



IPL

escola superior de tecnologia e gestão
instituto politécnico de leiria

Dissertação

Mestrado em Engenharia da Conceção e desenvolvimento do Produto

***Desmoldação de uma peça em Polipropileno
utilizando revestimento PVD “MoldLub”***

Jorge Manuel Vieira dos Santos

Leiria, Março de 2014



Dissertação

Mestrado em Engenharia da Conceção e desenvolvimento do Produto

***Desmoldação de uma peça em Polipropileno
utilizando revestimento PVD “MoldLub”***

Jorge Manuel Vieira dos Santos

Dissertação de Mestrado realizada sob a orientação do Doutor Carlos Alexandre Bento Capela,
Professor coordenador da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de
Leiria.

Leiria, Março de 2014

À Minha Família

Agradecimentos

Este estudo, embora sendo um trabalho individual, não teria sido possível sem a partilha de conhecimento, o apoio, o incentivo e o contributo, direto ou indireto, de várias pessoas e instituições.

Ao meu orientador de estágio, Doutor Carlos Capela um agradecimento especial, pois, para além da transmissão dos seus conhecimentos científicos, disponibilizou todo o tempo necessário para que este estudo fosse possível.

Aos professores do Mestrado em Engenharia de Conceção e Desenvolvimento de Produto que proporcionaram aprendizagem de extrema importância para o enriquecimento deste trabalho.

A todos os colegas e em especial aos colegas de grupo o Nelson Silva e o Luís Sousa, que em conjunto, com o conhecimento específico e experiência de cada um, me permitiram obter conhecimentos importantes.

Às empresas solicitadas e que responderam presente, disponibilizaram o seu conhecimento, que forneceram materiais, disponibilizaram equipamentos, executaram revestimentos entre outros.

- **AES Moldes**, Sr. José Carlos; **CadFlow**, Eng. João Carlos e João Eliseu; **Frumolde Tooling**; **FMP Moldes Lda**, Sr. Carlos Pereira; **Hasco Portuguesa** Sr. José Silva; **Montamoldes**, Sr. Fernando; **Mariteste Lda**, Sr. Luís; **Mold Tech Portugal**, Sr. Raúl Souto; **TEandM** Eng. Ricardo Alexandre; **Polimentos Luís Lourenço**; **Eschmann Texturas** Eng. Pedrosa, Sr. Sérgio

Embora por último na ordem cronológica mas em primeiro no meu coração. À minha família, em especial à minha esposa e aos meus filhos que sempre me apoiaram e várias vezes ficaram privados da minha companhia.

Aos meus pais, que embora não fisicamente presentes, sempre me incentivaram na progressão profissional e académica e me incutiram a coragem para ultrapassar todas as barreiras.

Um muito obrigado a todos.

Jorge Santos

*“Tudo é
considerado
impossível até
acontecer.”*

Nelson Mandela

Resumo

Com este trabalho pretendeu-se de avaliar o comportamento das peças plásticas em polipropileno, processadas por injeção, durante a extração, com diferentes revestimentos superficiais no elemento moldante macho/bucha. A peça plástica desenvolvida para este estudo, peça com dificuldades típicas de extração, é representativa de peças plásticas mais complexas processadas por injeção.

Deste modo, foi desenvolvido e fabricado um molde protótipo para o processamento de peças plásticas em polipropileno por injeção que teve como objetivo avaliar o comportamento destas na extração com elementos moldantes macho/bucha com diferentes tipos de revestimentos superficiais. As superfícies moldantes (macho/bucha) foram polidas com alto brilho por forma a aumentar a dificuldade na extração da peça e, posteriormente, um dos elementos moldantes macho/bucha foi, também, revestido com revestimento PVD “MoldLub”.

Foi possível observar um melhor desempenho da extração das peças plásticas com revestimento PVD “MoldLub” nos elementos moldantes macho/bucha (relativamente ao revestimento temperado e nitrado). Esta melhoria traduziu-se numa diminuição das forças de extração em carga e em vazio, das pressões de enchimento da peça plástica e do tempo de ciclo de moldação.

Palavras-chave: *Peça a produzir, revestimentos, PVD, molde protótipo, teste molde prototipo, injeção das peças.*

Abstract

With this work it was intended to evaluate the behavior of plastic parts in polypropylene, processed by injection, during extraction, with different surface coatings on the core insert. The plastic piece designed for this study, part with typical difficulties of extraction, is representative of more complex plastic parts processed by inject.

For this reason was developed and manufactured a mold prototype for processing by injection of plastic parts made of polypropylene, in order to evaluate the performance of these parts during extraction, with the core insert with different surface coatings. The moldantes surfaces (core insert) were polished with high gloss in order to increase the difficulty in extracting the piece and later one of the core insert elements was also coated with PVD Coating "MoldLub".

It was possible to observe a better performance of the extraction of plastic parts with PVD Coating "MoldLub" on the core insert (relative to temperate and nitrated coating). This improvement resulted in a reduction in ejection forces laden and unladen, the filling pressures of the plastic part and the molding cycle time.

Key-Words: *Plastic part, coatings, PVD, prototype mold, ejection forces, filling pressures.*

Índice de Figuras

Capítulo I

Figura 1.1 - Exportações na Indústria de moldes em 2012 – Dados recolhidos da Cefamol relativos ao ano 2012.....	4
--	---

Capítulo II

Figura 2.1 - Dureza das martensites ferro-carbono (0,35 a 1,2%C) revenidas durante 1 Hora às temperaturas indicadas [5]	11
Figura 2.2 - Influência do teor de carbono na dureza (após têmpera enérgica) [6]	14
Figura 2.3 - Influência do tempo de nitruração na camada nitrurada [6]	15
Figura 2.4 - Eletrodeposição de Cromo [9]	20
Figura 2.5 - Equipamento PVD da empresa TEandM	22
Figura 2.6 - Processo PVD [57]	22
Figura 2.7 - Ferramenta de corte revestida a nitreto de titânio pelo processo PVD [13]	24
Figura 2.8 - Micrografia da superfície da matriz de corte de aço rápido M2 com revestimento Superficial de nitreto de titânio, destacando a espessura da camada. [13]	24
Figura 2.9 - Equipamento Mold-Tech Portugal utilizado no revestimento Tribocout	27
Figura 2.10 - Divisão dos plásticos	30
Figura 2.11 - Símbolo de reciclagem do Polipropileno	31
Figura 2.12 - Ficha técnica do material utilizado neste estudo [61]	33-34
Figura 2.13 - Processamento de termoplásticos [58].....	35
Figura 2.14 - Processamento de um polímero por injeção foto: DuPont	36
Figura 2.15 - Molde de duas placas [16]	37
Figura 2.16 - Molde de três placas [16]	38
Figura 2.17 - Molde com elemento móvel [16]	39
Figura 2.18 - Molde com canal quente [52]	40
Figura 2.19 - Exemplo carburador e 4 bicos marca Günther	40
Figura 2.20 - Molde com carburador [16]	40
Figura 2.21 - Molde sandwich de peças diferentes [39]	42
Figura 2.22 - Molde sandwich convencional [16]	43
Figura 2.23 - Exemplo sistema injeção molde sandwich de 2 peças iguais [39]	43
Figura 2.24 - Molde sandwich com várias aberturas [4]	43
Figura 2.25 - Molde com núcleo rotativo, processo fuso e porcas helicoidais [16]	44
Figura 2.26 - Molde com núcleo rotativo com cremalheiras e rodas dentadas [16]	45
Figura 2.27 - Bucha retrátil da "Progressive components" [41]	45
Figura 2.28 - Cinemática de funcionamento das buchas retrateis " <i>Progressive components</i> " [41]	45

Figura 2.29 - Exemplo de peças com injeção de dois materiais	46
Figura 2.30 - Molde bi-matéria com chapa rotativa [16].....	47
Figura 2.31 - Processo de extrusão-sopro [59]	48
Figura 2.32 - Projeto do <i>pinch-off</i> [59]	49
Figura 2.33 - Processo injeção-sopro [37]	49
Figura 2.34 - Ciclo de moldação [58]	50

Capítulo III

Figura 3.1 - Exemplo de peça com várias zonas tubulares	52
Figura 3.2 - Exemplos de peças com dificuldades típicas de desmoldação: Jarros, seringas, tubos de aspirador em polipropileno.	52
Figura 3.3 - Desenho de artigo em corte e em perspetiva	54
Figura 3.4 - Peça plástica a processar: orientação da desmoldação e da contração	55
Figura 3.5 - Tempo enchimento	58
Figura 3.6 - Pressão de injeção em MPa	59
Figura 3.7 - Temperatura do material processado o enchimento	59
Figura 3.8 - Linhas de soldadura	60
Figura 3.9 - Zonas com concentração de gases	60
Figura 3.10 - Variação da força de fecho durante o enchimento do molde	62
Figura 3.11 - Evolução da pressão de injeção e compactação	63
Figura 3.12 - Gráfico da pressão de injeção durante a compactação	64

Capítulo IV

Figura 4.1 - Esboço de molde protótipo para a realização de testes com revestimentos nos elementos moldantes	68
Figura 4.2 - Desenho molde protótipo 3D para o processamento da peça em polipropileno	69
Figura 4.3 - Desenho de molde 2D para o processamento da peça em polipropileno	70
Figura 4.4 - Desenho montagem em 3D para o processamento da peça em polipropileno	71
Figura 4.5 - Dimensionamento do gito do sistema de alimentação.....	72
Figura 4.6 - Sistema de injeção: fluxo do material para a peça plástica (jito e ataques)	73
Figura 4.7 - Peça plástica a 20% do seu enchimento.....	74
Figura 4.8 - Peça plástica a 50% do seu enchimento.....	74
Figura 4.9 - Peça plástica a 70% do seu enchimento.....	75
Figura 4.10 - Zonas de concentração de gases devidas ao enchimento da peça, obtidas a partir do software de análise do sistema de injeção	75
Figura 4.11 - Extrator tubular Hasco Ref: Z45 e extratores interiores do tubular	76
Figura 4.12 Aparelho para medir a rugosidade de superfície marca Mahr Marsurf M 300	78
Figura 4.13 - Controlo de rugosidade antes e após acabamento superficial brilho	79
Figura 4.14 - Controlo de rugosidade no macho/bucha (Nº 2) após PVD "MoldLub"	79
Figura 4.15 - Zonas cónicas para centramento das duas metades do molde	80
Figura 4.16 - Sistema centramento extração (nº1) e sentido movimento extração	81
Figura 4.17 - Refrigeração da cavidade (lado fixo)	82
Figura 4.18 - Refrigeração da bucha (lado móvel)	82
Figura 4.19 - Indicação de entradas e saídas de águas no molde	83
Figura 4.20 - Termómetro utilizado para controlo da temperatura do aço	84
Figura 4.21 - Sonda de pressão Kistler Ref.6190	84
Figura 4.22 - Sensor Kistler aplicado no molde, zona de Ligação da ficha	85
Figura 4.23- Lado esquerdo enchimento a 80%, lado direito localização sensor no molde	85

Figura 4.24 - Torno convencional e Fresadora convencional	86
Figura 4.25 - Centro de Maquinação (CNC) e Electroerosão por penetração	87
Figura 4.26 - Componentes do molde após processo de maquinação por torneamento.	87

Capítulo V

Figura 5.1- Máquina de injeção utilizada no processamento das peças plásticas.....	89
Figura 5.2 -Pormenor de montagem do molde protótipo na máquina de injeção.....	90
Figura 5.3 - Controlador de temperatura de água Wittmann Tempro basic 140	91
Figura 5.4 - Procedimento de verificação da temperatura nas zonas moldantes do molde protótipo	91
Figura 5.5 - Solução encontrada para reduzir comprimento do fio do sensor	92
Figura 5.6 - Ficha do sensor Kistler para o sistema de leitura	92
Figura 5.7 - Equipamento Kistler para leitura dos dados de leitura do sensor	93
Figura 5.8 - Peças plásticas processadas com o canal injeção	94
Figura 5.9 - Peças plásticas processadas com o canal injeção separado	94
Figura 5.10 - Comparação do peso da peça plástica experimental e computacional	95
Figura 5.11- Curvas típica de variação de pressão de injeção versus tempo no macho/bucha 1 (temperado e nitrurado).	97
Figura 5.12 -Curvas típica de variação de pressão de injeção versus tempo no macho/bucha 2, com revestimento PVD (MoldLub).....	97
Figura 5.13 - Valores de velocidade e de força de extração pedidos e obtidos (página de extração da máquina de injeção)	99

Capítulo VI

Figura 6.1 - Divisão da peça e gito por percentagem	101
Figura 6.2 - Localização do sensor na peça plástica	102

Este pórtico foi inicialmente elaborado em francês

Índice de Tabelas

Capítulo II

Tabela 2.1 - Tratamentos Térmicos.....	8
Tabela 2.2 - Tratamentos Termoquímicos	13
Tabela 2.3 - Processos de Galvanoplastia, PVD e fluxo pressurizado	18
Tabela 2.4 - Nitreto Titânio [25]	23
Tabela 2.5 - Nitreto de crómio [25]	24
Tabela 2.6 - Carbonitreto de Titânio [25]	25
Tabela 2.7 - DLC (Diamond Like Carbon) [36]	26
Tabela 2.8 - Ni-PTFE (níquel-teflon) características [34]	26
Tabela 2.9 - MoldLub, características [33]	29
Tabela 2.10 - Informação do registo da marca MoldLub [56]	29
Tabela 2.11 - Classificação dos moldes segundo SACHELLI	37

Capítulo III

Tabela 3.1 - Tabela do polímero utilizado no estudo reológico	57
Tabela 3.2 - Tabela de condições de processamento.....	57

Capítulo IV

Tabela 4.1 - Lista dos aços principais utilizados no projeto do molde (numeração de peças de acordo com <i>sketch</i>	71
Tabela 4.2 - Composição química do aço-carbono 1.1730 [60]	72
Tabela 4.3 - Propriedades Mecânicas do aço-carbono 1.1730 [60]	72
Tabela 4.4 - Propriedades Físicas do aço-carbono 1.1730 [60]	72

Capítulo V

Tabela 5.1- Especificações da máquina de injeção (Arburg ALLROUNDER 270C Golden)	90
Tabela 5.2 - Parâmetros de injeção	95-96
Tabela 5.3 - Tabela de valores de extração obtidos durante o ensaio	99

Lista de Siglas

<i>PP</i>	<i>Polipropileno</i>
<i>CEFAMOL</i>	<i>Associação Nacional da Indústria de Moldes, Ferramentas Especiais e Plásticos</i>
<i>CAD</i>	<i>Computador Aided Design</i>
<i>CAM</i>	<i>Computador Aided Manufacturing</i>
<i>PME</i>	<i>Pequenas e Médias Empresas</i>
<i>TMBT</i>	<i>Sigla correspondente a LTMT Low Temperature Thermomechanical Treatment</i>
<i>TMAT</i>	<i>Sigla correspondente a HTMT High Temperature Thermomechanical Treatment</i>
<i>PVD</i>	<i>Physical vapor deposition</i>
<i>CVD</i>	<i>Chymical vapor deposition</i>
<i>TiN</i>	<i>Nitreto de Titânio</i>
<i>CrN</i>	<i>Nitreto de Crómio</i>
<i>TiCN</i>	<i>Carbonitreto de Titânio</i>
<i>ZrN</i>	<i>Nitreto de Zircónio</i>
<i>ALTiN</i>	<i>Nitreto de Alumínio e Titânio</i>
<i>DLC</i>	<i>Diamond- Like Carbon</i>
<i>Ni-PTFE</i>	<i>Níquel Químico-Teflon</i>
<i>Tribocoat HT</i>	<i>Marca registrada usada para aplicativos personalizados de E-Níquel Polytetrafluoroethylen, revestimento para uso em superfícies de metal ou outros e é propriedade de Standex International Corporation</i>
<i>DIN</i>	<i>Deutsches Institut für Normung</i>

C_i	<i>Contração na direção i</i>
D_m	<i>Dimensão da zona moldante</i>
D_p	<i>Dimensão da peça plástica</i>
F_R	<i>Força de extração</i>
F	<i>Coefficiente de atrito entre peça e molde</i>
P_c	<i>Pressão de contato entre peça e molde</i>
A	<i>Área de contato</i>
P	<i>Força de extração</i>
E	<i>Módulo de elasticidade</i>
A	<i>Área total de contato entre o molde e a superfície que contrai na direção da extração</i>
μ	<i>Coefficiente de atrito entre o plástico e o aço</i>
d	<i>Diametro da circunferência em torno do núcleo e da bucha</i>
t	<i>Espessura da peça plástica</i>
ν	<i>Coefficiente de poisson do plástico</i>
ΔT	<i>Contração térmica do plástico em todo o diâmetro</i>
ΔT	<i>Diferença de temperatura coeficiente de dilatação térmica entre o plástico e temperatura e temperatura de extração multiplicada por d</i>
R_z	<i>Rugosidade de profundidade média entre os 5 pontos mais altos e os 5 mais profundos</i>
R_a	<i>Rugosidade média</i>
HRC	<i>Rockwell C</i>

Índice

DEDICATÓRIA	I
AGRADECIMENTOS	III
RESUMO	VII
ABSTRACT	IX
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE TABELAS	XV
LISTA DE SIGLAS	XVII
ÍNDICE	XIX
1.INTRODUÇÃO	1
1.1.INDÚSTRIA PORTUGUESA DE MOLDES DE INJEÇÃO DE TERMOPLÁSTICOS	2
1.2.ENQUADRAMENTO	4
1.3.DESCRICÃO	4
1.4.ESTRUTURA	6
2.TRATAMENTOS E REVESTIMENTOS DE SUPERFÍCIE: ESTADO DA ARTE	7
2.1. TRATAMENTOS TÉRMICOS E DE ENDURECIMENTO SUPERFICIAL	7
2.1.1. <i>Tratamentos Mecânicos</i>	8
2.1.2. <i>Tratamentos Térmicos</i>	9
2.1.3. <i>Tratamentos Termomecânicos</i>	12
2.2. TRATAMENTOS DE ENDURECIMENTO SUPERFICIAL	13
2.3. REVESTIMENTOS TÉCNICOS E TRATAMENTOS SUPERFICIAIS.....	18
2.3.1 <i>Revestimentos por processo de Galvanoplastia</i>	18
2.3.2. <i>Revestimentos PVD</i>	21
2.3.2.1. <i>Vantagens da técnica PVD</i>	23
2.3.2.2. <i>Revestimentos</i>	23
2.3.2.3. <i>Revestimento MoldLub®</i>	28
2.4. <i>Materiais poliméricos</i>	29
2.4.1. <i>Processamento termoplástico</i>	34
2.4.2. <i>Moldes de injeção</i>	36
2.4.2.1. <i>Tipos de Moldes de injeção de termoplásticos</i>	36
2.4.2.2. <i>Molde de duas placas</i>	37
2.4.2.3. <i>Molde de três placas (designado também por molde bico de alfinete)</i>	38
2.4.2.4. <i>Molde com partes móveis</i>	38
2.4.2.5. <i>Molde com canal quente</i>	39
2.4.2.6. <i>Stack Mold (ou molde sandwich)</i>	41
2.4.2.7. <i>Molde com núcleo rotativo (moldes de desenroscamento)</i>	44

2.4.2.8. Moldes com Bi-matéria (2k, 3k etc).....	46
2.4.3. Moldagem por sopro	48
2.5. CICLOS DE INJEÇÃO	49
3. DESENVOLVIMENTO PEÇA PLÁSTICA E ANÁLISE REOLÓGICA	51
3.1. PEÇA A DESENVOLVER	51
3.2. CONTRAÇÃO	55
3.3. ESTUDO DE ENCHIMENTO “MOLDFLOW”	56
4. DESENVOLVIMENTO E FABRICO DO MOLDE PROTÓTIPO	65
4.1. INTRODUÇÃO	65
4.2. PROJETO DO MOLDE.....	66
4.2.1 Sistema de alimentação e fuga de gases	72
4.2.2. Sistema de extração, centramento, guiamento e aperto do molde à máquina	76
4.2.3. Forças de extração.....	77
4.2.4. Rugosidade das superfícies moldantes – macho/bucha.....	78
4.2.5. Sistema de centramento e guiamento do molde	80
4.2.6. Sistema de refrigeração.....	82
4.2.7. Sistema e Controlo de temperatura do molde.....	83
4.2.8. Sistema de controlo de Pressão interna.....	84
4.2.9. Processos utilizados no fabrico do molde.....	86
ENSAIO MOLDE PROTÓTIPO	89
5.1. MÁQUINA DE INJEÇÃO E PERIFÉRICOS	89
5.2. MONTAGEM DO MOLDE NA MÁQUINA DE INJEÇÃO	90
5.3. SISTEMA DE CONTROLO DE TEMPERATURA DO MOLDE.....	91
5.4 MONTAGEM DO SENSOR KISTLER NO MOLDE PROTÓTIPO E SISTEMA DE LEITURA	92
5.5. ENSAIO DO MOLDE PROTÓTIPO	93
5.6. PARÂMETROS UTILIZADOS NA INJEÇÃO DAS PEÇAS.....	95
5.7. FORÇA DE EXTRAÇÃO PARA CADA UM DOS ELEMENTOS MOLDANTES (MACHO/BUCHA)	98
6. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	101
7. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	103
7.1. CONCLUSÕES	103
7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	104
REFERÊNCIAS.....	105

1.Introdução

Neste capítulo pretende-se fazer uma síntese dos temas a abordar e da estrutura deste documento. Os temas abordados prenderam-se com o processamento por injeção, tipos e processos de fabrico de moldes e tipos de revestimentos superficiais utilizados nas superfícies moldantes.

Os moldes de injeção são ferramentas complexas que são constituídas por vários componentes e que quando montados permitem o processamento de materiais termoplásticos com a forma das superfícies moldantes.

No projeto, conceção e fabricação de moldes por injeção, devem ser tidas em consideração um conjunto significativo de variáveis, que são de extrema importância na eficiência e eficácia durante o seu funcionamento, assim como na longevidade de vida útil da ferramenta/molde.

Numa primeira fase do projeto do molde da peça a processar deve-se ter em conta os seguintes aspetos:

- Que peça se pretende moldar?
- Qual a produção prevista?
- Qual o plástico que se pretende processar para obter a peça pretendida?

A partir destas respostas é possível selecionar o tipo de molde que deverá ser projetado para obter a peça plástica pretendida, o número de peças que o molde deverá processar por ciclo (quantidade de cavidades), tipos de materiais a utilizar no fabrico do molde (aços, alumínio, ligas de cobre e outros) bem como o tipo de tratamento térmico e revestimentos superficiais das superfícies moldantes.

Os revestimentos superficiais das superfícies moldantes são fundamentais para o seu funcionamento mecânico, para a sua durabilidade e fiabilidade.

Neste trabalho pretende-se avaliar o desempenho de dois tipos de revestimentos em termos do processo de injeção (determinação das pressões de injeção) e extração (determinação das forças de extração). Deste modo, foi desenvolvido e fabricado um molde protótipo para o processamento de peças plásticas em polipropileno por injeção, representativas de peças de maior complexidade com problemas típicos de extração

1.1. Indústria Portuguesa de moldes de injeção de termoplásticos

A Indústria de moldes teve a sua origem na evolução da Indústria do Vidro. Foi no início do século XX, que se começaram a produzir os primeiros moldes para vidro, até essa altura essa necessidade era satisfeita através da importação de moldes da Alemanha e da Áustria [1].

No final dos anos 20, surge a “Ureia Industrial” conhecida por “baquelite” que originou o aparecimento dos primeiros moldes para tampas e peças simples. Com o início da 2ª Guerra Mundial, as matérias-primas escassearam, o que provocou a paralisação na produção de moldes que só viria a arrancar definitivamente no início dos anos 40 com o reaparecimento do “baquelite” [1].

A Indústria de Moldes para matérias plásticas teve o seu início em 1943 na Marinha Grande, numa pequena empresa de moldes para vidro e por iniciativa de Aníbal H. Abrantes, e sem concordância do seu sócio e irmão Aires Roque, que por esse motivo acabou por vender a sua posição na empresa, continuando a sua atividade na Indústria Vidreira [1].

Dois anos mais tarde em 1945, Abrantes produziu o primeiro molde de injeção para plástico [1]. Foi o início de uma longa caminhada, marcada pelo pioneirismo e a introdução de novos processos e tecnologias, na busca de otimização de processos e métodos de fabricação, com o objetivo de aperfeiçoamento dos moldes, que cada vez se tornaram mais complexos e precisos.

Neste seguimento, começaram a estabelecer-se outras empresas produtoras de moldes para plásticos, nas cidades da Marinha Grande e Oliveira de Azeméis, (outro centro tradicional da Indústria do Vidro). A indústria desenvolveu-se com a importação de tecnologia estrangeira e, em 1955, a indústria já exportava para mais de 50 países, só na área da Marinha Grande existiam 54 empresas em laboração, empregando cerca de 2000 pessoas [1].

Em 1969, e por iniciativa de sete empresas fabricantes de moldes, foi criada a CEFAMOL – Associação Nacional da Indústria de Moldes, que é uma instituição sem fins lucrativos e de utilidade pública, conta hoje com 114 associados. Foi criada com o objetivo de contribuir para o desenvolvimento do sector dos moldes, ajudando a promover os moldes portugueses no exterior e nas negociações com o governo e outras organizações tanto nacionais como estrangeiras. A sua atividade inclui também a pesquisa tecnológica e o intercâmbio de informações técnicas e científicas com outras entidades da mesma área tanto em Portugal como no estrangeiro [1].

Em 1983 foi instalado na empresa Edilásio Carreira da Silva, Lda um sistema de CAD/CAM multiposto. Foi o primeiro sistema deste tipo instalado numa empresa de moldes e também o primeiro sistema multiposto a operar em ambiente industrial no sector da metalomecânica portuguesa [1].

Com base em dados da CEFAMOL relativos ao ano de 2012, o Sector Português de moldes possui cerca de 530 empresas com dimensão de PME, dedicadas ao fabrico de moldes e ferramentas especiais, e emprega cerca de 8,250 trabalhadores, com uma distribuição geográfica bipolar, regiões da Marinha Grande e Oliveira de Azeméis [54].

Portugal encontra-se entre os principais fabricantes mundiais de moldes para injeção de plásticos e exportava, em 2009, 80% da produção total que foi aumentando para 90% da produção total em 2012, sendo os principais mercados Alemanha, Espanha, França, Brasil e Rep. Checa, como se pode verificar pela figura 1.1. O valor total das exportações atingiu, em 2012, os 473,01 milhões de euros, sendo que as vendas foram efetuadas para 75 mercados (países) diferente, o que demonstra a dimensão internacional e global desta indústria. É um sector Inovador e de alta intensidade tecnológica [2, 54].

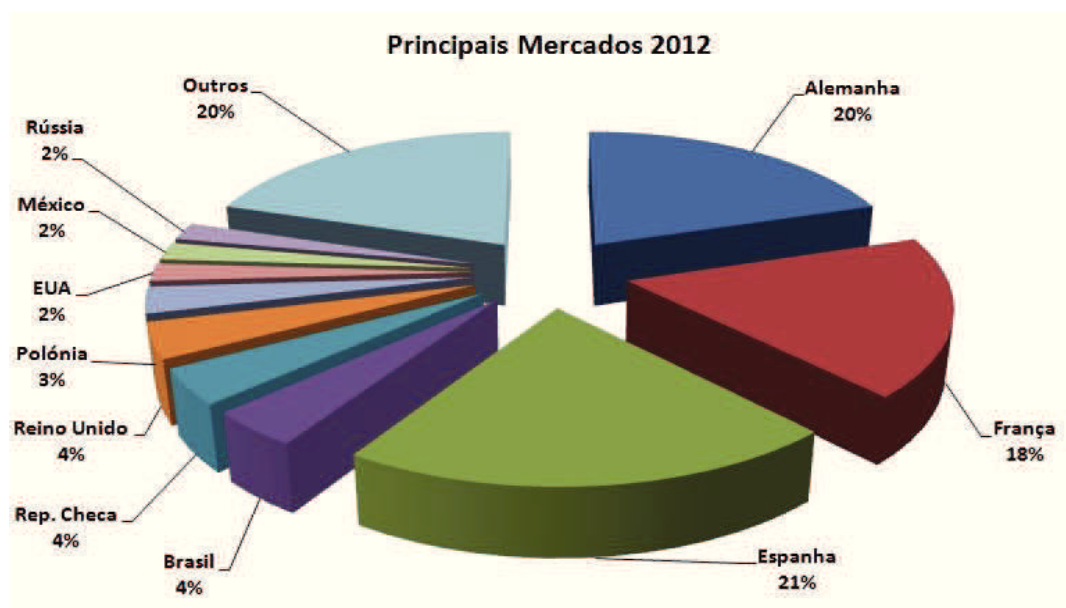


Figura 1.1 - Exportações na Indústria de moldes em 2012 – Dados recolhidos da Cefamol relativos ao ano 2012.

1.2. Enquadramento

A utilização de lubrificantes secos pode ser uma imposição técnica, em produtos onde não são permitidos os lubrificantes convencionais líquidos. São exemplo deste tipo de produtos os destinados à alimentação e medicina, produtos que estão sujeitos a regras apertadas e não podem ser sujeitos a qualquer tipo de contaminação. Este tipo de lubrificação também pode ser utilizado em produtos onde se pretende ter um elevado desempenho e não é possível fazer a lubrificação com regularidade (como é o caso dos rolamentos e peças para aeronáutica).

No entanto, devido às potencialidades deste tipo de lubrificante, estes também são utilizados, não por imposição técnica, mas com objetivo de otimização do molde de forma a melhorar o seu desempenho.

1.3. Descrição

Este estudo teve uma forte componente experimental em que o objetivo principal foi o de avaliar o desempenho dos revestimentos, das superfícies moldantes com função lubrificante e um tratamento de endurecimento superficial (em condições iguais às de produção em série),

em termos de comportamento na injeção e na extração. O tipo de revestimento e o tratamento superficial utilizado para este estudo foram a Nitruração (após tempera) e o revestimento PVD com a designação comercial “MoldLub”.

Para ser possível realizar este estudo foi desenvolvida uma peça específica, em que o seu interior é tubular e não tem saídas de desmoldação, ou seja, as paredes interiores da peça são verticais (0° de ângulo de saída). Esta conceção da peça cria naturalmente dificuldades à sua extração do molde e por vezes torna mesmo impossível ter uma peça de boa qualidade ou pode mesmo inviabilizar a sua extração do molde.

Foi também desenhado e fabricado um molde protótipo, feito em aço, com especificações técnicas semelhantes às utilizadas num molde de produção em série. Foram executadas duas buchas/machos (elementos moldantes) intermutáveis e foram injetadas peças com cada uma das buchas/machos individualmente.

Estas peças são Standard Hasco Ref Z41 e são fornecidas com revestimento superficial tempera e após nitruração. Uma das peças foi utilizada conforme rececionada, ou seja temperada e nitrurada. Na outra bucha/macho (elemento moldante) foi utilizado um revestimento PVD com designação comercial “MoldLub”. Para evidenciar a dificuldade na extração, as superfícies moldantes foram polidas com alto brilho.

O Polímero escolhido para a injeção das peças foi o (PP) Polipropileno por ser um material muito utilizado, macio e com uma contração elevada. O facto de ter uma contração elevada, no caso de uma peça tubular, vai naturalmente originar aperto em relação à bucha em aço. O alto brilho dado à bucha/macho (elemento moldante) vai originar maior dificuldade na sua extração pois cria maior aderência do polímero ao aço.

Após o molde finalizado, foram injetadas peças em condições reais de produção, com cada uma das buchas/machos (elementos moldantes). Foi utilizada sempre a mesma máquina de injeção, a mesma matéria- prima e os mesmos parâmetros de processamento. Foram analisadas as diferenças nos vários parâmetros de moldação resultantes da mudança do macho/bucha (elemento moldante) utilizados na injeção de cada uma das peças.

Após os ensaios efetuados, os dados resultantes foram analisados para avaliar o

comportamento da peça em Polipropileno com elementos moldantes com diferentes revestimentos e tratamentos superficiais.

1.4. Estrutura

O trabalho teve uma natural componente de pesquisa e investigação e uma forte componente experimental (laboratorial e tecnológica).

Este trabalho foi estruturado da seguinte forma:

Capítulo 1 – Introdução: neste capítulo são feitas algumas considerações e um resumo sobre a indústria de moldes em Portugal, como surgiu e qual a sua importância na atualidade e uma descrição do estudo efetuado.

Capítulo 2 – Estado da Arte: foi realizado uma revisão bibliográfica na área dos tratamentos térmicos e revestimentos de superfície, tipos de moldes e processos de fabrico.

Capítulo 3 - Desenvolvimento e conceção do desenho de peça polímero a utilizar e análise reológica: neste capítulo é apresentado o estudo relativo ao desenvolvimento do desenho de peça (desenho de produto) a moldar e o estudo reológico, *Mold Flow*.

