura do molde. Consequentemente, no momento da extração a diferença de temperaturas, temperatura de extração e temperatura do molde, é mais baixa o que se vai traduzir numa menor força de extração.

Efeito do acabamento superficial do molde

O acabamento superficial tem uma natural influência no valor das forças de extração de peças plásticas. No caso da peça da versão 1, foram processadas peças plásticas, em que o elemento moldante apresentava dois tipos de acabamentos das superfícies moldantes (tabela 7.5): maquinado e polido (com acabamento com lixa de grão fino). O estado de superfície inicial da bucha do molde apresentava marcas de maquinação na zona moldante e a peça apresentava arrastamentos de material ao extrair, apresentando uma força de extração elevada. Pode-se observar uma melhoria substancial nas forças de extração da peça e sem marcas de arrastamentos de material após a optimização do estado de superfície das zonas moldantes do molde com recurso ao polimento.

Temperatura extracção

Quanto maior for a temperatura de extracção, para mesma temperatura do molde, menor serão as forças de extracção obtidas. No entanto, não se pode ter uma temperatura excessiva pois a peça plástica poderá não ter suficiente rigidez para se poder extrair. No caso oposto, para temperaturas de extracção mais baixas, a peça plástica está naturalmente mais solidificada e a contrair sob a bucha, aumentando as forças de extracção.

Capítulo 8

Conclusões e desenvolvimentos futuros

No presente capítulo efectua-se uma análise do trabalho realizado e uma previsão de trabalhos futuros, a desenvolver na área do processamento de materiais plásticos.

8.1 Conclusões

Neste trabalho pretendeu-se determinar as forças de extracção, experimentais e previstas, envolvidas no processo desmoldação de peças plásticas processadas por injecção.

Consequentemente foi desenvolvido, projectado e fabricado um molde de injecção para materiais termoplásticos, de canais frios, com a possibilidade de processar três versões de peças plásticas (peça com diferentes geometrias), com o objectivo de avaliar experimentalmente as forças de extracção.

O processo de moldação por injecção em automático, para as três versões, com as peças a caírem para por gravidade, permitiu registar os dados das forças de extracção das peças processadas nos cinco materiais plásticos.

O molde projectado teve o desempenho esperado, pois suportou esforços mecânicos e as solicitações térmicas. A análise estrutural efectuada foi assim validada.

As simulações reológicas efectuadas permitiram dimensionar de forma adequada os canais do circuito de refrigeração de cavidade e deste modo diminuir o tempo de ciclo.

O sistema de extracção por aro extractor considerado, foi eficiente para desmoldar as peças plásticas das três versões (V1, V2 e V3).

Foram processados por injecção cinco materiais termoplásticos, ABS, ABS/PC, PP, PBT e PE, e obtidas as respectivas forças de extracção. No processamento destes materiais foram, necessariamente, ajustados e registados os respectivos parâmetros de processamento e avaliada a sua influência.

Os resultados experimentais relativos à força de extracção foram comparados com os do modelo proposto por Glanvill. Na análise dos resultados experimentais com os do modelo, para a versão 1 (V1) foram registadas diferenças entre 15 a 25 %, em função do tipo de material processado. Para o caso da versão 2 (V2) não foram registadas diferenças significativas para os materiais processados (validando o modelo de Glanvill), excepto para o material ABS/PC em que se registou uma diferença na ordem de 25 %. No caso da versão 3 (V3) foi apenas registada uma diferença de 9 % para o material ABS/PC (validando o modelo de Glanvill para os outros materiais).

Na determinação experimental das forças de extracção foi obtida um grau de repetibilidade elevado, com desvio na ordem dos 3% a 6%.

Os parâmetros avaliados foram tempo de compactação, pressão de compactação (pressurização), tempo de refrigeração, temperatura do molde, temperatura de extracção e acabamento superficial. Estes parâmetros foram avaliados com base na informação técnica, relativa a gama de temperaturas de processamento, fornecidas pelos de materiais plásticos.

Com o aumento do tempo e da pressão de pressurização aumenta a força de extracção. A diminuição da temperatura do molde e temperatura de extracção tem com consequência um aumento da força de extracção. A tendência verificada com a melhoria do acabamento superficial foi a de diminuição da força de extracção.

8.2 Desenvolvimentos futuros

Como ponto de partida para trabalhos futuros, na área de processamento de termoplásticos e no seguimento deste trabalho, poderá ser realizado um trabalho de instrumentação do molde e máquina de injeção, de forma a poder monitorizar o processo de moldação por injeção.

Validar os resultados obtidos com outros modelos de previsão de forças de extracção.

Desenvolver um modelo para as geometrias da peça desenvolvida.

Validar o modelo proposto para outros materiais termoplásticos.

