



Reprodutibilidade de blocos moldantes de moldes híbridos em moldação por injeção de plásticos

Mestrado em Engenharia Mecânica – Produção Industrial

Bruno Miguel Rodrigues Carreira

Leiria, julho de 2021



Reprodutibilidade de blocos moldantes de moldes híbridos em moldação por injeção de plásticos

Mestrado em Engenharia Mecânica – Produção Industrial

Bruno Miguel Rodrigues Carreira

Trabalho de Dissertação realizado sob a orientação do Professor Doutor Pedro Martinho e do Professor Doutor Mário Correia da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria

Leiria, julho de 2021

Originalidade e Direitos de Autor

O presente relatório de dissertação é original, elaborado unicamente para este fim, tendo sido devidamente citados todos os autores cujos estudos e publicações contribuíram para o elaborar.

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição de que seja mencionado o Autor e feita referência ao ciclo de estudos no âmbito do qual o mesmo foi realizado, a saber, Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica – Produção Industrial, no ano letivo 2020/2021, da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, Portugal, e, bem assim, à data das provas públicas que visaram a avaliação destes trabalhos.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Agradecimentos

Aos meus orientadores, Doutor Pedro Martinho e Doutor Mário Correia, docentes do departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Politécnico de Leiria, por todo o conhecimento, disponibilidade, apoio e orientação na realização desta dissertação.

À Escola Superior de Tecnologia e Gestão (ESTG) por ter proporcionado as condições para a realização deste estudo, nomeadamente na aquisição da resina e dos blocos moldantes, assim como o acesso a todos os equipamentos disponíveis nos laboratórios.

À Engenheira Fernanda Carvalho por todo o apoio e orientação na parte prática, quer no Laboratório de Fabrico Rápido da ESTG para a construção das zonas moldantes, quer no Laboratório de Tecnologia Mecânica para os ensaios de injeção.

À Lismolde, Lda, em particular ao Engenheiro Diogo Pombeiro, por se ter disponibilizado para a construção de um dos blocos moldantes.

À empresa 3D *Polyscan*, em especial ao senhor Abel Laranjeiro, por todo o trabalho realizado no controlo dimensional dos blocos moldantes desta dissertação.

Ao meu colega e amigo, Diogo Parreiras, por toda a ajuda e disponibilidade na realização dos trabalhos laboratoriais.

Aos meus colegas de trabalho por todo o conhecimento e experiência transmitidas ao longo desta dissertação.

Aos meus pais que durante todo o meu percurso académico sempre acreditaram em mim e me mostraram que o sucesso não se alcança sem esforço, dedicação, humildade e muito trabalho.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Resumo

Nos últimos anos a indústria de moldes e plásticos sofreu uma evolução significativa quer a nível de processos quer a nível de produtos, devido ao aumento da exigência e das necessidades dos clientes. Até há poucos anos, as ferramentas (moldes) eram construídas exclusivamente a partir de processos convencionais (fresagem, furação, eletroerosão), no entanto, esta realidade sofreu uma profunda alteração fruto da redução de custos e prazos, havendo, por isso, necessidade de procurar tecnologias alternativas que respondam a este aumento de exigência, permitindo um *time-to-market* consideravelmente inferior. O termo *Rapid Tooling* (RT) representa de uma forma geral este conjunto de técnicas.

O conceito de molde híbrido surge com o progresso das técnicas de fabrico, permitindo combinar os processos de maquinaria convencionais com as tecnologias de RT. Os moldes híbridos são ferramentas em que a sua estrutura é fabricada através de técnicas e materiais convencionais, enquanto as zonas moldantes são obtidas através de processos de RT.

O objetivo deste trabalho consiste em avaliar a reprodutibilidade de blocos moldantes de moldes híbridos na moldação por injeção. Para isso, serão produzidos blocos moldantes bucha com recurso a processos/materiais alternativos aos convencionais (aço e alumínio). O vazamento de resina *epoxy* com 60% de carga de alumínio e o FDM serão os processos utilizados na obtenção dos blocos moldantes bucha. Numa fase posterior, estas buchas serão utilizadas na injeção de peças plásticas com materiais amorfos e semicristalinos. Tendo em conta os resultados obtidos, procurar-se-á estabelecer uma relação entre a vida útil da zona moldante com os materiais utilizados (quer na sua construção, quer na injeção) e com as variáveis de processamento usadas. Isto é, será feita uma avaliação da reprodutibilidade de cada ferramenta, ou seja, a sua capacidade de reproduzir peças dentro de tolerâncias admissíveis e com boa qualidade.

As conclusões obtidas neste trabalho permitem verificar que a utilização de resina *epoxy* com carga de alumínio na construção de blocos moldantes de moldes híbridos é uma solução alternativa para a obtenção de pequenas/médias séries de moldações. Apesar dos defeitos superficiais em dois dos blocos utilizados e da consequente perda de reprodutibilidade mais cedo do que previsto, a produção de mais de 2000 peças de plástico sem variabilidade geométrica e dimensional nestes blocos e injetando materiais distintos constitui um claro indicador de que este processo é viável para uma média série. Por outro lado, os blocos construídos em FDM apenas possibilitaram a obtenção de um baixo número de peças protótipo, dada a reduzida temperatura de transição vítrea (T_g) dos materiais utilizados.

Palavras-chave: Moldes Híbridos, Blocos Moldantes, Resina *Epoxy*, Canais Conformáveis, Moldação por Injeção, Reprodutibilidade, Desgaste

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Abstract

In recent years, the molds and plastics industry has undergone a significant evolution both in terms of processes and in terms of products, due to the increased demand and needs of customers. Until a few years ago, tools (molds) were built exclusively from conventional processes (milling, drilling, electro-erosion), however, this reality has undergone a profound change because of the reduction in costs and deadlines. look for alternative technologies that respond to this increased demand, allowing a considerably shorter time-to-market. The term Rapid Tooling (RT) generally represents this set of techniques.

The concept of hybrid mold emerges with the progress of manufacturing techniques, allowing to combine conventional machining processes with RT technologies. Hybrid molds are tools in which their structure is manufactured using conventional techniques and materials, while the molding zones are obtained through RT processes.

The main goal of this work is to evaluate the reproducibility of molds of hybrid molds in injection molding. For this, molding blocks cores will be produced using processes / materials alternative to conventional ones (steel and aluminium). The casting of epoxy resin with 60% aluminium load and FDM will be the processes used to obtain the molding blocks. At a later stage, these bushings will be used in the injection of plastic parts with amorphous and semicrystalline materials. Considering the results obtained, an attempt will be made to establish a relationship between the useful life of the molding area with the materials used (whether in its construction or injection) and with the processing variables used. That is, an evaluation will be made of the reproducibility of each tool, that is, its ability to reproduce parts within admissible tolerances and with good quality.

The conclusions obtained in this work allow us to verify that the use of epoxy resin with aluminium filler in the construction of molding blocks for hybrid molds is an alternative solution for obtaining small/medium molding series. Despite the surface defects in two of the blocks used and the consequent loss of reproducibility more sooner than expected the production of more than 2000 plastic parts without geometric and dimensional variability in these blocks and injecting different materials is a clear indicator that this process is viable for a medium series. On the other hand, the blocks built in FDM only made it possible to obtain a low number of prototype parts, given the reduced glass transition temperature (T_g) of the materials used.

Keywords: *Hybrid Moulds, Moulding Blocks, Epoxy Resin, Conformable Channels, Injection, Reproducibility, Wear*

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Índice

Originalidade e Direitos de Autor	iii
Agradecimentos	v
Resumo	vii
Abstract	ix
Lista de Figuras	xiii
Lista de tabelas	xvii
Lista de siglas e acrónimos.....	xix
1. Introdução	1
2. Revisão Bibliográfica.....	3
2.1. Moldação por Injeção.....	3
2.1.1. Processo	3
2.1.2. Máquina de Injeção	3
2.1.3. Ciclo de Moldação.....	4
2.2. Moldes Híbridos.....	7
2.3. Processos de Fabrico para Blocos Moldantes	9
2.3.1. Moldação em Resina Vazada (<i>Cast Resin Tooling</i>)	10
2.3.2. Impressão a jato de tinta (IJP)- <i>PolyJet</i>	12
2.3.3. <i>Fused Deposition Modeling</i> (FDM)	16
2.4. Aplicação do Fabrico Aditivo nos Moldes.....	17
2.5. Desgaste em Blocos Moldantes de Moldes Híbridos.....	23
3. Trabalho Experimental.....	33
3.1. Peça de estudo	33
3.2. Projeto do Molde	34
3.3. Simulação Numérica Computacional	36
3.4. Construção dos Blocos Moldantes	43
3.4.1. Vazamento de Resina <i>Epoxy</i> com Carga.....	43
3.4.2. <i>Fused Deposition Modelling</i> (FDM)	47
3.5. Controlo Dimensional dos Blocos Moldantes.....	50

3.6. Ensaio de Injeção	54
4. Discussão de Resultados.....	55
4.1. Bloco Epoxy com Alumínio-Injeção de PP Moplen HP500N.....	55
4.2. Bloco Epoxy com Alumínio-Injeção de PP Hostacom G2NO2	57
4.3. Bloco Epoxy com Alumínio-Injeção de Poliestireno (PS)	60
4.4. Bloco FDM (Original)-Injeção de PP Moplen HP 500N	62
4.5. Bloco FDM (Modificado)-Injeção de PP Moplen HP 500N	66
5. Conclusão	69
6. Trabalhos Futuros.....	71
7. Referências Bibliográficas	73
Anexos	77

Lista de Figuras

Figura 1 - Constituição de uma máquina de injeção (Cruz, 2004)	4
Figura 2 - Ciclo de moldação (Broeck, 2017)	5
Figura 3 - Conceito de molde híbrido (Pontes, Queirós, & et al., 2005)	7
Figura 4 - Classificação de RT (Chua, Hong, & Ho, 1999)	9
Figura 5 - Diagrama de vazamento de resinas (Vasconcelos, Lino, Batista, & Neto, 2006)	11
Figura 6 - Princípio da tecnologia <i>PolyJet</i> (Barclift & Williams, 2012)	12
Figura 7 - Bucha construída em <i>PolyJet</i> (Stratasys, 2016)	13
Figura 8 - Exemplo 2 testado pela <i>Grundfos</i> (Otte, Grundfos, & Stratasys, 2015)	15
Figura 9 - Esquema da cabeça de extrusão (Fernandes, 2016)	16
Figura 10 - Controlo de temperatura adequado vs deficitário (Dang & Park, 2012)	17
Figura 11 - Canais de controlo de temperatura convencionais vs conformáveis (TEXER, s.d.)	18
Figura 12 - Caso de estudo: 3D (esquerda) e 2D (direita) (Bom, 2014)	19
Figura 13 - Canais convencionais vs Canais conformáveis da cavidade (Bom, 2014)	19
Figura 14 - Canais convencionais vs Canais conformáveis da bucha (Bom, 2014)	20
Figura 15 - Temperatura na superfície da peça no final do arrefecimento para os 2 modelos (Bom, 2014) ...	21
Figura 16 - Eficiência dos canais para os 2 modelos (Bom, 2014)	21
Figura 17 - Tempo total de arrefecimento para os 2 modelos (Bom, 2014)	22
Figura 18 - Tempo de ciclo total para os 2 modelos (Bom, 2014)	22
Figura 19 - Estimativa da série obtida por ferramenta, tendo em conta o termoplástico (Stratasys, 2016)	25
Figura 20 (a) e (b) Erosão da ferramenta após 6 ciclos; (c) imagem ampliada da área erodida (Bagalkot, Pons, Symons, & Clucas, 2019)	27
Figura 21 - Desgaste da bucha resultante da remoção progressiva de partículas (Bagalkot, Pons, Symons, & Clucas, 2019)	28
Figura 22 - Artigo moldado com material da bucha (Bagalkot, Pons, Symons, & Clucas, 2019)	29
Figura 23 - Falha na parede do canal de injeção (Bagalkot, Pons, Symons, & Clucas, 2019)	30
Figura 24 - a) Castelo de material antes da moldação; b) Falha devido à elevada pressão de injeção (Bagalkot, Pons, Symons, & Clucas, 2019)	30
Figura 25 - a) Fratura de uma extremidade durante a extração; b) Canto lascado devido à pressão de injeção (Bagalkot, Pons, Symons, & Clucas, 2019)	31
Figura 26 - Geometria e dimensões da peça de plástico em estudo	33

Figura 27 - Molde 3D: Extração (esquerda) e Injeção (direita)	35
Figura 28 - Chapa das buchas adaptada	35
Figura 29 – Resultado da simulação do tempo de enchimento	37
Figura 30 - Temperatura na superfície da peça após a fase de arrefecimento	38
Figura 31 - Eficiência dos canais de controlo de temperatura convencionais	38
Figura 32 - Tempo de controlo de temperatura do modelo convencional	39
Figura 33 - Temperatura na superfície da peça após arrefecimento	40
Figura 34 - Eficiência dos canais de controlo de temperatura conformáveis	40
Figura 35 - Tempo de arrefecimento do modelo com canais conformáveis	41
Figura 36 - Pressão de injeção para PP <i>Moplen</i> HP500N (esq) e PP <i>Hostacom</i> G2N02 (dir)	42
Figura 37 - Modelo (<i>master</i>) utilizado	43
Figura 38 - Esquema do molde de silicone e respetiva linha de junta (<i>Parting Line</i>)	44
Figura 39 - Molde de silicone durante o processo de cura	45
Figura 40 - Bloco moldante com pó de alumínio obtido	46
Figura 41 - Bloco moldante em FDM	47
Figura 42 - Bloco em FDM durante a operação de acabamento	47
Figura 43 - Bloco moldante aquando da sua construção	48
Figura 44 - Bloco moldante com novas <i>features</i>	49
Figura 45 – Controlo dimensional de um bloco moldante	50
Figura 46 - Relatório do controlo dimensional de um dos blocos moldantes I	51
Figura 47 - Relatório do controlo dimensional de um dos blocos moldantes II	51
Figura 48 - Cotas de referência inspecionadas da peça plástica	52
Figura 49 - Controlo dimensional de uma das moldações no <i>INSPECTplus</i>	53
Figura 50 - Máquina de injeção <i>Lien Yu</i> D80	54
Figura 51 - Extrator central com zona negativa	54
Figura 52 – Desgaste após 1750 moldações: (a) Deterioração Superficial; (b) Fissura Superficial	56
Figura 53 - Variação das espessuras “A” e “C” ao longo do tempo	56
Figura 54 – Evolução do desgaste na zona do canal da injeção após 250 (a), 500 (b), 750 (c) e 1080 (d) moldações	57
Figura 55 – Remoção de partículas “ <i>Pitting</i> ”	58