Capítulo 4 - Desenvolvimento do projeto do molde e fases do seu fabrico: neste capítulo é apresentado o desenvolvimento e fabrico do molde protótipo (*sketch* e desenho 3D), seleção de materiais, maquinação dos vários componentes do molde, montagem e ajustamento.

Capítulo 5- Ensaio do molde protótipo: é apresentada a máquina de injeção utilizada, os equipamentos periféricos e os procedimentos considerados no processamento. Neste capítulo, são também apresentados os resultados obtidos no processamento das peças plásticas em termos de pressões de injeção e forças de extração.

Capítulo 6 – Análise e discussão de resultados: neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios realizados.

Capítulo 7- Conclusões e trabalhos futuros: neste capítulo são apresentados as principais conclusões obtidas neste estudo.

2. Tratamentos e Revestimentos de superfície: Estado da Arte

A escolha do aço a aplicar nos moldes de injeção de polímeros é, um dos principais fatores que vai influenciar a qualidade final, tanto do produto plástico como da própria ferramenta (molde). Ao escolher determinado aço deve ter-se em consideração o tipo de polímero, os esforços que o molde irá sofrer durante o processamento por injeção, o tipo de acabamento superficial que se pretende ter na peça plástica e a durabilidade que se pretende obter do molde.

Os tratamentos térmicos e revestimentos de superfície contribuem significativamente para a durabilidade da ferramenta e para a qualidade do produto final que é a peça plástica. O tipo de aço escolhido, influencia diretamente a viabilidade, ou inviabilidade, de aplicação de determinados revestimentos e tratamentos, pois nem todos os tipos de revestimentos podem ser aplicados a todos os tipos de aços.

2.1. Tratamentos térmicos e de endurecimento superficial

Com o objetivo de melhorar as propriedades mecânicas do aço estes são submetidos a determinados tratamentos. O tratamento é um processo no qual o aço no estado sólido é submetido a ciclos de aquecimento e arrefecimento controlados para lhe conferir determinadas propriedades [3]. Por vezes, dois aços, com referências idênticas, podem exigir diferenças significativas nos tratamentos térmicos, por esse motivo é de extrema importância

a ficha de especificações técnicas de cada fornecedor de aço. Pelos motivos atrás mencionados o tratamento térmico deve ser deixado para especialistas [4].

Existe vários tratamentos térmicos que podem ser divididos nos seguintes grupos em função das técnicas de execução [3] das quais iremos analisar os mais comuns, indicados na tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Tratamentos Térmicos

<u>Mecânicos</u>	<u>Térmicos</u>	<u>Termomecânicos</u>
A quente (forjamento, estampagem)	Recozido	Ausforming (TMBT)
A frio (estriagem)	Têmpera	Trat. Mecânico alta temperatura (TMAT)
	Revenido	Isoforming

2.1.1. Tratamentos Mecânicos

São processos, a quente ou a frio, de deformação do aço, com o objetivo de melhorar as suas propriedades mecânicas [6].

O forjamento foi dos primeiros processos de transformação por deformação plástica, as tribos Hindus desde 1500 antes de Cristo, trabalhavam ouro, a prata e o ferro. A arte do forjamento foi utilizada até à idade média para a fabricação de armas e armaduras [3].

O forjabilidade é uma característica peculiar dos aços, as estruturas que compõem o aço à temperatura ambiente, transformam-se quando aquecidas até à temperatura de forjamento, em austenite que é uma estrutura forjável por ser plástica [3].

Para a execução destes tratamentos o aço deve ser aquecido lentamente e bem até ao núcleo, numa atmosfera tão neutra quanto possível, até que seja atingida a temperatura de início do trabalho [3].

O Aquecimento muito rápido no início do processo, tem o inconveniente de provocar grandes diferenças de temperatura entre o núcleo e a superfície da peça, provocando tensões

muito elevadas que podem originar zonas frágeis [3].

Para o forjamento o intervalo de temperaturas é normalmente de 200°C e dependendo da composição do aço pode ser de 150°C e de 250°C (no caso de alguns tipos de aço rápido) [3]. A temperatura do limite superior vai diminuindo para os aços sem liga à medida que aumenta o seu teor de carbono, ou seja, 1 100°C para os teores baixos, 1 050°C para teores na ordem dos 0,7% e de 1 000°C para teores de carbono superiores [3]. A temperatura limite inferior para aços sem liga, com pouco teor de carbono, é de 850°C, com teor de carbono acima dos 0,40% é aproximadamente de 800°C. Para os aços de liga é normalmente 850°C subindo para os 900°C nos aços de muita liga [3].

Terminado o trabalho as peças são deixadas a arrefecer lentamente. Normalmente após este tratamento são submetidas a um recozimento de amaciamento que tem por fim dar ao aço uma estrutura globular mais conveniente para a maquinação [3].

2.1.2. Tratamentos Térmicos

Os objetivos dos tratamentos térmicos podem ser resumidos em [8]:

- Remoção de tensões internas (oriundas de resfriamento desigual, trabalho mecânico ou outra causa)
- Aumento ou diminuição da dureza
- Melhorar ductilidade
- Melhorar maquinação
- Melhorar resistência ao desgaste
- Melhorar as propriedades de corte
- Melhorar a resistência à corrosão
- Melhorar resistência ao calor
- Modificação das propriedades elétricas e magnéticas

Recozimento

Existem vários tipos de recozimento:

- Recozimento por difusão
- Recozimento de normalização

- Recozimento de amaciamento
- Recozimento de distensão
- Recozimento intermédio

O objetivo do recozimento é a remoção de tensões internas devido aos tratamentos mecânicos e reduzir a dureza do aço para facilitar as maquinações. O recozimento elimina o efeito de qualquer tratamento térmico ou mecânico anterior [3-8]. Os diferentes tipos de recozimento são obtidos consoante as diferentes temperaturas, velocidade e tempos de aquecimento e arrefecimento.

Têmpera (Formação de martensite Fe-C por arrefecimento rápido)

A forma tradicional de obter grande resistência nos aços é a têmpera para martensite. Esta é subsequentemente reaquecida ou revenida, a uma temperatura intermédia, o que aumenta a tenacidade do aço sem grande perda de resistência. Para que se consiga obter a resistência ótima, o aço tem que ser previamente transformado em martensite. Para que isso aconteça é necessário que o aço seja temperado a uma velocidade suficientemente rápida, que impeça a decomposição da austenite, durante o arrefecimento, em produtos como a ferrite, a perlite e a bainite. A geometria do provete e a composição do aço são fundamentais para a eficiência da têmpera [6, 8].

Assim como nos outros tratamentos térmicos também a têmpera é constituída pelo aquecimento, estágio à temperatura de têmpera e o arrefecimento. Com o aquecimento pretende-se a austenitização completa da massa de aço para, com o arrefecimento controlado, a transformar em martensite, como referido anteriormente [6].

Se uma amostra de aço-carbono austenitizada for arrefecida rapidamente até à temperatura ambiente por meio de imersão em água (têmpera), a sua estrutura passa de austenite para martensite [6].

A temperabilidade de um aço é definida como a propriedade que determina a profundidade e a distribuição da dureza induzida por têmpera a partir do estado austenítico. A temperabilidade do aço depende de três fatores, (1) da composição química do aço, (2) do tamanho do grão austenítico e (3) da estrutura do aço antes da têmpera. A temperabilidade do

aço não deve ser confundida com a dureza do aço, que é a resistência à deformação plástica [5].

Revenido

O revenido é o tratamento de aquecimento de um aço martensítico a uma temperatura abaixo da temperatura de transformação eutectóide, com o objetivo de tornar o aço mais dúctil e macio. O aço é inicialmente austenitizado, após temperado com velocidade elevada de modo a obter martensite e a evitar a transformação em austenite, ferrite ou cementite. Posteriormente o aço é reaquecido a uma temperatura abaixo da temperatura eutectóide para amaciar a martensite, que se transforma numa estrutura de partículas de carboneto de ferro numa matriz de ferrite [5].

Na figura 2.1 pode observar-se o efeito do aumento de temperatura de revenido na dureza de diversos aços-carbono martensíticos. A dureza diminui gradualmente com o aumento de temperatura desde aproximadamente 200°C até 700°C [6].

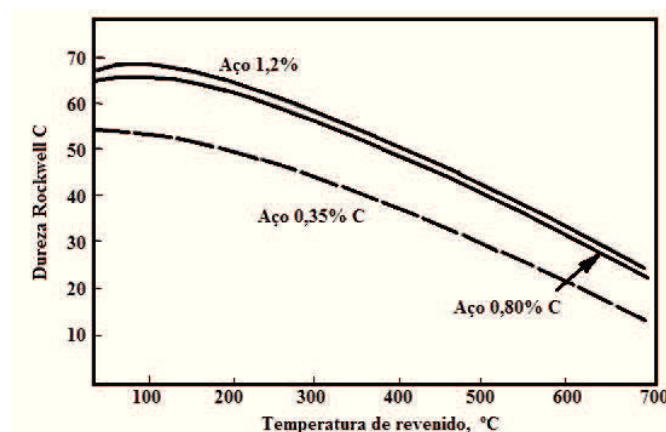


Figura 2.1 - Dureza das martensites ferro-carbono (0,35 a 1,2%C) revenidas durante 1 Hora às temperaturas indicadas [5].

O revenido tem por fim eliminar as tensões provocadas pelo arrefecimento da têmpera e dar às peças temperadas a melhor tenacidade (resiliência) possível, de acordo com o trabalho a que serão submetidas. A tenacidade aumenta em virtude de terem sido reduzidas as tensões devidas à têmpera e também devido à distensão e amaciamento da estrutura de têmpera. Este aumento de tenacidade é portanto, obtido à custa duma diminuição da dureza, de um modo geral [6].

Emprega-se também o revenido quando se pretende obter um aumento de dureza quer por transformação da austenite residual (nos aços rápidos e nos aços para trabalho a quente) ou por precipitação (nos aços de endurecimento estrutural) [3].

2.1.3. Tratamentos Termomecânicos

Um tratamento termomecânico é a combinação de tratamentos térmicos e mecânicos a que os aços se submetem numa determinada fase da sua produção e consiste na aplicação simultânea de calor e de um processo de deformação, com o objetivo de alterar a forma e refinar a microestrutura e assim elevar consideravelmente a sua resistência mecânica [7].

Os tratamentos termomecânicos podem ser classificados em duas classes, tratamentos termomecânicos de alta temperatura (TMAT) e tratamentos termomecânicos de baixa temperatura (TMBT) [7].

Ausforming (enformação austenítica)

O processo conhecido por *ausforming* ou tratamento termomecânico de baixa temperatura (TMBT) foi o primeiro descrito por Harvey e posteriormente por Lips e Van Zuilen. Consiste na deformação da austenite no domínio metaestável entre as curvas de ferrite e da bainite.

A grande vantagem do processo, quando aplicado a aços apropriados, é o espetacular aumento de resistência que se consegue, sem efeito adverso na ductilidade e tenacidade. Por exemplo, um aço com 4,7%Cr-1,5%Mo-0,4%V-0,34C tem uma resistência à tração de cerca de 2000 MNm⁻² após o tratamento clássico de tempera e revenido, ao passo que, por *austforming*, se pode obter uma resistência acima dos 3000 MNm⁻² [6].

Tratamento Termomecânico de Alta Temperatura (TMAT)

Nos tratamentos termomecânicos de alta temperatura, a deformação é feita na região austenítica estável, imediatamente acima. O aço é depois temperado para o estado martensítico e finalmente revenido a uma temperatura apropriada [6].

O endurecimento obtido resulta do refinamento do grão de austenite, que é tipicamente de 10-60 μm para ~3μm, mas as propriedades ótimas são em geral obtidas quando se evita a

recristalização da austenite [6]. Uma vantagem especial deste processo é que permite obter excelentes propriedades com deformações moderadas (~40%), o que torna possível a utilização de equipamento convencional de deformação [6].

O TMAT não conduz a resistências tão elevadas como as que resultam do austforming, mas a ductibilidade e as propriedades em fadiga são, por regra, superiores [6, 7].

Isoforming

No processo *isoforming* há deformação da austenite metaestável, mas a deformação prossegue até se completar a transformação da austenite até à temperatura de deformação [6, 7]. Isto tem a ver com o facto de a morfologia lamelar da perlite originar uma baixa tenacidade dos aços ferrítico-perlíticos, verificando-se o aumento da temperatura de transição dúctil/frágil com o aumento da fração volumétrica da perlite [6, 7].

A deformação, durante a transformação de fase, faz que a microestrutura ferrite/perlite dê lugar a uma estrutura com finos subgrãos de ferrite [6]. Com este tratamento o aumento da resistência obtido é em geral pequeno. No entanto, pode haver uma melhoria substancial da tenacidade devida ao refinamento do tamanho do grão da ferrite e à substituição da cementite laminar por partículas esferoidais [6, 7]

2.2. Tratamentos de endurecimento superficial

Na tabela 2.2 estão indicados os tratamentos termoquímicos mais utilizados.

Tabela 2.2 - Tratamentos Termoquímicos

<u>Termoquímicos</u>
Cementação
Nitruração
Carbonitruração
Sulfinuzação

Cementação

Este tratamento aplica-se especialmente nos aços ferrítico-perlíticos e consiste em carbonizar a camada superior da peça. Para fazer este tratamento a peça é envolvida com um cimento e aquece-se durante um certo tempo a uma temperatura entre 870° e 930°C, dependendo do tipo de cimento, transmitindo desta forma o carbono ativo à superfície da peça [6, 7]. Quanto maior for o tempo do tratamento, maior será a profundidade da camada cementada [3, 6].

A peça, carbonizada na superfície, é temperada a partir da temperatura de têmpera prescrita, ficando a camada cementada com dureza elevada enquanto o núcleo, que mantém a sua composição, conserva a sua tenacidade e não sofre praticamente nenhuma alteração de dureza [7].

A cementação consiste então em dois fenómenos que se verificam em simultâneo, a primeira é a carbonização (cementação) e a segunda é a têmpera [6, 7]. As peças com este tratamento obtêm elevada dureza na superfície (entre 55 a 60HRC) para o teor de 0,4%C e grande maleabilidade no núcleo (dependendo do tipo de aço). Estas características tornam o processo recomendado para certas peças sujeitas a muito esforço superficial, como é, por exemplo, o caso das engrenagens [6, 7]. Na figura 2.2 pode-se observar a influência do teor de carbono na dureza (após têmpera enérgica)

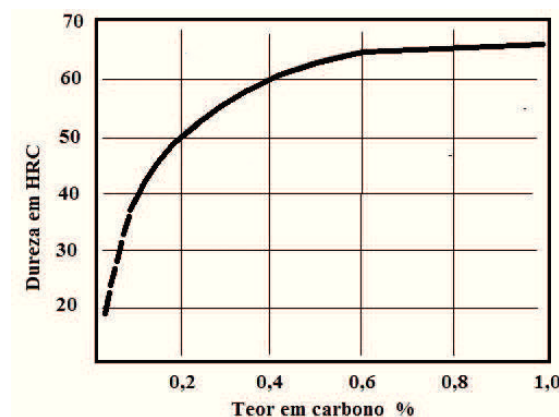


Figura 2.2 - Influência do teor de carbono na dureza (após têmpera enérgica) [6].

Nitruração

A nitruração consiste na introdução de azoto, sob a forma de nitretos de ferro, numa película superficial do aço obtendo-se grande dureza superficial [3-6]. Este processo é normalmente utilizado quando se pretende obter dureza máxima ou uma grande resistência ao desgaste diminuindo desta forma o perigo de “gripagem” nas superfícies de deslizamento. Deve no entanto ter-se em conta que a zona exterior da camada nitrurada é muito frágil e fina, não devendo ser exposta a grandes esforços locais de compressão ou a choques [3, 6].

Há 2 tipos de nitruração: a nitruração gasosa e a nitruração líquida, antigamente chamada cianuração [3, 6]. A nitruração gasosa é o mais clássico processo de nitruração (foi patenteado em 1908 por Adolph Machlet) [6].

A temperatura de nitruração, quer em atmosfera azotada (500-520°C) quer em banho de sais libertando o azoto (550-580°C), está situada entre 500 e 580°C, ou seja na zona abaixo do ponto de transformação [3, 6]. Na figura 2.3 podemos observar que a duração da nitruração depende diretamente da profundidade da camada nitrurada que se pretende obter.

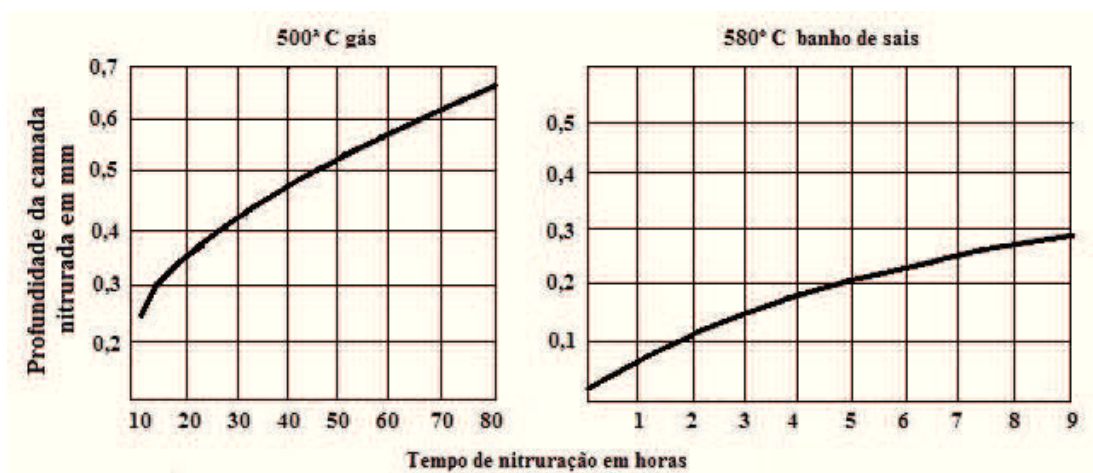


Figura 2.3 - Influência do tempo de nitruração na camada nitrurada [6].

Na nitruração por meio de gás, as peças são arrefecidas no forno sem entrada de ar, (caso contrário elas sairiam azuladas o que é indesejável na maior parte dos casos), o tempo de nitruração neste caso varia entre as 20 e 60 horas [3, 6].

A nitruração em banho de sais é efetuada, como referido atrás, entre 550-580°C e tem um tempo curto de nitruração, entre 30 a 180 minutos. O cianeto do banho de sais decompõe-se

nos pontos de contacto com o aço libertando azoto e carbono. O azoto ativo libertado difunde-se na superfície do aço. Por este processo a zona nitrurada é constituída por duas camadas: uma camada superficial com, 0,015mm a 0,02mm aproximadamente, a que se denomina de zona de ligação, constituída por nitretos e carbonetos, e outra, subjacente aquela, com profundidade de 0,1 a 0,3mm aproximadamente chamada zona de difusão, formada pela absorção de azoto [3].

A camada exterior é de grande importância para o bom comportamento ao desgaste e também para a obtenção de boas condições de deslizamento, sendo a dureza e a composição desta camada os fatores decisivos [3]. Relativamente à nitruração em meio gasoso, a nitruração em banho de sais oferece a vantagem de poder suprimir a limpeza ou a decapagem da peça [3].

Existe uma variante da nitruração líquida designada com o nome de processo Tenifer (Te – tenaz, ni-nitrogénio ou azoto, fer-ferro). Este processo é uma nitruração em banho de sais (cianetos e cianetos alcalinos), com a particularidade de o banho ser atravessado por correntes de bolhas de ar que provocam uma oxidação acelerada dos cianetos alcalinos reforçando a absorção do azoto. Trata-se de um processo mais económico em virtude da melhor utilização dos banhos de sais. A temperatura desta nitruração é de 560°C e o tempo de imersão é geralmente de 30 a 120 minutos [3]. Neste caso a zona de ligação tem uma espessura de 0,06 a 0,12 mm e é constituída por 25% de carbonetos de ferro e 75% de nitretos de ferro. A zona de difusão (rica em azoto) pode atingir 0,8 mm de espessura nos aços sem liga [3]. Depois da nitruração não é necessário qualquer tratamento térmico [3].

Em princípio qualquer aço pode ser nitrurado mas só aqueles que contêm quantidades suficientes de elementos capazes de formar nitretos especiais (alumínio, crómio, molibdénio, tungsténio, vanádio) obterão durezas superficiais máximas. Os que possuem uma percentagem mínima destes elementos, apresentarão, após a nitruração, um pequeno aumento de dureza superficial, por esse facto se chama nitruração macia. [4, 6].

Carbonitruração

A carbonitruração é uma combinação da cementação e a nitruração, permitindo desta forma a obtenção de camadas superficiais muito duras, com a espessura de cerca de 0.1mm, o que

em peças de pequenas espessuras se torna de extremamente importante [3, 4]. Durante o processo de carbonitruração o carbono e o azoto penetram na superfície do aço. O azoto nascente combina-se com o aço formando nitretos tal como na nitruração. Devido à absorção do azoto, a transformação $\alpha \leftrightarrow \gamma$ desloca-se para temperaturas relativamente baixas, de tal forma que a austenite se forma entre os 600°C a 750°C. Simultaneamente favorece-se a absorção do carbono (que se dissolve no ferro γ) para que, durante o arrefecimento, exista quantidade de carbono suficiente para a formação da martensite [3].

Podemos distinguir dois tipos de carbonitruração, segundo critério de transformação $\alpha \leftrightarrow \gamma$ da zona profunda da peça. Assim temos a carbonitruração com ou sem transformação $\alpha \leftrightarrow \gamma$ da zona profunda, transformação essa que depende apenas da temperatura exceto para as peças de pequenas dimensões que neste caso a difusão se produz em toda a secção [3].

Estes dois processos podem ser efetuados tanto em meio líquido como em meio gasoso. O arrefecimento é efetuado imediatamente após a carbonitruração tendo em consideração a qualidade do aço [3].

Utilizam-se banhos de sais azotados (banhos de cianetos) ou, no caso da carbonitruração em atmosfera gasosa, hidrocarbonetos com amoníaco. Para temperaturas no limite inferior da gama de temperaturas da carbonitruração, verifica-se uma maior intensidade da absorção do azoto e uma diminuição da carbonização (na região superior de temperaturas produz-se o caso inverso) [3]. O facto das temperaturas necessárias para a carbonitruração serem pouco elevadas tem repercussões favoráveis sobre a maneira como as peças, sobretudo as mais pequenas, se comportam quanto à deformação. Este tratamento convém sobretudo aos aços de pequena liga, não sendo necessário quaisquer tratamentos térmicos posteriores (recozido intermédio etc) [3] A carbonitruração pode ser executada em qualquer aço [3].

Sulfinuzação

Este tratamento tem por objetivo aumentar a resistência ao desgaste das peças tratadas, aquecendo-as em banho de sais de composição determinada a uma temperatura de 565°C.) [3]. A temperatura não pode ultrapassar os 575°C pois verifica-se um aumento de volume da peça cujas razões não estão ainda perfeitamente determinadas. O tempo de imersão varia entre 1 e 3 horas, obtendo-se películas superficiais com o máximo de 0.3mm de espessura, motivo pelo qual não traz vantagem prolongar mais o tempo de imersão) [3].

Este tratamento não aumenta a dureza superficial da peça, efetuando-se analogamente à nitruração macia. A diferença está no facto do enxofre, além do carbono e do azoto, também entrar na formação da zona de ligação. A penetração do carbono e do azoto na superfície verifica-se tal como na nitruração macia enquanto o enxofre apenas participa na formação da película mais exterior da zona de ligação) [3].

2.3. Revestimentos técnicos e tratamentos superficiais

Nos materiais metálicos que são suscetíveis de sofrerem ataque corrosivo, a aplicação de revestimentos superficiais constitui a técnica mais comum. Muitas vezes, os revestimentos superficiais atuam também no sentido de conferirem um aspeto decorativo à superfície metálica e, eventualmente, aumentar a dureza superficial e consequentemente a resistência ao desgaste [8]. Também em peças com necessidade de lubrificação onde não possa existir vestígios de lubrificante, ou seja difícil ou impossível a lubrificação comum, os revestimentos de superfície são as aplicações escolhidas. Existe uma grande quantidade de revestimentos de superfície, alguns muito idênticos, mas cada um com determinado objetivo e características distintas, na tabela 2.3 encontram-se os mais utilizados.

Tabela 2.3 - Processos de Galvanoplastia, PVD e fluxo pressurizado

<i>Processo Galvanoplastia</i>	
<i>Revestimento</i>	<i>Característica / Cor</i>
Cromagem Dura	Metal de transição duro - Cor cinza prata
Niquelagem química	Metal de transição - Cor prateado [26]
Electro-químico Teflon (Ni-PTFE) (tribocout, Standex Company)	Níquel Electroлитico e Polytetrafluorethylene (PTFE)
<i>Processo Revestimento PVD (Physical Vapor Deposition) (os mais utilizados)</i>	
Nitreto de Titânio (TiN)	Material cerâmico fino - Cor dourada [25]
Nitreto de Crómio (CrN)	Material cerâmico fino - Cinzento Prata [25]
Carbonitreto de Titânio (TiCN)	Material cerâmico fino - Cor cinzento Azulado [25]
Diamond- Like Carbon (DLC)	Carbono amorfo ionizado - De cor preto

2.3.1 Revestimentos por processo de Galvanoplastia

O processo de Galvanoplastia foi descoberto pelo físico e químico italiano Luigi Galvani que fazia estudos sobre eletricidade por volta de 1750. Os revestimentos feitos por este processo têm por objetivo o aumento de dureza superficial, proteção contra a corrosão,

proteção contra oxidação, aspeto decorativo da peça entre outros. Também podemos definir esta tecnologia como a responsável pela transferência de íons metálicos de uma superfície sólida ou meio líquido chamado eletrólito para outra superfície, metálica ou não. Este processo pelo facto de utilizar corrente elétrica foi chamado de eletrodeposição [8].

A eletrodeposição é provavelmente o processo de revestimento mais utilizado, pois com este revestimento conseguem-se camadas superficiais de espessura fina, uniformes e isentas de poros. Os metais normalmente depositados por esta técnica são o Zinco, estanho, cobre, níquel, cromo, cádmio, prata e ouro [8]. A peça a ser revestida é usada como um cátodo numa célula eletrolítica (ou cuba eletrolítica), onde o eletrólito contém sal do metal protetor, podendo o ânodo ser do mesmo metal a ser depositado [8]. A eletrodeposição é um fenómeno inverso à corrosão, ou seja, na corrosão o metal é dissolvido na solução, na eletrodeposição o metal é depositado na solução

Cromagem dura

A aplicação do cromo duro é feita pelo processo de eletrodeposição explicado no ponto anterior. A camada de cromo duro proporciona elevada resistência ao desgaste, em virtude da sua elevada dureza superficial que anda na ordem dos 900HV (60/70 Hrc), proporcionando desta forma uma duração superior da vida útil da ferramenta, retardando o seu desgaste.

O cromo (Cr) é um metal branco azulado quebradiço, que pode ser polido mecanicamente até ficar com superfície espelhada, ótica. O crómio é usado em quantidades maiores que o tungsténio e o molibdénio na fabricação de aços inoxidáveis para melhorar a resistência contra a corrosão e a resistência ao calor, além das suas propriedades mecânicas. O crómio é dos poucos metais que pode ser depositado com alta dureza a partir de eletrólitos aquosos. Os revestimentos a cromo podem ser divididos em dois grupos principais: Cromo Decorativo e Cromo Duro Industrial [9].

No Cromo Decorativo o que se pretende é a capacidade de reflexão de luz que a superfície cromada produz, melhorando significativamente a aparência das peças revestidas. Como o cromo não se embacia a sua capacidade refletiva mantêm-se constante. Também a resistência à corrosão é de extrema importância [9].

Chama-se Cromo Duro Industrial a camadas superiores a 5µm de espessura quando depositados diretamente no metal base [9]. As características principais do Cromo Duro depositado por eletrolise são a sua elevada dureza entre os 800 e 1200 Vickers (superior à do quartzo), estrutura cristalina cúbica, densidade de 7,2g/Cm³, ponto de fusão de 1,903° C e um coeficiente de dilatação térmica parecido com o aço [9].

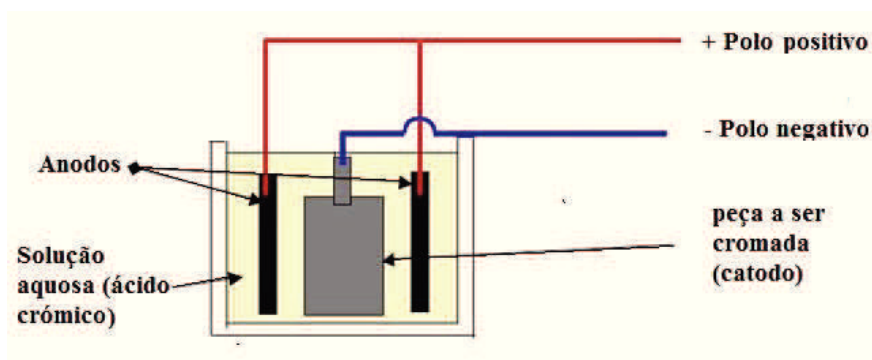


Figura 2.4 - Eletrodeposição de Cromo [9].

A eletrodeposição do cromo duro faz-se da seguinte forma, e conforme figura 2.4:

O banho de cromo é composto de Anidrido crômio (Cr₂O₃) dissolvido em água (H₂O) e passa a ser ácido crômico. Na solução é adicionado o catalisador: ácido sulfúrico (H₂SO₄) [9]. A peça é fixada no pólo negativo (catodo) onde ocorre a deposição do cromo metálico. No polo positivo fixamos os ânodos, onde ocorre a reconstituição do ácido crômico. O processo de deposição inicia-se quando, mediante a passagem de corrente contínua promovem a eletrólise da solução. A equação da reação é dada pela equação 2.1:



Sob ação da corrente contínua a molécula de ácido crômico, tendo excesso de três elétrons, portanto fortemente negativa, migra para o ânodo. Influenciado pelo catalisador na superfície anódica, forma-se a molécula complexa da segunda parte da equação [9]. O catalisador de banho H₂SO₄ na proporção de 1:1000 penetra na camada catódica pelo seu reduzido tamanho, atingindo a superfície catódica. Em contacto com o radical alcalino OH este dissolve-se permitindo a redução do íon de cromo para cromo metálico [9]. Pelo facto de o Cromo Duro possuir dureza elevada não são recomendadas camadas espessas para evitar excesso de tensões internas na camada [9].

Niquelagem Química

A niquelagem química é um tratamento de superfície que consiste em depositar níquel pelo processo de eletrodeposição. O processo utilizado é o mesmo utilizado da cromagem dura, descrito no ponto anterior, mas com a diferença de se depositar Níquel em vez de cromo.

O Níquel é um metal branco-prateado e possui grande resistência mecânica à corrosão e à oxidação, o revestimento com este metal permite atingir durezas superficiais de 1000 HV (66-70Hrc) e pode aplicar-se em superfícies metálicas ou não metálicas.

2.3.2. Revestimentos PVD

Na engenharia de superfícies existe o processo de sobreposição ou modificação de superfícies. Num processo de sobreposição, como o nome indica, é sobreposto um material que cobre todo o substrato. Num processo de modificação da superfície, muda as propriedades da superfície, mas o material da “carcaça” ainda está presente na superfície. Cada processo tem vantagens, desvantagens e aplicações específicas. Nalguns casos um processo de modificação de superfície pode ser utilizado para modificar a superfície do substrato antes de depositar um revestimento.

Uma peça em aço pode ser endurecida por têmpera ou nitruração antes da deposição de um revestimento duro por um processo de PVD.

Os processos iniciais de deposição física de vapor (PVD) remontam a 1938 desenvolvidos na altura pela mão de Berghaus [10]. Mas foi no princípio da década de 60, com o aparecimento da técnica de deposições iónicas desenvolvidas por Mattox [11] que se começaram a consolidar expectativas em redor das técnicas de PVD baseadas em sistemas de vácuo. O processo PVD (physical vapor deposition) é um processo de deposição atómica em que o material é vaporizado a partir de uma fonte de sólido ou líquido em forma de átomos ou moléculas, transportado em forma de vapor através de um vácuo ou gasoso de baixa pressão (ou plasma) [12]. Na figura 2.5 pode-se observar um equipamento, da empresa TEandM, para execução de revestimentos em PVD.

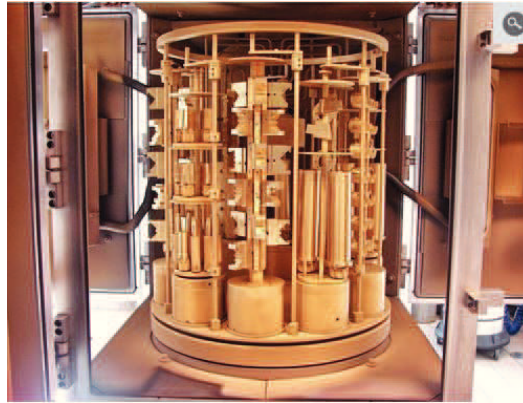


Figura 2.5 - Equipamento PVD da empresa TEandM.