Capítulo 9

Referências Bibliográficas

- [1] http://www.cefamol.pt/cefamol/pt/Cefamol_IndustriaMoldes;
- [2] LYMAN, D; ROWLAND, S. - Polymers: biomaterials and medical applications. Kroschwitz, J.(eds), John Wiley and Sons, (1989), p.52-71;
- [3] DAVIS, H. E.; TROXELL, G. E.;HAUCK, G. F. W. - The testing of engineering materials, 4ª ed. USA: McGraw-Hill, 1982;
- [4] CLARK, J.O.E. - Química. São Paulo: Melhoramentos, 1971;
- [5] QMCWEB - A era dos plásticos: Uma síntese da nossa época. <http://www.qmc.ufsc.br/qmcweb/exemplar29.html>;
- [6] ANTEQUERA, Pablo - Los Materiales Compuestos de Fibra de Vidrio. Zaragoza: Secretariado de Publicaciones Ciudad Universitaria Zaragoza, ISBN 1991. 978-84-7733-264-0;
- [7] Menges, G., Bangert, H.- Measurement of coefficients of static friction as means of determining opening and demoulding forces in injection moulds. Kunststoffe. vol. 71:nº 9 (1981), p. 13-16;
- [8] Wang, H., Kabanemi, K.K., Salloum, G. - Numerical and experimental studies on the ejection of injection-molded plastic products. Polym. Eng. Science. Vol. 40: nº 3 (2000), p. 826-840;
- [9] <http://www.ferramentalrapido.ufba.br/moldagemporinjecao.htm>;
- [10] Júlio C. Viana; Thermomechanical Environment and the Morphology Development in Injection Moulding; University of Minho;
- [11] Instituto Superior Técnico, Sebenta de Tecnologia Mecânica;
- [12] A. J. Pontes, A. S. Pouzada; Ejection of tubular polypropylene mouldings: The influence of processing and molecular weight; University of Minho;
- [13] Pontes, A.J., Titomanlio, G., Pouzada, A.S. - The influence of processing conditions in ejection forces of injection moulded parts, 1999;
- [14] Menges, G., Bangert, H.- Measurement of coefficients of static friction as means of determining opening and demoulding forces in injection moulds. Kunststoffe. vol. 71:nº 9 (1981), p. 13-16;
- [15] E.C. Ferreira, J.R. Gomes, N.M. Neves, A.S. Miranda e A.S. Pouzada; Avaliação do Coeficiente de atrito na extracção de peças injectadas em plástico; Universidade do Minho;

- [16] A. J. Pontes, University of Minho, 2002, Shrinkage and Ejection forces in injection Moulded Products;
- [17] M.C. Gaspar, C. Capela and J. Bolrão, Acabamento Superficial por Maquinagem a Alta Velocidade do Aço para Moldes X36 CrMo17; High Speed Milling Surface Finishing of X36 CrMo17 Mould Steel;;
- [18] Menges, G., Mohren, P.- How to make injection molds. New York: Hanser, 1986. 540 p. ISBN 3-446-16305-0;
- [19] Burke, C., Malloy, R. 1991, "An Experimental Study of the Ejection Forces Encountered During Injection Molding," ANTEC 1991, pp. 1781-1787;
- [20] Mary E. Kinsella M.S. 2004, ejection forces and static friction coefficients for rapid tooled injection mold insert dissertation; Ohio State University;
- [21] Menges, G., Michaeli, W., Mohren, P. 2001, How to Make Injection Molds, Hanser Gardner Publications, Munich, Cincinnati;
- [22] Malloy, R., Majeski, P. 1989, "Design of Pin Ejector Systems for Injection Molds," ANTEC 1989, pp. 1231-1235;
- [23] Glanvill, A.B. 1971, The Plastics Engineer's Data Book, Machinery Publishing Co. Ltd., The Whitefriars Press Ltd., London, p. 30;
- [24] Dominick V. Rosato, Donald V. Rosato, Marlene G. Rosato, book "Injection molding handbook, 3rd ed. ISBN 0-7923-8619-1;
- [25] Giang T. Pham, Jonathan S. Colton, Ejection force modeling for stereolithography injection molding tools, Polymer Engineering and Science, April, 2002;
- [26] http://findarticles.com/p/articles/mi_hb3367/is_4_42/ai_n28916501;
- [27] http://www.dsm.com/en_US/html/dep/ejectionsystems.htm;
- [28] Kabanemi, K.K., Vaillancourt, H., Wang, H., Salloum, G. – Residual stresses, shrinkage, and warpage of complex injection molded products: Numerical simulation and experimental validation. Polym. Eng. Sci.. vol. 38: nº 1 (1998), p. 21-37.
- [29] Williams, R.F., Pacoast, L.H. – Effect of process variables on mold shrinkage. Modern Plastics Intern.. (1967), p. 185-192;
- [30] DIN EN ISO 13565-2;
- [31] <http://www.mspc.eng.br/matr/im01/rmat104.gif>;
- [32.] www.centimfe.com/centimfe/index_html;
- [33] Huynh, V. M. e Fan, Y., "Surface-Texture Measurement and Characterization With Applications To Machine-Tool Monitoring", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, (1992);
- [34] Revista O Molde; Acabamento superficial por maquinação convencional dos aços; Superficial finish in conventional machining of steels;
- [35] Capela, C., Bolrão, J e Gaspar M.C., "Acabamento superficial por maquinagem a alta velocidade do aço para moldes X36 CrMo 17", (2005);