Figura 56 - Variação das espessuras “A” e “C” ao longo do tempo.....	58
Figura 57 - Variação da massa ao longo do tempo.....	59
Figura 58 – Desgaste após 1080 moldações.....	59
Figura 59 – Evolução dos defeitos superficiais após 5 (a) e 500 (b) moldações.....	60
Figura 60 - Fratura da extremidade no canto superior esquerdo.....	61
Figura 61 - Variação das espessuras "A" e "C" ao longo do tempo.....	61
Figura 62 - Bloco FDM ajustado à chapa do molde.....	62
Figura 63 - Desgaste do bloco após 6 (a) e 10 (b) ciclos.....	62
Figura 64 – Fenómeno de adesão entre artigo e bloco (a); Deformação da superfície ao 13º ciclo (b).....	63
Figura 65 - Bloco após 15 ciclos de moldação.....	64
Figura 66 - Variação das espessuras “A” e “C” ao longo do tempo.....	64
Figura 67 - Variação da massa ao longo do tempo.....	65
Figura 68 - Estado final da superfície moldante.....	65
Figura 69 - Bloco FDM montado na chapa 3.....	66
Figura 70 - Desgaste do bloco após 6 (a) e 10 (b) ciclos.....	66
Figura 71 – Bloco após 16 ciclos de moldação.....	67
Figura 72 - Variação das espessuras “A” e “C” ao longo do tempo.....	68
Figura 73 - Variação da massa ao longo do tempo.....	68
Figura 74 - Proposta de melhoria da modelação do bloco moldante.....	71

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Lista de tabelas

Tabela 1 - Dados da malha utilizada na simulação do modelo convencional.....	36
Tabela 2 - Propriedades do termoplástico utilizado nas simulações.....	36
Tabela 3 - Principais variáveis de processamento	37
Tabela 4 - Variáveis de processamento para PP <i>Moplen</i> HP500N.....	42
Tabela 5 - Principais características da resina SR 1660 e endurecedor SD 1305.....	45
Tabela 6 - Controlo dimensional das moldações obtidas com o molde em aço	53

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Lista de siglas e acrónimos

ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
Al	Alumínio
AM	<i>Additive Manufacturing</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
FA	Fabrico Aditivo
FDM	Fused Deposition Modelling
PA	Poliamida
PC	Policarbonato
PE	Polietileno
PP	Polipropileno
PR	Prototipagem Rápida
PS	Polistireno
RP	<i>Rapid Prototyping</i>
RT	<i>Rapid Tooling</i>
SLS	<i>Selective Laser Sintering</i>
STL	<i>Structured Triangular Language</i>
T _g	Temperatura de Transição Vítea

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

1. Introdução

O constante desenvolvimento tecnológico e o aumento da exigência do mercado têm conduzido à diminuição do ciclo de vida de todos os produtos. A constante procura de diferenciação por parte das empresas, seja na fase de desenvolvimento ou na conceção final de produtos, tem-se revelado o grande objetivo/desafio. Para isso, o acesso a produções unitárias ou de pequenas séries torna-se fundamental no processo de desenvolvimento de novos produtos. Deste modo, é necessário recorrer a técnicas e materiais alternativos que possibilitem às empresas aceder, numa fase inicial, a modelos que permitam a realização de testes de funcionalidade e avaliação de *design*.

Surge o conceito de *Rapid Tooling* (RT) que consiste no fabrico total ou parcial de ferramentas através de processos não convencionais. Inerente ao RT e à crescente procura de séries reduzidas de produtos, surge a noção de molde híbrido que permite combinar os processos de maquinaria convencionais com as tecnologias de RT. Dado que este tipo de moldes é produzido em materiais alternativos, ou seja, materiais mais macios do que os convencionalmente utilizados (aço ou alumínio), isto conduz a que as propriedades mecânicas e térmicas sejam inferiores às de um molde convencional. Deste modo, torna-se pertinente estudar a utilização de técnicas que permitem a produção de zonas moldantes alternativas e, conseqüentemente, a aquisição de um número limitado de moldações.

A moldação por injeção é um processo bastante utilizado para fabricar componentes em série. De modo a aumentar a produtividade e a qualidade das amostras obtidas, é essencial desenvolver um sistema que permita regular de forma eficaz a temperatura dos moldes, otimizando uma das fases mais importantes do ciclo de injeção, o controlo de temperatura. No entanto, este processo pode tornar-se um verdadeiro desafio dado que se tem verificado um crescente aumento da complexidade geométrica das peças. Deste modo, os canais conformáveis constituem uma excelente opção porque permitem uniformizar o processo de arrefecimento e, conseqüentemente, reduzir o tempo de ciclo uma vez que esta configuração de canais permite manter uma distância constante para a superfície moldante.

Um dos conceitos associados à indústria de moldes que deve ser esclarecido é a utilização dos termos “refrigeração”, “arrefecimento” e “controlo de temperatura”. Uns autores defendem que os dois primeiros termos estão corretos, havendo, no entanto, outros investigadores que não concordam e que acham que o conceito “controlo de temperatura” é mais adequado. Na verdade, a utilização de todos estes termos é correta e adequada, visto que o principal objetivo deste sistema é remover o calor do termoplástico que foi injetado, sendo este processo realizado, normalmente, recorrendo a água quente ou fria. O facto de o molde poder “trabalhar” a quente ou a frio depende do polímero a injetar (Por exemplo: PP tem temperatura de fusão de 200-260°C e a temperatura do molde pode variar entre 30 e 70°C). Deste modo, ao longo deste trabalho serão utilizados estes 3 termos para fazer referência a esta etapa do ciclo de moldação.

Neste trabalho pretende-se avaliar a reprodutibilidade de blocos moldantes de moldes híbridos no processo de moldação por injeção. Para isso, será aproveitada a estrutura de um molde convencional de modo a poder integrar os blocos moldantes buchas produzidos através de 2 técnicas de RT distintas. O vazamento de resina *epoxy* com 60 % de pó de alumínio e o FDM serão os processos utilizados. Após a obtenção dos blocos moldantes, irão ser realizados testes na máquina de injeção de modo a aferir qual a dimensão da série que é possível obter com cada bloco, assim como verificar o desgaste ocorrido durante o processo e a sua capacidade de reproduzir, dentro de tolerâncias admissíveis, a peça alvo de estudo.

Esta dissertação encontra-se dividida em 6 capítulos. No primeiro capítulo encontra-se o enquadramento deste estudo assim como a apresentação dos seus objetivos.

No segundo capítulo é apresentada a revisão bibliográfica, dando-se destaque aos processos de fabrico e ao desgaste de blocos moldantes de moldes híbridos através da apresentação de casos de estudo reais. A aplicação do fabrico aditivo na indústria de moldes é outro dos tópicos onde é dado algum relevo, nomeadamente em relação à utilização de canais conformáveis, tendo-se optado por apresentar um exemplo onde a utilização desta configuração permitiu uma redução do ciclo de injeção. Tendo em conta que um dos objetivos deste trabalho é avaliar o desgaste de blocos moldantes, optou-se por conceder algum destaque a um caso de estudo realizado pelo Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de *Canterbury*, Nova Zelândia, onde são identificados e estudados os diversos mecanismos de falha em 3 exemplos bastante distintos, cujas zonas moldantes foram obtidas através de PRT (*Polymer Rapid Tooling*). Após a realização de alguns testes de injeção, os fenómenos são categorizados de acordo com os tipos de falha ocorridos, sendo apresentadas propostas de melhoria a fim de prolongar a sua vida útil.

No terceiro capítulo encontra-se todo o trabalho experimental realizado durante este estudo. Começa-se por explicar todo o trabalho de modelação do molde convencional (aço) efetuado no *software* CAD 3D assim como os principais componentes/acessórios utilizados. Ainda neste subcapítulo são esclarecidas todas as alterações efetuadas na chapa das buchas (chapa 3) para que esta possa integrar as zonas moldantes produzidas nas diferentes tecnologias. Neste capítulo são apresentadas todas as simulações numéricas computacionais realizadas no *software* *Moldex3D*, desde a preparação das malhas até à obtenção de resultados, com o objetivo de justificar que a aplicação de canais de controlo de temperatura conformáveis é uma real mais-valia para este exemplo. Nesta secção é ainda explicado todo o processo de construção dos blocos moldantes com recurso ao vazamento de resina, desde a preparação do molde de silicone ao vazamento e respetiva cura e pós-cura. No fim deste capítulo é feita referência ao controlo dimensional dos blocos moldantes e aos testes de injeção realizados, nomeadamente em relação ao equipamento e às variáveis de processamento utilizadas. No quarto capítulo são apresentados os resultados dos vários testes de injeção efetuados e no quinto capítulo encontram-se as principais conclusões do trabalho desenvolvido. Por fim, no sexto capítulo são dadas sugestões para a realização de trabalhos futuros.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Moldação por Injeção

A moldação por injeção é um processo muito importante no processo de transformação de plásticos uma vez que permite obter peças simples ou complexas com apertadas tolerâncias dimensionais e com excelentes acabamentos superficiais. Dado que é um método que apresenta uma facilidade em ser automatizado, possibilita uma elevada cadência de componentes.

2.1.1. Processo

O processo de moldação por injeção foi patenteado em 1872 pelos irmãos *John e Isaiah Hyatt*, tendo sofrido sucessivas evoluções com as invenções da máquina hidráulica, máquina de parafuso alternativo e máquina elétrica. Em 1925, *Uhlmann* definiu o processo como um método para enformar corpos em moldes permanentes sujeitos a pressão (*permanent molds under pressure*) (Martinho P. M., 2002).

Atualmente, a moldação por injeção é o processo de formar peças de plástico mais utilizado devido à necessidade de aumentar a produtividade e diminuir custos, ao aumento da concorrência no mercado, às crescentes exigências nos produtos e à necessidade de fomentar a utilização de novos materiais. Este processo é utilizado para transformar materiais poliméricos em produtos finais, tais como componentes para a indústria automóvel e aeroespacial, embalagens, utensílios domésticos, material eletrónico.

O princípio básico deste processo assenta na injeção de material plástico fundido para o interior de um molde, onde, após uma série de operações, nomeadamente pressurização, arrefecimento e solidificação, origina um produto.

Neste processo há ainda que considerar a existência de uma ferramenta, ou seja, o molde que irá receber e enformar o material plástico que provém da unidade de injeção. Os moldes são constituídos, no mínimo, por duas partes (parte fixa e parte móvel).

2.1.2. Máquina de Injeção

Atualmente, existem inúmeras máquinas de injeção no mercado que têm em comum o facto de possuírem quatro unidades principais de funcionamento: a unidade de fecho, a unidade de potência, a unidade de injeção e a unidade de comando, tal como se pode observar na Figura 1.

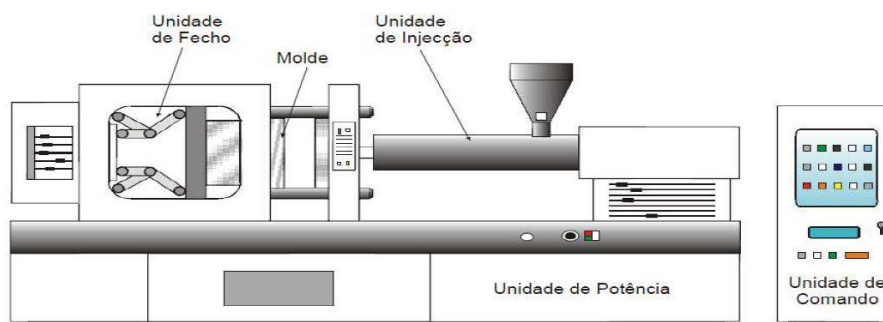


Figura 1 - Constituição de uma máquina de injeção (Cruz, 2004)

A unidade de fecho é responsável pela fixação do molde ao equipamento, suportando as pressões que ocorrem durante o processo de injeção (Martinho P. M., 2002).

A unidade de potência (ou unidade base) é a estrutura de suporte das unidades de injeção e de fecho e tem como função assegurar o fornecimento de energia ao cilindro e aos motores hidráulicos. Tem na sua constituição um sistema óleo-hidráulico (ou eletromecânico) que acionado por um conjunto motor elétrico/bomba fornece a pressão necessária para efetuar os movimentos do sistema.

A unidade de injeção (ou plasticização) é responsável pelo transporte, armazenamento, aquecimento e plasticização do material plástico desde a tremonha até ao bico de injeção.

A unidade de controlo (ou comando) é constituída por vários equipamentos que asseguram o controlo e a monitorização das operações e dos parâmetros do processo, sendo a interface entre o operador e a máquina. Para além de permitir a interface com o operador, possibilita a comunicação com periféricos ou sistemas de gestão de dados.

2.1.3. Ciclo de Moldação

Por definição, o ciclo de moldação por injeção consiste num conjunto de etapas que se realizam na máquina de injeção entre duas moldações consecutivas. É extremamente importante que estas operações estejam otimizadas de modo a assegurar a competitividade económica do processo. Assim, o ciclo de moldação é constituído por 6 etapas principais (Martinho P. M., 2002):

1. Fecho do molde: o material, que se encontra no estado fundido, está pronto para ser injetado;
2. Injeção: o fuso, atuando como um pistão, injeta o material fundido para dentro do molde;
3. Pressurização: de modo a compensar a contração, é mantida a pressão do fuso sobre o material durante a fase inicial do controlo de temperatura;
4. Controlo de temperatura: permite a regulação e gestão da temperatura do molde até estarem reunidas condições para a extração. Esta etapa é fundamental, uma vez que ocupa mais de 60% do tempo total. Enquanto esta fase decorre, o fuso recua e prepara o material para o ciclo seguinte, fenómeno designado por plasticização;

5. Abertura do molde: após o controlo de temperatura, o molde abre para ocorrer a extração;
6. Extração: estão reunidas as condições para que a moldação possa ser extraída, podendo ser atuada de forma mecânica ou hidráulica;

Após estas operações, o molde volta a fechar e o ciclo recomeça. Na Figura 2 encontram-se representadas as etapas do ciclo de moldação.