Atualmente, através das técnicas de PVD são produzidos filmes finos dos mais variados materiais, sendo a pulverização catódica reativa uma das técnicas mais utilizadas devido à sua versatilidade, dado que é facilitada a passagem do trabalho laboratorial para o industrial. O método de revestimento envolve processos puramente físicos tais como uma evaporação, por bombardeamento iónico de plasma (o que torna a deposição num processo à escala atómica), assim como envolve uma reação química na superfície a ser revestida [53]. No processo PVD as temperaturas de deposição são muito baixas e variam entre os 150°C e os 500°C [23] e o material de revestimento sólido de alta pureza (como titânio, crómio, alumínio etc.) é evaporado por calor ou bombardeado com íons (deposição catódica). No mesmo momento é introduzido um gás reativo (ex. nitrogénio ou um outro gás que contenha carbono) formando um composto com o vapor metálico que se deposita nas ferramentas, ou nos componentes, na forma de um revestimento fino e altamente aderente. Durante este processo as peças giram a uma velocidade constante para se obter uma espessura uniforme [13]. Ver figura 2.6.

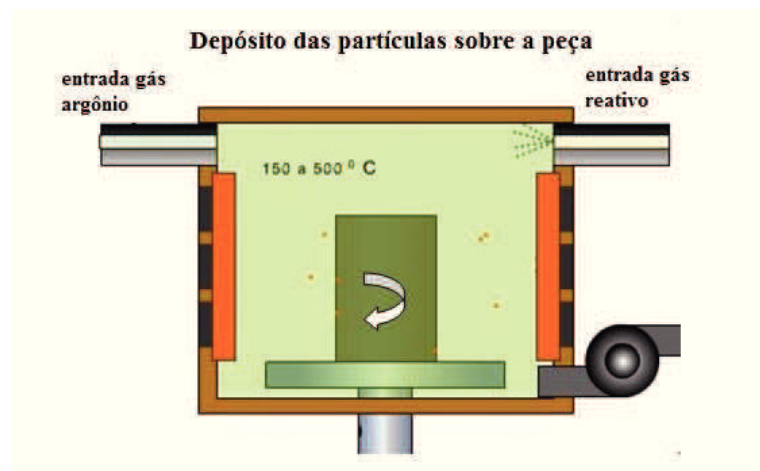


Figura 2.6 - Processo PVD [57].

Nota: O processo CVD (Chymical vapor deposition) ocorre por meio de uma reação química entre gases, por exemplo hidrogénio, cloreto de titânio e metano, em atmosfera de nitrogénio, e para recriar um recobrimento de TiCN, precisamos de temperaturas bem mais elevadas (900°C a 1000°C), que o PVD, não sendo aplicável aos aços ferramenta [14].

2.3.2.1. Vantagens da técnica PVD

São citadas as seguintes vantagens [15] a favor dos revestimentos pelo processo PVD:

- A possibilidade de operar a pressões de trabalho muito baixas permite sintetizar materiais de elevada pureza
- Melhoria de adesão do revestimento ao substrato, devido à possibilidade de se “limpar” Pulverizando (*etching*), e ainda pré-aquecer os substratos através de bombardeamento iónico e neutral da superfície do substrato
- A uniformização de espessuras dos revestimentos é possível, pois este processo permite deslocar ou rodar as amostras relativamente á fonte de calor durante a deposição
- Após o revestimento, elimina-se a necessidade de maquinar ou polir, já que na maior parte dos casos a morfologia superficial do substrato é praticamente reproduzida à superfície do revestimento
- Controle da estrutura do revestimento. O bombardeamento iónico fomenta o crescimento epitaxial e encoraja a mobilidade atómica
- Normalmente não são utilizados quaisquer efluentes ou poluente, dado que na maior parte dos casos não intervêm produtos ou soluções tóxicas
- Temperaturas de deposição relativamente baixas. A ionização direta dos átomos do material a depositar providência benefícios previamente só conseguidos em substratos aquecidos
- Evita a contaminação pelo hidrogénio; fenómeno que acontece em eletrodeposições

2.3.2.2. Revestimentos

Tabela 2.4 - Nitreto Titânio [25].

Nitreto de Titânio					
Designação	Dureza HV	Rugosidade (Ra μm)	Coefficiente atrito (seco)	Espessura (μm)	Cor
TiN	2500 \pm 400	0,2	0,65 a 0,70	2 - 4	Dourado

O Nitreto de Titânio conforme se pode observar na tabela 2.4, é um material cerâmico de cor dourada, é aplicado pelo processo PVD descrito atrás. É aplicado normalmente em ferramentas (brocas e machos de rosca) pois, as ferramentas tratadas por esta técnica adquirem alta dureza e baixo desgaste por fricção, o que lhe confere uma vida prolongada e um bom desempenho de corte [13].

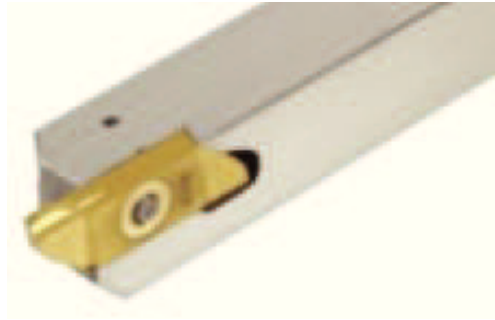


Figura 2.7 – Ferramenta de corte revestida a nitreto de titânio pelo processo PVD [13]

Na figura 2.8 Pode-se observar o resultado do revestimento com nitreto de titânio, onde se vê a espessura da camada numa matriz de aço rápido M2.

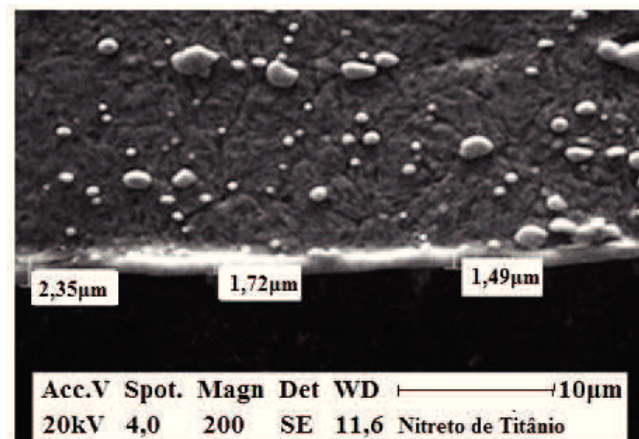


Figura 2.8 - Micrografia da superfície da matriz de corte de aço rápido M2 com revestimento Superficial de nitreto de titânio, destacando a espessura da camada [13].

Tabela 2.5 - Nitreto de crómio [25].

Nitreto de Crómio					
Designação	Dureza HV	Rugosidade (Ra µm)	Coefficiente atrito (seco)	Espessura (µm)	Cor
CrN	2100 ± 300	0,2	0,50 a 0,60	2 – 6+	Cinzento Prateado

O Nitreto de Crómio, conforme se pode observar na tabela 2.5, tem como principais características a elevada dureza a quente, excelente adesão, baixo coeficiente de atrito, o que no caso dos moldes de injeção de polímeros pode auxiliar na desmoldação, boa tenacidade e ductibilidade, aumenta a resistência das peças ao desgaste abrasivo, biocompatível e tem excelente resistência à corrosão e a oxidação [13].

O Nitreto Titânio (TiN) e o Nitreto de Crómio (CrN), são as duas ligas aplicadas pelo processo PVD que mais se tem destacado no revestimento de moldes de injeção de ligas de alumínio [18, 19]. Os desmoldantes convencionais e os óxidos naturais formados nas superfícies do aço e do alumínio são facilmente removidos quer pela Ação da temperatura quer pela Ação mecânica do fluxo líquido, não sendo uma proteção eficiente Por esse motivo recomenda-se Tin ou CrN ou seja a criação de uma barreira entre a superfície do aço e do alumínio líquido evitando o contacto direto entre os dois [20].

O TiN não tem uma suficiente resistência à oxidação acima dos 550°C, por esse motivo a aplicação do CrN justifica-se em alguns casos pois é mais resistente á oxidação, mostrando bons resultados até aos 800°C. [21] A resistência á corrosão do CrN é também superior [22]. A dureza do CrN comparada à dos outros nitretos de metais de transição é relativamente baixa (1600-2000VHN), mas tem a vantagem de estar sujeita a tensões menores. Por esse motivo é possível depositar filmes de maior espessura e compensar desta forma a menor dureza.

Tabela 2.6 - Carbonitreto de Titânio [25].

Carbonitreto de Titânio					
Designação	Dureza HV	Rugosidade (Ra µm)	Coefficiente atrito (seco)	Espessura (µm)	Cor
TiCN	2800 ± 300	0,15	0,45 a 0,60	2 - 5	Cinzento Azulado

O TiN forma uma camada de estrutura simples, ou seja mono-camada. No caso do carbonitreto de titânio (TiCN) normalmente possui uma estrutura mais complexa. Com o objetivo de conciliar uma boa aderência com uma alta dureza superficial, a relação entre os valores de C e N é variada de uma forma crescente durante o processo de revestimento, gerando desta forma uma sobreposição de 5 a 10 camadas de composição diferente [24]. As principais vantagens o TiCN relativamente ao TiN são a sua elevada dureza, e ainda um coeficiente de atrito menor. A dureza e a tenacidade, combinadas com a boa resistência ao desgaste, são indicadas para aplicações em ferramentas de fresar [13].

Tabela 2.7 - DLC (Diamond Like Carbon) [36].

DLC (Diamond Like-Carbon)					
Designação	Dureza HV	Rugosidade (Ra µm)	Coefficiente atrito (seco)	Espessura (µm)	Cor
DLC	1500 - 9000		<0,1	0.5 a 5	Preto

O DLC (Diamond Like Carbon) tem sido estudado como um revestimento tribológico, como descrito por Grill nos artigos de revisão [31]. O termo tribológico surgiu na década de 60, no Século XX com a finalidade de definir a combinação interdisciplinar entre os campos de lubrificação atrito e desgaste [31]. Os filmes DLC têm vindo a ser estudados devido ao conjunto de propriedades que apresentam, entre as quais se destacam o seu baixo coeficiente de atrito, elevada dureza e elevada resistência ao desgaste [32].

A título de curiosidade, estima-se, (segundo estudo realizado em 2010, [27]) que existem perdas económicas associadas ao atrito e desgaste que representam, nos países industrializados cerca de 4% do produto interno bruto (PIB).

As principais características do DLC são o baixo coeficiente de atrito e alta resistência ao desgaste, auto lubrificante, boa aderência nos diversos tipos de metais, (principalmente nos aços) e é biocompatível, boa tenacidade, boa resistência á corrosão [33].

Tabela 2.8 - Ni-PTFE (níquel-teflon) características [34].

Ni-PTFE (Níquel-Teflon)					
Designação	Dureza HV	Rugosidade (Ra µm)	Coefficiente atrito (seco)	Espessura(µm)	Cor
Tribocout HT (25%PTFE)	250 - 400		0.08 a 0.1	6 -10	Prata/Verde

Tribocoat ® é um revestimento eletrolítico composto, que possui a excelente combinação entre a resistência à corrosão, resistência ao desgaste, lubrificação e propriedades de adesão seca. Pode ser aplicado em todas as superfícies metálicas ferrosas assim como algumas superfícies de ligas metálicas não ferrosas. O revestimento com esta designação, Tribocoat, é um revestimento exclusivo da Mold- Tech. [34]. Este processo, níquel autocatalítico, incorporando partículas de Teflon distribuídas uniformemente, fornece uma liga de níquel fósforo, revestimento altamente uniforme apresentando boa resistência ao desgaste e resistência à corrosão [34, 35].

Quando se trata de determinados revestimentos, é necessário que as partículas sejam uniformemente distribuídas para garantir propriedades uniformes. Este é um princípio fundamental por detrás da conceção e fabrico de revestimentos de PTFE, e uma das razões iniciais porque níquel químico foi adicionado, o PTFE ajuda a alcançar propriedades anti adesão uniformes. Embora o uso de níquel químico em revestimentos de PTFE não é um novo desenvolvimento, nos últimos vinte anos, levaram a uma manipulação bem-sucedida do níquel químico / fórmula PTFE e as suas capacidades resultantes.

Fricção, lubrificação, rolamento, e hidrodinâmica, são todas as propriedades que podem ser reforçadas pela presença de níquel químico num revestimento de PTFE. No entanto, as principais vantagens são o níquel químico anti adesão, agregado a capacidades que estão presentes, quando o níquel se espalha uniformemente no desgaste [36].

A combinação de níquel e polímeros de Teflon ® proporciona um extremamente baixo coeficiente de atrito, com uma libertação fácil a partir de moldes, durante as operações de moldagem. Estas ligas de fósforo e níquel, combinações de Teflon, são perfeitamente adequadas para utilização em aplicações de moldagem usando plástico, epóxis e silicones, [34, 35]. O processo Tribocoat pode ser usado com qualquer tipo de aços ferramenta, BeCu , alumínio forjado , ferro fundido e aço inoxidável . Pode ser soldada sem qualquer efeito negativo associado ao molde. Tribocoat funciona perfeitamente com todos os materiais de moldação, com excepção da borracha pura, mas funciona bem com borracha de silicone, TPO, PVC e Santoprene [34].



Figura 2.9 - Equipamento Mold-Tech Portugal utilizado no revestimento Tribocout.

2.3.2.3. Revestimento MoldLub®

Sobre o revestimento PVD utilizado para este estudo, com designação comercial “MoldLub”, existe um facto bastante interessante. Este revestimento é relativamente recente, (foi registada a marca em 23-04-2007, Registo 000408998 / classe: 40 [56]) e é fruto de investigação do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra (FCTUC), que durante dois anos, uma equipa dirigida por Albano Cavaleiro, desenvolveu um estudo científico, de âmbito europeu, denominado Al-Mould, com o objetivo de encontrar uma solução eficaz para o desgaste a que os moldes estão sujeitos no processo de produção [55].

Os investigadores da FCTUC desenvolveram complexos estudos com objetivo de criação de um “autolubrificante sólido” e que garantisse a máxima resistência do revestimento do molde ao desgaste. Este revestimento foi testado na empresa TeandM, que devido ao sucesso dos testes realizados, o registou com a marca MoldLub e que se encontra hoje em plena comercialização [55]. Esta inovação tecnologia também é amiga do ambiente, porque substitui o uso de óleo dos lubrificantes líquidos convencionais, o que vai ao encontro das Diretivas Europeias que apontam para a redução dos lubrificantes líquidos.

Albano Cavaleiro salienta que, se considerarmos que o projeto e construção de moldes são uma das mais importantes atividades da Indústria Metalomecânica em Portugal, “esta Investigação resolve um dos problemas maiores do setor, tornando as empresas muito mais eficientes e competitivas” [55].

“Os problemas de desgaste são prementes e este avanço tecnológico garante uma maior durabilidade dos moldes - em alguns modelos prolonga a longevidade em 80% - e conseqüente redução de prejuízos na produção, aumento da produtividade e mais ganhos económicos. A pesquisa desenvolvida é mais um exemplo de que a colaboração recíproca entre a comunidade científica e as empresas é muito vantajosa”, avalia o docente da FCTUC [55].

O MoldLub com o baixo coeficiente de atrito e dureza elevada (mais do dobro da nitridação), responde de forma inequívoca a todos os aspetos complexos que envolvem a desmoldação de componentes plásticos injetados [33].

Tabela 2.9 - MoldLub, características [33].

MoldLub					
Designação	Dureza HV(0,05)	Rugosidade (Ra μm)	Coefficiente atrito*	Espessura(μm)	Cor
MoldLub	2200		0.1 a 0.3	2 -5	Prata/Verde

*A seco com contra corpo de aço inox

Tabela 2.10 - Informação do registo da marca MoldLub [56].



MOLDLUB					
PAÍS	Portugal				
TITULAR	Teandm - Tecnologia E Engenharia De Materiais, S.a.				
Classe	Registro	Tipo	Apresentação	Estado	
40	000408998	Mista	2005/12/11	Registrada	Ver Registro
Classe 40: Tratamento de materiais.					

2.4. Materiais poliméricos

Os plásticos são divididos em três grandes grupos:

- Termoplásticos
- Termoendurecíveis
- Elastómeros

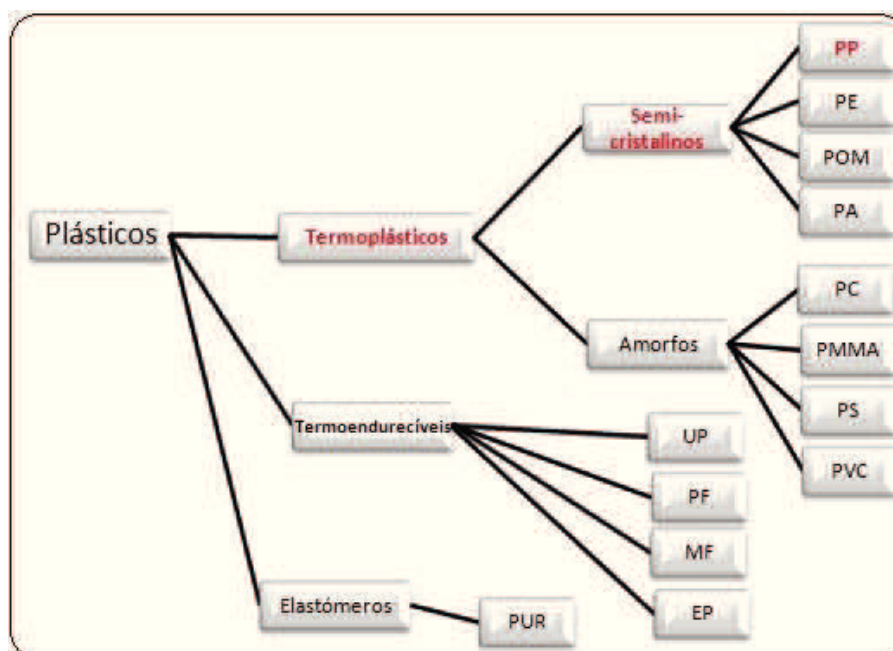


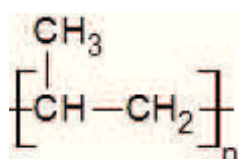
Figura 2.10 - Divisão dos plásticos.

O Polipropileno, polímero que iremos utilizar neste trabalho, pertence à categoria dos termoplásticos semi-cristalinos. Os Termoplásticos (Thermos = calor, plasso = formar) são fusíveis e solúveis, podem ser fundidos várias vezes e solubilizados por vários solventes. Variam, a temperatura ambiente, de maleáveis a rígidos ou frágeis. São diferenciados entre termoplásticos amorfos (amorph = desordenado), que possuem estado de ordenação molecular semelhante ao vidro e são transparentes e em termoplásticos semi-cristalinos. Que apresentam uma aparência opaca [48].

O polipropileno é um polímero obtido por polimerização do gás propileno. No seu estado natural é semi-translucido e de cor branca de aspeto leitoso. Pode ser moldado por diferentes processos de transformação, onde se destaca a moldação por injeção. Relativamente ao ambiente o polipropileno é reciclável e não tem efeitos contaminantes.

A sigla do Polipropileno é: “PP”

A fórmula química do Polipropileno é:



(2.2)

A densidade do Polipropileno é de: 0,9 – 0,93 (g/cm³)

Símbolo reciclagem

A identificação de materiais poliméricos segue um código internacional.

Nesse código os símbolos são constituídos por um elemento comum, formado por três setas, inserida num triângulo e apontadas em sentido horário, e um código numérico. Este código internacional abrange os seguintes polímeros: 1 Polietileno Tereftalato (PET); 2 Polietileno de Alta Densidade (PEAD); 3 Policloreto de Vinila (PVC); 4 Polietileno de Baixa Densidade (PEBD); 5 Polipropileno (PP); 6 Poliestireno (PS); e 7 outros [50].



Figura 2.11 - Símbolo de reciclagem do Polipropileno

Principais características

- Semi cristalino
- Baixa densidade (entre 0,90 e 0,93 g/cm³) que oferece um bom equilíbrio de propriedades térmicas, químicas e eléctricas
- Rigidez elevada
- Baixa absorção de humidade
- Atóxico
- Antiaderente
- Elevada tenacidade

Vantagens da utilização do PP

- Baixo custo
- Elevada resistência química e a solventes
- Óptima resistência dielectrica
- Boa resistência ao impacto
- Boa resistência ao entalhe
- Alta resistência à fractura por flexão ou fadiga

- Soldavel e moldavel
- Facilidade de aditivação e coloração
- Anticorrosivo
- Reciclavel

Desvantagens da utilização do PP

- Baixa resistência mecânica
- Baixa resistência a abrasão
- Resistência limitada ao calor
- Frágil a baixas temperaturas
- Condutividade térmica baixa
- Acumulador de cargas electrostáticas
- Sensibilidade à luz UV e agentes de oxidação

Aplicações gerais

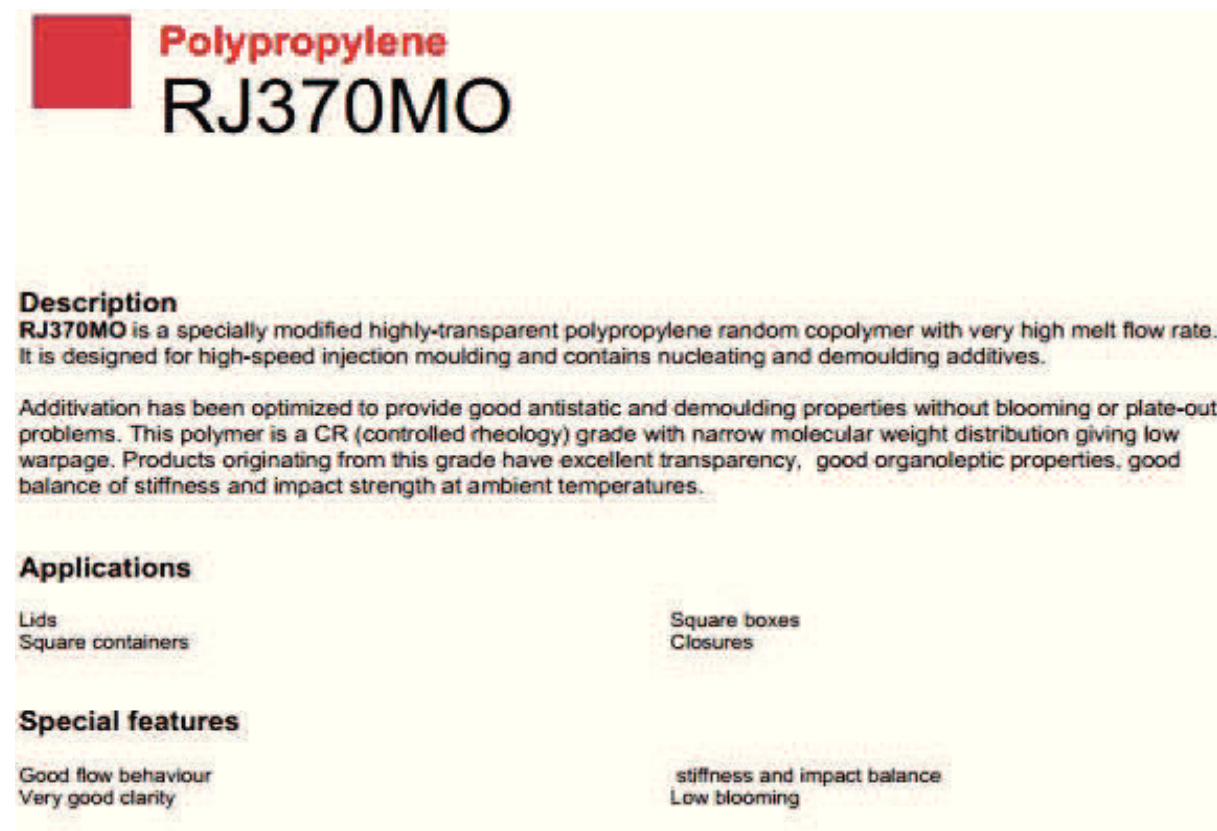
- Brinquedos
- Embalagem para alimentos: sacaria e filme, copos iogurte
- Utensílios domésticos: caixas, talheres, pratos, tábuas, baldes
- Carcaças para electrodomésticos
- Peças para máquinas de lavar
- Tapeçarias
- Material hospitalar esterilizável
- Utensílios para laboratório: mesas, tubos
- Recipientes para remédios e produtos químicos
- Peças para automóvel: pára-choques, painel de instrumentos, carcaças de bateria, lanternas, ventoinhas, ventiladores
- Moldes para a indústria de fibras
- Engrenagens para galvanoplastia
- Tubos para cargas de canetas esferográficas
- Tubos para condução de fluídos

A escolha do polímero a utilizar neste estudo recaiu sobre o Polipropileno pelo facto de ser um material com elevado índice de contração que varia entre 1,0% a 2,0% (no caso desta

referência de propileno), o que normalmente causa alguns problemas na desmoldação pois, por esse motivo (contração do material), cria um aperto natural na peça de aço do molde (perno/bucha), por outro lado é um polímero macio, fácil de evidenciar marcas de esforço na desmoldação.

O polímero utilizado tem a ref: “Borealis RJ370MO Polypropylene”, a escolha desta referência de Polipropileno deve-se ao facto de existir em *stock*, logo de fácil aquisição.

Na figura 2.12 pode observar-se as características técnicas e propriedades físicas, do polímero utilizado neste estudo.



Polypropylene
RJ370MO

Description
RJ370MO is a specially modified highly-transparent polypropylene random copolymer with very high melt flow rate. It is designed for high-speed injection moulding and contains nucleating and demoulding additives.

Additivation has been optimized to provide good antistatic and demoulding properties without blooming or plate-out problems. This polymer is a CR (controlled rheology) grade with narrow molecular weight distribution giving low warpage. Products originating from this grade have excellent transparency, good organoleptic properties, good balance of stiffness and impact strength at ambient temperatures.

Applications

Lids Square containers	Square boxes Closures
---------------------------	--------------------------

Special features

Good flow behaviour Very good clarity	stiffness and impact balance Low blooming
--	--

Physical Properties		
Property	Typical Value	Test Method
<small>Data should not be used for specification work</small>		
Density	905 kg/m ³	ISO 1183
Melt Flow Rate (230 °C/2.16 kg)	45 g/10min	ISO 1133
Tensile Modulus (1 mm/min)	1.050 MPa	ISO 527-2
Tensile Strain at Yield (50 mm/min)	13 %	ISO 527-2
Tensile Stress at Yield (50 mm/min)	27 MPa	ISO 527-2
Heat Deflection Temperature (0,45 N/mm ²) [†]	73 °C	ISO 75-2
Charpy Impact Strength, notched (23 °C)	5,0 kJ/m ²	ISO 179/1eA
Hardness, Rockwell (R-scale)	80	ISO 2039-2

[†] Measured on injection moulded specimens acc. to ISO 1873-2

Processing Techniques		
RJ370MO is easy to process with standard injection moulding machines.		
Following parameters should be used as guidelines:		
Melt temperature	210 - 260 °C	
Holding pressure	200 - 500 bar	Minimum to avoid sink marks.
Mould temperature	15 - 40 °C	
Injection speed	High	
Shrinkage 1 - 2 %, depending on wall thickness and moulding parameters		

Figura 2.12 - Ficha técnica do material utilizado neste estudo [61]

2.4.1. Processamento termoplástico

O processamento de termoplásticos consiste no processo de mover materiais fundidos (viscosos), com características termoplásticas (que ficam amolecidos quando são aquecidos), para dentro de um molde, ou de uma forma, onde depois de arrefecidos solidificam para ter o formato desejado, conforme se pode observar na figura 2.13. Os processos termoplásticos estão em constante evolução, devido à inovação contínua na área dos polímeros. Os processos mais utilizados, tendo como ponto central entre todos os processos o uso de um polímero termoplástico que é transformado pelo calor num formato diferente que depois pode ser revertido são:

- Moldagem por injeção
- Moldagem por sopro
- Extrusão

Iremos abordar o processo de injeção por ser o processo utilizado neste estudo e também fazer uma pequena abordagem sobre moldagem por sopro.

A moldação por injeção pode ser usada para produzir economicamente grandes quantidades de peças. O material termoplástico é injetado sob pressão para dentro do molde, onde a forma da cavidade do molde determina a forma e a textura da superfície da peça acabada. Este processo verifica-se durante um ciclo de moldação que consiste em: injeção, pressurização, arrefecimento e extração da peça do interior do molde.

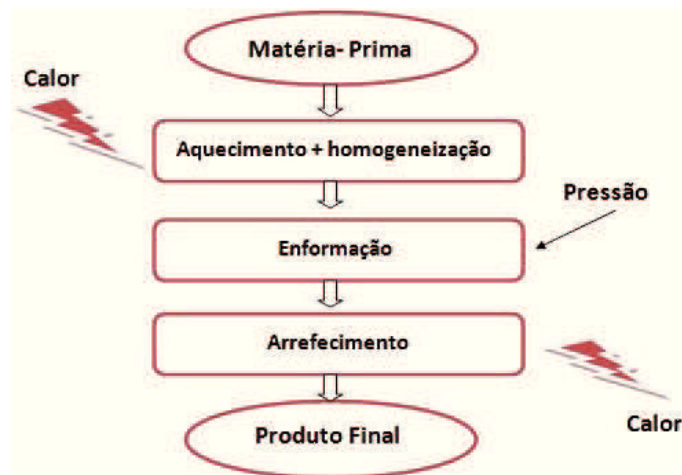


Figura 2.13 - Processamento de termoplásticos [58].

Todas as fases são igualmente importantes e podem ser otimizadas individualmente com o objetivo de obter uma peça de melhor qualidade e/ou um tempo de ciclo mais reduzido. Existem no entanto variáveis que condicionam o processamento por injeção, são elas: o tipo de material utilizado no molde, o tipo de refrigeração, o tipo de injeção, o tipo de superfície da zona moldante, a geometria da peça, o tipo de polímero utilizado, a máquina de injeção utilizada e as condições de processamento. Na figura 2.14 pode observar-se uma máquina para processamento de polímeros por injeção.

Pelo processo de injeção podem ser injetadas peças de décimas de grama a peças com vários quilos. As peças podem ser produzidas com grande precisão e em larga escala, sendo a melhor escolha do ponto de vista económico para grandes produções de peças [51].

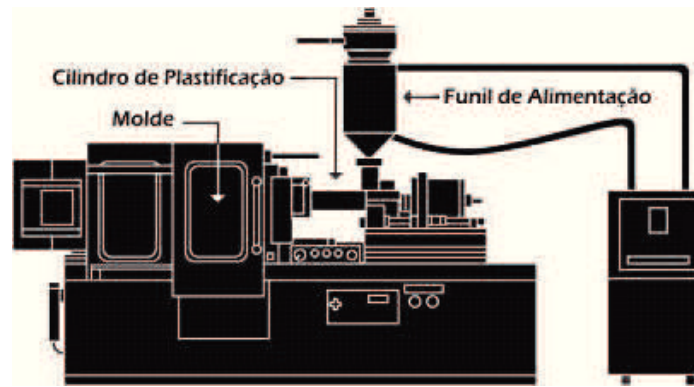


Figura 2.14 - Processamento de um polímero por injeção foto: DuPont.

2.4.2. Moldes de injeção

“Um molde de injeção pode ser entendido como um conjunto de sistemas funcionais que permitem que um espaço em que a peça vai ser materializada, definido pela cavidade e pela bucha -a impressão-, seja preenchido com plástico fundido em condições controladas, pelos outros sistemas que garantam a qualidade dimensional e estrutural das peças produzidas” [16].

Estes sistemas funcionais são:

- A estrutura que assegura a solidez estrutural do molde
- O guiamento que mantém o perfeito alinhamento da cavidade com a bucha
- A alimentação (jito, canais de alimentação e ataques), que permite o percurso do fundido, desde o bico da injetora até à impressão
- O controlo de temperatura que assegura que nas superfícies moldantes a temperatura seja tão uniforme quanto possível e que o arrefecimento se faça de forma rápida e eficiente
- A extração que faz com que as moldações sejam retiradas do molde [16]

2.4.2.1. Tipos de Moldes de injeção de termoplásticos

Os moldes de injeção podem ser classificados tendo em consideração algumas das suas características construtivas, conforme se pode observar na tabela 2.11, segundo SACCHELLI (2007) [38]

Tabela 2.11 - Classificação dos moldes segundo SACHELLI

CLASSIFICAÇÃO DOS MOLDES		
Extração	Alimentação	Placas funcionais
<ul style="list-style-type: none"> • Placa de extração • Pernos Extratores • Bucha Rotativa 	<ul style="list-style-type: none"> • À junta • Submarina • Canal Isolado • Bico Quente 	<ul style="list-style-type: none"> • Duas placas • Três placas • Partes Móveis

Os moldes de injeção são classificados segundo norma DIN 1670, denominada “Moldes de Injeção e Compressão de componentes em: moldes de duas placas, moldes de três placas ou placa flutuante, moldes com partes móveis, moldes com canal quente, *Stack molds* (moldes *sandwich*) e moldes com núcleo rotativo” [38].