- [36] Davim, J. P & Baptista Monteiro, "Mecânica do Contacto e Tribologia" – Apontamentos da cadeira, (2004);
- [37] Unlimited DSM; Design Guide; performance and value with engineering plastics;
- [38] <http://www.eng-tips.com/viewthread.cfm?qid=203149&page=2>;
- [39] Barreto Jr.E, "Conhecendo o extensómetro eléctrico de resistência – Manual eléctrico";
- [40] Doebelin, E.O."Measurements Systems – Application and Design"; McGraw Hill, New York, 1990;
- [41] KYOWA,"Measuring instruments for stress solutions";Tokyo;Cat. Nº.901D-U62;
- [42] <http://www.vishay.com/company/brands/micrommeasurements>;
- [43] <http://www.excelsensor.com.br>;
- [44] Menges, G., Bangert, H. 1981, "Measurement of Coefficients of Static Friction as a Means of Determining Opening and Demoulding Forces in Injection Moulds,"*Kunststoffe*, vol. 71, no. 9, pp. 552-557;
- [45] Pontes, A.J., Pinho, A.M., Miranda, A.S., Pouzada, A.S. 1997, "Effect of Processing Conditions on Ejection Forces in Injection Moulds," *O Molde*, October-December, pp. 25-34;
- [46] Pontes, A.J., Pantani, R., Titomanlio, G., Pouzada, A.S. 2001, "Prediction of Ejection Forces in Tubular Moldings in Amorphous Polymers," *ANTEC*, vol. I, pp. 927-931;
- [47] Pontes, A.J., Brito, A.M., and Pouzada, A.S. 2002, "Assessment of the Ejection Force in Tubular Injection Moldings," *Journal of Injection Molding Technology*, vol. 6, no.4, pp. 343-352;
- [48]. Brito, A.M.; Pontes, A. J.; Febra, A.; Oliveira, J.; Selada, A.; Pouzada, A. S., Injection Mould for Assessment of Ejection Forces (Molde para Medição de Forças de Extracção), *O Molde*, Ano 14: nº 50 (2001), p.56-61;
- [49] Pontes A. J.; Pantani, R.; Titomanlio, R.; Pouzada A. S. -Solidification Criterion on Shrinkage Predictions for Semi-Crystalline Injection Moulded Samples, *Intern. Polym. Proces.*, Vol. 15: Nº 3 (2000), p.284-290;
- [50] Pontes, A. J.; Pinho, A. M.; Pouzada, A. S., Medição da Força de Extracção em Moldes de Injecção de Termoplásticos, *Mecânica Experimental*, nº 3 (1998), p.95-100;
- [51] Pontes A. J., Pantani, R Titomanlio, R., Pouzada A. S. - Prediction of ejection forces in tubular moldings in amorphous polymers. *Proc. ANTEC 2001 Conf, Dallas: Maio*, (2001);
- [52] FERREIRA, E. C., MUSCHALLE, R., NEVES, N. M., POUZADA, A. S- May 8th, 2002, Analysis of Parameters Determining the Friction Properties of Thermoplastics in Injection Molding;
- [53] FERREIRA, E. C., MUSCHALLE, R., NEVES, N. M., POUZADA, A. S. - May, 2001, Friction Properties of Thermoplastics in Injection Molding;
- [54] PANTANI, R., PONTES, A. J., POUZADA, A. S., TITOMANLIO, G. - May 8th, 2002, On the Prediction of Ejection Forces for Tubular Moldings;

[55] PANTANI, R., PONTES, A. J., POUZADA, A. S., TITOMANLIO, G. ,May, 2001, Prediction of Ejection Forces In Tubular Mouldings In Amorphous Polymers;

[56] OLIVEIRA, M. J., PONTES, A. J., POUZADA, A. S., May 2002,Studies on the Influence of the Holding Pressure on the Orientation and Shrinkage of Injection Molded Parts;.

[57] François Cardarelli; Materials Handbook; A Concise Desktop Reference; 2nd Edition; Springer;