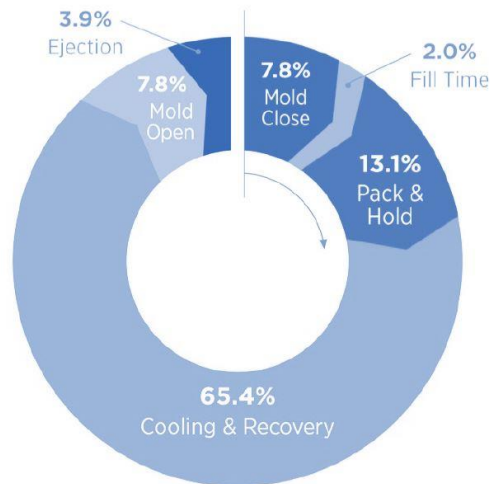


Figura 2 - Ciclo de moldação (Broeck, 2017)

O processo de moldação por injeção apresenta uma série de fatores que determinam as condições ideais na injeção de componentes. Tendo em conta que estas variáveis são extremamente importantes para este estudo, torna-se apropriado realizar uma breve descrição a fim de perceber qual a sua importância. Deste modo, o operador durante o ajuste do processo de injeção pode atuar sobre as seguintes variáveis de processamento (Neves, 2014):

- Temperatura do Molde: corresponde à temperatura a que o molde é mantido segundo a recomendação do fabricante do material a injetar. Esta temperatura pode ser consequência do aquecimento provocado pela injeção de material fundido para o seu interior conjugado com o arrefecimento forçado ou pode ser controlada através da utilização de equipamentos de aquecimento e controlo no molde. Um controlo de temperatura uniforme é fundamental sobre diversos aspetos, tais como a estabilidade dimensional, redução de tensões internas e estabilidade das linhas de soldaduras. Para se obter este controlo de temperatura eficiente é necessário que o sistema de controlo de temperatura seja projetado a fim de distribuir uniformemente o calor em toda a zona moldante;
- Velocidade de Injeção: traduz-se no tempo de preenchimento da zona moldante pelo polímero. Uma velocidade de injeção elevada está associada a um tempo de preenchimento reduzido. Geralmente, o processo de injeção é iniciado com uma velocidade lenta, sendo que o operador da máquina de injeção vai aumentando sucessivamente conforme as necessidades, evitando assim danos na ferramenta e o aparecimento de rebarba na peça;

- Temperatura de Processamento: corresponde à temperatura a que o material é elevado para poder ser processado por injeção. Geralmente, o fabricante fornece um intervalo de temperaturas dentro das quais o material deve ser mantido a fim de manter as condições ótimas de fluidez (Neves, 2014);
- Velocidade de Rotação do Fuso: uma dosagem de material rápida está relacionada com uma velocidade de rotação elevada, conduzindo a ciclos de moldação mais curtos. No entanto, importa perceber que velocidades elevadas podem conduzir à degradação do material;
- Tempo de Injeção: consiste no intervalo de tempo que vai desde o início da rotação do fuso até a pressão de injeção parar de atuar. Ou seja, refere-se ao tempo mínimo necessário para o polímero preencher a cavidade do molde, estando diretamente associado à velocidade de injeção;
- Pressão de Injeção: pressão requerida para que ocorra o preenchimento da cavidade pelo material plástico. O tipo de material, a complexidade da peça e a temperatura do molde são alguns fatores a ter em conta. Um material mais viscoso dificulta o preenchimento da cavidade, logo a pressão requerida para fazer fluir o material é mais elevada. A existência de ressaltos, nervuras e paredes muito finas numa peça dificulta o fluxo de material fundido;
- Pressão de Compactação: refere-se à pressão que é necessário fornecer a fim de compensar a contração da peça, sendo que apenas se inicia quando a peça já se encontra completa. A intensidade e a duração desta pressão dependem de alguns aspetos, tais como a temperatura do molde e o design da peça. Por exemplo, uma peça que apresente uma grande espessura vai necessitar de mais tempo de arrefecimento, por isso é essencial que a pressão de compactação atue até que o material esteja solidificado. Relativamente à temperatura do molde, quando estes trabalham a temperaturas muito elevadas, é necessário aumentar o tempo e a intensidade da pressão de compactação visto que a solidificação do material se processa de forma mais lenta;
- Segunda pressão (contrapressão): pressão que se opõe ao retorno do fuso aquando da dosagem do material. O aumento desta pressão assim como da velocidade de rotação do fuso beneficia a homogeneidade do material fundido, melhorando a qualidade da mistura devido ao maior cisalhamento;

Para além das variáveis de processamento, há que ter em conta os diversos parâmetros de processamento, ou seja, fatores que devem ser considerados aquando da realização do projeto do molde e do design da peça plástica. A geometria do bico de injeção, a espessura geral da peça, o comprimento de fluxo (percurso que o material realiza desde que sai do bico da máquina de injeção até solidificar), a localização e respetiva geometria do(s) ataque(s) e a distribuição de temperaturas na zona moldante são alguns exemplos de parâmetros de processamento. Em relação às espessuras de parede não uniformes, estas podem originar aprisionamento de ar pelo que se deve manter uma espessura de parede nominal constante (Martinho P. M., 2002).

2.2. Moldes Híbridos

Os moldes híbridos são ferramentas em que as zonas moldantes são produzidas através de técnicas de *Rapid Tooling* (RT). No entanto, a sua estrutura (em aço ou alumínio) continua a ser fabricada através de processos tradicionais. Ou seja, o conceito de molde híbrido combina as tecnologias convencionais para a conceção da estrutura e as técnicas alternativas para o fabrico das zonas moldantes, tal como se pode observar na Figura 3 (Pouzada P. S., 2015).

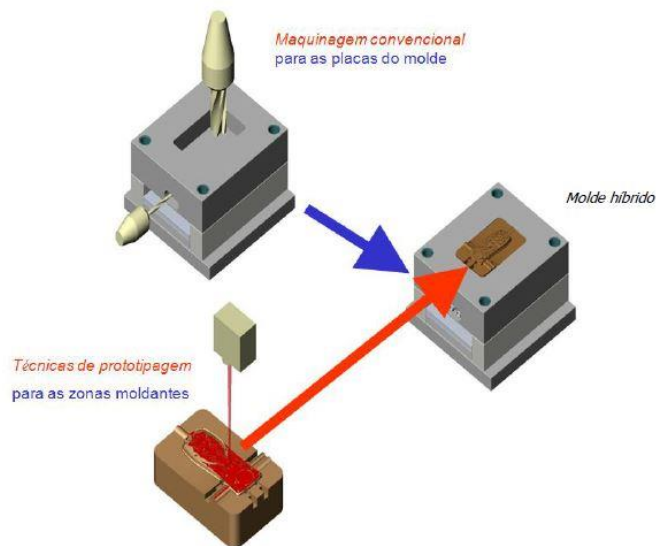


Figura 3 - Conceito de molde híbrido (Pontes, Queirós, & et al., 2005)

O conceito de moldes híbridos surgiu devido à necessidade de produzir zonas moldantes noutros materiais para além dos tradicionalmente utilizados. O objetivo deste tipo de moldes consiste na produção de zonas moldantes (cavidades e buchas) de forma mais expedita, procurando manter as características mecânicas e a qualidade das peças que se irão produzir. Comparativamente com os moldes convencionais, os moldes híbridos possuem como vantagens o facto de possuírem um custo e um tempo de produção relativamente inferiores (Pouzada P. S., 2015).

Dado que os moldes híbridos são produzidos em materiais alternativos, ou seja, materiais mais macios do que os convencionalmente utilizados (por exemplo o aço), este facto conduz a que as propriedades mecânicas e térmicas sejam inferiores às de um molde convencional.

Atualmente, as resinas, os metais e os cerâmicos são os materiais mais utilizados no fabrico de zonas moldantes de moldes híbridos. Em relação às resinas, de modo a aumentar as suas propriedades mecânicas, são utilizadas cargas metálicas que podem ser na forma de pó ou limalha. Estudos realizados revelam que a condutividade térmica nos blocos moldantes obtidos através de resina é baixa, conduzindo a que os ciclos de injeção sejam mais longos devido ao facto de a taxa de arrefecimento ser menor. Na resina *epoxy* são utilizadas cargas metálicas (geralmente pó de alumínio) que tem como objetivo colmatar o défice de condutividade térmica da resina e reduzir o desgaste do bloco (Martinho P. G., 2010).

Nos moldes híbridos deve-se ter em conta inúmeros fatores, tais como o tipo de injeção e a contração do material do molde, o sistema de controlo de temperatura, nomeadamente a dimensão e a configuração destes canais e o sistema de extração. Tal como já foi referido, as resinas apresentam uma condutividade térmica inferior à dos metais, o que conduz ao aumento do ciclo de injeção visto que se verifica uma baixa taxa de arrefecimento antes de estarem reunidas condições para ocorrer a extração da peça (Pouzada A. , 2009).

O facto de as resinas possuírem uma baixa condutividade térmica inferior conduz a um aumento do ciclo de moldação relativamente aos moldes convencionais devido à baixa taxa de arrefecimento antes da extração (Pouzada A. , 2009). No entanto, a temperatura do molde deve ser inferior à temperatura de transição vítrea (T_g) da resina (Ragaert, 2006).

Atualmente, os moldes híbridos podem ser utilizados em pequenas ou médias séries de injeção, sendo que o seu ciclo de vida e a sua capacidade de reproduzir peças dentro de tolerâncias admissíveis está diretamente relacionado com a minimização do seu desgaste (Gomes, 2015).

A dimensão do lote e o tamanho da peça, a facilidade de troca dos blocos moldantes pela frente, ou seja, sem ser necessário desmontar o molde, a utilização de canais conformáveis e o posicionamento dos extratores são alguns dos fatores que devem ser considerados no desenvolvimento dos moldes híbridos. Deste modo, verifica-se que o *design* do artigo e o projeto do molde devem ser cuidadosamente ponderados a fim de garantir que o desgaste é minimizado durante a vida útil da ferramenta (Saraiva, Lima, & Pouzada, 1999).

Tal como já referido anteriormente, o controlo de temperatura é uma etapa fundamental no ciclo de moldação, apresentando uma importância acrescida nos moldes híbridos. Considera-se um sistema de controlo de temperatura adequado um sistema que permita uma uniformidade de temperatura em torno da zona moldante e uma redução gradual da temperatura do polímero, reduzindo ao máximo o tempo de ciclo e possibilitando uma correta cristalização do material. Por isso, é fundamental durante a fase de projeto, mais precisamente durante a conceção dos canais, ter em conta diversos fatores, tais como o diâmetro/área da secção transversal, o correto distanciamento entre furos e entre estes e a zona moldante a fim de obter um circuito que permita um correto controlo de temperatura (Gomes, 2015).

A utilização de moldes híbridos não tem como principal objetivo produzir uma elevada quantidade de peças. No entanto, a customização de produtos e a redução da sua vida em termos de venda ao público desempenha um papel fulcral na medida em que permite analisar a viabilidade técnica e económica de processos aditivos e dos seus materiais (Vasco & Correia, 2017).

2.3. Processos de Fabrico para Blocos Moldantes

O termo Prototipagem Rápida (PR) foi o primeiro conceito a surgir e estava relacionado com a possibilidade de obter modelos físicos diretamente a partir de informação digital. Após alguns anos, os investigadores/utilizadores destas tecnologias concluíram que a PR não se enquadrava nas recentes descobertas e aplicações visto que este conjunto de técnicas permitia produzir diretamente componentes finais e não apenas protótipos (Relvas, 2018).

Surgiu o conceito de *Rapid Tooling* (RT) que consiste no fabrico de ferramentas produzidas total ou parcialmente através de tecnologias não convencionais, a fim de obter pequenas séries de objetos que permitam testar e aprovar o conceito do produto (Domingues, 2015).

Em 1999, *Chua et al.*, considerou que o RT era PR aplicada à fabricação de moldes para injeção. A classificação proposta por estes investigadores encontra-se representada na Figura 4. A rigidez dos materiais para construir as ferramentas e o método de fabricação (direta ou indireta) foram os critérios selecionados para esta classificação (Gomes, 2015).

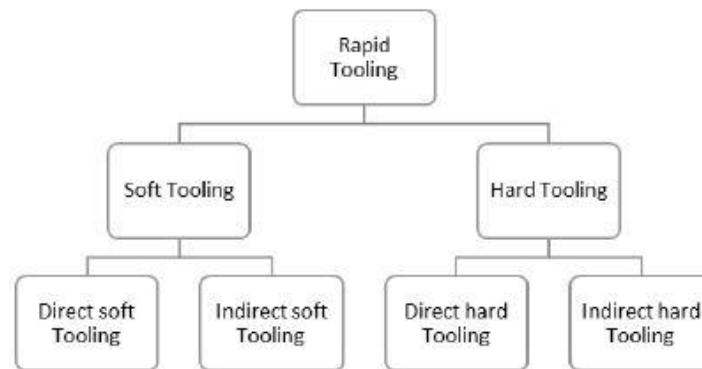


Figura 4 - Classificação de RT (Chua, Hong, & Ho, 1999)

O RT pode ainda ser dividido em dois grandes grupos: *o soft tooling* e *o hard tooling*. As ferramentas para séries curtas (100-10000) são designadas por *soft tooling*, visto que apresentam uma maior facilidade de serem trabalhadas do que as convencionais (aço ou alumínio). As *hard tooling* destinam-se a séries de produção maiores, são normalmente construídas em aços ferramentas, apresentando por isso uma maior resistência ao desgaste. As *soft tools* (moldes) são geralmente construídas em silicone visto que este apresenta uma excelente capacidade de reproduzir os detalhes do artigo que se pretende moldar (Boxström, 2017).

Outros autores consideram que o RT é a maneira de envolver os processos de FA no desenvolvimento de blocos moldantes para o processo de moldação por injeção. Nos métodos indiretos as peças são construídas a partir de modelos/*masters* já existentes, enquanto nos métodos diretos os objetos são obtidos diretamente a partir de um modelo CAD 3D. Tal como já foi referido anteriormente, o preço e a velocidade de construção são as duas principais razões para utilizar o RT. Por outro lado, a vida útil da ferramenta e as tolerâncias constituem as duas principais limitações deste processo uma vez que os materiais utilizados

apresentam propriedades mecânicas inferiores aos que são normalmente usados, nomeadamente, o aço e o alumínio (Gomes, 2015).

Discutir a vida útil de uma ferramenta (molde) está diretamente relacionado com a sua reprodutibilidade, ou seja, com a quantidade de ciclos/peças que esta pode produzir dentro de tolerâncias admissíveis e com qualidade superficial. Deste modo, deve procurar-se o melhor compromisso entre a série que se pretende, o prazo e o valor que se pretende desembolsar.

A moldação em resina vazada (*cast resin tooling*) e o FDM foram os dois processos utilizados na produção dos blocos moldantes. Deste modo, será feita uma breve abordagem a cada uma destas tecnologias.

2.3.1. Moldação em Resina Vazada (*Cast Resin Tooling*)

A moldação em resina vazada é uma técnica de RT que permite obter, num curto espaço de tempo, ferramentas que viabilizem a produção de pequenas séries de componentes. Trata-se de um processo de fabrico indireto visto que necessita da construção de um *master* e que consiste no vazamento de resinas epoxídicas sob vácuo. Tal como todos os processos, apresenta algumas vantagens e limitações. A baixa contração no processo de cura, permitindo uma boa precisão dimensional, o baixo custo e a possibilidade de obtenção de peças de grandes dimensões são alguns dos pontos fortes deste processo. No entanto, o facto de a mistura promover uma reação exotérmica (libertação de calor para o meio externo) conduz a que nem sempre seja possível moldar a mistura ao modelo de forma adequada e sem qualquer tipo de dano. Apresenta uma relação custo/qualidade bastante interessante e possibilita a obtenção de uma série razoável de moldações (Domingues, 2015).

A adição de cargas pode ser realizada tendo como objetivo três funções distintas. Para reforçar o polímero e melhorar o comportamento mecânico, para enchimento com o objetivo de ocupar espaço ou para minimizar certas carências da resina. Deste modo, com a finalidade de minimizar a baixa condutividade térmica da resina *epoxy* são utilizadas cargas metálicas, como por exemplo o Al, conduzindo igualmente a um incremento na rigidez do Bloco Moldante e na redução do seu desgaste.