Existe outros tipos específicos de moldes que embora possam estar enquadrados na classificação de moldes segundo a Norma DIN 1670, devido às suas características particulares são explicadas separadamente, ou seja: moldes para injetar vários componentes (designação usual 2K, 3K etc), moldes protótipos. De forma sucinta são explicadas abaixo as características de cada tipo específico de molde.

2.4.2.2. Molde de duas placas

Neste grupo de molde estão todos os moldes divididos pela parte fixa do molde (lado da injeção) e parte móvel (lado da extração). Este tipo de molde tem pouca mecânica, é o tipo de molde de custo mais baixo entre os moldes de produção em série. Na figura 2.15 pode observar-se um exemplo deste tipo de molde.

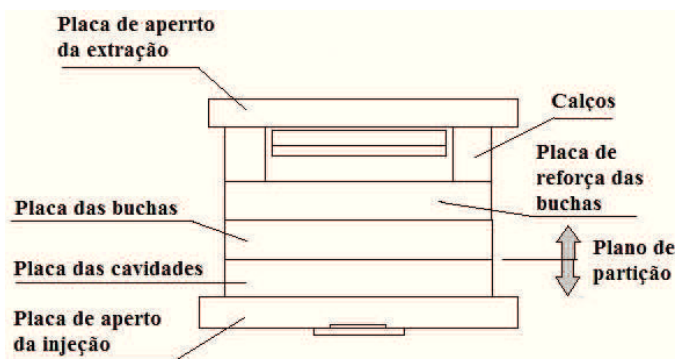


Figura 2.15 – Molde de duas placas [16].

2.4.2.3. Molde de três placas (designado também por molde bico de alfinete)

Este tipo de moldes tem duas aberturas e além da placa fixa e móvel tem também uma placa flutuante que tem como função separar o canal de injeção, conforme se pode observar na imagem 2.16. Tem a vantagem de deixar pouco vestígio de injeção, permitir a utilização de vários pontos de injeção e o canal de injeção sai separado da peça.

Este tipo de molde tem normalmente um canal de injeção grande, que, caso não seja reaproveitado, poderá ser um desperdício de material significativo. É um tipo de molde com alguma mecânica que requer mais manutenção que o molde de duas placas. Não é indicado para componentes de grandes dimensões devido ao maior peso do molde e ao facto de necessitar de maior curso de abertura. Este tipo de molde tem vindo a cair em desuso e tem sido substituído por moldes de canais quentes.

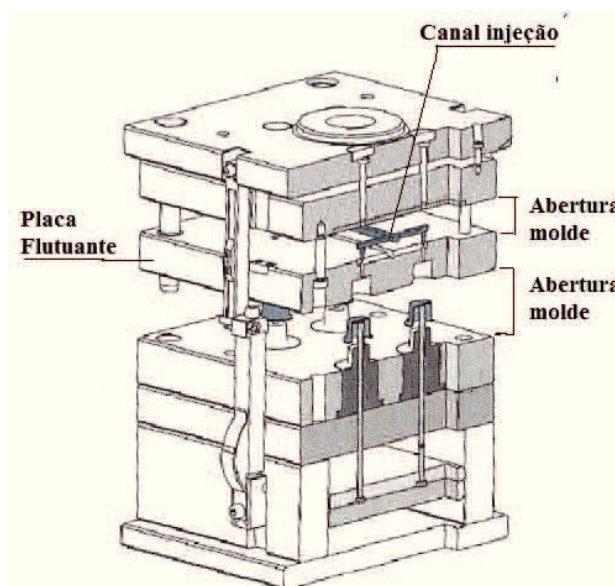


Figura 2.16 – molde de três placas [16].

2.4.2.4. Molde com partes móveis

Os moldes de partes móveis, conforme o nome indica, têm componentes móveis que se movimentam na direção de abertura do molde ou em direções diferentes aos da abertura do molde, conforme se pode observar na figura 2.17. Este tipo de moldes permite obter peças com formas geométricas complexas, que seriam impossíveis de obter sem movimentos, por serem negativas relativamente ao sentido de abertura do molde. Estas negativas nas peças

podem ser interiores ou exteriores.

Existem várias formas de mecanizar estes movimentos, ou seja, podem mover-se os movimentos com a abertura do molde de forma mecânica, durante a extração da peça também de forma mecânica, com molde aberto ou fechado de forma hidráulica ou pneumática, também se podem conjugar no mesmo movimentos várias soluções, por exemplo mecânico e hidráulico etc. Este tipo de moldes é extremamente comum, é um molde mais complexo que o molde de duas ou três chapas e requer manutenção cuidada.

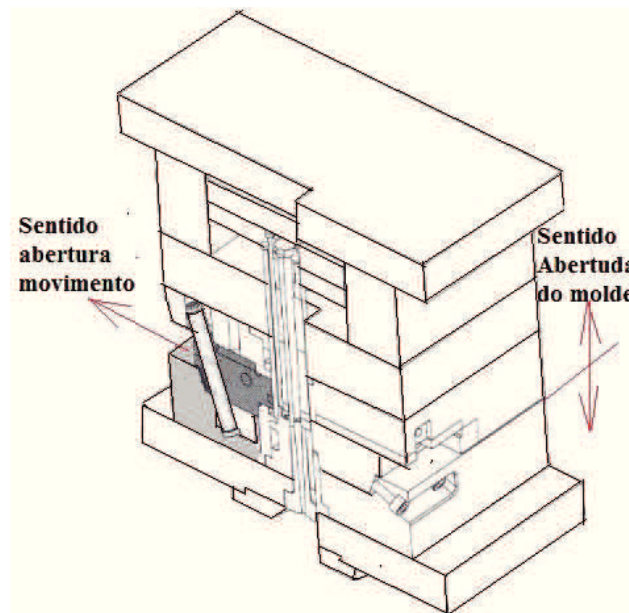


Figura 2.17 – Molde com elemento móvel [16].

2.4.2.5. Molde com canal quente

Neste tipo de moldes há componentes que são aquecidos por resistências elétricas e que permitem manter a temperatura do material polimérico a uma temperatura elevada e constante dentro do molde, permitindo que o material chegue mais rápido à cavidade e não precise de canais de alimentação. Este tipo de molde também está a cair em desuso pois tem manutenção elevada, para mudanças de cor do polímero é normalmente necessário desmontar o molde, assim como para o arranque do molde após paragens.

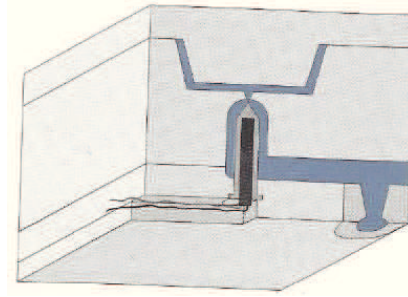


Figura 2.18 – Molde com canal quente [52].

Este tipo de molde tem sido substituído por moldes com carburadores e bicos aquecidos (ver figuras 2.19 e 2.20), que embora mais caro, tem maior rendimento, ou seja ciclos mais curtos, menor vestígios de injeção, fácil mudança de cor, permite utilização numa muito maior variedade de polímeros incluídos os polímeros técnicos, menor manutenção, permite injetar as peças por exemplo lateralmente. Este sistema é normalmente utilizado para molde de série de médias e grandes produções em moldes de múltiplas cavidades.

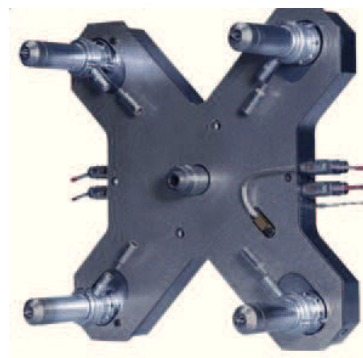


Figura 2.19 - Exemplo carburador e 4 bicos marca Günther.

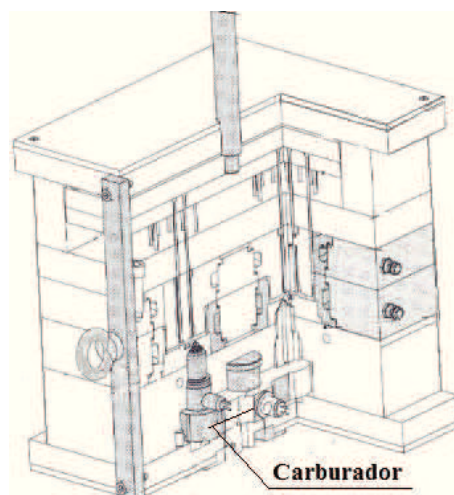


Figura 2.20-Molde com carburador [16].

2.4.2.6. *Stack Mold* (ou molde *sandwich*)

As características que definem um molde de sandwich são as várias aberturas (ver figura 2.22 e 2.24). A grande vantagem deste tipo de molde (*sandwich*) é não requerer muito mais força de fecho na máquina de injeção que um molde normal de duas placas com uma só linha de partição (abertura), porque a área projetada em ambas as cavidades do molde cancelam as suas forças, ou seja, no caso de um molde de sandwich de duas cavidades iguais a área projetada é a mesma [39].

Como regra geral, se calcularmos a área projetada da peça multiplicamos pela pressão necessária e o seu resultado multiplicado por 1.1, determinamos assim a pressão necessária para força de fecho do molde sandwich [39].

As vantagens dos moldes *sandwich* são:

- **Duplicar a produção** em vez de aumentar o tamanho do molde adicionando uma cavidade, o que poderia obrigar a uma máquina de injeção maior devido à maior dimensão do molde e da área projetada, é possível adicionar essa cavidade mantendo o tamanho do molde e da máquina de injeção. Desta forma os tempos de injeção, plastificação e arrefecimento são os mesmos, apenas o tempo de abertura e fecho do molde aumenta um pouco o tempo de ciclo total.
- **Redução do custo da peça** com molde sandwich injetamos duas peças com a mesma máquina que injetaríamos só uma e como o cálculo do custo de peça está diretamente relacionado com o custo hora máquina, consegue-se quase duplicar a produção com o mesmo custo máquina.
- **Eficiência e automação**, com este tipo de moldes podem injetar-se em simultâneo, com os mesmos parâmetros, peças diferentes, conforme se pode observar na figura 2.21.

Este tipo de moldes, embora com as múltiplas vantagens atrás mencionadas, tem alguns pontos que devem ser tidos em consideração na altura da decisão por esta opção.

- **Custo molde** este tipo de molde tem um custo elevado, deve ser analisado quantidade de peças previstas a produzir e custos acrescidos de manutenção e a partir desses cálculos calcular o período de amortização da ferramenta/molde.
- **Manutenção**, este tipo de molde requer mais manutenção que um molde de duas chapas pois são praticamente dois moldes encostados, tem sistemas de injeção complexos, sistemas para abertura de molde e para extração das peças que do lado da injeção não poderá ser atuado pela máquina de injeção.
- **Sistemas de injeção (carburadores)** sistemas de injeção mais caros e complexos (ver figura 2.23).
- **Espessura do molde**, deve ser verificado abertura máxima da máquina de injeção e espessura máxima de aperto do molde. Estes dois pontos podem inviabilizar a utilização deste tipo de molde na mesma máquina que produziriam com o mesmo molde de uma cavidade.

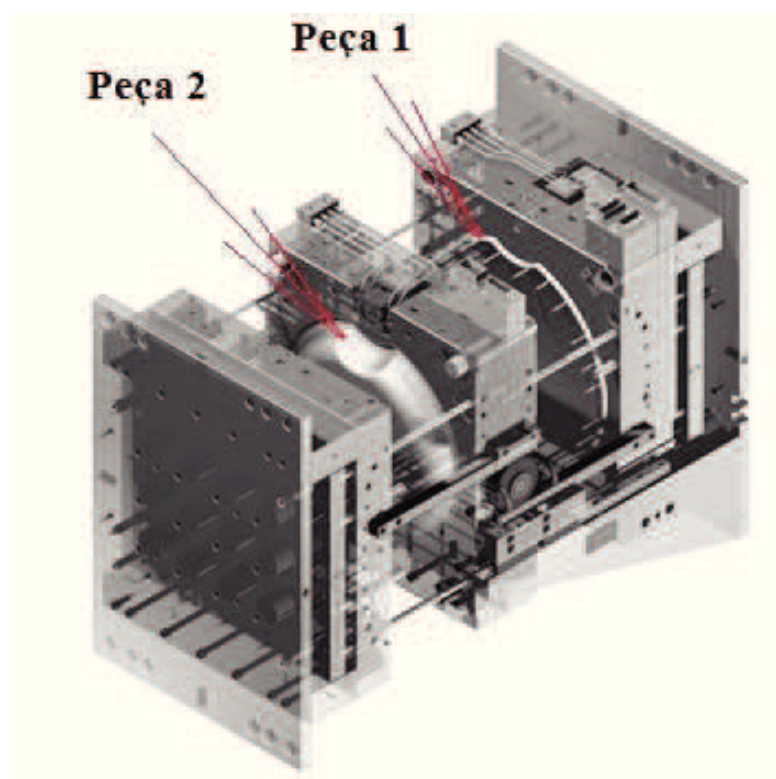


Figura 2.21 - Molde *sandwich* de peças diferentes [39].

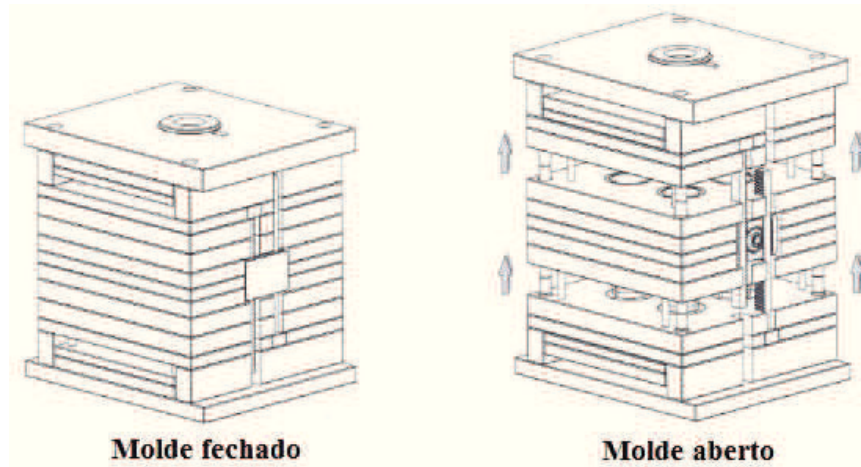


Figura 2.22 - Molde *sandwich* convencional [16].

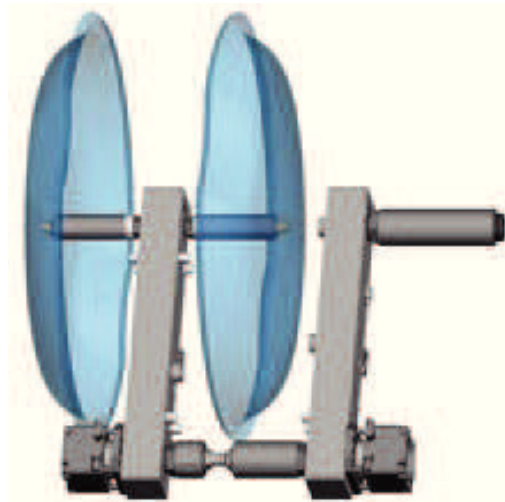


Figura 2.23 - Exemplo sistema injeção molde *sandwich* de 2 peças iguais [39].

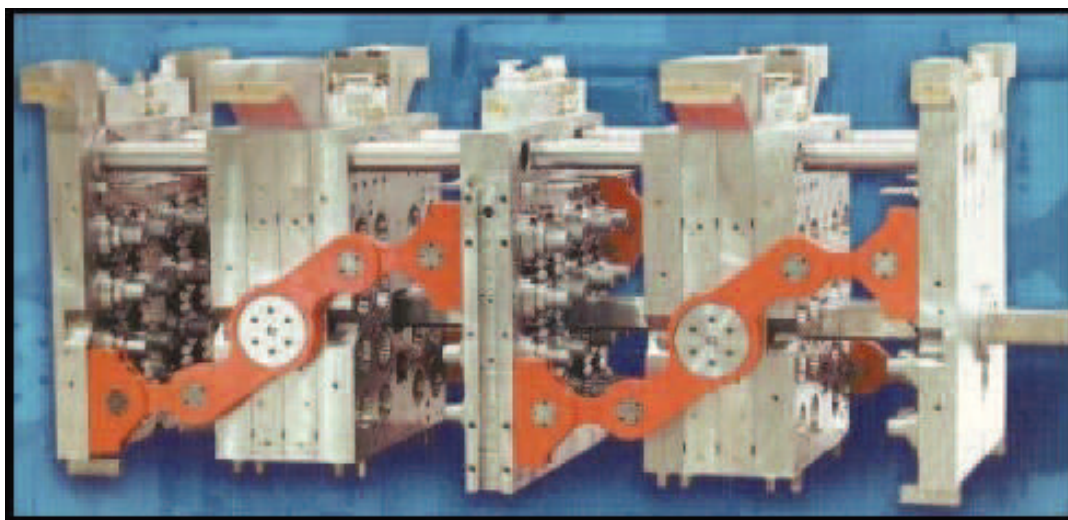


Figura 2.24 - Molde *sandwich* com várias aberturas [4].

2.4.2.7. Molde com núcleo rotativo (moldes de desenroscamento)

Como o nome indica este tipo de molde é específico para peças que tenham roscas no seu interior e que não possam ser desmoldadas por processo convencional. Existem peças com roscas interiores que devido à configuração da rosca podem ser desmoldadas por pressão, o que torna esses moldes convencionais por não necessitarem de desenroscamento automático.

Os moldes de desenroscamento automático são moldes complexos, pois no interior do molde tem que existir uma mecânica que faça o desenroscamento, similar ao que nós fazemos ao desenroscar manualmente, por exemplo, uma tampa de um frasco. Estes moldes geralmente são de cavidades múltiplas, por vezes com muitas cavidades (ex: moldes de 32 ou 64 cavidades são comuns neste tipo de moldes), as buchas roscadas são movidas, na maioria dos casos por engrenagens ajustadas concentricamente a uma engrenagem movida centralmente [40].

O movimento de rotação das peças moldantes no interior do molde pode ser feito com vários processos.

- Cremalheiras e rodas dentadas (ver figura 2.26)
- Fusos e porcas helicoidais (ver figura 2.25)
- Hidráulicos
- Alavancas
- Tirante

Este tipo de molde, devido à sua mecânica, é extremamente caro, requer boa manutenção.

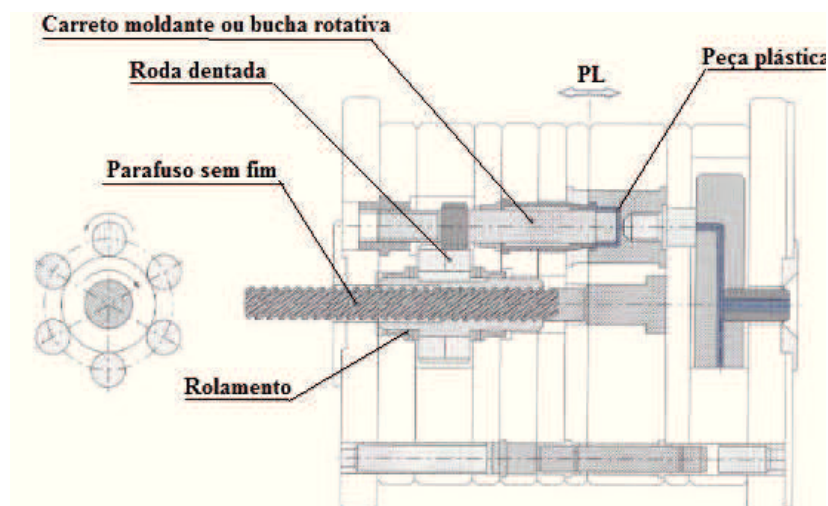


Figura 2.25 - Molde com núcleo rotativo, processo fusos e porcas helicoidais [16].

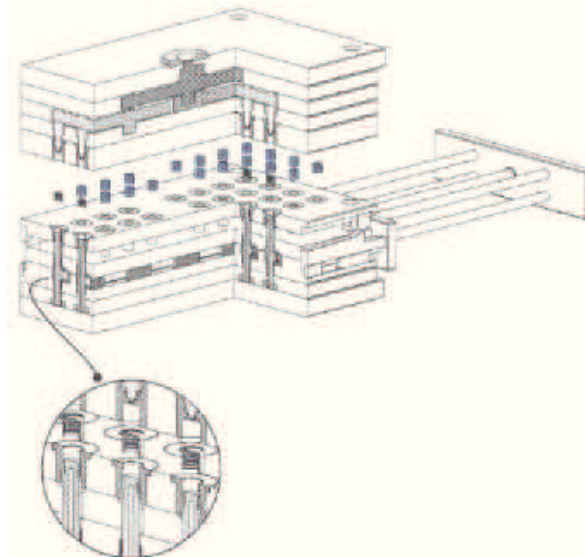


Figura 2.26 - Molde com núcleo rotativo com cremalheiras e rodas dentadas [16].

Também existem peças com roscas interiores que embora não possam ser desmoldadas por pressão, permitem ser desmoldadas com outro tipo de mecânica sem necessidade de desenroscamentos automáticos, por exemplo “buchas retráteis” (ver figura 2.27 e 2.28), normalmente este tipo de molde é muito caro devido ao custo das “buchas retráteis” e utiliza-se em moldes de poucas cavidades, este tipo de peças (buchas retráteis) também é utilizado para desmoldar outros tipos de negativos interiores além das roscas.



Figura 2.27 - bucha retrátil da "Progressive components" [41].

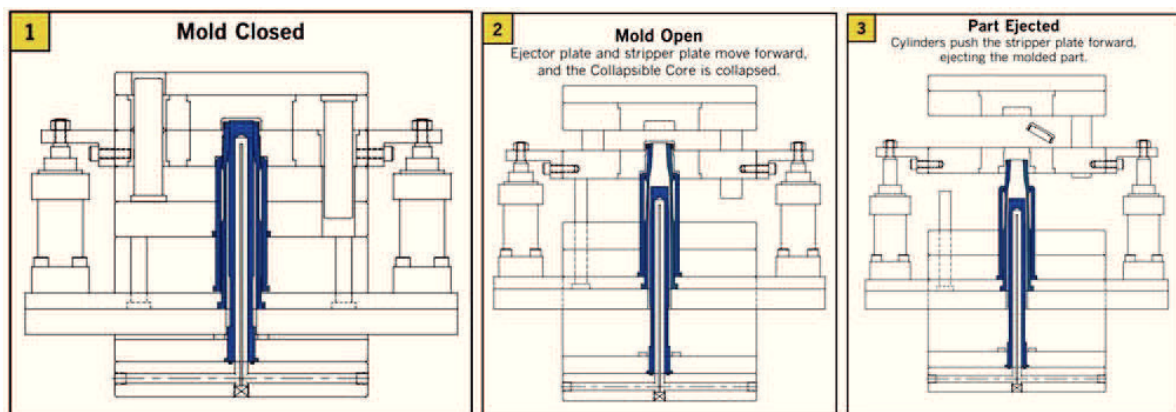


Figura 2.28 - Cinemática de funcionamento das buchas retráteis "Progressive components" [41].

2.4.2.8. Moldes com Bi-matéria (2k, 3k etc)

A técnica de Bi-material é utilizada para a moldação de dois ou mais materiais em simultâneo, os materiais podem ser diferentes e compatíveis, ou não [37]. Na figura 2.29 pode observar-se uma peça processada pelo processo de Bi-matéria.

A moldação bi-material pode ser efetuada através dos seguintes processos:

- **Transferência**
 - Transferindo as moldação de uma máquina para outra através de robot
 - Transferindo as moldações da 1º posição de injeção para a 2º posição, no mesmo molde através de robot.
- **De forma automática**
 - Por rotação incorporada no molde ou no prato da máquina de injeção. Para este tipo de molde a máquina tem que ter obrigatoriamente mais que uma unidade de injeção.



Figura 2.29 - Exemplo de peças com injeção de dois materiais.

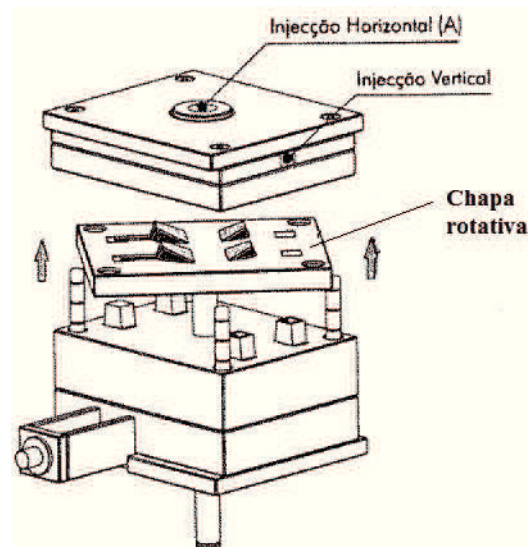


Figura 2.30 - Molde bi-matéria com chapa rotativa [16].

No caso da figura 2.30, apresenta-se um exemplo de um molde bi-material baseado no processo de rotação incorporada no molde.

A sequência de funcionamento deste molde com este conceito é o seguinte:

- 1-Injeta o 1º componente
- 2-Molde abre
- 3-Avança chapa e roda, o 1º componente, já injetado, é agora colocado na posição de moldação do 2º componente
- 4-Recolhe chapa e fecha o molde
- 5-Injeta 1º componente de um lado do molde e do outro lado vai injetar 2º componente sobre o 1º componente, ou seja estão em simultâneo a injetar as duas unidades de injeção
- 6-Abre molde, extrai a peça que tem os dois componentes injetados e recolhe extração de seguida contínua a sequência a partir do ponto 3

No caso dos moldes em que existe prato rotativo na máquina de injeção a sequência de operações é idêntica exceto o ponto 3 e 4, pois neste caso roda a metade do molde completa do lado da extração.

O processo a utilizar neste tipo de molde é escolhido de acordo com os seguintes critérios:

- Economia
- Produtividade

- Tipo de produto
- Equipamento disponível

2.4.3. Moldagem por sopro

Para a se conseguirem obter peças com formas mais complexas é usual a utilização de tecnologia moldação-sopro. Esta tecnologia pode ser baseada na extrusão (extrusão-sopro) ou na injeção (injeção- sopro).

A extrusão sopro baseia-se numa extrusora a que é adaptada uma cabeça de extrusão que vai produzir uma manga a que se chama “*parison*”. Esta manga é enformada por pressão interior contra o molde e vai assim reproduzir a forma exterior da peça, que é a forma do aço. O processo de extrusão-sopro é o processo mais usado para a obtenção de corpos ocos (por exemplo, garrafas, frascos, bidões), ver exemplo do processo na figura 2.31.

O conceito de um molde para sopro não é estruturalmente muito diferente de um outro tipo de molde com duas partes, mas, no caso do molde de sopro, apenas tem a cavidade, ou seja duas cavidades, uma em cada metade do molde [59].

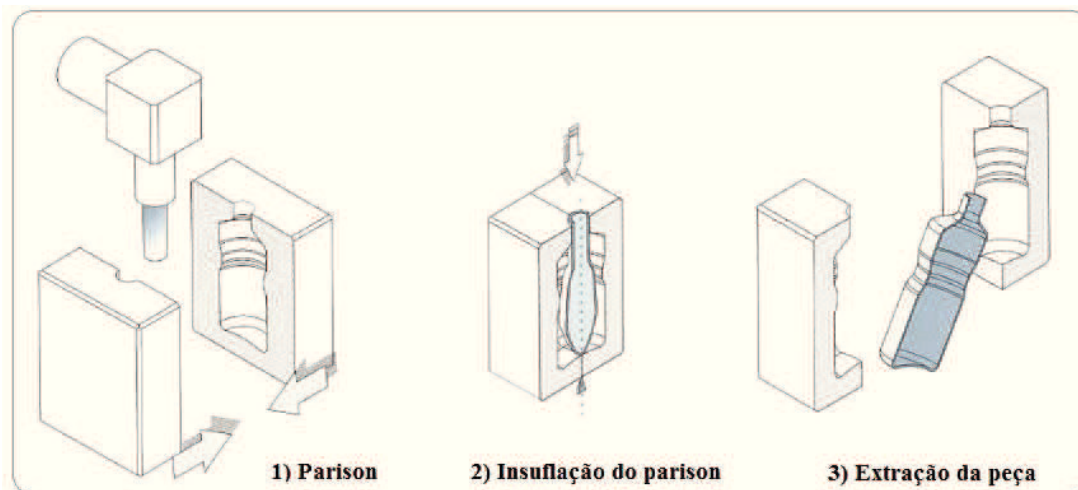
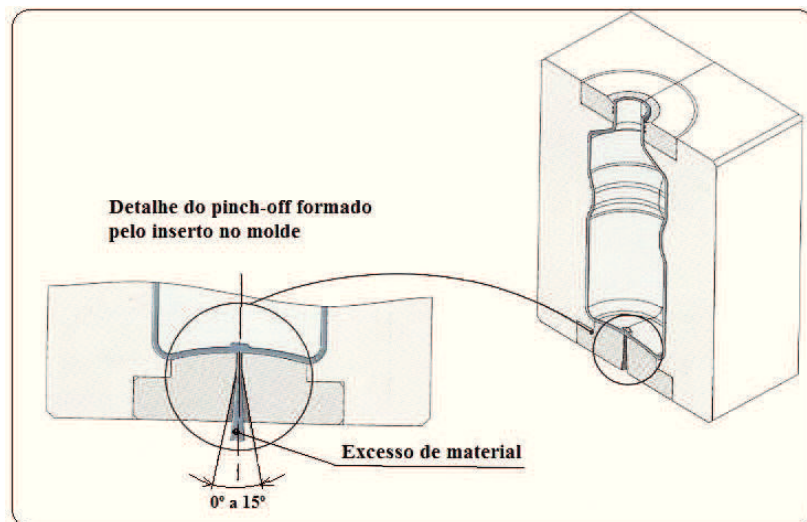


Figura 2.31 - Processo de extrusão-sopro [59].

Devido às baixas pressões sofridas neste tipo de molde não é necessário tratamento térmico nos aços. São executados frequentemente em alumínio, quando se usa polietileno de baixa densidade e para materiais mais rijos, algumas partes do molde (insertos e os *pinch off*) são feitos em aço [59]. Na figura 2.32 pode observar-se o detalhe do *pinch off*.

Figura 2.32 - Projeto do *pinch-off* [59].

Um problema comum neste tipo de moldes é a definição dos raios das curvaturas nos cantos das peças para que não se verifique uma diminuição exagerada na espessura da peça.

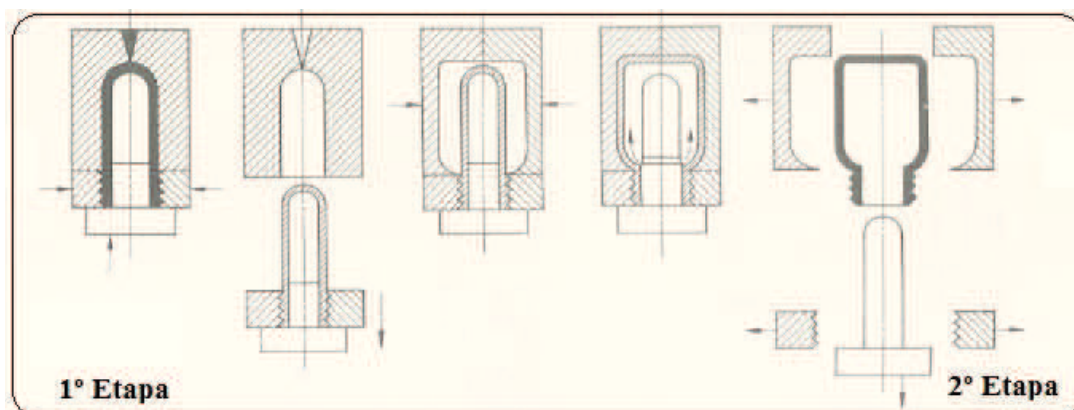


Figura 2.33 - Processo injeção-sopro [37].

Na injeção sopro, técnica que é muito usada na produção de garrafas para bebidas carbonatadas, é previamente feita uma pré-forma por moldação por injeção e numa operação subsequente, a pré-forma, que é geralmente em PET, é reauecida, estirada e insuflada dentro de um molde de sopro, ver processo injeção sopro figura 2.33.

2.5. Ciclos de injeção

O processamento por injeção é um processo cíclico. O ciclo é composto por um conjunto de

operações necessárias à produção de uma moldação, (ver figura 2.34). A otimização deste processo é de extrema importância e fundamental para assegurar a viabilidade económica do projeto, dado o elevado investimento em capital requerido para este tipo de solução (Máquina de injeção, molde e equipamentos auxiliares).

Na atividade industrial o objetivo principal é produzir peças conforme as normas e especificações do cliente no mais curto espaço de tempo possível. Para isso ser possível é necessário otimizar processos e condições de processamento tais como: pressão de injeção, temperatura do fundido e do molde, velocidade de injeção, contrapressão e de extração, tendo em consideração as propriedades do material (o seu comportamento reológico e térmico), a geometria da moldação e as especificações do produto final [51].

O ciclo de moldação pode ser observado, de uma forma bastante explícita, na figura 2.34.

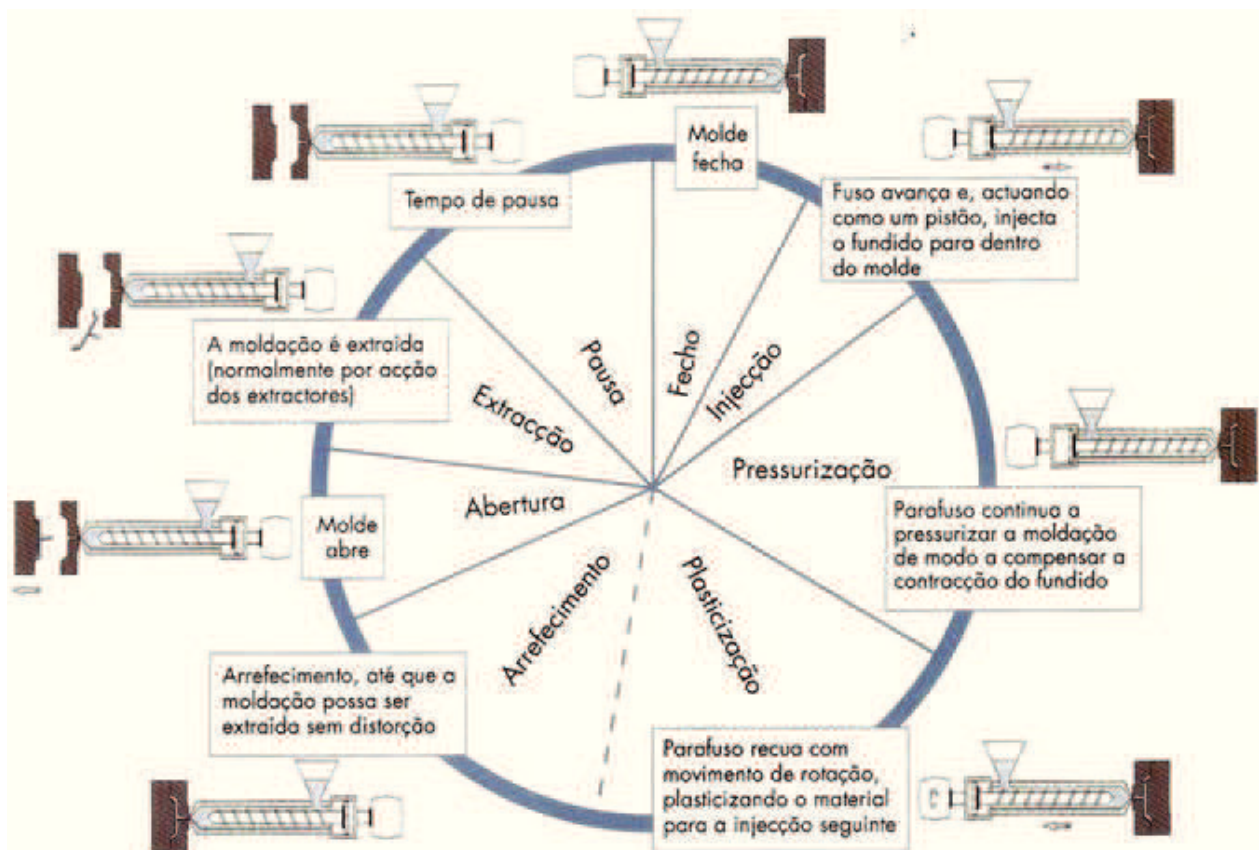


Figura 2.34 - Ciclo de moldação [58].

3. Desenvolvimento peça plástica e análise reológica

3.1. Peça a desenvolver

A dificuldade em desmoldar peças em polipropileno é função da forma, *design* e conceção da peça a moldar, superfícies moldantes e parâmetros de processamento.

Com este trabalho pretendeu-se analisar o comportamento na desmoldação e variações nas condições de processamento de peças processadas em polipropileno, com diferentes acabamentos superficiais na bucha/macho (elemento moldante).

Uma das dificuldades observadas na desmoldação de peças tubulares (ou com zonas de forma tubular, as chamadas “bossas”) foi a sua extração. Muitas destas zonas obrigam, devido à necessidades de montagem entre peças do produto final, a existência de ângulos de saída de desmoldação mínimos no seu interior e, também, como não são normalmente refrigeradas no seu interior, vai-se ter maiores dificuldades na sua desmoldação, pois o material está a temperatura superior à indicada para a sua extração.

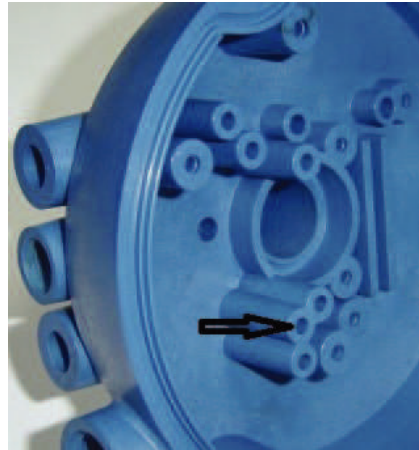


Figura 3.1 - Exemplo de peça com várias zonas tubulares.

Pode-se observar na figura 3.1 um exemplo de uma peça com características atrás referidas, peça com várias zonas tubulares e onde se podem verificar as dificuldades referidas de extração, atrás referidas. Este tipo de dificuldades na desmoldação de peças plásticas, pode também existir em peças com maiores diâmetros ou mesmo em outras formas, como por exemplo ribes e também se o macho/bucha (elemento moldante) tiver um acabamento superficial de alto brilho (SPI-SPE 1).

Na figura 3.2 são mostrados alguns exemplos de peças em polipropileno com acabamento superficial de brilho no seu interior (elemento moldante), jarros e seringas em polipropileno transparente. No caso dos tubos de um aspirador a dificuldade da desmoldação destes é devida ao fato de serem peças a processar serem muito compridas e com ângulos de saída de desmoldação mínimos, pois normalmente as superfícies moldantes não terem brilho.



Figura 3.2- Exemplos de peças com dificuldades típicas de desmoldação: Jarros, seringas, tubos de aspirador em polipropileno.

Assim, foi desenvolvida em Solid Work uma peça plástica de forma tubular (ver desenho da peça na figura 3.3) para ser processada por injeção. Esta peça tem características típicas de dificuldades de desmoldação, foi especificamente pensada para a realização deste estudo.

O objetivo principal não é ter uma peça bonita nem dar-lhe utilidade prática, mas sim analisar o comportamento da sua desmoldação. Consequentemente, a peça na zona do diâmetro interior é de 5,88 mm, não tem ângulo de saída (0°) e, também, não refrigeração na bucha/macho (elemento moldante). Para aumentar a dificuldade de desmoldação, as superfícies moldantes foram polidas com alto brilho.

Deste modo, pretende-se avaliar o comportamento da desmoldação de peças em polipropileno utilizando diferentes tipos de revestimentos/tratamentos superficiais, que foram realizados no elemento moldante que molda o interior da peça plástica processada.

3.2. Contração

A contração da peça plástica é função da geometria da peça a processar, do tipo de material termoplástico considerado, do sistema de refrigeração considerado, das condições de processamento e da pressurização (ou segunda pressão durante a fase de compactação da peça plástica) [47]. A contração do material polimérico vai originar um aperto radial na bucha macho moldante no, ou seja, no sentido das setas a verde na figura 3.4, o que vai criar dificuldades na extração da peça plástica do interior do molde.

Pode-se considerar que existem dois tipos de contração, uma dentro do molde (à temperatura de extração) e o outro, à temperatura ambiente, após a extração da peça (pós contração). Naturalmente, o maior de contração é geralmente obtido após a extração da peça plástica do molde e estabilizada à temperatura ambiente. A equação 3.1 dá-nos o valor da contração na direção i .

$$C_i = \frac{D_m - D_p}{D_m} \quad (3.1)$$

Em que: C_i -Contração na direção i ; D_m -Dimensão da zona moldante; D_p -Dimensão da peça plástica

A extração será dada no sentido do comprimento da peça, ou seja no sentido da seta vermelha indicada na figura 3.4

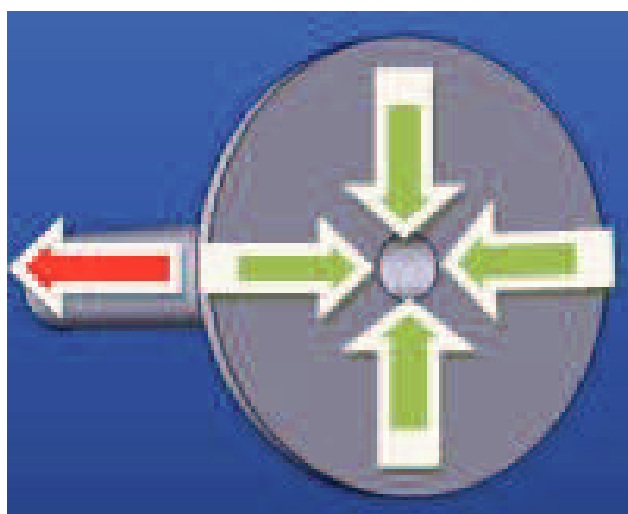


Figura 3.4- Peça plástica a processar: orientação da desmoldação e da contração.

A força necessária para extrair a peça do interior do molde será tanto maior quanto maior for o atrito entre o plástico e o aço na zona tubular. (ver ponto 4.2.3 Forças de extração)

Pode-se definir o atrito como a força que se opõe ao movimento relativo entre duas superfícies [28]. O coeficiente de atrito (μ), é proporcional à carga entre os dois corpos, N , e independente das áreas das superfícies deslizantes [29]. Assim, a força de atrito, F , pode ser determinada pela equação 3.2 [28, 30]:

$$F = \mu X N \quad (3.2)$$

O coeficiente de atrito estático aço-aço é de 0,7 [49]. O coeficiente de atrito após o revestimento MoldLub em seco, apresenta valores entre 0,1 e 0,3 (valores fornecidos pela empresa de revestimentos, (ver tabela 2.9). Os componentes moldantes do molde para o estudo foram a realizar, são extratores standard da Hasco, designados como macho/bucha (elemento moldante).

3.3. Estudo de enchimento “*Moldflow*”

No estudo de conceção e desenvolvimento da peça plástica e do molde protótipo para o processamento por injeção destes componentes plásticos foram realizados estudos de análise moldflow, que nos permitiram analisar o enchimento da peça a processar, pressões de injeção, pressão de compactação, temperaturas do material plástico durante o processamento, indicação da existência de linhas de soldadura e zonas de localização de gases por forma a serem criadas escapes de saídas dos mesmos. O sistema de simulação considerado neste estudo foi o Moldex 3D.

Na tabela 3.1 pode-se observar as características do polipropileno utilizado no processamento, o fornecedor do material, referência e o índice de fluidez (MFI). Para além desta informação também se pode observar a “janela” de temperaturas de processamento e temperatura recomendada para o molde.

Tabela 3.1 - Tabela do polímero utilizado no estudo reológico.

Material type	Thermoplastic
Generic name	PP
Supplier	Borealis AG
Trade name	Borealis PP RJ370MO
MFI	MFI(230,2.16)=45g/10min
Fiber percent	0.00 (%)
Melt temperature range	210 - 260 (oC)
Mold temperature range	15 - 40 (oC)
Ejection temperature	120 (oC)
Freeze temperature	140 (oC)

Tabela 3.2 - Tabela de condições de processamento.

Summary	
[Filling]	
Filling time (sec)	0.192
Melt Temperature (oC)	235
Mold Temperature (oC)	20
Maximum injection pressure (MPa)	500
Injection volume (cm ³)	4.31894
[Packing]	
Packing Time (sec)	3.63
Maximum packing pressure (MPa)	500
[Cooling]	
Cooling Time (sec)	10
Mold-Open Time (sec)	5
Eject Temperature (oC)	120
Air Temperature (oC)	20
[Miscellaneous]	
Cycle time (sec)	18.822
Mesh file	TUBO PP-3D(2).mde

Na tabela 3.2 pode-se verificar as condições de processamento consideradas no estudo reológico para a moldação da peça desenvolvida para este estudo e que o ciclo de moldação previsto pelo sistema é de 18,8 s. Os valores considerados, na análise foram:

- Temperatura do molde (20°C; o sistema propunha entre 15°C e 40°C, indicados na ficha técnica do material);

- Pressão máxima de injeção – considerou-se 500 MPa, valor muito superior ao valor máximo que as máquinas de injeção podem atingir;
- Os restantes parâmetros foram atribuídos pelo *software* Moldex 3D.

Nas figuras seguintes são apresentados os resultados gráficos das análises efetuadas pelo *software*.

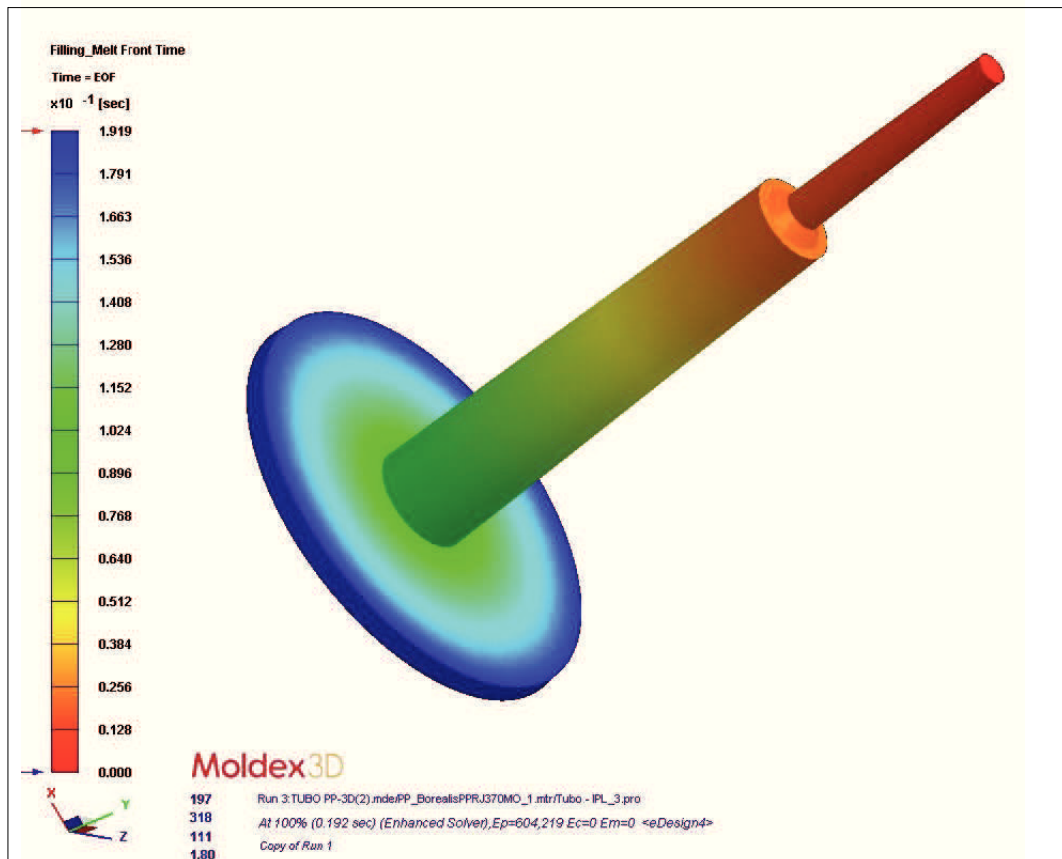


Figura 3.5 - Tempo enchimento.

Na figura 3.5 é possível verificar que o tempo estimado para o enchimento da cavidade do molde foi de 0,19 s, com base nas cores da barra lateral esquerda. É possível, também verificar os tempos de enchimento das várias zonas da peça plástica, durante o enchimento.

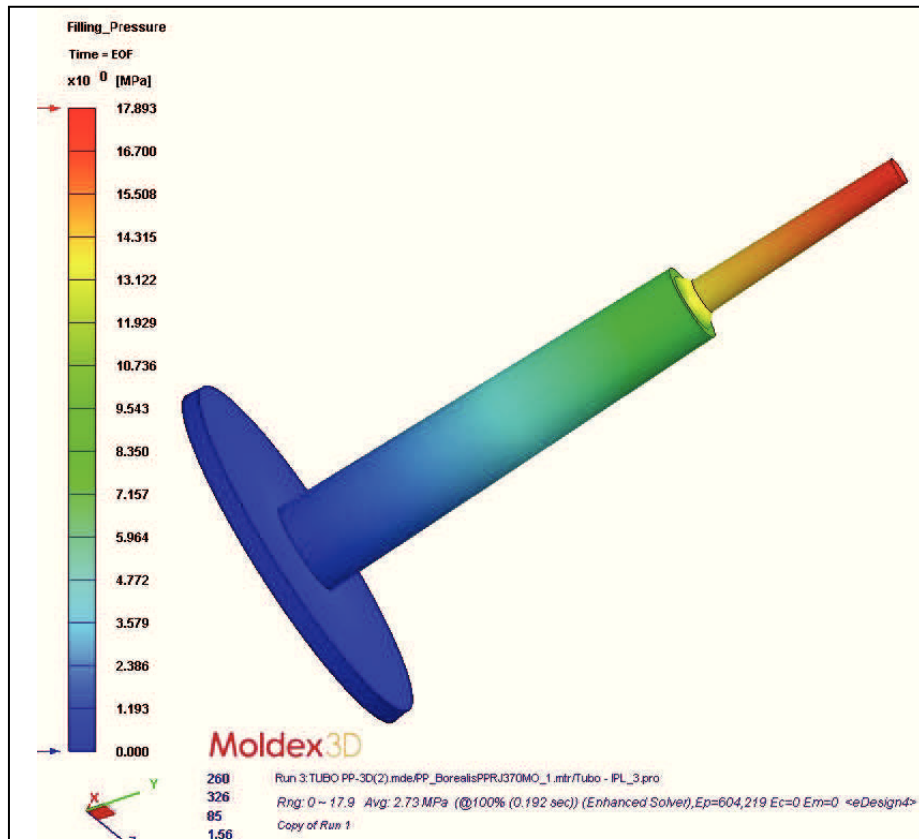


Figura 3.6 - Pressão de injeção em MPa.

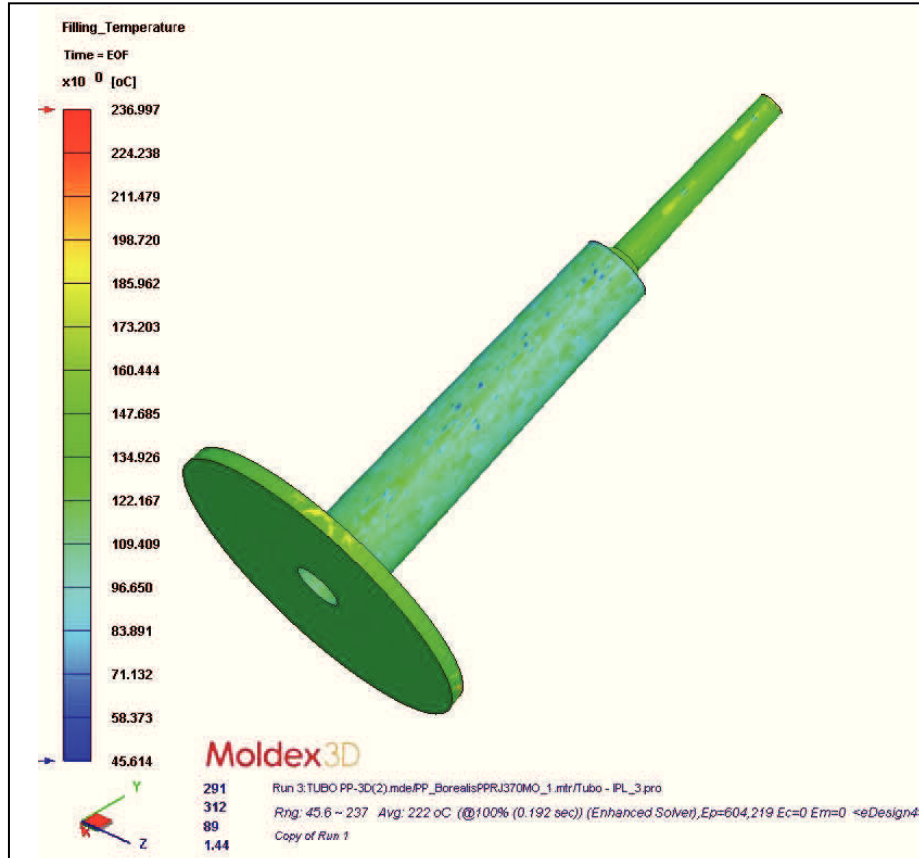


Figura 3.7 – Temperatura do Material processado durante o enchimento.

Na figura 3.6 pode-se observar a evolução das pressões de injeção durante o enchimento da peça plástica. A zona com maior pressão de injeção é, naturalmente, no canal de injeção e na zona de entrada de material plástico para a peça (+/- 12,000 MPa). Na figura 3.7, pode-se observar as diferentes temperaturas do material processado (barra lateral esquerda) e que a “janela” de processamento varia entre os 100 e os 200°C.

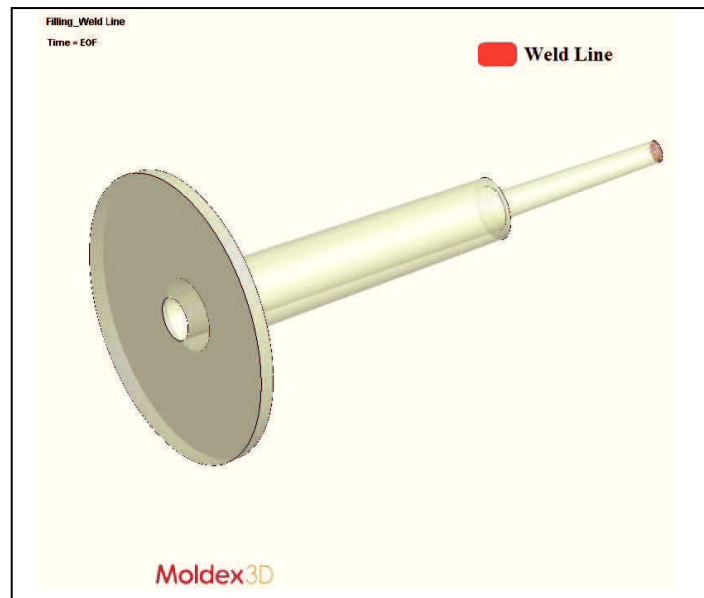


Figura 3.8 - Linhas de soldadura.

Como o tipo de injeção, considerado no estudo da peça plástica, foi o de injeção radial em filme, o enchimento é equilibrado, não são previstas linhas de soldadura do material, conforme pode ser observado na figura 3.8.

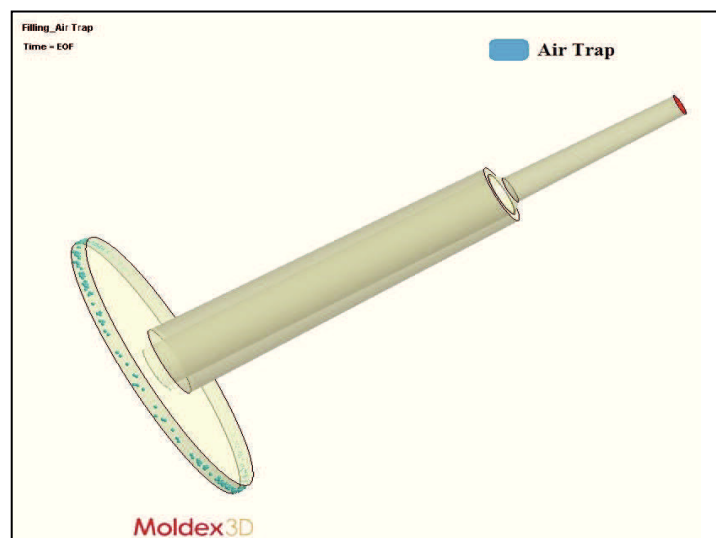


Figura 3.9 - Zonas com concentração de gases.

Na figura 3.9 é possível observar zonas de concentração de gases (resultantes do processamento do material plástico e do enchimento da cavidade do molde), ou seja zonas onde vai ser necessário o projetista dimensionar zonas para escapes de gases.

Como a concentração de gases, relativas ao processamento do material e enchimentos, se verifica no final do enchimento da peça plástica e numa zona do molde onde se podem maquinar zonas para fugas de gases, sem grande dificuldade, linha de junta do molde (abertura do molde), neste caso não se verifica qualquer constrangimento de projeto e de maquinaria. As fugas de gases, de modo geral para este tipo de material, devem ter uma profundidade entre os 0,025 e os 0,051mm [17]. Neste caso, considerou-se uma profundidade de 0,03mm, em todo o plano de junta.

Na figura 3.10 pode-se observar a evolução da força de fecho durante o ciclo de moldação. A força de fecho necessária para a injeção da peça plástica (apenas uma cavidade – uma peça) é muito baixa (2,04 Ton) pois a área projetada da peça plástica mais canais é muito reduzida. Como a máquina de injeção para o ensaio do molde é de 44 Ton de força de fecho, não existe constrangimento em termos de força de fecho necessária o processamento da peça desenvolvida para este estudo. A força de fecho máxima verifica-se para os 0,19s, do ciclo de moldação, altura em que temos o máximo pressão injeção e de compactação.

Na figura 3.11, observar a evolução da pressão de injeção em MPa durante o enchimento da peça. O valor máximo é de 17,4 MPa, atingido aos 0,19s.

Na figura 3.12, pode-se observar a curva característica relativa ao comportamento da pressão de injeção e compactação da peça.

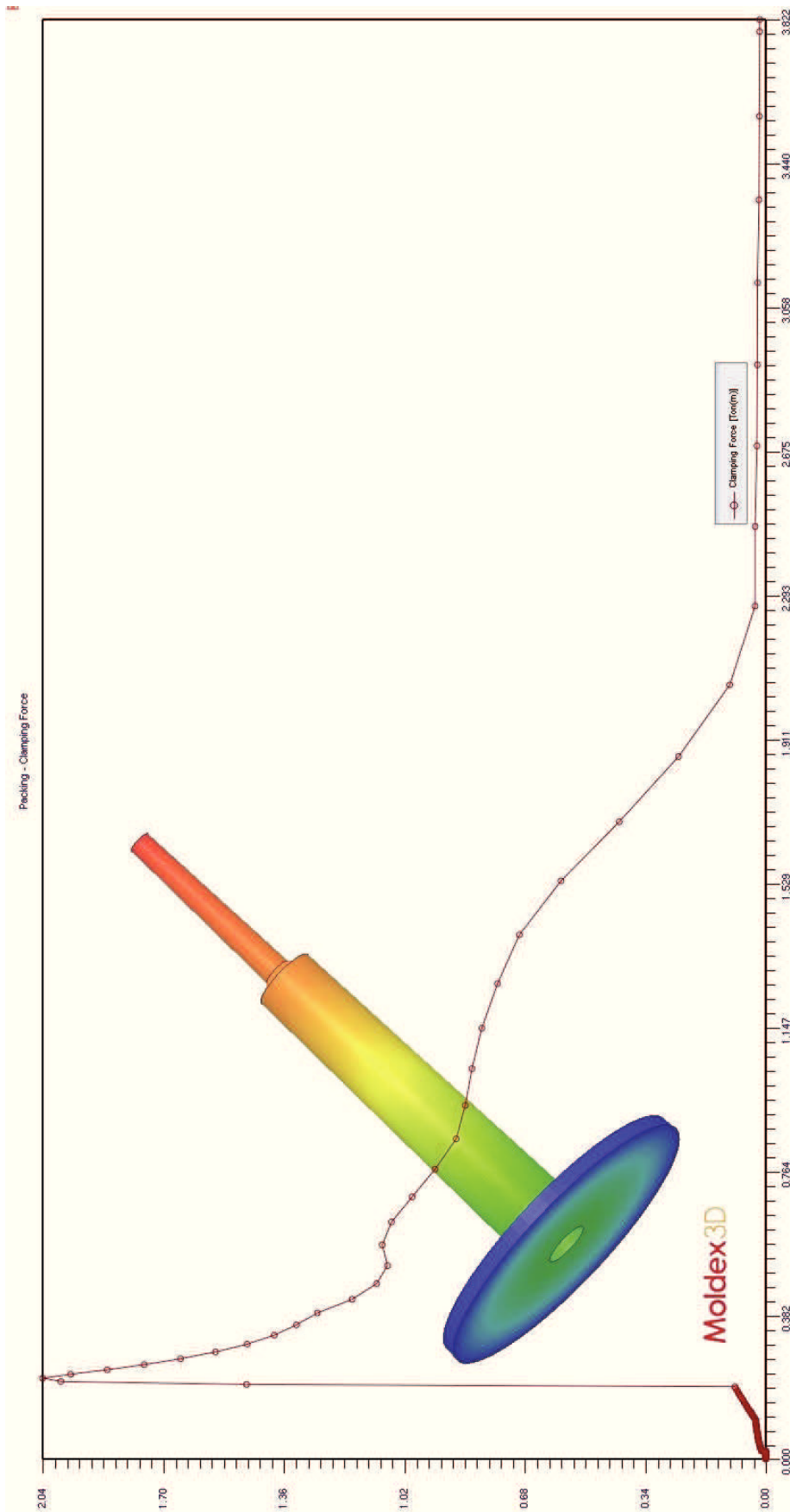


Figura 3.10 – Variação da força de fecho durante o enchimento do molde.

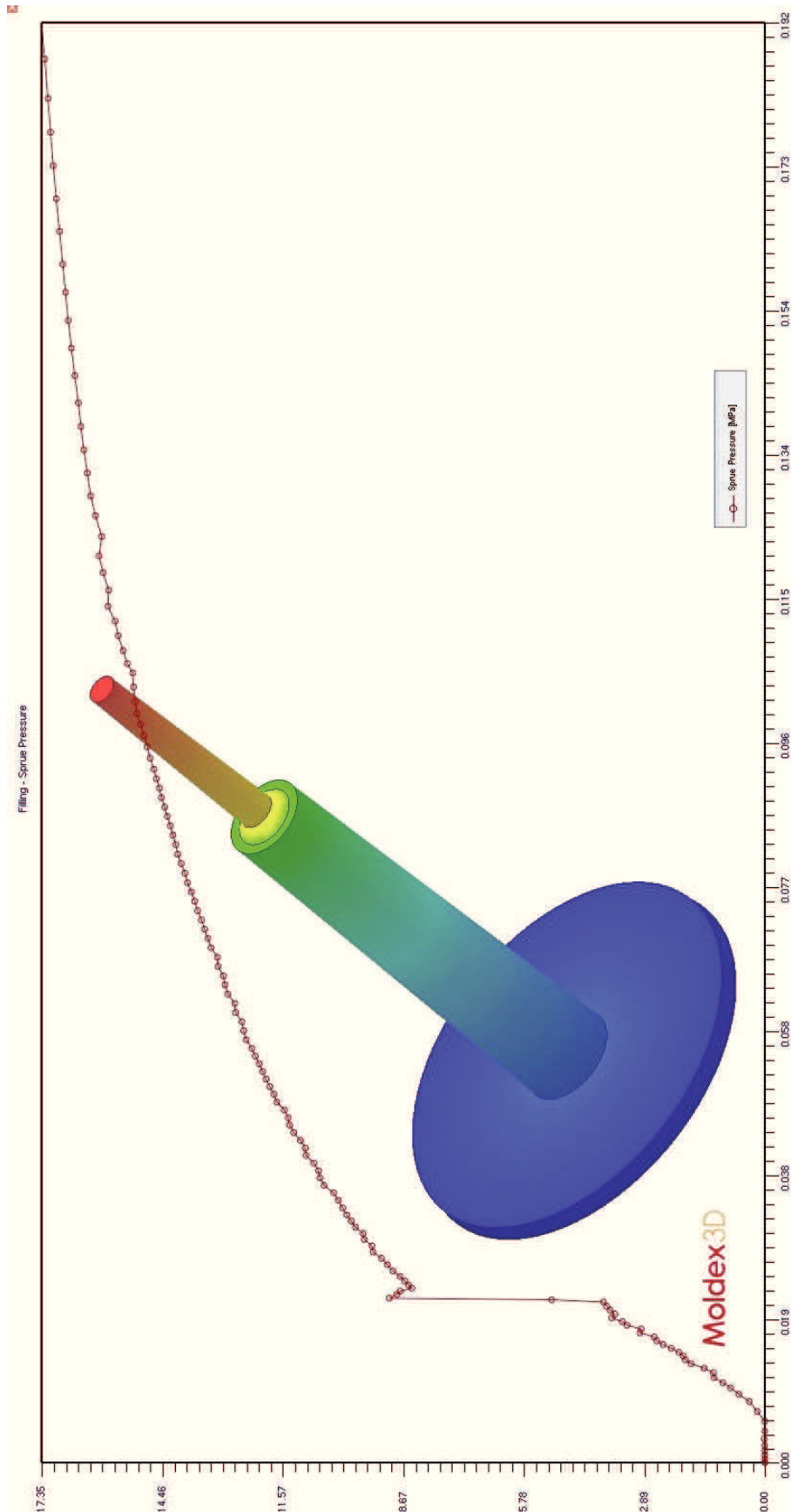


Figura 3.11 - Variação de pressão de injeção durante o enchimento da peça plástica.