Tal como se poderá observar com maior detalhe no capítulo 3, este processo envolve uma série de operações. Em primeiro lugar, é fundamental a obtenção de um *master*, ou seja, um modelo físico do objeto que se pretende replicar, sendo o poliuretano um exemplo de um material utilizado. Antes de realizar o vazamento da mistura, é necessário construir um molde de silicone com o objetivo de obter a zona moldante. A seleção do silicone justifica-se pela facilidade que este apresenta no processo de desmoldação do artigo, além de permitir uma replicação dos detalhes do objeto a moldar. Após este procedimento, efetua-se a mistura da resina com o endurecedor nas proporções definidas pelo fornecedor, sendo depois colocada numa câmara de vácuo com a finalidade de retirar as bolhas de ar existentes. Na Figura 5 é possível observar as principais etapas do processo de vazamento de resinas (Gomes, 2015).

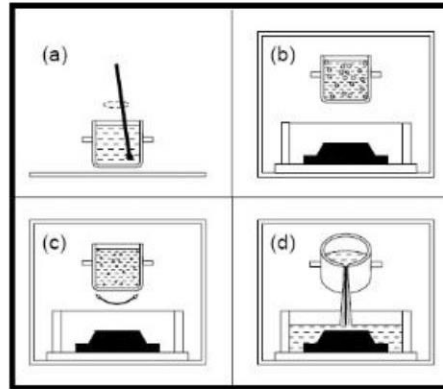


Figura 5 - Diagrama de vazamento de resinas (Vasconcelos, Lino, Batista, & Neto, 2006)

O vazamento da mistura é uma etapa muito importante e que deve ser realizada de forma cuidadosa e lenta a fim de evitar a formação de bolhas de ar no interior do material ou da superfície do modelo. Após o vazamento, efetua-se a desmoldagem do bloco moldante e realiza-se a pós-cura. Este processo deve ser feito conforme as indicações do fornecedor da resina para que sejam atingidos os parâmetros esperados (Domingues, 2015).

A utilização de resinas para a produção de blocos moldantes para o processo de moldação por injeção requer a adição de cargas, visto que as propriedades são bastante inferiores aos materiais convencionalmente utilizados. Deste modo, aquando da realização da mistura da resina com o endurecedor, são adicionadas cargas metálicas, nomeadamente pó de alumínio, com o objetivo de melhorar a resistência, tenacidade e a condutividade térmica.

O tipo de material a injetar, a geometria/complexidade da peça plástica e os parâmetros de injeção aplicados são fatores que condicionam o desgaste do bloco moldante. Deste modo, é expectável que um bloco moldante obtido através do vazamento de resinas tenha uma vida útil que pode variar entre os 100 e os 2000 ciclos de injeção (Gomes, 2015).

Para as zonas moldantes obtidas através do vazamento de resinas é necessário ter em conta algumas considerações. O sistema de alimentação não deve estar localizado próximo de uma *feature* frágil, ou seja, de um *rib* ou de um pequeno castelo que origina, por exemplo, um furo na peça plástica, visto que é nessa zona que se verifica a maior pressão de injeção. A dimensão do ataque é outro fator a ter em conta, sendo que este deve ser o maior possível, a fim de evitar aumentos de velocidade e pressão que conduzam à diminuição da vida útil do bloco moldante quer seja devido à fratura de alguma *feature* quer devido à degradação térmica localizada.

2.3.2. Impressão a jato de tinta (IJP)- *PolyJet*

A tecnologia *PolyJet* (abreviatura de *Photopolymer Jetting*) é um processo de impressão exclusivo da empresa *Stratasys*, sendo uma alternativa viável para diversas indústrias. Nesta tecnologia é utilizado um sistema que permite a deposição de pequenas gotas de um foto polímero sobre uma plataforma de construção. Imediatamente após esta deposição, cada camada é curada por uma luz ultravioleta. Importa referir que este processo apresenta como principal vantagem o facto de não necessitar de pós-cura. Trata-se de um método de fabrico direto visto que não requiere a construção prévia de um *master* (Sena, 2014).

Na Figura 6 encontra-se representado o princípio de funcionamento do *PolyJet*. Tal como referido, esta tecnologia deposita pequenas gotas de resina sobre a plataforma, realizando-se de seguida a sua cura através de radiação ultravioleta.

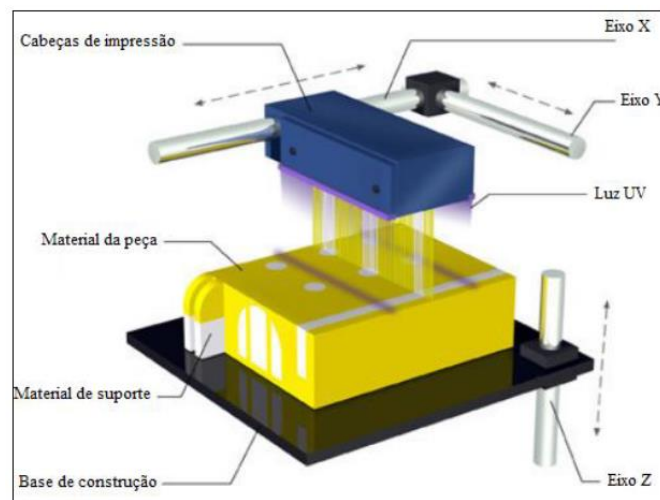


Figura 6 - Princípio da tecnologia *PolyJet* (Barclift & Williams, 2012)

O sistema é constituído pelo cabeçote de impressão e pelas lâmpadas emissoras de radiação ultravioleta que se podem mover nos eixos X e Y, e pela plataforma de construção que apenas pode sofrer translação no eixo Z. Após a deposição e cura de cada camada de resina, a plataforma desce e recomeça a construção de uma nova camada, repetindo-se este procedimento até construir o modelo. No fim do processo, o material de suporte pode ser removido manualmente ou através de um jato de água. Tal como já foi explicado anteriormente, não é necessária nenhuma pós-cura visto que a resina é totalmente curada durante o processo (Abreu, 2015).

O *PolyJet* é uma tecnologia que apresenta duas grandes desvantagens. Um dos aspetos negativos está relacionado com a necessidade de pós-processamento dado que é necessário efetuar a limpeza do material dos suportes com recurso a um jato de água, condicionando assim o uso deste processo num escritório visto que obriga à existência de uma fonte de abastecimento de água próxima. A outra desvantagem prende-se com o facto de haver desperdício de material, uma vez que o material utilizado nos suportes não pode ser reutilizado.

No *PolyJet* são utilizados dois tipos de materiais. Para o componente a produzir é utilizada uma resina foto polimérica curável através da radiação UV. Para a construção dos suportes recorre-se a um material tipo gel que também tem de ser foto curável. Existe atualmente no mercado uma vasta gama de foto polímeros desenvolvidos para este tipo de impressoras que apresentam propriedades semelhantes às dos plásticos mais utilizados no dia-a-dia, tais como o ABS e o PP.

Segundo a *Stratasys*, até há uns anos a única opção que permitia testar e validar componentes de plástico era a maquinação de moldes em alumínio com reduzida complexidade, ou seja, com poucas ou até mesmo nenhuma zonas negativas que requeriam a aplicação de balancés, elementos móveis ou outros mecanismos que possibilitavam a desmoldação destas zonas. No entanto, apesar deste tipo de moldes apresentar um custo muito inferior aos moldes convencionais feitos em aço, o custo e o prazo de entrega continua a ser significativo (*Stratasys*, 2015).

De acordo com a *Stratasys*, o processo *PolyJet* é uma alternativa viável quando o ponto de fusão dos materiais é inferior a 300°C (por exemplo: PP, PE, ABS, PC-ABS), quando as séries são pequenas (até 100 ciclos de moldação), as peças apresentam um volume inferior a 165 cm³ e quando as máquinas de injeção utilizadas não ultrapassam as 80 toneladas. Obviamente que a dimensão da série dependerá sempre da complexidade do artigo e dos parâmetros utilizados, no entanto, esta tecnologia constitui uma boa opção para construir zonas moldantes que permitam obter algumas peças de plástico.

Na Figura 7 encontra-se representado um caso de estudo realizado pela *Stratasys* onde foi construída uma bucha através da tecnologia *PolyJet* para produção de algumas moldações (*Stratasys*, 2016).

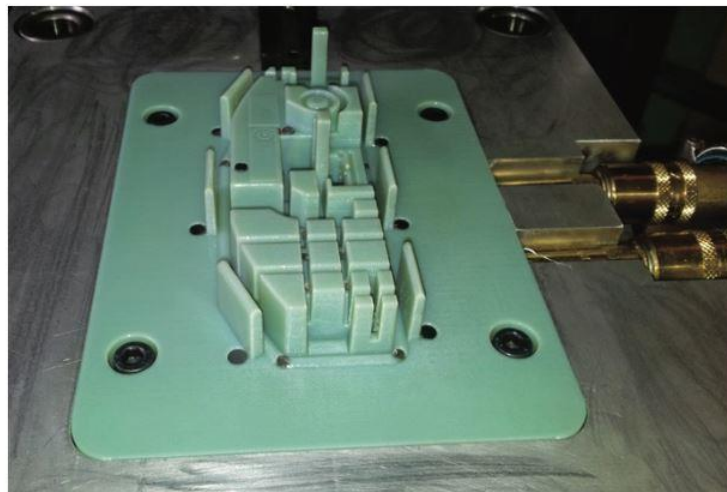


Figura 7 - Bucha construída em *PolyJet* (*Stratasys*, 2016)

O caso de estudo da Figura 7 permitiu concluir que é possível obter através do *PolyJet* um molde (ou uma zona moldante) com um sistema de extração e com as ligações dos acessórios de refrigeração funcionais. No entanto, é necessário perceber que há fatores a ter em conta. Por exemplo, as saídas da peça foram aumentadas para o máximo permitido pelo design de

modo que oferecesse a menor resistência possível à extração e, conseqüentemente, não danificasse a zona moldante. A saída recomendada para estes casos é de 5 graus, no entanto, considera-se que uma parede com 3 graus é aceitável. Tal como nos moldes convencionais, foram adicionados raios de 0.2mm nas áreas que se encontravam em “quina” com o objetivo de evitar zonas de concentração de tensões e, conseqüentemente, danos na zona moldante (Stratasys, 2016).

Relativamente ao processo de injeção, é importante começar com parâmetros conservadores de modo a evitar danos na zona moldante construída. Visto que a bucha foi construída com materiais com pouca condutividade térmica, as moldações necessitam de mais tempo para solidificar. No entanto, à medida que o número de ciclos vai aumentando, a temperatura do molde vai atingir um determinado ponto que conduz a que as peças não solidifiquem. De forma a contornar este problema e assegurar que a temperatura do molde não excede os 50°C, manteve-se o molde aberto depois da extração da peça e soprou-se ar comprimido para as zonas moldantes com o objetivo de reduzir a temperatura.

Deste modo, conclui-se que o processo *PolyJet* é uma alternativa viável para a validação e otimização de peças visto que apresenta custos e tempos de produção relativamente inferiores aos processos convencionais e possibilita uma liberdade geométrica característica dos processos de fabrico aditivo.

Com o objetivo de compreender melhor a tecnologia *PolyJet*, assim como os materiais utilizados e as implicações inerentes ao processo, optou-se por explicar de forma detalhada dois exemplos estudados numa empresa.

A *Grundfos*, empresa de referência mundial na fabricação de bombas, em parceria com a *Stratasys*, decidiu realizar um estudo com o objetivo de perceber como é que os materiais obtidos através de técnicas diferentes de fabrico aditivo se comportavam no processo de moldação por injeção. Para isso, selecionaram 4 materiais distintos e construíram as zonas moldantes (cavidade e bucha) em duas tecnologias. O RGD720 (transparente) e o *Digital ABS* foram utilizados no processo *PolyJet*, enquanto na tecnologia SLS (*Selective Laser Sintering*) foram usados dois tipos de poliamidas (PA) com fibra de vidro (Otte, Grundfos, & Stratasys, 2015).

Após a construção dos 4 moldes, optou-se por testar vários tipos de materiais em cada ferramenta. Concluíram que o PA com 30% e o PPS com 40% de fibra de vidro foram os materiais mais desafiantes visto que existiram dificuldades em controlar a temperatura dos moldes, assim como a viscosidade do material e o desgaste ocorrido nestas ferramentas devido ao facto do reforço deste tipo de materiais apresentar uma percentagem elevada. Verificou-se que as peças obtidas nos moldes em SLS apresentaram uma qualidade superficial muito pobre, optando-se por excluir esta tecnologia dos restantes testes. Esta falta de qualidade na superfície da zona moldante conduziu também a problemas durante a fase de extração devido ao atrito criado entre a bucha e o artigo moldado. Por outro lado, o excelente acabamento superficial proporcionado aquando da construção dos blocos moldantes em *PolyJet* permitiu obter resultados bastante satisfatórios, quer em relação à qualidade superficial dos modelos, quer à não existência de problemas durante a fase de

extração. Importa destacar o facto de o material com 40% de fibra de vidro não se ter revelado um problema, ao contrário do que tinha acontecido com a outra tecnologia. Deste modo, os testes realizados permitiram concluir que, para geometrias simples, os moldes obtidos através da tecnologia *PolyJet* possibilitaram à *Grundfos* produzir 20 peças funcionais que podem ser testadas durante o processo de desenvolvimento de novos produtos.

Depois do sucesso alcançado nos primeiros moldes obtidos através do *PolyJet*, a *Grundfos* decidiu testar um novo exemplo com maiores dimensões e com um nível de complexidade consideravelmente superior. Na Figura 8 encontra-se representado o segundo exemplo testado pela empresa, onde é possível observar a existência de *ribs* e roscas.



Figura 8 - Exemplo 2 testado pela *Grundfos* (Otte, Grundfos, & Stratasys, 2015)

Dado que a dimensão da série era reduzida, e tendo em conta que o tempo de ciclo não constituía um entrave, a maior parte das *features* do molde foram desenvolvidas com o objetivo de serem removidas manualmente após cada injeção, sendo depois colocadas no seu lugar. Sem este procedimento, não seria possível desmoldar as zonas negativas sem recorrer à utilização de mecanismos apropriados, o que conduziria a um aumento dos custos.