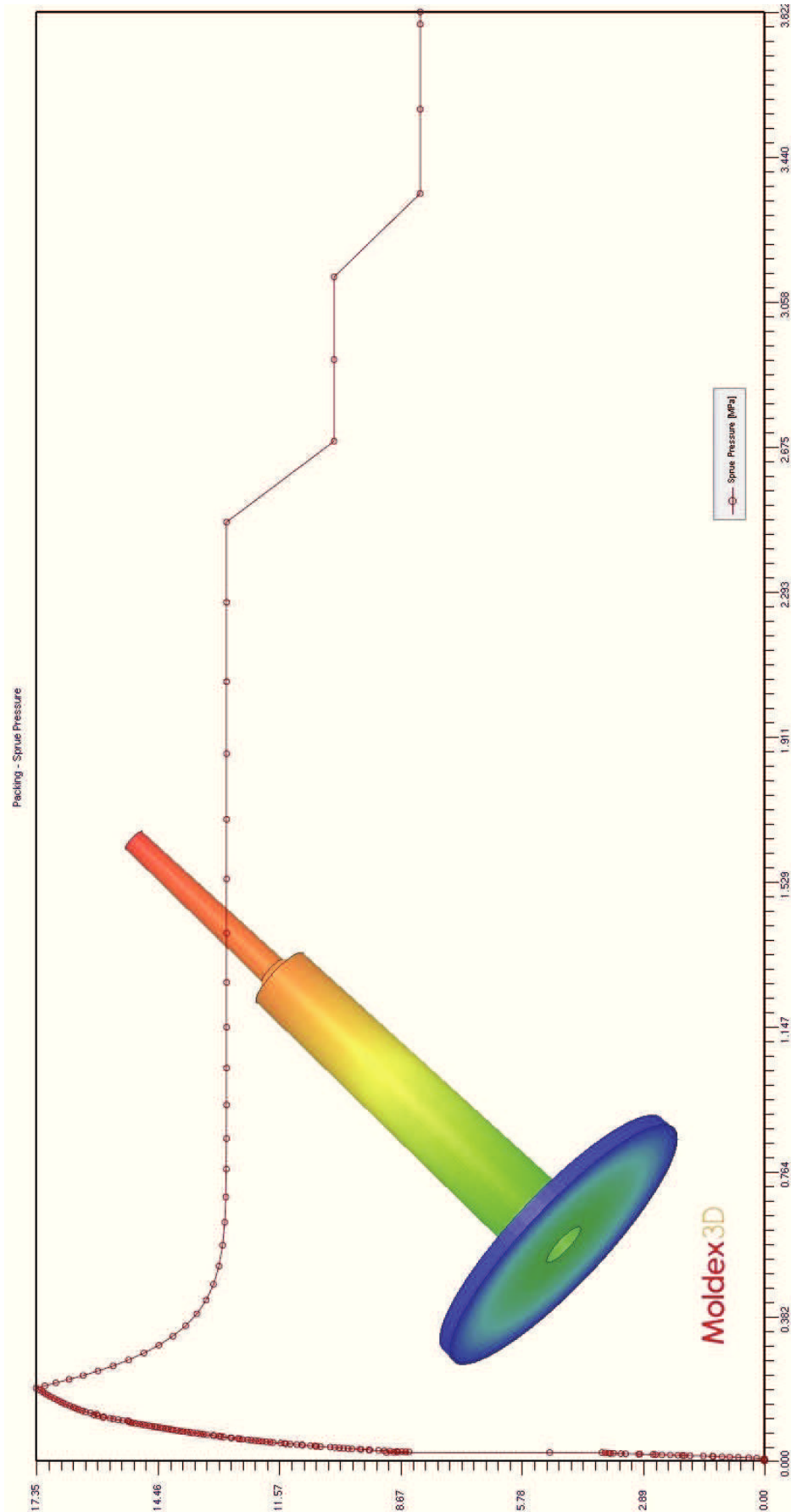


Figura 3.12 – Evolução da pressão de injeção e compactação

4. Desenvolvimento e fabrico do molde protótipo

4.1. Introdução

Segundo Rosato *et al* [42] um molde protótipo é constituído por elementos moldantes fabricados com metais, metais leves, resinas epoxídicas (com ou sem cargas) ou elastómeros.

O objetivo do molde protótipo é conseguir peças protótipo iguais às peças de produção em série, com sistemas de extração e refrigeração muito semelhantes ao molde de produção em série. Deve ter, também, custos de desenvolvimento e fabrico relativamente baixos. Nesta fase, pretende-se conhecer as várias fases de desenvolvimento e fabrico do molde de injeção protótipo, desde a fase do desenho preliminar do molde (*sketch*), seleção de materiais, processos de maquinação, ajustamento e montagem do molde.

O fabrico do molde protótipo para a realização de testes experimentais é parte fundamental do estudo que se pretende realizar neste trabalho, sem o qual não seria possível analisar em o comportamento da desmoldação/extração da peça em polipropileno, em que são utilizados revestimentos nas superfícies dos elementos moldantes do molde.

O molde foi fabricado em aço e as buchas (elementos moldantes) são intermutáveis, ou seja, existem dois elementos moldantes cada um com um tipo de revestimentos específico.

O molde incorpora uma instrumentação que permite monitorizar a pressão na superfície das

cavidades (elementos moldantes) durante a fase de injeção, assim como monitorizar as temperaturas dos circuitos de refrigeração, com o objetivo de estabilizar a temperatura do molde. Esta monitorização será realizada com recurso a uma sonda externa de contato.

Com este molde protótipo é possível ter as mesmas condições de processamento que o molde de produção em série, pois o projeto foi desenvolvido com esse objetivo.

Nos testes realizados com o molde protótipo, foram maximizadas as dificuldades de desmoldação, aumentadas significativamente as pressões de injeção, os tempos de arrefecimento, para que a desmoldação da peça em polipropileno, sem aplicação de lubrificante seco atingisse uma situação limite, ou que não fosse possível desmoldar a peça.

Nos elementos moldantes (buchas) foi executado polimento com alto brilho, pois este tipo de acabamento superficial tem como consequência criar uma maior aderência do polímero ao elemento moldante em aço, criando maiores dificuldades à extração da peça plástica. Deste modo o efeito do lubrificante seco (revestimento da bucha com MoldLub) será naturalmente mais significativo.

4.2. Projeto do molde

Ao projetar um molde para produção em série deve ter-se em consideração que se está a desenvolver uma ferramenta, que tem como objetivo produzir peças de alta qualidade, de ciclos de moldação curtos, com custos de manutenção relativamente baixos e desempenhar corretamente as funções para o qual foi projetado [16].

O objetivo do fabrico de um molde neste trabalho foi o de avaliar o comportamento da peça plástica processada a determinado revestimento no aço. O molde protótipo desenvolvido irá produzir uma pequena serie de peças plásticas, nas mesmas condições processamento similares a de um molde de produção em serie. Esse molde terá sistemas semelhantes de refrigeração, injeção e, os tipos de acabamento superficial dos elementos moldantes em aço, por forma a se ter a mesma qualidade das peças plásticas processadas.

No desenvolvimento e projeto do molde existiu a preocupação de se obterem custos relativamente reduzidos, mas ter um molde funcional, que possa trabalhar em ciclo automático e que tenha os requisitos fundamentais de um molde de produção em série referidos atrás. Por esse motivo, o molde foi fabricado em aço e não nouro tipo de material.

Numa primeira fase, foi desenhado um *Sketch* (figura 4.1) para uma rápida listagem dos materiais necessários ao fabrico do molde. Para as maquinações de desbaste iniciais, por forma a ganhar tempo no fabrico do molde, foi utilizado o *sketch* enquanto o desenho relativo ao projeto de molde (e desenhos para maquinação) em 2D e 3D (em Software SolidWork), eram desenvolvidos (figuras 4.2;4.3;4.4).

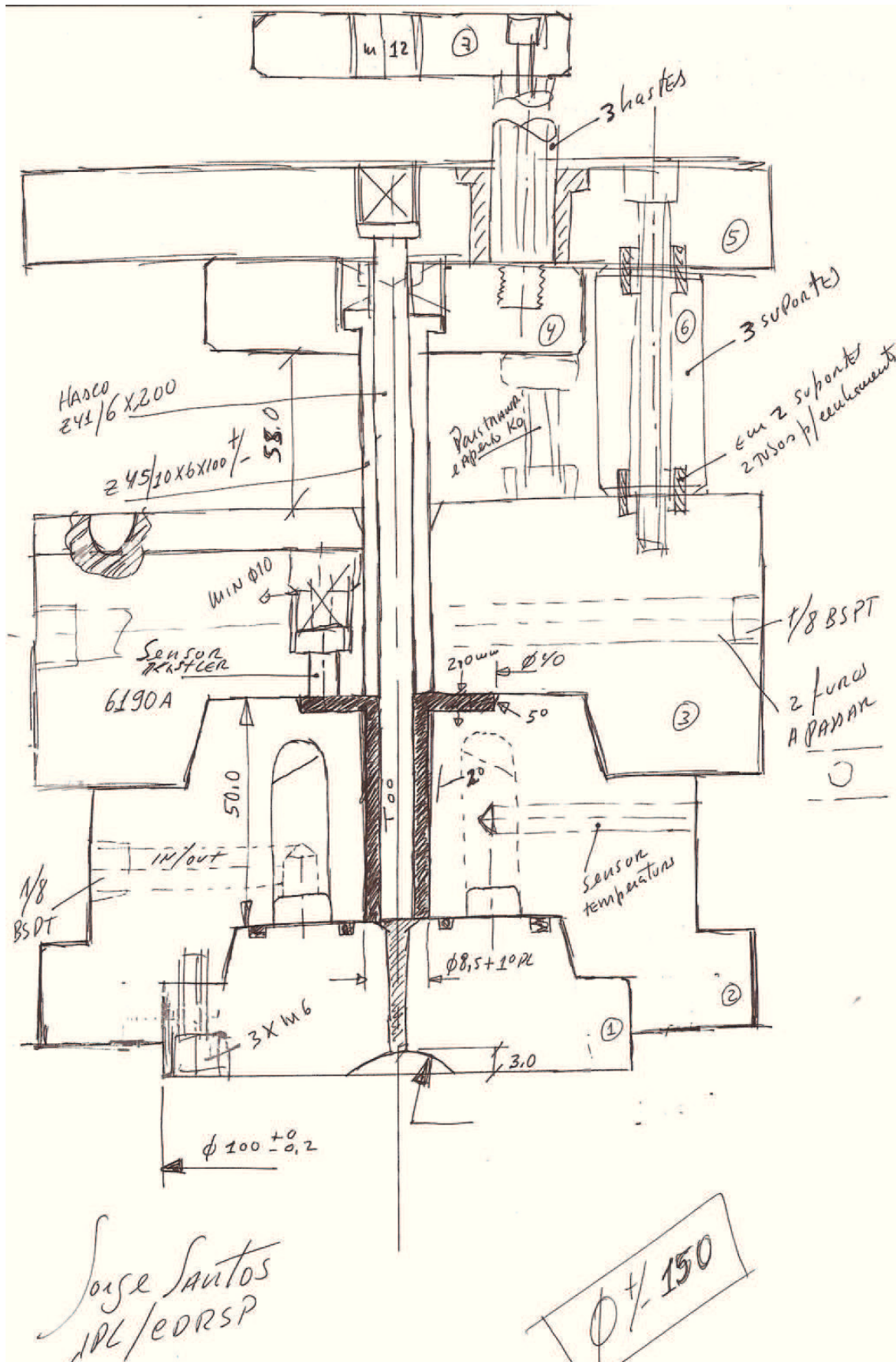


Figura 4.1 - Esboço de molde protótipo para a realização de testes com revestimentos nos elementos moldantes.

O desenho de molde protótipo foi realizado em Solid Work a partir do desenho preliminar (*sketch*) uma vez que as dimensões dos aços foram consideradas a partir deste (figura 4.1).

Com o desenho do molde em 3D é possível verificar com maior facilidade possíveis interferências entre os vários elementos mecânicos do molde, fixações, águas etc., minimizando o risco de erros de projeto e de maquinação.

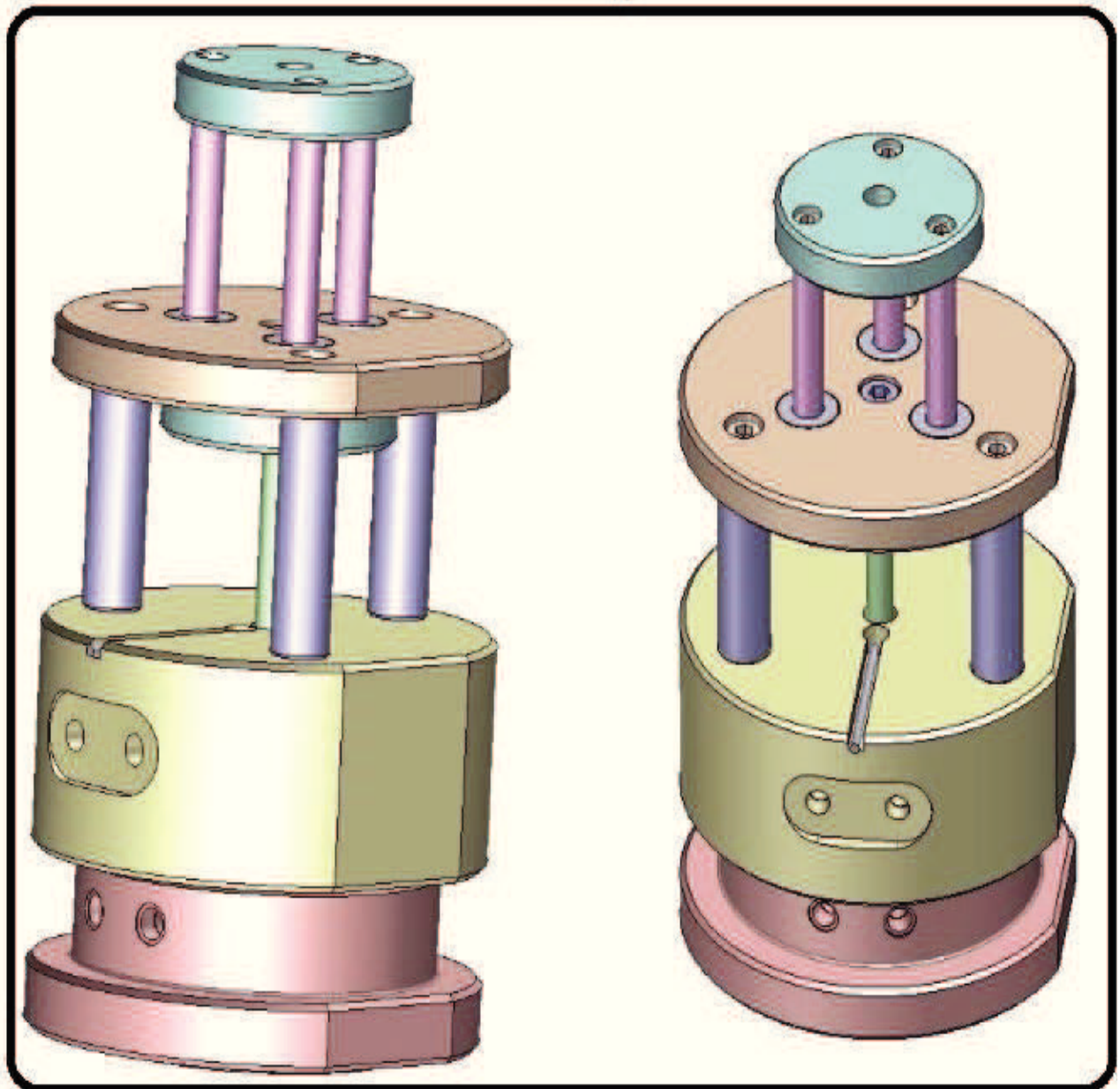


Figura 4.2 – Desenho molde protótipo 3D para o processamento da peça em polipropileno.

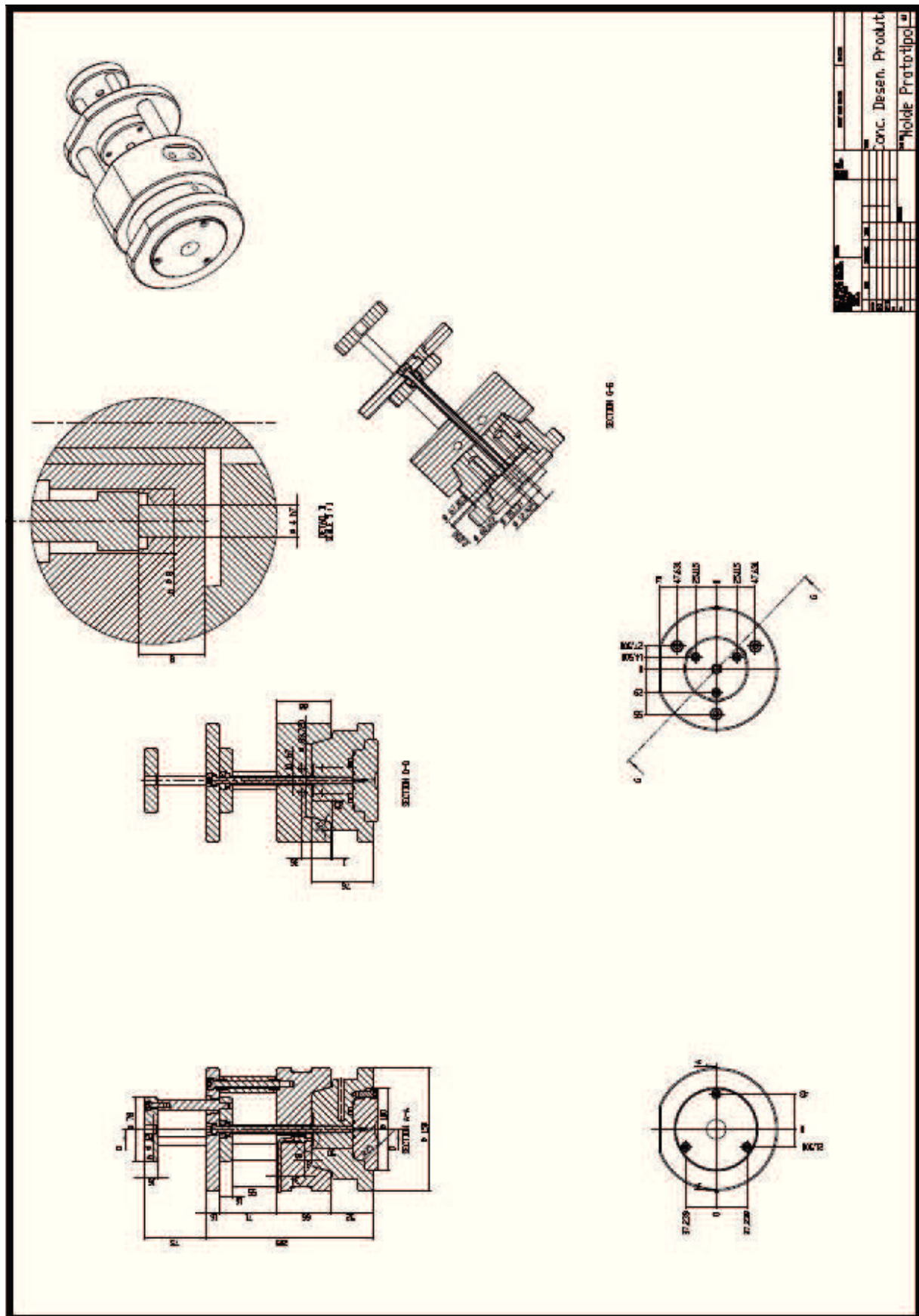


Figura 4.3 - Desenho de molde 2D para o processamento da peça em polipropileno.

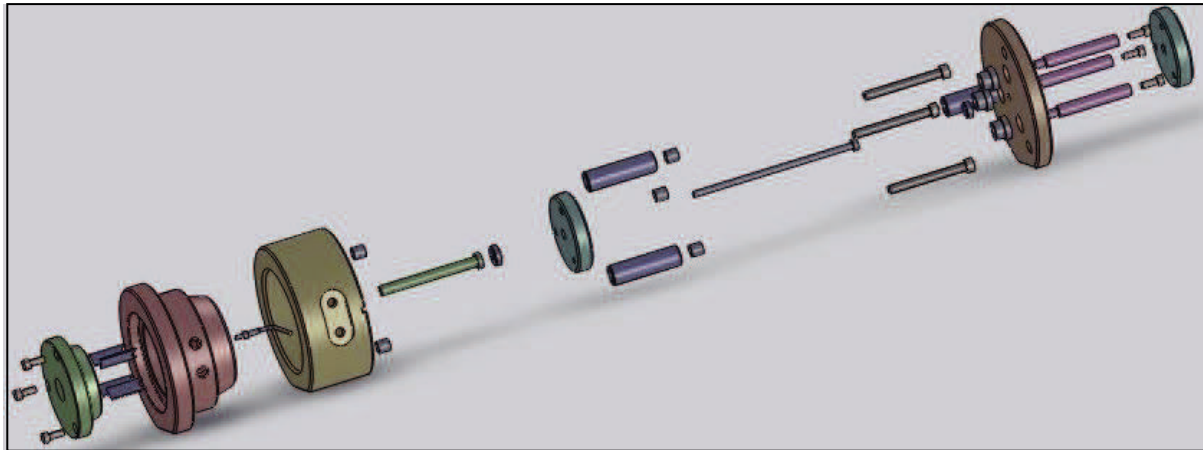


Figura 4.4 - Desenho montagem em 3D para o processamento da peça em polipropileno.

Na figura 4.4 pode-se ver a cinemática da montagem das peças do molde protótipo para fabrico de peças em polipropileno e avaliar o comportamento da extração destas quando os elementos moldantes em aço apresentam diferentes tipos de revestimento.

No desenho de projeto do molde, não foi elaborada lista de materiais e também não foi cotado na totalidade devido ao fato de se tratar de um molde protótipo. Assim, apenas foram colocadas as dimensões necessárias e suficientes ao fabrico do molde (tabela 4.1).

Tabela 4.1 - Lista dos aços principais utilizados no projeto do molde (numeração de peças de acordo com *sketch* inicial).

	Dimensões	Quantidade	Tipo de aço (Norma W. N° / AISI / Din)
1	Ø 100mm x 35mm	1	1.1730 / 1045 / Ck 45
2	Ø 150mm x 75mm	1	1.1730 / 1045 / Ck 45
3	Ø 150mm x 60mm	1	1.1730 / 1045 / Ck 45
4	Ø 80mm x 20mm	1	1.1730 / 1045 / Ck 45
5	Ø 150mm x 20mm	1	1.1730 / 1045 / Ck 45
6	Ø 80mm x 16mm	1	1.1730 / 1045 / Ck 45
7	Ø 30mm x 70mm	3	1.1730 / 1045 / Ck 45

O aço selecionado para o fabrico do molde foi o *aço-carbono 1.1730* (tabelas 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4), tendo em consideração que se pretende ter custos relativamente baixos e que é para processar uma pequena serie de peças plásticas. Este aço tem boa uma boa tenacidade, é fornecido com uma dureza inferior a 250 HRC. Este material é muito utilizado no fabrico de protótipos ou de moldes de pequenas dimensões sujeito a baixas solicitações.

Tabela 4.2 - Composição química do aço-carbono 1.1730 [60].

C %	Si %	Mn %	P %	S %
0,43 - 0,5	≤ 0,4	0,6 - 0,9	≤ 0,035	≤ 0,035

Tabela 4.3 - Propriedades Mecânicas do aço-carbono 1.1730 [60]

Resistência à tração, R_m	640 MPa
Limite elasticidade $R_{p0,2}$	340 MPa
Redução de ares, Z	40%
Alongamento, A_5	20%

Tabela 4.4 - Propriedades Físicas do aço-carbono 1.1730 [60].

Temperatura	20° C	200° C	400° C
Densidade Kg / m ²	7870	7820	7750
Expansão térmica (10-6/°C)	-	12	13.5
Módulo de elasticidade Gpa	195	193	177
Condutividade Térmica W/m °C	-	40	41

4.2.1 Sistema de alimentação e fuga de gases

O sistema de alimentação selecionado foi injeção e canal de alimentação frio, com ataque direto na peça com um filme de 0,2 mm radial (diferença entre os diâmetros de 6,28 e 5,88), como se pode observar na figura 4.5.

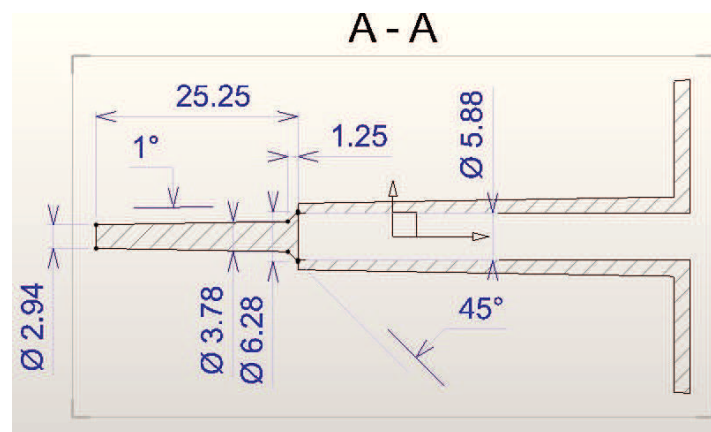


Figura 4.5 - Dimensionamento do gito do sistema de alimentação.

O sistema de injeção considerado permite um correto balanceamento do enchimento da peça (plástica), uniformidade de espessuras e permite o enchimento da peça sem linhas de soldadura em zonas de difícil colocação de escape de gases.

A desvantagem deste tipo de injeção é o facto do gito e ataques terem que ser removidos manualmente após a extração da peça do molde. Neste caso não é problemático porque o molde é para pouca quantidade de peças.

Com este tipo de injeção, a peça termina o seu enchimento na zona de maior diâmetro e, é necessário fazer escapes de gases no plano radial, conforme se pode observar na figura 4.10.

Para este tipo de material (PP) as fugas para gases devem ter uma profundidade entre 0,025 mm a 0,051 mm [17]. No caso do molde protótipo, considerou-se para as fugas de gases com uma profundidade 0,03 mm.

Como se pode observar na figura 4.10, obtida através do estudo de enchimento, a concentração de gases encontra-se em zonas onde existem planos de união de peças do molde em aço, o que vai facilitar o seu ”escape” para o exterior. Consequentemente é de fácil execução por processos de maquinação fazer o escape de gases, e deste modo obter uma peça plástica isenta de marcas características da insuficiente saída de gases.

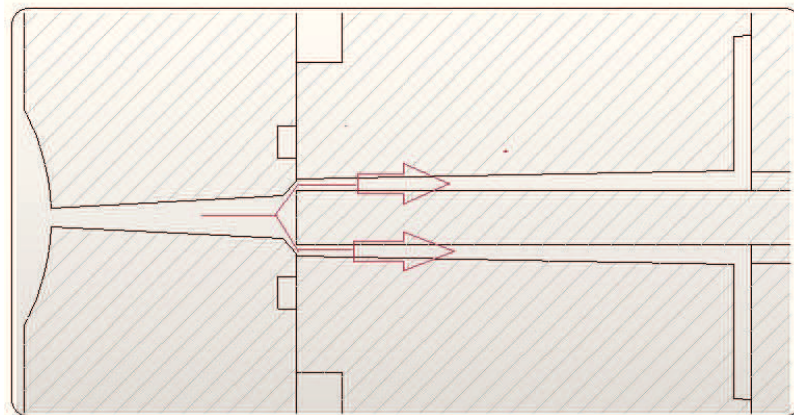


Figura 4.6 - Sistema de injeção: fluxo do material para a peça plástica (jito e ataques).

Nas figuras abaixo (4.7, 4.8 e 4.9) pode-se observar o comportamento relativo ao enchimento da peça plástica, para diferentes percentagens enchimento (20, 50, e 70%), obtidas com *software* de análise de enchimento. Pode-se constatar que o enchimento da peça faz-se de forma equilibrada.

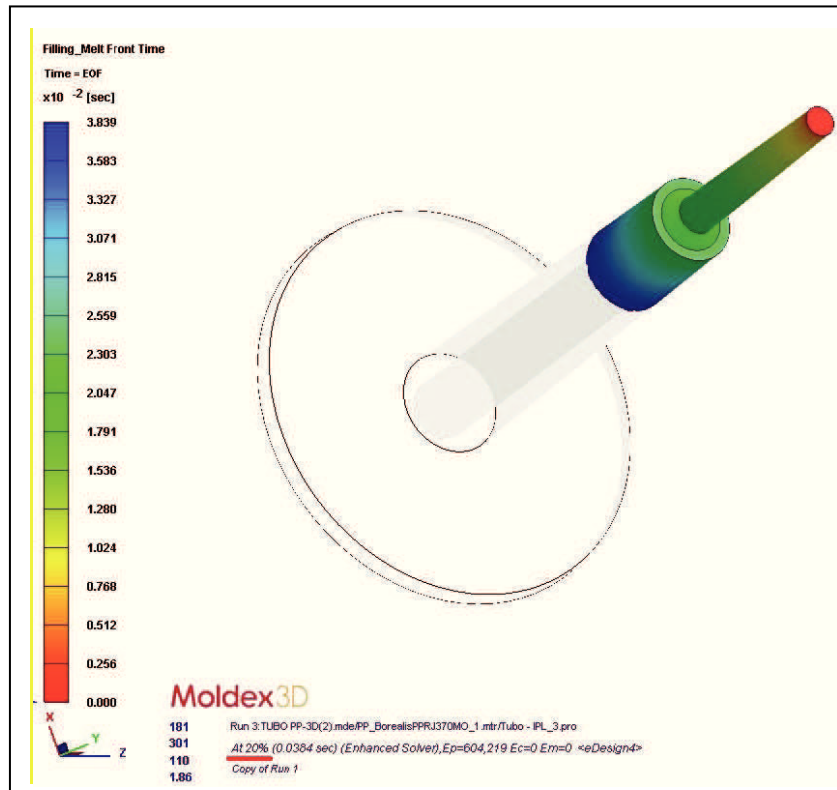


Figura 4.7 - Peça plástica a 20% do seu enchimento.