Tal como no primeiro exemplo, foram construídos dois moldes, um com o material transparente e outro com o *Digital ABS*. Tendo em conta que o artigo escolhido era funcional, foi necessário injetar as amostras com o material original (PPE-PS com 30% de fibra de vidro). O processo de injeção foi iniciado com parâmetros conservadores no molde construído com material transparente. A primeira peça completa foi obtida no sexto ciclo, sendo que na sétima moldação foi necessário interromper o procedimento visto que o molde já possuía fissuras consideráveis fruto da pressão de injeção aplicada. Optou-se por trocar para o outro molde e continuar o processo com os mesmos parâmetros. Com esta ferramenta foram obtidas 20 moldações, tendo-se optado por parar a produção de modo a salvaguardar a zona moldante e poder realizar futuros testes. Importa destacar que, devido ao facto de o ciclo de injeção ser bastante longo, parte do material presente no fuso da máquina de injeção sobreaqueceu e queimou. De forma a contornar esta dificuldade, antes de cada ciclo, o material queimado era retirado para fora do cilindro, evitando que entrasse no molde. Relativamente ao controlo de temperatura da ferramenta, este foi feito com recurso a ar comprimido, sendo que o ciclo de injeção só iniciava quando a temperatura atingia os 20°C.

Deste modo, desde a fase inicial do *design* até à obtenção das amostras, decorreram apenas 10 dias. A título de curiosidade, caso se pretendesse a maquinação de um molde em alumínio, seriam necessárias 5 semanas, permitindo poupar mais de 50% no prazo de entrega.

Estes testes permitiram à *Grundfos* concluir que o *Digital ABS* era o material ideal para a obtenção de amostras visto que permitiu a produção de peças com precisão dimensional e com uma qualidade superficial bastante assinalável. Além disso, estes ensaios possibilitaram a aquisição de exemplares com o material utilizado na produção final, viabilizando assim a execução de testes de funcionalidade e a avaliação do *design*.

2.3.3. *Fused Deposition Modeling (FDM)*

A modelação por deposição de material fundido, em inglês FDM, é um processo que foi desenvolvido por S. *Scott Crump* em 1988. Um ano mais tarde, fundou a empresa *Stratasys* e em 1992 começou a comercializar a primeira impressora de FDM (Fernandes, 2016).

O principal componente responsável pela transformação do material sólido num moldável é a cabeça de extrusão. Nesta tecnologia, o material entra no estado sólido numa das extremidades da cabeça de extrusão, e por ação do calor gerado por resistências elétricas, é fundido. Após este processo, é extrudido pelo bico (*nozzle*) que se localiza na outra extremidade da cabeça de extrusão. Aquando da extrusão do material, a cabeça de extrusão e/ou a cama de impressão deslocam-se no plano cartesiano, dando origem ao objeto camada a camada. Na Figura 9 encontra-se o esquema da cabeça de extrusão.

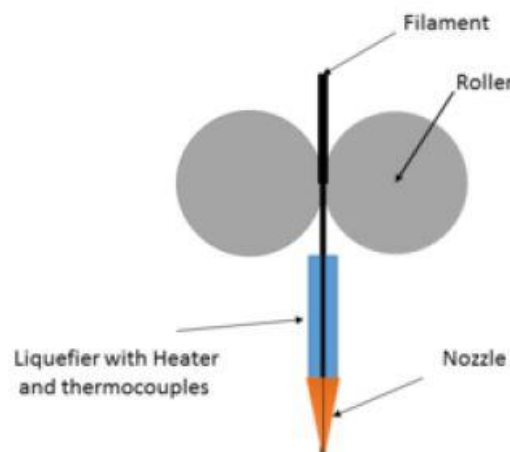


Figura 9 - Esquema da cabeça de extrusão (Fernandes, 2016)

Dentro do vasto leque de técnicas de fabrico aditivo disponíveis no mercado, o FDM tem-se destacado pelo facto do custo de aquisição do equipamento ser reduzido. A facilidade em trocar de material, o baixo custo de manutenção, a variedade de materiais disponíveis, a rapidez em produzir modelos mais pequenos e o facto de ser um equipamento compacto são vantagens desta tecnologia. No entanto, o facto de deixar uma linha visível entre camadas, a pouca rigidez em construções sob o eixo vertical e o difícil processo de calibração são alguns dos pontos negativos deste processo (Cordeiro, 2014).

Por vezes, quando os objetos a construir necessitam de apoio vertical, é utilizado material de suporte. Geralmente, o filamento para estas estruturas de suporte é de qualidade inferior ao do objeto principal visto que no fim da construção estas são removidas (Fernandes, 2016).

2.4. Aplicação do Fabrico Aditivo nos Moldes

Atualmente, os processos tradicionais de fabrico de moldes, nomeadamente a furação, apresentam algumas limitações dado que apenas permitem construir canais de controlo de temperatura retilíneos de diâmetro constante, originando sistemas muito limitados visto que existe dificuldade (ou mesmo impossibilidade) de alcançar determinadas zonas das peças. Deste modo, a indústria de moldes de injeção apresenta um enorme interesse em utilizar as tecnologias de fabrico aditivo na medida em que estas possibilitam melhorar o controlo de temperatura dos moldes e, conseqüentemente, otimizar os tempos de ciclo (Reis, 2017).

Tendo em conta que uma das principais fases do processo de moldação por injeção é o arrefecimento, e visto que uma grande parte do ciclo de moldação é dedicado ao controlo de temperatura da ferramenta, torna-se claro que a gestão de temperatura apresenta uma elevada importância (Figura 10).

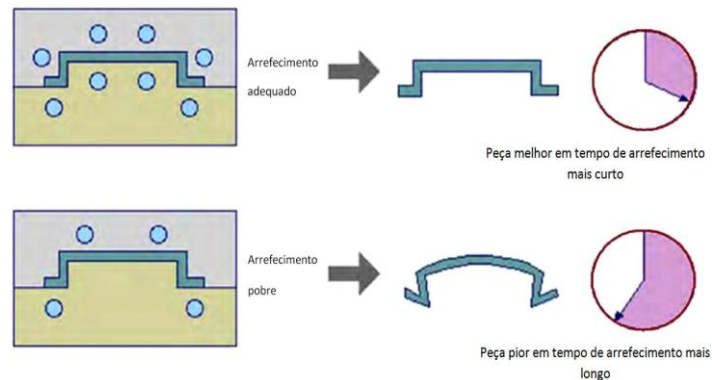


Figura 10 - Controlo de temperatura adequado vs deficitário (Dang & Park, 2012)

Com o avanço das tecnologias surgiu a capacidade de produzir componentes com canais conformáveis, ou seja, canais que acompanham toda a geometria da peça e que permitem ter sempre uma distância uniforme para a zona moldante. Assim, os canais conformáveis permitem uma gestão muito mais eficiente da temperatura no molde, melhorando a qualidade das peças, diminuindo os tempos de ciclo e, naturalmente, os custos de produção. Na Figura 11 encontra-se à esquerda um exemplo de uma peça com canais de controlo de temperatura conformáveis e à direita uma solução com canais convencionais (Reis, 2017).

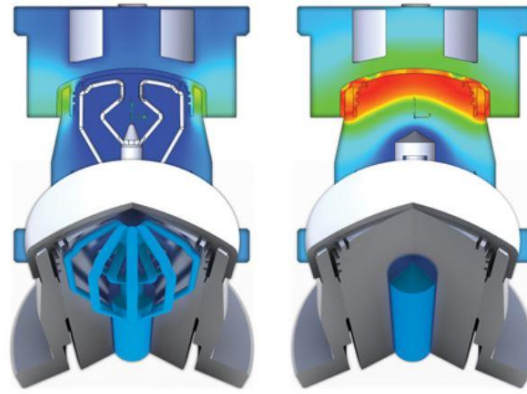


Figura 11 - Canais de controlo de temperatura convencionais vs conformáveis (TEXER, s.d.)

Analisando a Figura 11 verifica-se que os canais conformáveis contornam a geometria da peça, permitindo uma distribuição uniforme de temperatura que se traduz numa diminuição de fenómenos indesejáveis que afetam diretamente a qualidade do artigo, tais como chupados, tensões residuais e empenos devido à contração não uniforme. Por outro lado, conclui-se também que nenhuma das soluções convencionais (por exemplo cascatas ou pinos térmicos) garante uma gestão de temperatura eficiente na medida em que não assegura uma distância constante para toda a zona moldante (TEXER, s.d.).

O prazo de entrega é outro dos aspetos positivos que conduz a que este conjunto de técnicas seja uma mais-valia para a indústria de moldes visto que todos estes processos podem ser otimizados em relação às condições de processamento, ganhando-se tempo no prazo de entrega. Embora o fabrico aditivo apresente, em muitos casos, custos superiores aos processos convencionais, estas tecnologias permitem uma redução considerável do tempo de execução, sendo muitas vezes fator decisivo na altura de tomar decisões sobre a escolha dos processos a utilizar (Reis, 2017).

No entanto, e tal como já foi referido anteriormente, estas tecnologias apresentam, regra geral, um acabamento superficial pobre, constituindo, por isso, uma enorme desvantagem. Este aspeto menos positivo obriga a que seja necessário efetuar uma operação posterior de acabamento, aumentando os custos e o prazo de entrega visto que o componente quando sai da máquina de fabrico rápido não se encontra no seu estado final (Sena, 2014).

De modo a compreender melhor quais as vantagens e desvantagens dos canais conformáveis, optou-se por apresentar um caso de estudo realizado por um aluno do Instituto Superior Técnico onde são comparados os desempenhos destes dois tipos de canais através da realização de estudos reológicos (Bom, 2014).

O caso apresentado possui uma geometria complexa relativamente à possível utilização de canais de controlo de temperatura convencionais visto que tem uma estrutura em “concha”, tal como se pode observar na Figura 12.

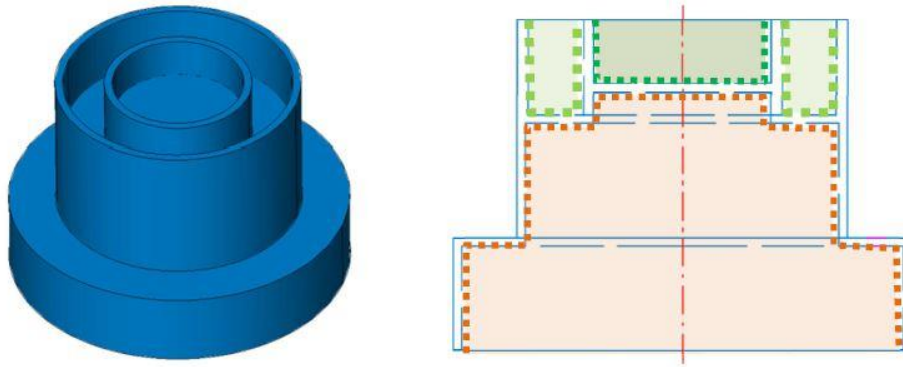


Figura 12 - Caso de estudo: 3D (esquerda) e 2D (direita) (Bom, 2014)

Analisando a Figura 12 verifica-se que há zonas que são consideradas entraves à aplicação dos canais convencionais visto que a peça apresenta um diâmetro de apenas 90mm e uma altura de 60mm (Bom, 2014).

Na Figura 13 encontram-se representadas as duas configurações de canais do lado da cavidade do caso de estudo. Ambas as situações têm 3 circuitos independentes, sendo que as entradas e as saídas encontram-se representadas com setas.

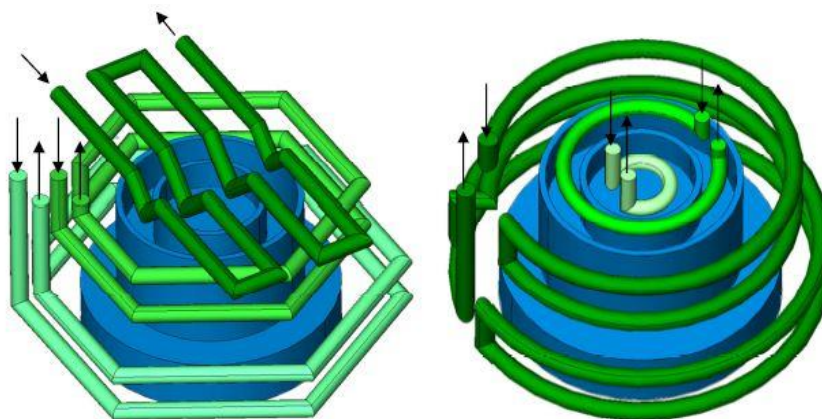


Figura 13 - Canais convencionais vs Canais conformáveis da cavidade (Bom, 2014)

Relativamente aos canais de controlo de temperatura convencionais, facilmente se percebe que tem de ser retilíneos, tornando impossível apresentar sempre uma distância constante para a zona moldante, constituindo um problema no controlo de temperatura de um artigo que apresenta uma geometria circular. Em relação aos canais conformáveis, conclui-se que a configuração presente na Figura 13 é a mais indicada uma vez que permite manter uma distância uniforme entre o canal e a zona moldante (Bom, 2014).

Na Figura 14 encontram-se representados os dois tipos de canais de controlo de temperatura da bucha. Importa referir que a bucha com canais convencionais apresenta 2 circuitos independentes, sendo um deles uma cascata que tem como função levar o fluido a zonas mais profundas e de difícil acesso através de furação convencional. Por outro lado, a bucha com os canais conformáveis possui apenas 1 circuito que permite contornar toda a geometria do artigo.

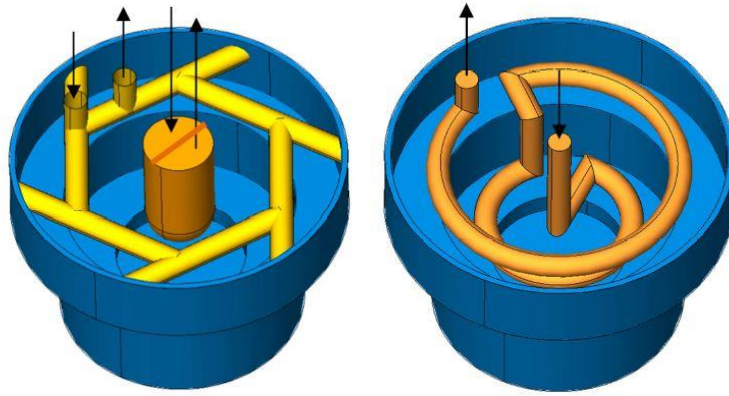


Figura 14 - Canais convencionais vs Canais conformáveis da bucha (Bom, 2014)

Tal como já foi referido, o facto de a peça ser cilíndrica dificulta a utilização dos processos convencionais na medida em que é impossível ter furos a uma distância constante da zona moldante, conduzindo a que haja um défice de controlo de temperatura. Contrariamente, na bucha que apresenta os canais conformáveis percebe-se que há uma uniformidade na distância entre os furos e a superfície moldante, sendo, por isso, expectável a obtenção de melhores resultados com esta configuração (Bom, 2014).

Para o caso com canais convencionais importa realçar o facto de ser necessário aplicar tacos de cobre (em vez dos habituais tampões) com o objetivo de tapar os furos do sistema de controlo de temperatura, dado que estes intersectam a zona moldante.

De modo a validar o caso de estudo, foram efetuados estudos reológicos através do *Moldex3D* com as duas configurações. Foi estudado o enchimento, a compactação, o “arrefecimento” e o empeno, sendo que no fim foi realizada uma comparação entre os dois modelos (Bom, 2014).

Na Figura 15 encontra-se representada a distribuição de temperaturas na superfície da peça no final do arrefecimento para as duas configurações de canais. Esta análise permite identificar quais os pontos que apresentam maior dificuldade em diminuir a sua temperatura, também designados por “*hot spots*”, sendo que são estes locais que limitam o tempo de ciclo. Verificou-se também que o diferencial de temperatura nestas zonas quando se passa do modelo com canais convencionais para o caso que apresenta canais conformáveis é de cerca de 10°C, sendo mais favorável no exemplo da direita.

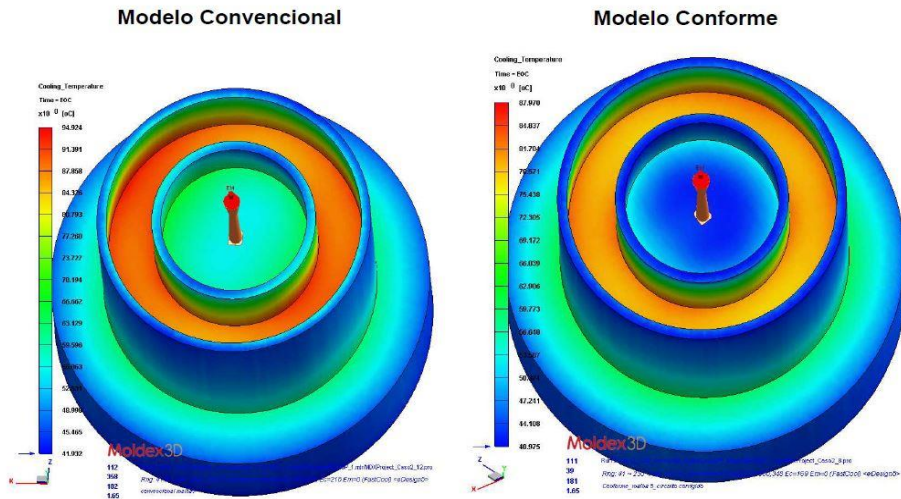


Figura 15 - Temperatura na superfície da peça no final do arrefecimento para os 2 modelos (Bom, 2014)

Na Figura 16 encontra-se a eficiência dos canais de controlo de temperatura para os 2 modelos de canais, ou seja, o calor que é transferido da peça para a zona moldante (Bom, 2014).

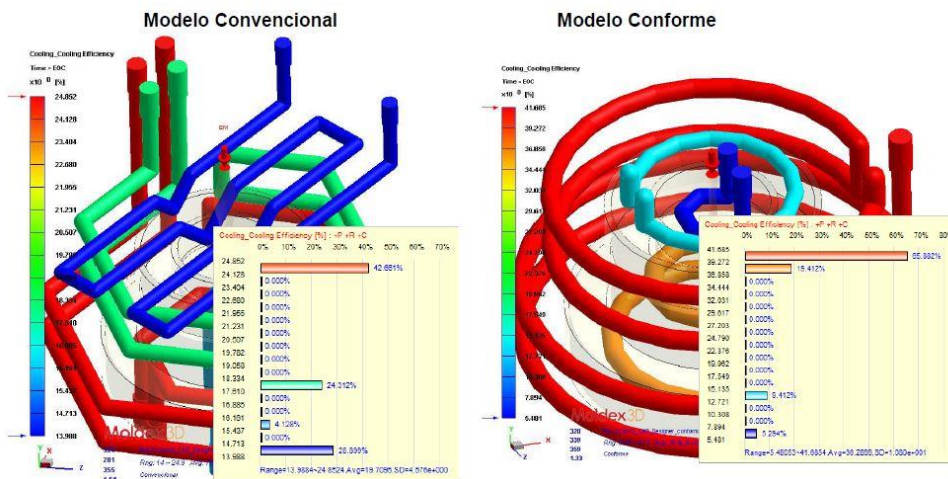


Figura 16 - Eficiência dos canais para os 2 modelos (Bom, 2014)

Analisando a Figura 16 conclui-se que a eficiência média dos canais do sistema convencional ronda os 19%, enquanto o modelo com canais conformáveis apresenta uma eficiência média de 38% uma vez que existe maior percentagem de canais com maior eficiência neste caso (Bom, 2014).

Na Figura 17 pode ser observado o tempo de arrefecimento, ou seja, o tempo desde o fim da compactação até a peça atingir a temperatura de extração. Verifica-se que este tempo diminui 1,4s quando se passa do modelo com canais convencionais para o modelo com canais conformáveis, ou seja, há uma diminuição do tempo de arrefecimento em cerca de 17%.

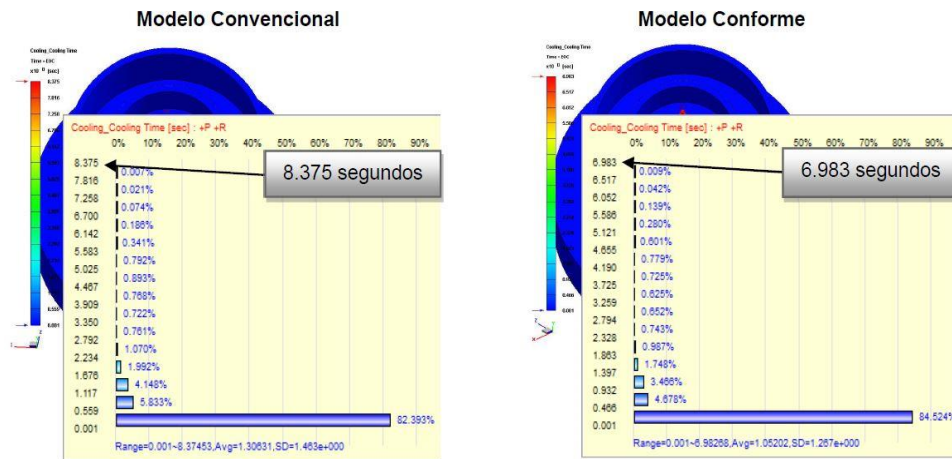


Figura 17 - Tempo total de arrefecimento para os 2 modelos (Bom, 2014)

De modo a compreender melhor o impacto que a redução do tempo de arrefecimento tem no tempo de ciclo, encontra-se representado na Figura 18 o tempo de ciclo total para os dois modelos (Bom, 2014).

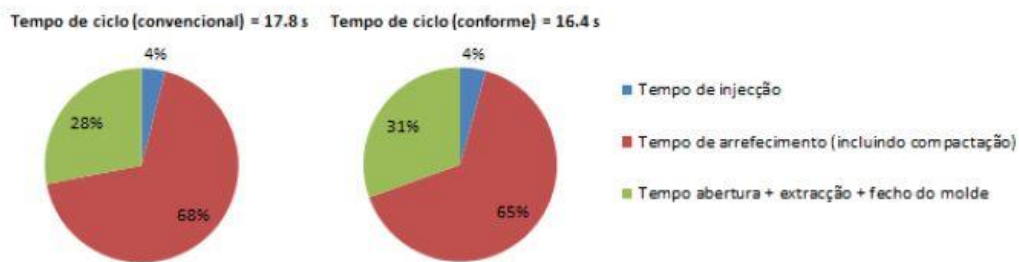


Figura 18 - Tempo de ciclo total para os 2 modelos (Bom, 2014)

Analisando a Figura 18 é possível verificar que se obteve um tempo de ciclo de 17,8s para o modelo que apresenta os canais convencionais e 16,4s para o modelo com canais conformáveis, concluindo-se que a implementação de um sistema de controlo de temperatura que acompanha toda a geometria da peça permite uma redução de 8% no tempo de ciclo de injeção. Importa realçar que já se encontram incluídos 5s que correspondem ao tempo de abertura e fecho do molde, assim como à extração do artigo, sendo este o valor sugerido por defeito pelo *Moldex3D* (Bom, 2014).

Apesar de esta melhoria parecer, à primeira vista, insignificante, importa referir que normalmente um molde em aço é concebido para ter uma vida útil longa, podendo em muitos casos atingir os 2 ou 3 milhões de ciclos. Deste modo, esta redução de 8% pode permitir à empresa responsável pela produção de peças uma poupança significativa, visto que a cadência de produção aumenta.

2.5. Desgaste em Blocos Moldantes de Moldes Híbridos

Atualmente, os moldes híbridos podem ser utilizados em pequenas ou médias séries de injeção, sendo que o seu ciclo de vida e a sua capacidade de reproduzir peças dentro de tolerâncias admissíveis está diretamente relacionado com a minimização do seu desgaste (Gomes, 2015).

O design da peça e a estrutura do molde são fatores a ter em conta de modo a garantir que o desgaste permaneça em valores toleráveis durante a vida útil. Ou seja, um molde que não esteja corretamente dimensionado pode conduzir a um aumento do desgaste visto que a pressão que é aplicada durante o ciclo de injeção acelera a degradação dos componentes. À semelhança dos moldes de injeção convencionais, os moldes híbridos devem garantir um ciclo de moldação tão curto quanto possível de modo a maximizar a produção.

A falha em blocos moldantes de moldes híbridos está, geralmente, associada a tensões resultantes da fase de extração do artigo, dependendo da contração e do coeficiente de atrito entre a zona moldante e a moldação. A contração é um fator muito importante a considerar aquando do *design* de peças plásticas com tolerâncias muito reduzidas. Em moldes híbridos, as dimensões finais não estão apenas relacionadas com a contração, sendo que a deformação ocorrida em zonas moldantes não metálicas é outro aspeto a ter em conta, fruto da pressão inerente ao próprio processo. Tal como se irá ver no caso de estudo, há uma tendência para haver remoção de partículas de material (“chips”) próximo do canal de injeção, possivelmente devido à degradação térmica (Martinho P. G., 2010).

O desgaste abrasivo, adesivo e corrosivo são os três tipos de desgaste que os moldes podem sofrer aquando da sua utilização. O desgaste abrasivo ocorre quando há remoção de material através do contacto progressivo entre superfícies de materiais com durezas distintas, sendo que o material mais duro retira partículas ao outro, originando fissuras e, conseqüentemente, desgaste. O desgaste adesivo resulta do deslizamento sob pressão entre duas superfícies sólidas. Neste caso, as projeções de superfícies são deformadas plasticamente e podem ser unidas nos locais onde se verifica a maior pressão. Este tipo de desgaste ocorre quando os materiais das superfícies têm uma afinidade similar. O desgaste erosivo consiste na remoção de material por impulso quando as partículas embatem numa extremidade (Tsouknidas, 2011).

Durante a fase de controlo de temperatura, a rugosidade do polímero e das superfícies moldantes, a contração associada ao processo e a adesão entre materiais conduz ao aumento das forças de atrito entre o artigo moldado e a bucha que devem ser superadas. Deste modo, existem duas soluções que podem ser adotadas com o objetivo de minimizar o desgaste. Deve-se efetuar o polimento das superfícies de forma a reduzir o *mechanical interlock*, isto é, o atrito entre o artigo moldado e a superfície moldante. Outra solução consiste no aumento da dureza da zona moldante quer seja através da seleção de outro tipo de aço ou tratamento térmico, sendo esta medida considerada a mais eficaz para combater o desgaste da superfície moldante (Martinho P. G., 2010).

Vasconcelos *et al.* verificou um elevado desgaste em blocos com resina *epoxy* e carga de alumínio e relacionou-o com as partículas oriundas e arrancadas da superfície moldante do bloco (Vasconcelos, Lino, Batista, & Neto, 2006). Associaram a diminuição da integridade do material com a coesão entre as partículas da resina e do alumínio devido à resistência de interface. Além disso, também afirmaram que a geometria equiaxial das partículas de alumínio e a natureza química produzem uma força de adesão relativamente baixa à matriz *epoxy*, como sugerido anteriormente por *Barthés-Labrousse et al.* (Barthés-Labrousse, Marsh, Minel, & Gorse, 1998).

A danificação do canal de injeção e o “*pitting*” são tipos de falha bastante frequentes no que respeita ao desgaste de blocos moldantes com resina *epoxy* e partículas de alumínio. O “*pitting*” consiste na remoção de pequenas partículas de material da superfície moldante e pode estar associado a dois fenómenos distintos: erosão da zona moldante devido à pressão de injeção ou adesão entre partículas do bloco com o polímero injetado (Martinho P. G., 2010).

Tal como já foi referido anteriormente, o tipo de material a injetar é outro dos fatores que está relacionado com o desgaste de blocos moldantes de moldes híbridos visto que há termoplásticos que são mais abrasivos do que outros.

Segundo a *Stratasys*, as ferramentas produzidas através de processos aditivos permitem melhorar o tempo de desenvolvimento de componentes entre 50 e 90%, permitindo avaliar a performance/desempenho destes produtos numa fase ainda inicial do processo. A tecnologia *PolyJet* permite produzir peças com uma boa qualidade superficial, conduzindo a que quase não seja necessário pós-processamento. Quando se utiliza o processo *PolyJet* para a obtenção de blocos moldantes, tanto a vida útil como a qualidade da moldação dependem do termoplástico utilizado no processo de injeção. Quando se utilizam polímeros viscosos, o fenómeno de *short shot* e as linhas de soldadura tendem a aparecer, sendo que uma das formas de resolver este problema consiste no aumento da pressão de injeção. No entanto, os blocos moldantes produzidos por *PolyJet* não suportam pressões de injeção muito elevadas, recomendando-se, por isso, a utilização de termoplásticos mais fluídos. Quando for necessário aumentar a pressão de injeção, é recomendado o incremento do canal de injeção, sendo que esta operação poderá ser sempre feita após a produção do bloco (Stratasys, 2016).

Na Figura 19 encontra-se uma estimativa do número de moldações obtidas por ferramenta, tendo em conta o termoplástico utilizado no processo de injeção. Importa referir que o número de ciclos é relativo visto que a vida útil depende da complexidade do artigo, sendo que *features* altas e com uma espessura reduzida não favorecem a reprodutibilidade do bloco, uma vez que é necessário aumentar a pressão de injeção para as encher.

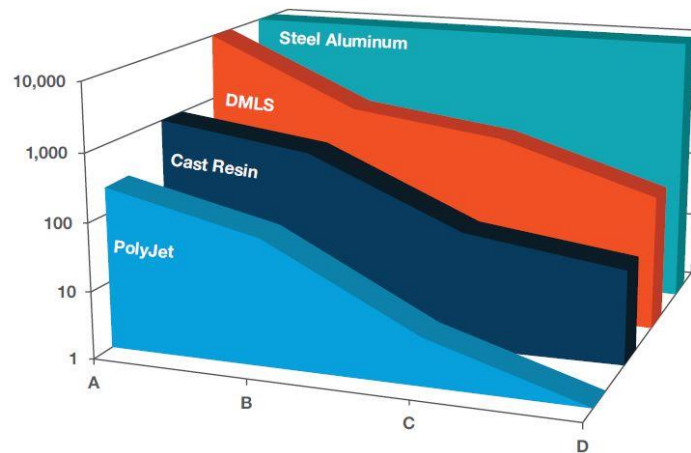


Figura 19 - Estimativa da série obtida por ferramenta, tendo em conta o termoplástico (Stratasys, 2016)

A Figura 19 permite verificar que os termoplásticos se encontram divididos em 4 classes com base na sua facilidade de processamento. A categoria A contém o polietileno (PE), polipropileno (PP), poliestireno (PS) e ABS, sendo que a categoria B inclui o polipropileno com fibra de vidro, o polióxido de metileno (POM) e o policarbonato-ABS. A poliamida, o polióxido de metileno com fibra de vidro e o policarbonato (PC) estão inseridos na categoria C. Por fim, os materiais mais abrasivos, como por exemplo o policarbonato com fibra de vidro e óxido de polifenileno (PPO) encontram-se na categoria D (Stratasys, 2016).