A peça atinge os 20% de enchimento aos 0,0038s, conforme mostra a barra lateral esquerda (figura 4.7)

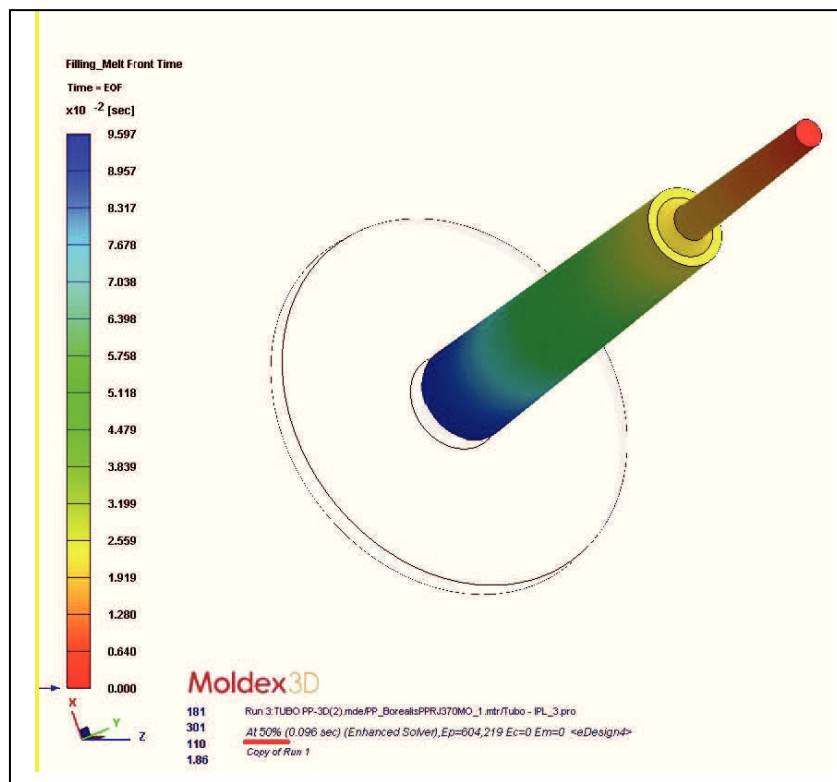


Figura 4.8 - Peça plástica a 50% do seu enchimento.

Pode-se observar que o enchimento da peça a 50% é atingido aos 0,0096s (figura 4.8) Por outro lado, também se observa que o enchimento do tubo (zona revestida a MoldLub) está praticamente concluído com o enchimento da peça a 50%

O enchimento da peça a 70% acontece aos 0,013s (figura 4.9) e pode verificar-se que o enchimento continua equilibrado como seria expectável.

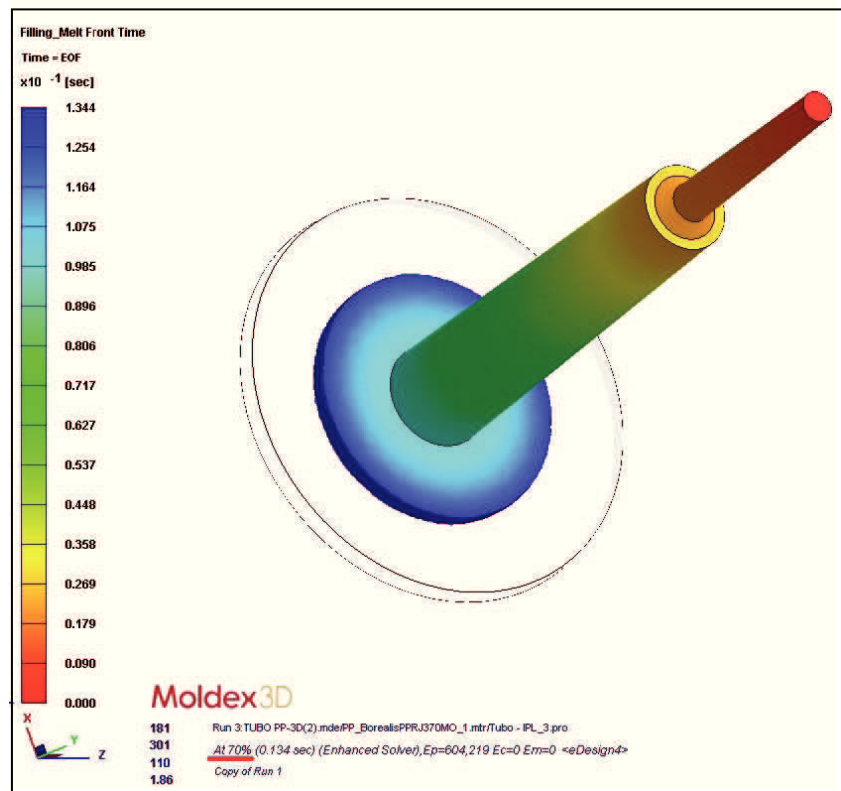


Figura 4.9 - Peça plástica a 70% do seu enchimento.

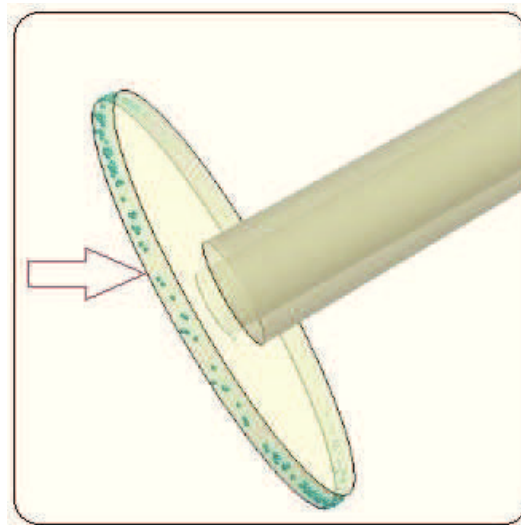


Figura 4.10 - Zonas de concentração de gases devidas ao enchimento da peça, obtidas a partir do *software* de análise do sistema de injeção.

Na figura 4.10, pode-se observar a concentração de gases resultantes da injeção da peça plástica, situação que não é preocupante porque se concentra no final do enchimento da peça, zona onde existe a separação da metade fixa e móvel do molde.

No plano entre a parte fixa e parte móvel do molde (abertura do molde - linha de junta), foram maquinadas as zonas para escape de gases (com 0,030 mm de profundidade) permitindo desta forma um escape de gases perfeito, igual em toda a peça, evitando desta forma o aparecimento de zonas “queimadas” (característica típica deste defeito das peças plásticas processadas com deficiente saída de gases).

4.2.2. Sistema de extração, centramento, guiamento e aperto do molde à máquina

Atendendo à configuração tubular da peça plástica a processar, optou-se por um sistema de extração que é constituído por um extrator tubular *standard* da marca Hasco com Ref: Z45/10x6x100 (figura 4.11). Este tipo de extração permite, no caso desta peça, que a força de extração seja feita uniformemente.



Figura 4.11 - Extrator tubular Hasco Ref: Z45 e extratores interiores do tubular.

O bucha/macho (elementos moldantes) do molde é constituída por um perno que trabalha dentro de um extrator tubular, na chapa da bucha. Os pernos moldantes que trabalham dentro deste extrator tubular são Hasco Ref. Z41 em aço temperado 1.2343 e nitrados. Um desses pernos (bucha/macho, elemento moldante) vai levar um revestimento em PVD designado “MoldLub”. É nestas peças que se vai dar o aperto maior do polímero devido à contração, que em parte ainda é feita dentro do molde.

A rugosidade superficial destas peças, sendo peças iguais e standardizadas, é praticamente a mesma (ver controlo rugosidade ponto 4.2.4), ou seja, em termos de forças de extração, sendo os parâmetros utilizados na máquina de injeção os mesmos e as temperaturas de molde também, não deverá existir variações.

Uma destas buchas irá ser revestida com um lubrificante seco pelo processo PVD e com designação comercial “MoldLub”, este revestimento poderá influenciar a força de extração necessária para extrair a peça do molde devido ao menor atrito da bucha com PVD em relação à bucha sem revestimento. Iremos verificar nos testes do molde.

4.2.3. Forças de extração

A força de extração para retirar a peça do interior do molde está diretamente ligada com o tipo de material a processar, complexidade da peça plástica, as condições de processamento, os materiais utilizados na construção das zonas moldantes, o acabamento de superfície em contacto com o polímero a qualidade geral do projeto e fabrico do molde.

O coeficiente estático entre as superfícies em contato com o polímero e o aço, segundo alguns estudos realizados [44, 45] é um fator importante a ter em conta no processo de extração de polímeros injetados. Num estudo realizado pelos investigadores Bangert e Menges onde analisaram o coeficiente de atrito estático em condições idênticas às que ocorrem durante o processo de extração da peça do interior do molde, demonstraram que o coeficiente de atrito estático é influenciado por vários fatores como; rugosidade das superfícies moldantes; temperatura do molde; tempo de arrefecimento; temperatura do polímero fundido; pressão de compactação; temperatura de extração. [44, 45]

Os modelos para previsão das forças de extração de peças processadas por injeção foram baseados em modelos mecânicos ou termomecânicos [46]. A maioria dos modelos deriva da seguinte equação:

$$FR = f \times Pc \times A \quad (4.1)$$

onde: **FR** - Força de extração; **f**-Coeficiente de atrito entre peça e molde; **Pc**- pressão de contato com peça e molde; **A**- Área de contato

V. Rosato *et al* [42] (“injection moulding handbook”) apresenta-se o seguinte modelo para cálculo de forças de extração:

$$P = \frac{St \times E \times \mu \times A}{d \times \left[\frac{d}{2 \times t} - \left(\frac{d}{4 \times t} \right) \times \nu \right]} \quad (4.2)$$

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

4.2.4. Rugosidade das superfícies moldantes – macho/bucha

A rugosidade dos elementos moldantes machos/bucha foi analisada por forma a garantir que não existiam diferenças relevantes entre eles que pudessem ter influência na extração das peças plásticas. A rugosidade do macho moldante, revestido com MoldLub (processo PVD), foi analisada antes e após o revestimento por forma a verificar se o revestimento tinha influência na rugosidade da superfície (figuras 4.13 e 4.14). Uma menor rugosidade poderá ter como resultado menores valores de forças de extração. O equipamento utilizado para medir as rugosidades das superfícies moldantes foi o rugosímetro MAHR Marsurf M300 indicado na figura 4.12.



Figura 4.12 – Rugosímetro de marca Mahr Marsurf M 300, utilizado neste estudo.

Como se pode observar nas figuras 4.13 e 4.14 os valores de rugosidade média (Ra) nas superfícies moldantes do macho/bucha (Nº 1) e no macho/bucha (Nº 2) foram,

respetivamente, de $0,25\mu\text{m}$ e de $0,37\mu\text{m}$. Pode-se, também, observar que o macho/bucha (Nº 2) após revestimento PVD "MoldLub" apresenta um valor de rugosidade média (Ra) de $0,04\mu\text{m}$, significativamente mais baixo que os valores obtidos antes de ser revestido com "MoldLub". Os valores de rugosidade em termos de profundidade média (Rz), medidos para o macho/bucha (Nº 1) e o macho/bucha (Nº 2), foram respetivamente de $2,20\mu\text{m}$ e de $2,42\mu\text{m}$. As superfícies moldantes após terem sido polidas com acabamento alto brilho, os valores de rugosidade da profundidade média (Rz) diminuíram, naturalmente, para valores de $1,31\mu\text{m}$ para o macho/bucha (Nº 1) e para $1,49\mu\text{m}$ no macho/bucha (Nº 2).

Macho/Bucha Nº1	Macho/Bucha Nº1 Com brilho	Macho/Bucha Nº2	Macho/Bucha Nº2 Com brilho
Date 11/12/2013 Hora 09:30 Ra 0.254 μm Rz 2.203 μm Rmax 5.054 μm A1 34.61 Rt 5.054 μm Rsk -0.99 Lista Rz Rz 2.203 μm Rmax 5.054 μm Rz5 1.601 μm Rz1 1.599 μm Rz2 1.233 μm Rz3 5.054 μm Rz4 1.520 μm Rz5 1.611 μm	Lista Rz Lc GS 0.500 mm Rz 1.318 μm Rmax 1.959 μm Rz5 0.382 μm Rz1 1.959 μm Rz2 1.270 μm Rz3 1.190 μm Rz4 0.994 μm Rz5 1.233 μm	Date 11/12/2013 Hora 09:30 Ra 0.369 μm Rz 2.420 μm Rmax 4.059 μm A1 51.64 Rt 4.059 μm Rsk 1.281 Lista Rz Rz 2.420 μm Rmax 4.059 μm Rz5 1.220 μm Rz1 4.059 μm Rz2 2.703 μm Rz3 1.007 μm Rz4 1.697 μm Rz5 1.752 μm	Date 26/12/2013 Hora 10:21 Ra 0.228 μm Rz 1.498 μm Rmax 2.924 μm A1 25.41 Rt 2.924 μm Rsk 1.202 Lista Rz Rz 1.498 μm Rmax 2.924 μm Rz5 0.832 μm Rz1 0.995 μm Rz2 1.175 μm Rz3 1.032 μm Rz4 1.502 μm Rz5 2.924 μm

Figura 4.13- controlo de rugosidade antes e após acabamento superficial brilho.

PERTHOMETER M4P	
DATA	
OBJ.	
#	
LT	1.50 MM
LC GS	0.25 MM
RA	0.04 YN
RZ	0.29 YN
RMAX	0.32 YN
RT	0.39 YN
RZ2	0.17 YN

Figura 4.14 - Controlo de rugosidade no macho/bucha (Nº 2) após PVD "MoldLub".

Com base nas medições efetuadas pode verificar-se que a rugosidade dos dois machos/bucha é praticamente a mesma e que as diferenças são irrelevantes. Foi possível observar que o

revestimento MoldLub influenciou significativamente a rugosidade das superfícies, como era espectável, diminuindo os valores de rugosidade. Os valores de rugosidade média (Ra) obtidos passaram de $0,23\mu\text{m}$ para $0,04\mu\text{m}$ e os valores de Rugosidade da profundidade média (Rz) passaram de $1,49\mu\text{m}$ para $0,29\mu\text{m}$.

4.2.5. Sistema de centramento e guiamento do molde

O centramento entre as duas metades do molde (lado da injeção e lado da extração), é feito diretamente no aço com um cone circular de acordo com a figura 4.15. Como se trata do fabrico de um molde protótipo, com o qual se pretende ter peças plásticas de boa qualidade a baixo custo, a não colocação de guias ou outro tipo de interlocks, traduz-se numa diminuição do custo do molde. Por outro lado, o tipo de conceção do molde leva a que não exista a preocupação com o posicionamento entre o lado da injeção e o lado da extração.

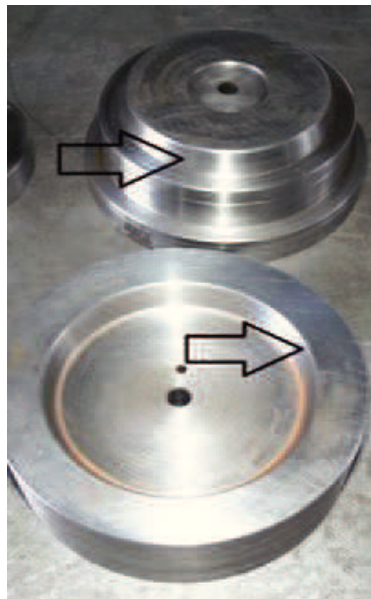


Figura 4.15 - Zonas cónicas para centramento das duas metades do molde.

No entanto é necessário, que se tenha um guiamento da chapa extratora para que o sistema de extração funcione corretamente. Este sistema de guiamento é feito através de três guias que deslizam dentro de casquilhos *standards* (Nº 1 fig, 4.16). Estas guias têm também a função de fixar a chapa à qual vai ser fixo o Ko da máquina de injeção, por forma a ser possível esta trabalhar em automático.

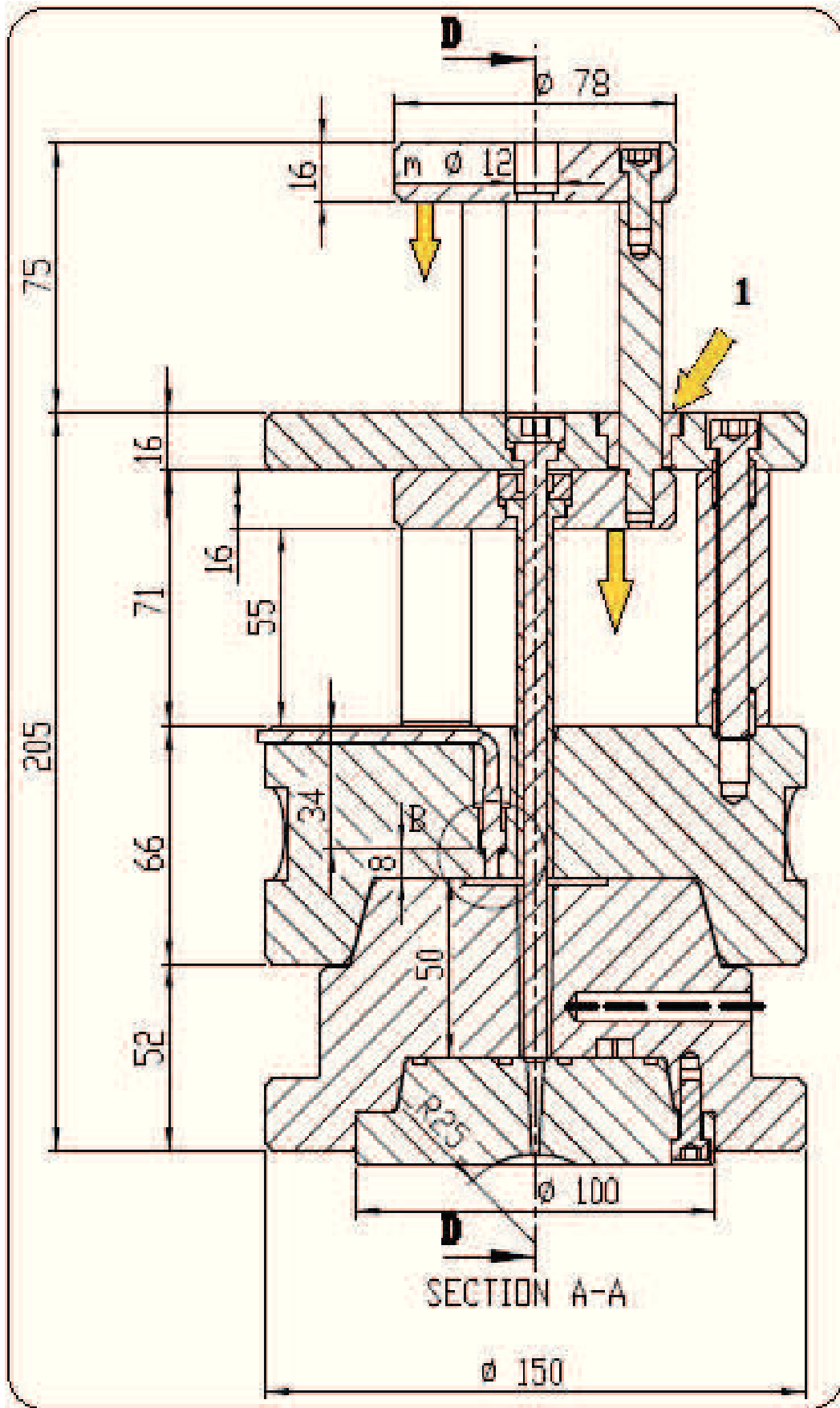


Figura 4.16 – Sistema centramento extração (nº1) e sentido movimento extração.

O aperto do molde á máquina de injeção é feito de forma convencional pois está previsto espaço em todo o diâmetro do molde.

4.2.6. Sistema de refrigeração

A refrigeração considerada no projeto deste protótipo é perfeitamente exequível num molde de produção em série. Foi efetivamente esse o objetivo, o de ter um sistema de refrigeração o mais similar possível. No lado da injeção foi maquinado um canal circular com 4 cascatas na vertical e, no lado da extração, foram maquinados 2 furos que atravessam o molde, conforme figuras 4.17, 4.18.

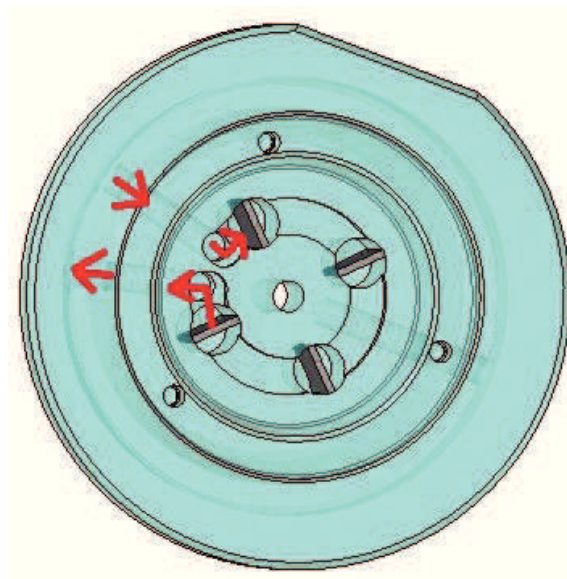


Figura 4.17 - Refrigeração da cavidade (lado fixo).

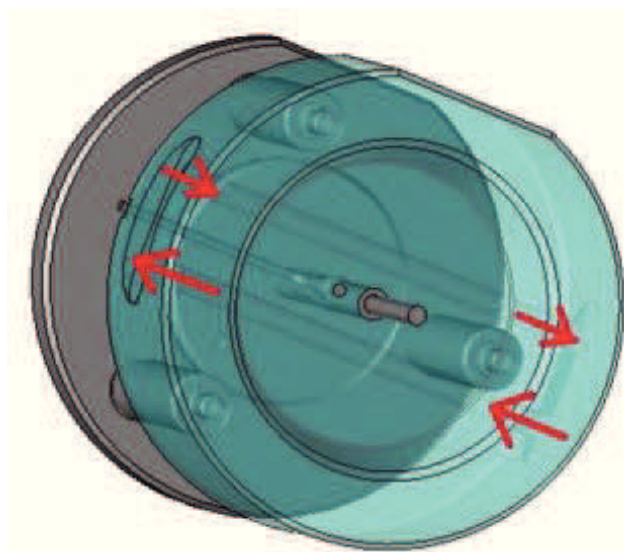


Figura 4.18- Refrigeração da bucha (lado móvel).

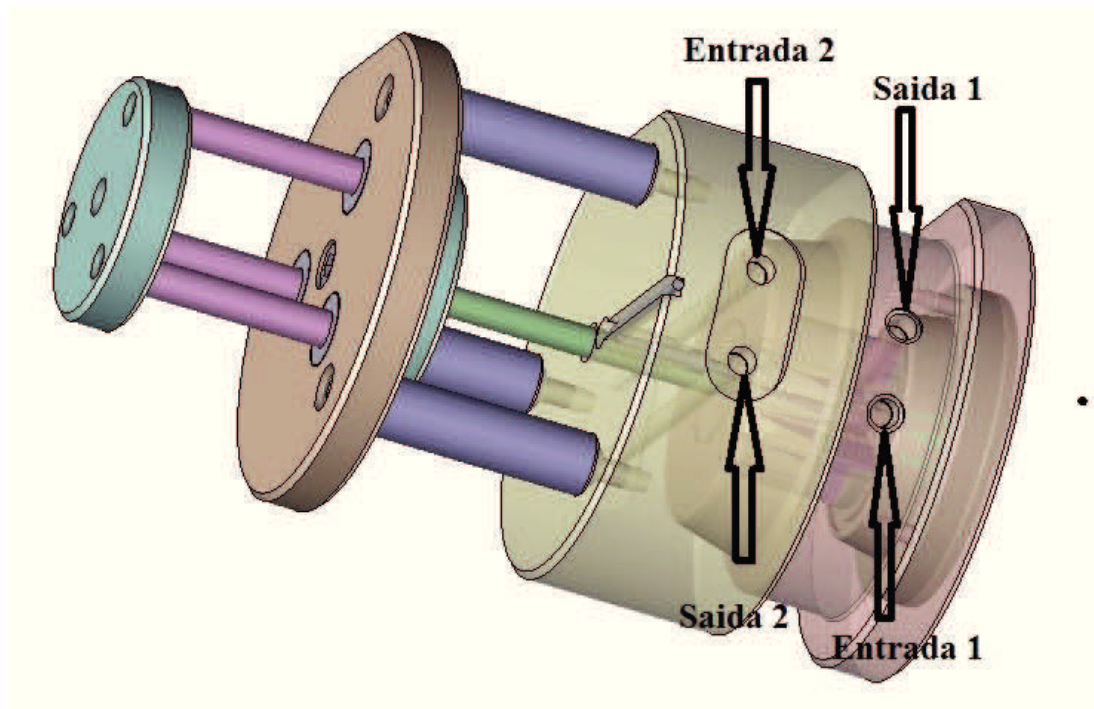


Figura 4.19 - Indicação de entradas e saídas de águas no molde.

4.2.7. Sistema e Controlo de temperatura do molde

Para verificação da temperatura do aço do molde nas zonas moldantes foi utilizado um termómetro de contacto da SKF, com a referência ThermoPen TMTP 200. Este termómetro permite medir numa gama de temperaturas entre -40 a 200°C. Este equipamento tem uma precisão $\leq 0.5^{\circ}\text{C}$ e utiliza uma sonda tipo K.

O objetivo de controlar a temperatura do aço é garantir igual temperatura nas zonas moldantes, tanto no ensaio com o macho/bucha sem revestimento PVD como no ensaio com o macho/bucha com revestimento PVD. Na figura 4.20 pode-se ver o termómetro a ser utilizado na medição de uma zona moldante.



Figura 4.20 - Termómetro utilizado para controlo da temperatura do aço.

4.2.8. Sistema de controlo de Pressão interna

Com o objetivo de medir a pressão interna de injeção, foi colocado no molde (figuras 4.22 e 4.23) um sensor piezoelétrico de pressão (marca Kistler com referência 6190 A; figura 4.21), com termopar integrado para pressão e medição da temperatura. Este sensor foi montado de forma a ficar em contato direto com a superfície moldante, por forma a ter contato direto com o material processado. Este sensor permite a leitura de pressões até 2 000 bares e a leitura de temperaturas até 450°C.

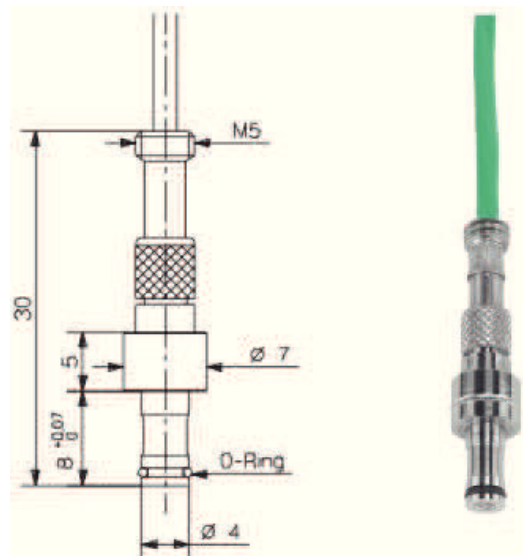


Figura 4.21 - Sonda de pressão Kistler Ref.6190.

Neste tipo de sensor, a deteção da pressão e da temperatura, é feita na superfície frontal que é transmitida a um elemento de medição em quartzo, que produz uma carga elétrica que é posteriormente transformada numa tensão a 10V. A temperatura do polímero é medida por

um termopar tipo K, também colocado na superfície frontal deste sensor [43].

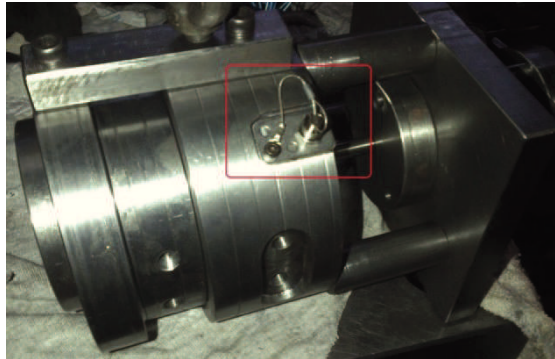


Figura 4.22 - Sensor Kistler aplicado no molde, zona de Ligação da ficha.

Para a localização do sensor no molde foi escolhida uma zona próximo do final de enchimento da peça, (a cerca de 80% do enchimento), conforme se pode verificar na figura 4.23. Esta localização foi considerada por ser de fácil execução e por ser após a zona onde foi executado o revestimento PVD.

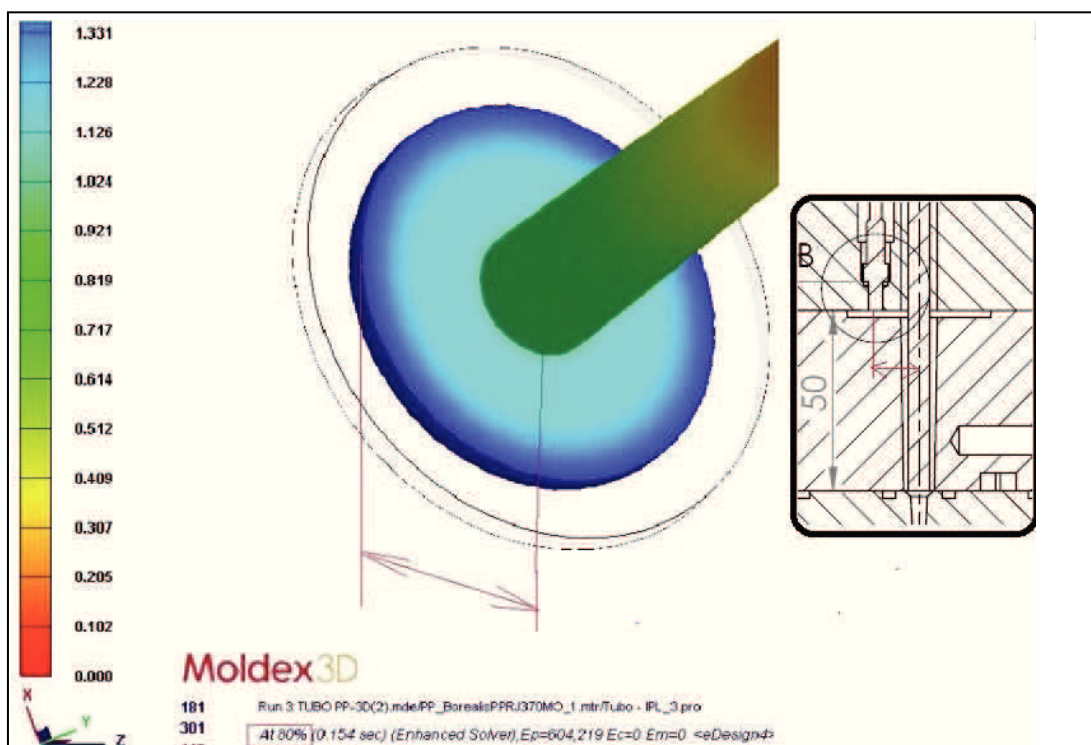


Figura 4.23 - Lado esquerdo enchimento a 80%, lado direito localização sensor no molde.

4.2.9. Processos utilizados no fabrico do molde

Neste estudo, o molde protótipo desenvolvido e fabricado é fundamental, sem o qual não seria possível realizar os ensaios para analisar a influência do tipo de revestimento das superfícies moldantes. Este molde deve ter um custo reduzido pois foi desenvolvido apenas para este efeito. Consequentemente, foi projetado de forma o mais simples possível, utilizando o equipamento mais rápido, convencional e económico para o seu fabrico. O torneamento foi a opção naturalmente escolhida para a maioria das maquinações efetuadas. Na figura 4.24, lado esquerdo, pode observar-se a maquinação de desbaste da peça cavidade (peça nº2).

No fabrico da maioria dos componentes do molde protótipo foram utilizados vários equipamentos de corte por arranque de aparas, nomeadamente torno convencional, centro de maquinação de fresagem (CNC), fresadora convencional e electroerosão por penetração, conforme se pode observar nas figuras 4.24, 4.25 e 4.26.

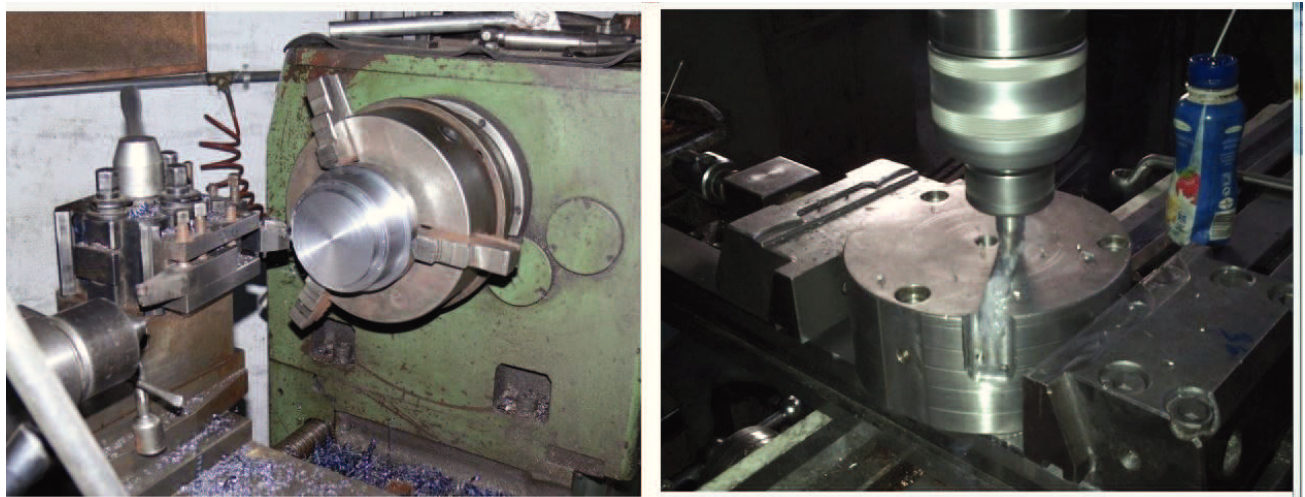


Figura 4.24 - Torno convencional e Fresadora convencional.