O PP e o PE, enquadrados na categoria A, apresentaram a vida útil mais elevada devido ao seu baixo ponto de fusão e baixa viscosidade. Os termoplásticos da categoria B, nomeadamente o POM e o PP com fibra de vidro, evidenciaram uma vida ligeiramente mais curta do que os da classe A devido ao aumento da temperatura e viscosidade.

Concluiu-se que os materiais menos abrasivos, ou seja, os da categoria A e B permitem obter um número de peças consideravelmente superior aos das outras categorias visto que não provocam um desgaste tão evidente, aumentando assim a sua vida útil do bloco moldante.

De modo a compreender melhor o efeito do desgaste em blocos moldantes obtidos através de técnicas de *Rapid Tooling*, optou-se por apresentar um caso de estudo desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de *Canterbury*, Nova Zelândia. O principal objetivo era desenvolver blocos moldantes através de *Polymer Rapid Tooling* (PRT) e perceber o desgaste sofrido quando submetidos ao processo de moldação por injeção e às diferentes condições de processamento (Bagalkot, Pons, Symons, & Clucas, 2019).

Ao longo do estudo foram analisados 3 casos diferentes cujas zonas moldantes apresentavam geometrias e *features* completamente distintas, traduzindo-se em diversos problemas.

O primeiro exemplo apresentava uma geometria plana e sem *features* complexas. O desafio consistia apenas em preencher a cavidade sem danificar a zona moldante. Os blocos moldantes foram obtidos numa impressora da *Stratasys*, mais precisamente a *OBJET 350 Connex 3 Polyjet Machine* e o material selecionado foi o *Digital ABS*. A espessura de camada escolhida foi de 30 μm , tendo sido utilizado o modo de impressão mais refinado

(*glossy mode*). A cavidade e a bucha foram colocadas numa estrutura *standard* e a máquina de injeção utilizada foi uma *TOYO* com uma força de fecho máxima de 230 toneladas. Para além do jato de água usado para remover o material de suporte, não foi efetuado qualquer tipo de pós processamento.

O segundo exemplo já possuía relativa complexidade, devido ao facto de apresentar algumas *features*, mais precisamente paredes finas, saliências e *ribs*. A impressora, o material, a espessura de camada e o modo de impressão utilizados foram iguais ao primeiro caso. Neste exemplo, optou-se por escolher outra máquina de injeção, aumentando a força de fecho de 230 para 450 toneladas. Importa realçar que a temperatura máxima do molde foi de 45°C de modo a mantê-la abaixo da T_g do material (53°C)

O último exemplo tinha a geometria mais complexa, visto que a linha de junta não era plana e existiam paredes sem saída. As zonas moldantes foram produzidas noutro material, o *Visijet M3-X* da *3D Systems*, numa impressora *ProJet MJP 3600 series* também desta empresa. Para este caso foi selecionada uma espessura de camada de 29 μm , com um método de impressão com uma definição bastante elevada. Relativamente ao pós-processamento, a cavidade e a bucha foram colocadas num forno durante 60 minutos, tendo-se utilizado um detergente quente para remover o material dos suportes. O objetivo deste exemplo consistia em aumentar a vida útil da ferramenta, evitando queimar (*scalding*) a zona moldante devido à falta de fugas de gases.

Antes de avançar para uma explicação mais detalhada sobre o desgaste verificado nos três exemplos, importa referir que foi feita uma aprendizagem ao longo dos três casos desenvolvidos no sentido de melhorar a vida útil dos blocos moldantes. Por exemplo, o primeiro exemplo forneceu importantes dicas sobre a necessidade de controlar a pressão de injeção a fim de evitar falhas após a primeira tentativa. O segundo caso permitiu perceber a importância do tempo de controlo de temperatura.

Tal como já foi abordado anteriormente, estes três exemplos permitiram identificar vários tipos de falha. Deste modo, os investigadores decidiram colocá-los em três categorias: aparecimento de falhas e deterioração da superfície moldante, aumento das fendas ao longo do tempo e fratura de *features*, ou seja, de *ribs*, pequenas saliências, paredes com espessura reduzida ou sem saída e furos.

Aparecimento de Falhas e Deterioração da Superfície Moldante

Relativamente ao aparecimento de fissuras nos blocos moldantes, verificou-se que a fase de injeção possui uma enorme relevância. À medida que o polímero flui para dentro da cavidade, existe um constante atrito entre este polímero fundido e a superfície moldante, resultando na remoção de pequenas partículas de material. Este fenómeno tende a aumentar nos casos onde é injetado um polímero com um baixo índice de fluidez visto que é necessário aplicar uma pressão de injeção maior para encher a peça. A erosão é microscópica, não sendo possível observar a olho nu entre os ciclos de injeção, tendo-se apenas constatado este facto quando se recorreu a um microscópio. Na Figura 20a é possível observar os pedaços de material que foram arrancados da ferramenta e que acabaram por ficar presos à peça plástica,

originando pequenas saliências na superfície da ferramenta. Assim, o ciclo de moldação seguinte originou uma nova peça com estes fragmentos. Na Figura 20b encontram-se igualmente representados estes defeitos na zona moldante. Por último, a Figura 20c representa uma imagem ampliada da superfície moldante deteriorada, sendo possível observar com maior detalhe as saliências. A branco encontram-se os defeitos do ciclo de injeção anterior e a castanho é possível visualizar os novos fragmentos da zona moldante que foram erodidos.

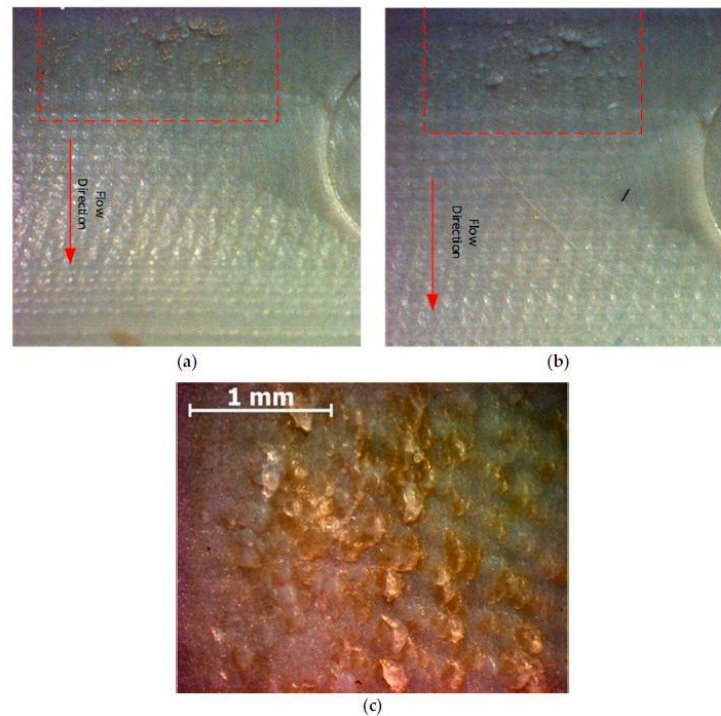


Figura 20 (a) e (b) Erosão da ferramenta após 6 ciclos; (c) imagem ampliada da área erodida (Bagalkot, Pons, Symons, & Clucas, 2019)

Ao longo do estudo, os investigadores tiveram o cuidado de analisar a qualidade das moldações após cada ciclo de injeção, sendo que quando uma das peças surgia com alguma irregularidade, o molde era imediatamente inspecionado para avaliar os estragos. Importa referir que nos primeiros seis ciclos não houve qualquer tipo de problema. No entanto, a partir do sétimo ciclo, verificou-se uma pequena deterioração da superfície moldante, defeito que foi aumentando progressivamente em cada ciclo de moldação.

Nesta categoria ainda foi incluída a deterioração da zona moldante através do aquecimento. *Surface scalding*, termo em inglês utilizado, ocorre quando a superfície moldante queima, quer seja devido ao contacto com o polímero no estado fundido, quer seja devido ao ar/gases quentes desenvolvidos durante o processo de moldação. Este dano é caracterizado pelo aparecimento de pequenas zonas de cor castanha.

Apesar de a temperatura do molde ter sido mantida abaixo da T_g (53°C) antes de cada injeção, o contacto do polímero com a ferramenta aumenta a sua temperatura visto que ocorre transferência de calor. Este fenómeno não se verificou nos primeiros dois casos visto que apresentavam uma linha de partição plana, o que facilitou a realização de canais de fugas de

gases aquando da impressão do bloco moldante. No entanto, o terceiro exemplo, que possuía uma maior complexidade fruto do seu plano de partição apresentar um desnível, teve problemas. O facto da sua linha de junta não ser simples aliado à condicionante de estas zonas intercetarem as chapas do molde, não havendo ligação com o exterior, conduziu à não realização de fugas de gases. Deste modo, a falta destes canais, que tem como função expulsar o ar/gases do interior das zonas moldantes para o exterior, explica a degradação ocorrida apenas neste terceiro exemplo. Importa destacar que este fenómeno não se verificou logo no início da produção, tendo-se apenas observado este defeito após o décimo terceiro ciclo de injeção.

Aumento das Fendas ao Longo do Tempo

Em relação ao aumento das fissuras ao longo do tempo (*crack growth*), este fenómeno verificou-se de forma mais expressiva no exemplo dois. Quando a peça se encontra 95% cheia, a segunda fase, denominada pressurização, começa a atuar com o objetivo de compensar a contração do polímero e forçar o resto material a entrar na zona moldante. Esta etapa conduz a um fenómeno de adesão entre a superfície e o artigo moldado. Na Figura 21 é possível observar o desgaste no final da produção que resultou da remoção progressiva de partículas de material da bucha, culminando na rotura de algumas *features*, nomeadamente o furo e o *rib*.



Figura 21 - Desgaste da bucha resultante da remoção progressiva de partículas (Bagalkot, Pons, Symons, & Clucas, 2019)

Após alguns ciclos de injeção, observou-se que o furo central que se encontrava na bucha começou a deteriorar-se. Quando a fenda se propagou, o artigo moldado começou a surgir com pedaços de material da zona moldante (Figura 22). Nesta altura, a temperatura da bucha era superior à T_g . Este facto poderá explicar esta rotura, uma vez que a ferramenta pode perder resistência.

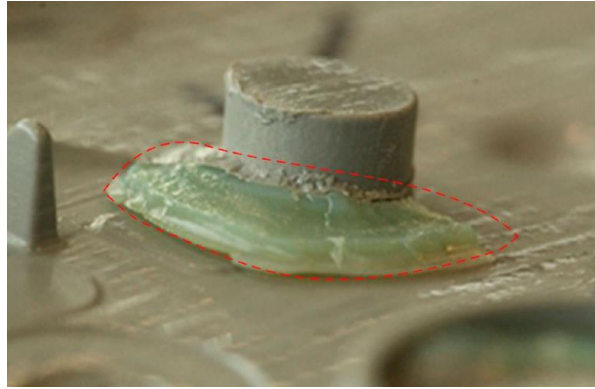


Figura 22 - Artigo moldado com material da bucha (Bagalkot, Pons, Symons, & Clucas, 2019)

A proposta sugerida pelos investigadores é que durante os primeiros ciclos existem danos na superfície moldante que conduzem ao aparecimento de pequenas fissuras. Após alguns ciclos, o polímero tende a entrar nestas fendas e expande-as. À medida que as fissuras aumentam, a quantidade de polímero que tende a entrar antes de solidificar também aumenta. Quando ocorre a extração, o polímero, que, entretanto, já solidificou, arranca as partículas do bloco moldante. Deste modo, verifica-se que este tipo de falha (*avulsion failure*) é progressiva, não ocorrendo de forma abrupta.

Fratura de *Features*

Relativamente à fratura de *features*, durante a fase de injeção o polímero fundido é forçado a entrar no molde sob pressão. Deste modo, quando a frente de material se encontra a preencher a zona moldante, esta exerce uma força sobre estas *features*, nomeadamente, paredes, saliências e *ribs*. Esta força, quando excede a tensão de cedência do material àquela temperatura, pode resultar na sua fratura. Importa referir que a pressão de injeção é mais elevada no início do ciclo, acabando por diminuir gradualmente. Este facto significa que todas as *features* que se encontram mais próximas do ponto de injeção são mais suscetíveis à rotura do que aquelas que se encontram em zonas mais distantes. No exemplo 1 observou-se este tipo de falha na parede onde se encontrava o canal de injeção devido à elevada pressão de injeção verificada junto a esta *feature*. A parede do canal de injeção fraturou parcialmente logo no primeiro ciclo, não tendo sido arrancada da zona moldante. No entanto, após alguns ciclos de injeção, ocorreu a fratura e houve remoção de material da superfície moldante. Na Figura 23 é possível observar este tipo de fratura, sendo o termo inglês “*shear failure*” o utilizado para descrever esta situação.

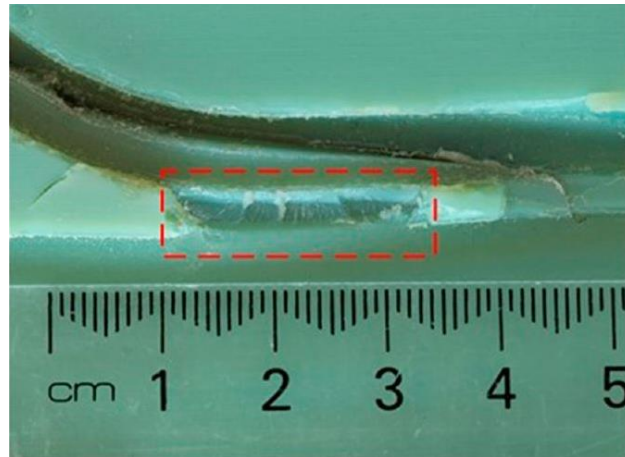


Figura 23 - Falha na parede do canal de injeção (Bagalkot, Pons, Symons, & Clucas, 2019)

Os investigadores optaram por classificar este tipo de falha como “*shear failure*”, ou seja, falha de cisalhamento, devido ao facto de haver uma razão de aspeto pequena entre a altura e a espessura da parede. Verificou-se que esta falha foi crítica visto que comprometeu a produção de mais moldações uma vez que não era seguro continuar a injetar. Este exemplo permitiu concluir que este tipo de falha poderá ocorrer em zonas próximas do ponto de injeção apresentem paredes com espessura reduzida.