Figura 4.25 - Centro de Maquinação (CNC) e Electroerosão por penetração.



Figura 4.26 – Componentes do molde após processo de maquinação por torneamento.

~

Ensaio molde protótipo

Neste capítulo são referidos os procedimentos considerados no ensaio do molde protótipo por injeção, os equipamentos utilizados, os parâmetros de injeção considerados no processamento das peças plásticas e apresentados os resultados obtidos.

5.1. Máquina de injeção e periféricos

A máquina de injeção utilizada no processamento das peças plásticas foi uma **Arburg ALLROUNDER 270C Golden**, conforme se pode observar na figura 5.1.



Figura 5.1- Máquina de injeção utilizada no processamento das peças plásticas.

Na tabela abaixo (tabela 5.1) é possível observar algumas das especificações técnicas da máquina de injeção que foi utilizada neste trabalho e que tiveram que ser naturalmente consideradas no projeto do molde protótipo.

Tabela 5.1 - Especificações da máquina de injeção (Arburg ALLROUNDER 270C Golden).

Força de fecho	44 toneladas
Distância entre colunas	270mm x 270mm (10,63" x 10,63")
Curso de abertura	350mm (13,78")
Espessura máxima de molde	199.89mm (7,87")
Diâmetro do fuso	22mm (0,87")
Furo anel centragem lado injeção	Ø 101.6mm (4"± 0.002")

No processamento de peças plásticas, com o molde protótipo, poderia ter sido utilizada uma máquina com menor força de fecho, mas optou-se por utilizar a máquina Arburg ALLROUNDER 270C Golden, pelo facto de ser uma máquina recente, com facilidade de operação e precisão e, por outro lado, existir disponibilidade por parte da empresa de ensaios (proprietária da máquina) em colaborar neste estudo.

5.2. Montagem do molde na máquina de injeção

A montagem fez-se sem qualquer dificuldade pois o projeto foi elaborado tendo em consideração que este molde seria, naturalmente, ensaiado nesta máquina de injeção.

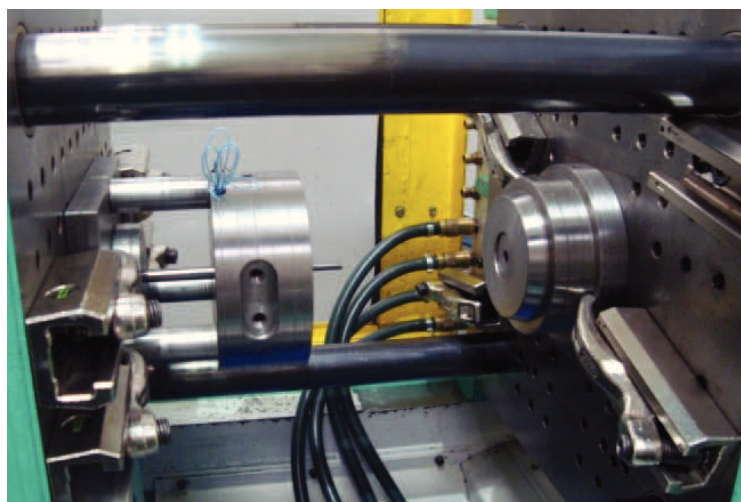


Figura 5.2 – Pormenor de montagem do molde protótipo na máquina de injeção.

5.3. Sistema de controlo de temperatura do molde

Por forma a ser possível o controlo da temperatura das águas e estabilizar as condições de processamento, foi utilizado um aparelho de refrigeração da marca Wittmann Tempro basic 140 (figura 5.3). No processamento das peças plásticas foi considerado uma temperatura de 20°C para o molde protótipo e o sistema de controlo deste equipamento manteve a temperatura constante de 20°C.



Figura 5.3 - Controlador de temperatura de água Wittmann Tempro basic 140.

Por forma a controlar a temperatura nas zonas moldante esta foi verificada com recurso a um termómetro de temperatura de marca **SKF Thermopen TMTP 200** (figura 5.4) e foi possível observar que era a temperatura pretendida (20°C). De acordo com as especificações técnicas do fornecedor do polímero utilizado poderia ter sido utilizadas temperaturas, para o processamento deste material polimérico, na gama de 15 a 40°C.



Figura 5.4 – Procedimento de verificação da temperatura nas zonas moldantes do molde protótipo.

5.4 Montagem do sensor Kistler no molde protótipo e sistema de leitura

O sensor Kistler foi montado no molde protótipo tendo em consideração os procedimentos indicados no manual e, também as indicações do fornecedor/representante da Kistler. Durante a montagem do sensor no molde, foi detetado um pequeno problema, o fio de ligação do sensor era demasiado comprido para o molde protótipo. Como este não poderia ser cortado para não inviabilizar a sua montagem em outros moldes (tendo em consideração que o sensor foi gentilmente cedido pelo representante da Kistler), foi necessário encontrar uma solução que não passasse pelo corte do fio. Assim, a solução encontrada e considerada, foi a de executar um furo que permitiu passar o fio várias vezes por dentro dele e desta forma reduzir o comprimento e manter o fio protegido, conforme se pode observar na figura 5.5.

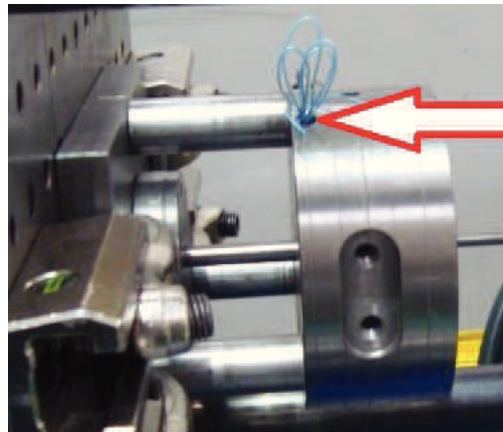


Figura 5.5 - Solução implementada por forma a “reduzir” comprimento do fio do sensor.

Para leitura dos dados do sensor foi utilizado o equipamento Kistler e *software* de leitura próprio pois a máquina de injeção utilizada na moldação das peças plásticas, não tem equipamento de leitura adequado para este tipo de sensores (figuras 5.6 e 5.7).

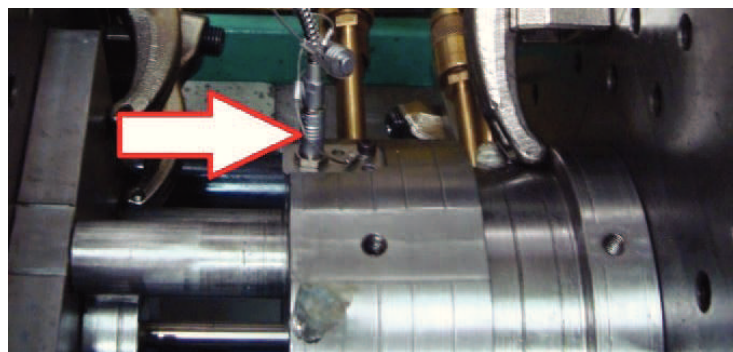


Figura 5.6 - Ficha do sensor Kistler para o sistema de leitura.

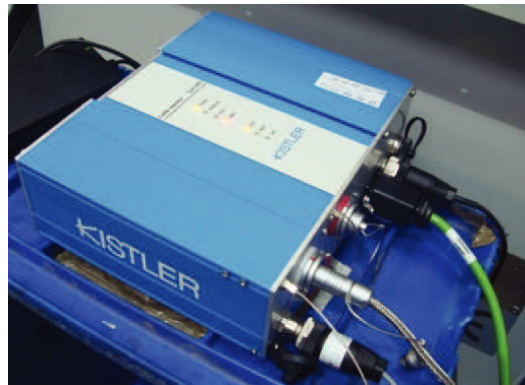


Figura 5.7 - Equipamento Kistler para leitura dos dados de leitura do sensor.

5.5. Ensaio do molde protótipo

No processamento das peças plásticas por injeção e tendo em consideração os objetivos que se pretendiam alcançar, foram considerados os seguintes procedimentos:

- Aumentar as pressões de injeção até se obter o peso máximo de peça. Quando o aumento da pressão de injeção deixar de aumentar o peso da peça considera-se como ótimos os valores de 1º e 2º pressão ou pressão de compactação;

- Considerar a velocidade de injeção relativamente baixa, por forma a ser mais fácil verificar a diferença dos tempos de injeção entre os dois elementos moldantes macho/bucha;

- Considerar o tempo de arrefecimento superior ao necessário, para que a peça tenha uma maior contração dentro da cavidade do molde e dessa forma aumentar a dificuldade de desmoldação;

- Considerar uma velocidade de extração baixa, por forma a ser mais fácil visualizar os valores da força de extração que é utilizada durante a desmoldação da peça plástica;

- Analisar a força de extração com molde em vazio, com ambos os dois elementos moldantes (macho/bucha), e verificar a força de extração na desmoldação das peças plásticas processadas. A diferença dos dois valores irá dar a força utilizada para desmoldar as peças plásticas processadas.

- Manter os parâmetros de processamento de injeção, no processamento das peças plásticas para ambos os elementos moldantes, macho/bucha temperado e nitrurado e para o macho/bucha revestido a PDV (MoldLub).

Nas figuras 5.8 e 5.9 é possível observar as peças processadas com canal de injeção e com o canal de injeção separado.



Figura 5.8 - Peças plásticas processadas com o canal injeção.



Figura 5.9 - Peças plásticas processadas com o canal injeção separado.

Para verificação do peso das peças processadas utilizou-se uma balança com precisão de 0,01gr, marca Kern e com referência CM 60-2N. O peso máximo obtido com peça plástica processada foi de 3,64gr (ver figura 5.10), sem canal injeção e o peso da peça, obtido com base no *software* de modulação 3d SolidWork, foi de 3,65gr.

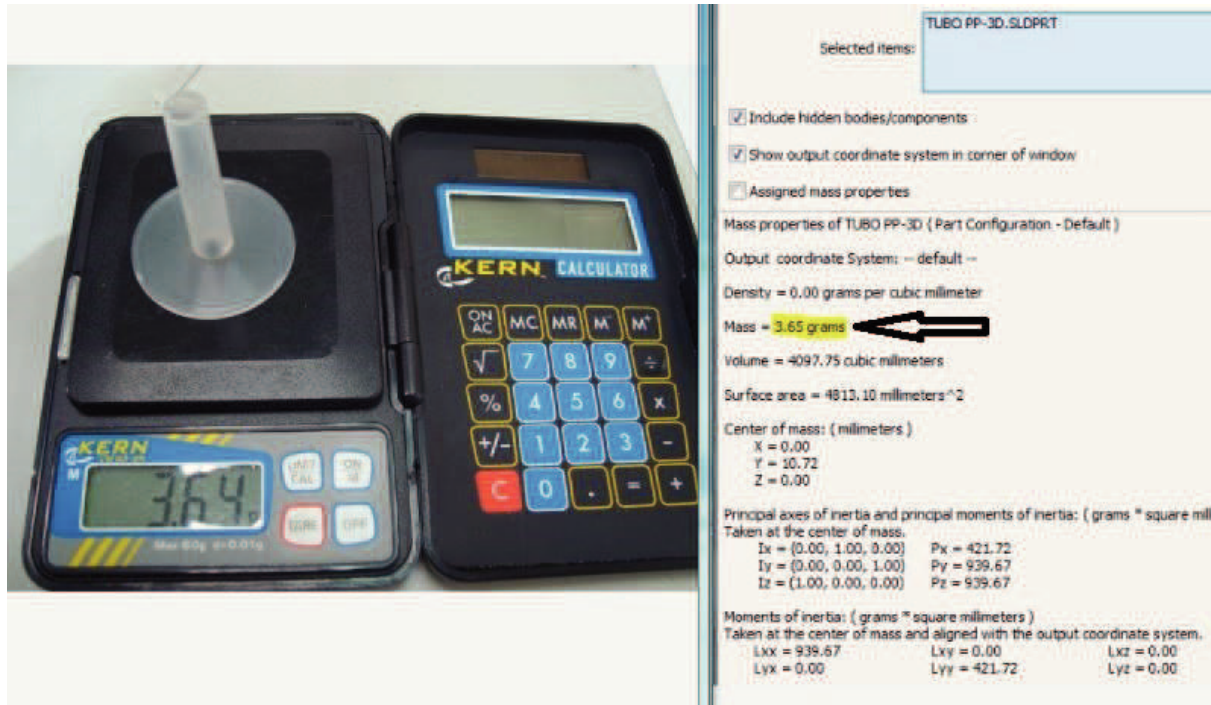


Figura 5.10 – Comparação do peso da peça plástica experimental e computacional.

5.6. Parâmetros utilizados na injeção das peças

Na tabela 5.2 pode-se ver os parâmetros de processamento, considerados e obtidos (a partir do software da máquina de injeção), no ensaio com o molde protótipo.

Tabela 5.2 - Parâmetros de injeção.

Relatório teste		Nome peça			
Data:	Número:	Tubo PP			
11-1-14	2				
Máquina:	Arburg Allrounder 270 C Golden	Ton:	44		
Pressão fecho:	15	Diâmetro fuso:	22		
Material:	Polipropileno	Marca:	Borealis		
Referência:	RJ 370MO				
Temperatura molde					
Temperatura no controlador:	20 C°				
Temperatura medida aço cavidade:	20 C°				
Temperatura medida aço bucha:	20 C°				
Temperatura medida no perno:	C°				
Temperatura do material na máquina (C°)					
Bico	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 4
220	210	200	190	--	--

Macho/bucha N°1 Temperado e nitrurado				Macho/bucha N°2 Com revestimento PVD MoldLub			
Injeção				Injeção			
	1ª	2ª			1ª	2ª	
Pressão	298		Espec.	Pressão	260		Espec.
Velocidade	30		mm/sg	Velocidade	30		mm/sg
Curso	5		mm/sg	Curso	5		mm/sg
Pós pressão				Pós pressão			
	1ª	2ª			1ª	2ª	
Pressão	350		Espec.	Pressão	380		Espec.
Velocidade	3		mm/sg	Velocidade	3		mm/sg
Curso	9		mm/sg	Curso	7,84		mm/sg
Curso Material:	20	mm		Curso Material:	20	mm	
Corte:	15	mm		Corte:	15	mm	
Almofada:	6,95	mm		Almofada:	7,16	mm	
Contra-pressão:	5	Bar		Contra-pressão:	5	Bar	
Descompressão:	5	mm		Descompressão:	5	mm	
Rotação fuso:	200	Rpm		Rotação fuso:	200	Rpm	
Tempos				Tempos			
Injecção	0,59	Seg.		Injecção	0,58	Seg.	
Pós -Pressão	6,5	Seg.		Pós -Pressão	6,5	Seg.	
Dosagem	2,52	Seg.		Dosagem	2,52	Seg.	
Arrefecimento	1,5	Seg.		Arrefecimento	1,5	Seg.	
Ciclo Total	31	Seg.		Ciclo Total	31	Seg.	

Após a permuta dos elementos moldantes, macho/bucha temperado e nitrurado e o macho/bucha revestido a PVD (MoldLub) foram registadas algumas alterações nos parâmetros de injeção, que foram registadas com o sensor de Pressão Kistler.

Nas figuras 5.11 e 5.12 pode-se observar as curvas típicas de variação de pressão de injeção versus tempo, obtida com base na leitura do sensor kistler para ambos os elementos moldantes macho/bucha considerados.



Figura 5.11 - Curvas típica de variação de pressão de injeção versus tempo no macho/bucha 1 (temperado e nitrurado).



Figura 5.12 - Curvas típica de variação de pressão de injeção versus tempo no macho/bucha 2, com revestimento PVD (MoldLub).

Com base na análise das curvas típicas de variação de pressão de injeção versus tempo, para os dois elementos moldantes pode-se observa o seguinte:

A pressão máxima de injeção (figura 5.11, macho/bucha 1, temperado e nitrurado) é de 195,2 Bar aos 4,79s (indicação no canto superior direito da curva). Na figura 5.12

(macho/bucha 2, com revestimento PVD, MoldLub), a pressão máxima de injeção é de 139,6 Bar aos 3,95s;

É possível observar a partir da análise das duas figuras (5.11 e 5.12) que no caso do elemento moldante macho/bucha 2 (com revestimento PVD, MoldLub) a pressão máxima é mais baixa (139,6 Bar) que a do caso do elemento moldante macho/bucha 1 (temperado e nitrurado que é 195, 2 Bar e que é alcançada mais cedo (aos 3,95s). Estas variações de pressão máximas de injeção foram, também registadas pelo sistema de controlo da máquina de injeção conforme é possível observar na tabela 19. Estes valores apresentam naturalmente a mesma tendência.

5.7. Força de extração para cada um dos elementos moldantes (macho/bucha)

No processamento das peças plásticas por injeção e tendo em consideração os objetivos que se pretendiam alcançar, foram também considerados os seguintes procedimentos para verificar a força de extração:

- Considerar uma velocidade de extração baixa, por forma a ser mais fácil visualizar os valores da força durante extração da peça;

- Verificar o valor da força de extração com molde em vazio, com ambas os elementos moldantes macho/bucha e verificar a força de extração em ciclo automático. A diferença dos dois valores irá dar a força utilizada para desmoldar a peça plástica.

Considerar uma força de extração máxima de 3kN (o valor mínimo possível da máquina é de 2.5kN). Assim irá ser necessário abrir a “página da extração” da máquina de injeção e, durante a extração, visualizar e registar os valores máximos atingidos de força de extração durante a desmoldação da peça.



Figura 5.13 – Valores de velocidade e de força de extração pedidos e obtidos (página de extração da máquina de injeção).

Na figura 5.13, no canto superior esquerdo da mesma, com o número 1, é possível observar a velocidade de extração pedida e a utilizada no ciclo de moldação, ou seja, foi considerado um valor de velocidade máxima de 10mm/s e é possível observar que a velocidade variou entre os 2 e os 10mm/s. Na situação 2, é possível observar o valor da força de extração pedida e utilizada durante o ciclo de moldação.

No ensaio com o molde protótipo considerou-se como valor máximo de força de extração o valor 3kN. Foram registados durante o ciclo de moldação (avanço da extração) os vários valores e obtido os valores máximos necessários ao estudo. Consequentemente foram registados os cinco valores máximos obtidos nos cinco ciclos em automático (ciclo de moldação) e registado o valor máximo de força de extração. Os valores máximos obtidos em cada um dos casos (elementos moldades macho/bucha) estão registados na tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Tabela de valores de extração obtidos durante o ensaio.

Valores máximos verificados na máquina de injeção durante a extração			
Com perno/bucha 1) temperado e nitrurado		Com perno/bucha 2) com PVD MoldLub	
Movimento em vazio	Durante extração	Movimento em vazio	Durante extração
0,41 kN	0,59 kN	0,20 kN	0,25 kN
Força utilizada para a extração da peça			
0,59 kN – 0,41 kN = 0,18 kN (18,46 Kg)		0,25 kN – 0,20 kN = 0,05 kN (5,1 Kg)	

(1kN = 101,97 Kg)

6. Análise e discussão de resultados

Para análise e discussão de resultados é necessário observar, quanto representa em termos de enchimento da peça processada, a zona que é feita pelo macho/bucha que foi revestido a PVD MoldLub. Também é importante saber a que percentagem do enchimento da peça processada começa a ser feita a leitura pelo sensor.

Pela análise moldflow verificou-se que o enchimento da peça e canal de injeção é repartido da seguinte forma, 12% corresponde ao canal injeção; 41% corresponde à zona do perno/bucha; 47% ao resto da peça, conforme se pode observar na figura 6.1.

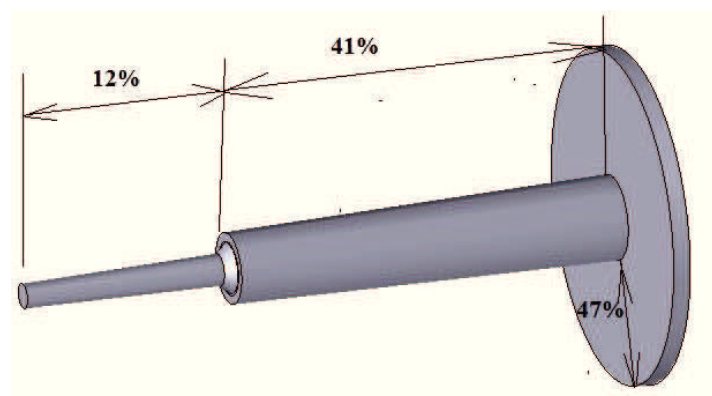


Figura 6.1 - Divisão da peça e grito por percentagem.

A localização do sensor na peça plástica processada, conforme já referido no ponto 4.2.8, encontra-se (+/-) a 80% do enchimento da peça, na figura 6.2 é visível a localização do sensor na peça plástica processada e está assinalado, a vermelho, o percurso do polímero até chegar ao sensor, ou seja irá passar toda a zona dos 41% que está revestida a PVD.

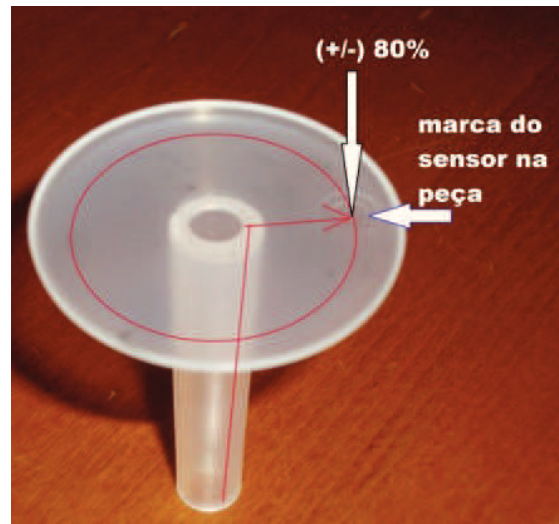


Figura 6.2 - Localização do sensor na peça plástica.

A zona revestida a PVD que representa 41% é inferior a metade da peça plástica, em termos de enchimento não é o ótimo, o ideal para se tirar melhores conclusões seria ter a totalidade dos elementos moldantes revestido, mas, relativamente a forças de extração não é relevante pois a força a vencer durante extração da peça situa-se nos 41% da peça processada que está revestido, o topo da peça não é relevante para análise das forças de extração.

Observou-se, nas forças de extração, cerca de 70% menos quando utilizado o macho/bucha revestido a PVD MoldLub, relativamente a pressões de injeção também se verificou que é utilizada menos pressão de injeção para encher a cavidade do molde e também se verificou que o enchimento da peça é mais rápido, o material chegou mais rápido ao sensor quando utilizado o macho/bucha com revestimento PVD, Mold Lub.

7. Conclusões e trabalhos futuros

7.1. Conclusões

- Foi desenvolvido e fabricado um molde protótipo para o processamento de peças plásticas em polipropileno por injeção, com o objetivo de avaliar o comportamento destas na extração com diferentes revestimentos superficiais no elemento moldante macho/bucha;
- Foi projetada uma peça plástica com dificuldades típicas de extração e representativa de peças plásticas mais complexas processadas por injeção;
 - O molde, foi projetado para ter uma concepção o mais simples possível, mas ter os mesmos requisitos de molde de produção em serie, com os mesmos sistemas funcionais. O molde foi instrumentado com um sensor Kistler por forma a avaliar as pressões internas de injeção no tempo de ciclo de moldação;
 - A análise dos resultados obtidos no processamento das peças plásticas com diferentes tipos de revestimentos dos elementos moldantes, permitiu avaliar o comportamento na extração destes dois tipos de revestimento utilizados. No caso do revestimento PVD “MoldLub” (relativamente ao revestimento temperado e nitrurado) foi possível observar:
 - uma significativa diminuição da força necessária para a extração da peça processada;
 - uma significativa diminuição da força de extração em vazio;
 - um enchimento mais rápido da peça plástica;
 - um menor tempo de ciclo;
 - uma menor pressão de enchimento da peça plástica;
 - uma diminuição da rugosidade decorrente do processo PVD;

7.2. Desenvolvimentos futuros

- Realizar este estudo com peças do mesmo tipo mas com maiores dimensões e, também em peças com ribes profundos;
- Estender este estudo a outros materiais termoplásticos;
- Seria interessante, ser possível implementar este tipo de estudos, com diversos materiais e tipos de revestimento a partir de *softwares* de simulação computacionais.

Referências

- [1] Beira Eduardo, Crespo Cristina, Gomes Nunes, Menezes Joaquim, Dos moldes à engenharia de produto, a trajectória de um cluster. http://in3.dem.ist.utl.pt/msc_04history/aula_6_a.pdf Consulta a 2-2-11
- [2] Beira, E. J., & Menezes, J. M. (1986). Inovação e indústria de moldes em Portugal: a introdução do CAD/CAM/CAE nos anos 80. http://in3.dem.ist.utl.pt/msc_04history/aula_9_b.pdf consulta dia 5-2-11
- [3] Soares, Pinto (1992). Aços: características, tratamentos, Porto: Livraria Livroluz. pp. 32-48
- [4] Rees, Herbert (1995). Mold Engineering. Munich, Vienna, New York, Hanser. pp 399-402
- [5] Smith William (2000). Princípios da Ciência e Engenharia dos Materiais, Mc Graw-Hill pp 496-497, 508-524
- [6] Honeycombe R. H. K. (1982) AÇOS Microestrutura e Propriedades, Fundação Calouste Gulbenkian pp 175-199
- [7] Rajan T.V.; Sharma C.P ; Sharma Ashok (2004) Heat Treatment, principles and techniques, Department of Metallurgical Engineering Malaviya Regional Engineering College, Jaipur pp 178-201
- [8] Chiaverini, Vicente (1986) Tecnologia Mecânica, processos de fabricação e tratamento, Vol II, 2ª edição, São Paulo, McGraw-Hill pp 240-247, 255-283
- [9] 1º Encontro de Integrantes da Cadeira Produtiva de Ferramentas, Moldes e Matrizes – 28-10-03 a 30-10-03 em São Paulo SP, Engenharia de Aplicações – Cascadura Industrial S.A (<http://www.saletto.com.br/italocoutinho/arquivos/abm2003cd-artigo.PDF>) consulta 12-03-2011
- [10] B.Berghaus, Improvements in and Relating to the Coating of Articles by Means of Thermally Vaporised Material, UK Patent 510, 993
- [11] D.M. Mattox, (1965) Ion Plating, Sandia Laboratories Report SCR-65, Albuquerque
- [12] D.M. Mattox, (1998) Handbook of physical vapor deposition (PVD) processing, United States of America, Noyes Publications pp 30-35
- [13] Descrição dos processos de revestimento por adição de camadas, CIMM, Centro de Informação Metal Mecânica, http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6376-descricao-dos-processos-de-revestimento-por-adicao-de-camadas Consulta a 25-4-11

- [14] Pinedo, Carlos Eduardo (2004) Tratamentos superficiais para aplicações tribológicas, Journal of Materials
- [15] A. Mathews, (1996) Protective Coating and Thin Films, NATO-ASI
- [16] Centimfe, (2003) Manual do projectista para moldes de injeção de plástico, Tipificação dos moldes , Volume 3 pp 41-62
- [17] Centimfe, (2003) Manual do projectista para moldes de injeção de plástico, Tipificação dos moldes , Volume 6 pp 19-46
- [18] Wang, Y, (1997), A study of PVD coating and die materials for extended diecasting die life, Surface and Coating Technology, Vol. 94/95 pp 60
- [19] Wild, R, (1996), Revestimento PVD prolonga a vida de moldes metálicos, fundição e serviços, pp 34-41
- [20] Pimenta, Marcelo Dornelles; Vencovsky, Paulo Konrad; Yuhara, Daniel Atsuhito, Aplicação de revestimentos PVD em moldes de injeção de alumínio, Setor de Revestimentos, Brasimet Comercio e Indústria S.A
- [21] O. Knotek, A. Schrey, (1995), Handbook of thin Film Process Technology, IOP Publishing Ltd.
- [22] I.Milosev, H.H. Strehblow, B. Navinsek, (1995) Surface & Coatings Technology pp 74-75, 897
- [23] R.F.Brunshah (Ed.) (1982), Deposition technologies for films and coatings, Noyes, Park Ridge, NJ
- [24] Kaiser, O, (1995), PVD Beschichtungen schützen Werkzeug und Schmelze, Kunststoffe, Vol 85, pp 898-904
- [25] <http://prirev.com> Consulta a 19-10-13
- [26] Instituto de Metais não Ferrosos <http://www.icz.org.br/niquel> Consulta a 26-10-13
- [27] Costa, R. (2010) “Estudo de lubrificação híbrida usando filmes de DLC com lubrificantes nas áreas espacial, automotiva e médica” Dissertação de doutoramento. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São Paulo.
- [28] Bhushan, B. (2000) “*Tribology: Friction, Wear, and Lubrification*” em: Drof RC (ed.) The Engineering Handbook, RCR Press LLC
- [29] Tichy, J., Meyer, D. (2000) “*Review of solid mechanics in tribology*” International Journal of Solids and Structures 37 391-400
- [30] Bushan, B. (1999) “*Principles and applications of tribology*”, John Wiley & Sons, inc, New York
- [31] Grill, A. (1993) “Review of the tribology of Diamond-like carbon” Wear 168 143-153
- [32] Sedlacek, M., Podgornik, B., Vizintin, J. (2008) “Tribological proprieties of DLC coatings and comparison with test results: Development of a database”, Material Characterization 59 151-161
- [33] www.teandm.pt Consulta a 26-10-13
- [34] www.mold-tech.com Consulta a 26-10-13

- [35] www.estoppey-addor.ch Consulta a 26-10-13
- [36] www.richterprecision.com Consulta 2-11-13
- [36] www.thomasnet.com Consulta 2-11-13
- [37] Engº. Ind. Francesco Provenza (1976) Moldes para plásticos, Editor F. Provenza
- [38] SACCHELLI, Carlos Maurício.(2007) sistematização do processo de desenvolvimento Integrado de Moldes de Injeção de Termoplásticos, Universidade Federal de Santa Catarina pp 62
- [39] MHS mold hot runner solutions www.moldhotrunnersolutions.com Consulta 30-11-13
- [40] L.Sors, L.Bardócz, I. Radnóti (2002) Plásticos, moldes e Matrizes, Hemus S.A pp 133-224
- [41] <http://www.procomps.com> Consulta a 30-11-13
- [42] ROSATO,D.;ROSATO,V.;DOMINICK,V. (1995) Injection moulding handbook. New York: Chapman & Hall
- [43] www.kistler.com Consulta a 01-12-13
- [44] Menges, G., Bangert, H. (1981)- Measurement of coefficients of static friction as means of determining opening and demoulding forces in injection moulds. Kunststoffe. vol. 71
- [45] 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;
- [46] Mary E. Kinsella M.S. (2004), ejection forces and static friction coefficients for rapid tooled injection mold insert dissertation; Ohio State University
- [47] A. J. Pontes, University of Minho, (2002), Shrinkage and Ejection forces in injection Moulded Products
- [48] Michaeli,Greif,Kaufmann,Vossebürger (2005) “Tecnologia dos Plásticos”, Editora Edgard Blücher Ltda
- [49] Sullivan, James F. (1988)Technical Physics USA:Wiley
- [50] International Organization for Standardization. ISO 14020: (2000)environmental labels and declarations – general principles. 2nd ed. Genève: ISO, 5 p.
- [51] www.chemtrend.com Consulta 22-12-13
- [52] Centimfe, (2003) Manual do projectista para moldes de injeção de plástico, Tipificação dos moldes , Volume 6 pp 13-59
- [53] www.teandm.pt consultada a 23-12-2013
- [54] Cefamol, Associação Nacional da Indústria de Moldes, A Indústria Portuguesa de Moldes 2012
- [55] www.cienciahoje.pt (Consulta 12-11-14) CiênciaHoje, Jornal de Ciência, Tecnologia e Empreendedorismo

[56] pt.unibrandrer.com (consulta a 12-01-14)

[57] www.cimm.com (consulta a 13-01-14)

[58] Centimfe, (2003) Manual do projectista para moldes de injeção de plástico, Tipificação dos moldes , Volume 2 pp 13-17

[59] Centimfe, (2003) Manual do projectista para moldes de injeção de plástico, Tipificação dos moldes , Volume 1 pp 44-51

[60] www.thyssenktupp.com (consulta a 13-01-14)

[61] www.borealisgroup.com (consulta a 13-01-14)