Ainda dentro da fratura de *features*, no exemplo 2 verificou-se a destruição de um castelo de material que dava origem a um furo no artigo moldado. Após apenas cinco ciclos de injeção, todas as peças produzidas apareceram com um aumento de espessura, em vez de um furo, visto que a *feature* que lhe dava origem já não se encontrava presente. Importa referir que esta apenas se encontrava a 5mm da zona onde o polímero entra, sendo a *feature* do molde que sofreu com a pressão de injeção mais elevada. Na Figura 24a é possível observar o castelo de material antes de ocorrer o primeiro ciclo de injeção, sendo que na Figura 24b encontra-se presente a falha provocada pela pressão de injeção.

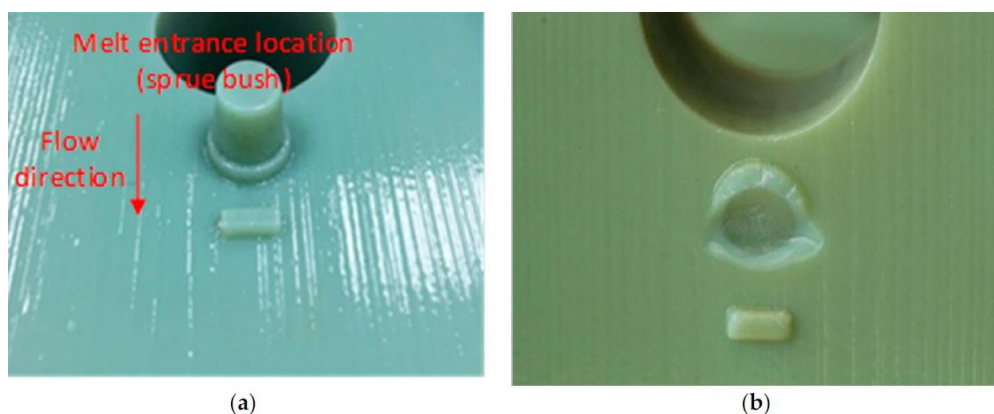


Figura 24 - a) Castelo de material antes da moldação; b) Falha devido à elevada pressão de injeção (Bagalkot, Pons, Symons, & Clucas, 2019)

Os investigadores sugerem que durante a fase de injeção o polímero exerce uma pressão elevada na face da *feature* que se encontra mais próxima do ponto de injeção, originando uma flexão. Quando a frente de fundido alcança a parte de trás, constata-se que existe uma

diferença de pressão entre as duas zonas, conduzindo a uma redução da flexão deste castelo de material. Este ciclo é repetido durante cada moldação, sendo responsável por desenvolver uma fissura na superfície moldante que tende a aumentar, provocando a rotura completa desta zona. Importa referir que as *features* com uma elevada razão de aspeto altura/espessura são as mais vulneráveis a este tipo de falha, designado por *bending failure*.

Apesar de o artigo moldante apresentar este defeito, os investigadores consideraram que esta falha não era crítica, ao contrário do exemplo anterior, uma vez que ainda era seguro injetar com esta ferramenta.

Por último, há ainda a considerar a fratura de extremidades. Há medida que o número de ciclos de injeção aumenta, estas zonas tendem a deteriorar-se cada vez mais. Esta fratura de extremidades ocorre de forma mais significativa em zonas próximas do ponto de injeção devido à elevada pressão que se faz aí sentir, ao contrário das áreas mais afastadas onde o desgaste não é tão evidente. Na Figura 25a é possível observar a fratura de uma extremidade da ferramenta aquando da extração do artigo, enquanto na Figura 25b encontra-se um canto quebrado devido à pressão de injeção.

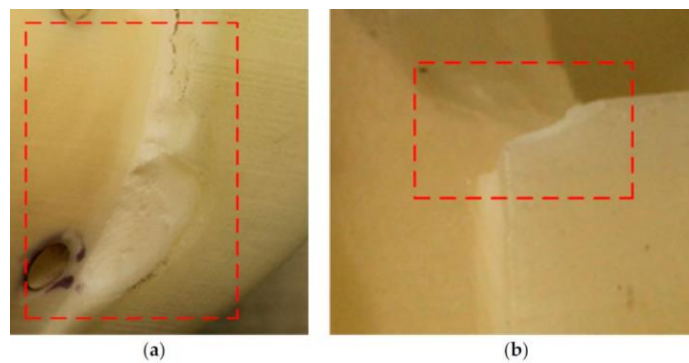


Figura 25 - a) Fratura de uma extremidade durante a extração; b) Canto lascado devido à pressão de injeção (Bagalkot, Pons, Symons, & Clucas, 2019)

Outra das razões que explica a falha de extremidades é a saída das paredes. Durante a extração, existe um constante atrito entre o artigo moldado e as paredes das zonas moldantes, conduzindo a uma degradação das extremidades destes blocos.

Durante o exemplo 1, a fratura de extremidades não foi considerada uma falha relevante visto que não conduziu a nenhum problema de segurança que implicasse a suspensão imediata da produção. No exemplo 2, este fenómeno não foi considerado dado que o bloco moldante foi apenas utilizado durante 5 ensaios, tendo depois ocorrido “*shear failure*”, ou seja, quebra de *features*. O exemplo 3 foi o mais interessante neste tipo de falhas visto que o bloco moldante manteve-se intacto durante os primeiros oito ciclos de injeção. No entanto, a partir do nono ciclo verificou-se uma deterioração progressiva das extremidades, sendo que no décimo quarto ciclo, aquando da fase de extração, foi arrancado um grande fragmento de material da bucha. Após este fenómeno, começou a aparecer rebarba visto que a extremidade quebrada se encontrava na linha de junta. O desgaste da superfície foi apenas nas extremidades por onde o material fundido passa, sendo que o material arrancado apenas ocorreu em paredes sem saída. No fim do décimo nono ciclo verificou-se que a fratura

apresentava 5mm de largura, optando-se por parar com a produção visto que esta falha já possuía umas dimensões significativas. De qualquer modo, dos três exemplos estudados, concluiu-se que este bloco foi o que atingiu a maior longevidade (19 ciclos).

Os resultados deste caso de estudo permitiram concluir que existem vários métodos de falha em blocos moldantes produzidos através de polímeros. Ao longo do estudo são dadas várias sugestões com o objetivo de aumentar a vida útil do molde, destacando-se a utilização de parâmetros mais conservadores ou a alteração do *design* do artigo.

Este estudo permitiu identificar os parâmetros de processo críticos e o seu efeito nos diferentes blocos moldantes. A temperatura do molde é um dos mais importantes visto que afeta todas as áreas da ferramenta e contribui para vários tipos de falha. Por outro lado, a pressão de injeção é apenas relevante em certas áreas do molde. Ou seja, este parâmetro apresentou uma enorme importância em *features* próximas do ponto de injeção visto que é aí que se verifica uma maior pressão, enquanto em zonas mais afastadas não teve grande relevância na falha dos blocos moldantes. O design do artigo também é importante em zonas que possuam *features* com cota elevada.

Para os exemplos estudados os investigadores concluíram que é fiável construir blocos moldantes com temperaturas até 250°C, sendo expectável obter até 14 moldações antes de haver qualquer mecanismo de falha. Ou seja, é possível obter uma quantidade limitada de peças a partir da construção de uma ferramenta com custos relativamente baixos. Este facto é importante porque o comportamento mecânico de uma peça moldada por injeção é bastante diferente de uma obtida diretamente através de impressão.

3. Trabalho Experimental

O capítulo 3 descreve todo o trabalho experimental desenvolvido durante esta dissertação, desde o projeto CAD ou modelação do molde convencional (aço) até às alterações realizadas na chapa 3, chapa das buchas, para que esta possa integrar os blocos moldantes produzidos nas diferentes tecnologias. São também apresentadas todas as simulações numéricas computacionais (CAE) efetuadas no *software Moldex3D R16*, assim como todo o trabalho de preparação realizado com o objetivo de avaliar o arrefecimento da moldação com a aplicação de canais de controlo à peça de estudo. Neste capítulo é também explicado o processo de construção dos blocos moldantes pela técnica de vazamento de resina e vácuo (*vacuum casting*), desde a construção do molde de silicone ao vazamento da resina utilizada, incluindo os processos de cura e pós-cura. É também dado destaque ao controlo dimensional dos diversos blocos moldantes obtidos assim como às moldações produzidas no molde em aço. Por fim, é feita referência aos testes de injeção realizados.

3.1. Peça de estudo

Na Figura 26 encontra-se a peça plástica alvo de estudo deste trabalho, salientando-se a espessura geral de 2mm e a inclinação da aba de 120°.

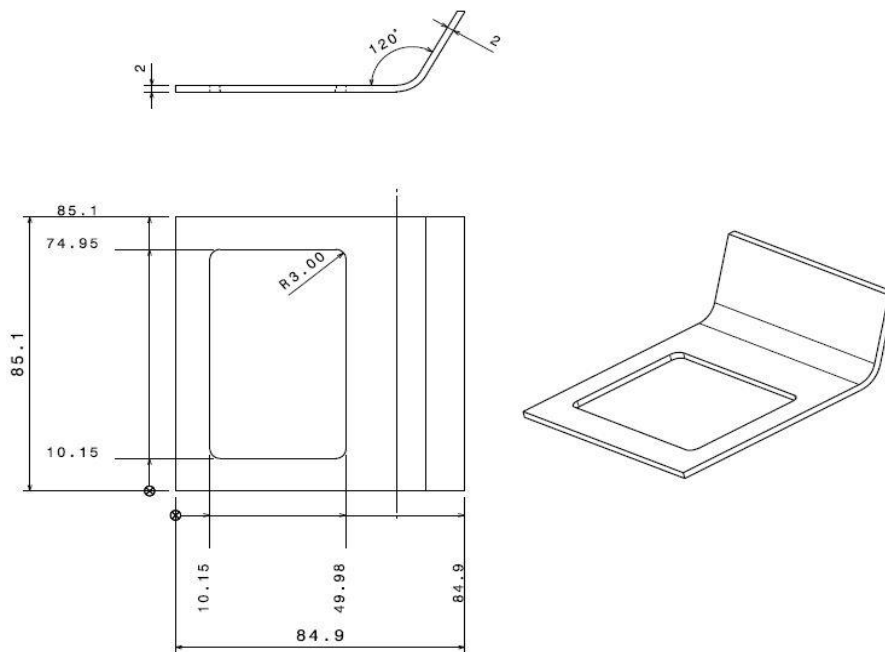


Figura 26 - Geometria e dimensões da peça de plástico em estudo

3.2. Projeto do Molde

Um molde para injeção de termoplásticos é constituído principalmente por 7 sistemas funcionais que em conjunto possibilitam a produção de peças plásticas. Todos eles apresentam uma enorme importância, não sendo possível obter um correto funcionamento do molde sem um deles. Os sistemas funcionais presentes num molde para injeção são os seguintes:

- Estrutura: conjunto de todas as chapas que permitem montar todos os outros componentes;
- Zonas moldantes: formado pelas cavidades, buchas e, eventualmente, elementos móveis que são responsáveis por definir a geometria da peça a moldar;
- Alimentação: é responsável pelo transporte do polímero fundido desde a máquina de injeção até às zonas moldantes, permitindo o seu preenchimento;
- Guiamento, travamento e centramento: permite, por um lado, montar o molde de forma correta, e por outro, ajustar as duas (ou mais) metades do molde, assegurando a reprodutibilidade dimensional do artigo a moldar;
- Escape de gases: responsável pela evacuação do ar que é pressurizado dentro das zonas moldantes quando o molde está fechado e é injetado o material plástico no seu interior;
- Controlo de temperatura: permite regular a temperatura do molde e do artigo a moldar;
- Extração: garante a expulsão correta da peça;

O molde utilizado como referência para este trabalho apresenta uma estrutura monobloco, ou seja, não existe chapa das cavidades (chapa 2) e chapa das buchas (chapa 3) com a respetiva caixa para as zonas moldantes, daí a designação utilizada. Isto é, as zonas moldantes (cavidade e bucha) apresentam, para além da geometria da peça a moldar, furos para as guias principais e casquilhos, assegurando assim o guiamento e o centramento destas com a restante estrutura. Tanto a cavidade como a bucha possuem os circuitos do sistema de controlo de temperatura, não sendo necessário recorrer ao uso de vedantes visto que neste tipo de estrutura não existe passagem do fluido refrigerante entre a zona moldante e a respetiva chapa.

O molde utilizado nesta dissertação tem de dimensões principais 296x196x247 mm e as chapas 1 e 9 estão salientes 25mm para o aperto à máquina de injeção (Figura 27). As entradas e as saídas dos canais de controlo de temperatura encontram-se no lado contrário ao operador. O sistema de extração é constituído por 5 extratores, 4 para auxiliar na expulsão da peça de plástico e apenas 1 para ejeção do canal de alimentação.

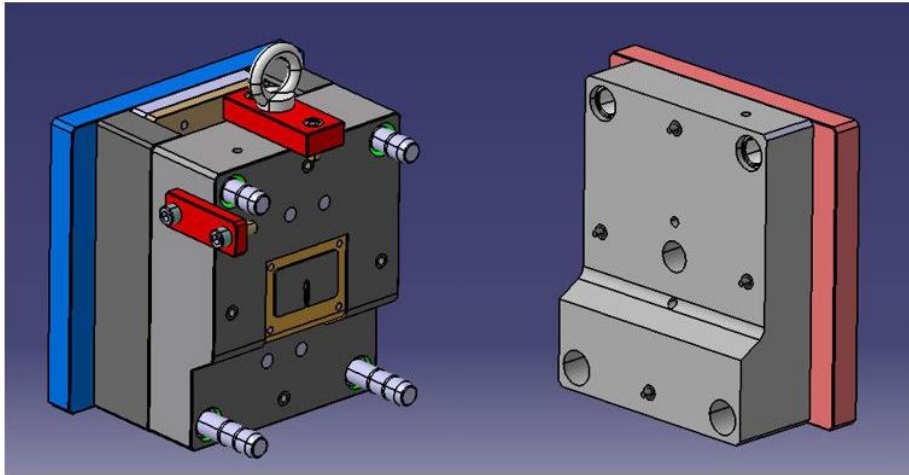


Figura 27 - Molde 3D: Extração (esquerda) e Injeção (direita)

Visto que o molde referência apresenta uma estrutura monobloco, foi necessário modelar no *software* CATIA V5 a chapa 3 de forma a poder integrar os blocos moldantes buchas construídos através das diversas técnicas de fabrico rápido (*Rapid Tooling*) reaproveitando a estrutura existente. Para garantir um bom encaixe/ajustamento dos blocos moldantes bucha na respetiva chapa do molde, houve necessidade de modelar esta chapa para facilitar as eventuais operações de pós processamento dos blocos obtidos. Ou seja, só com o CAD é possível obter um ficheiro IGS que serve para o acabamento da zona moldante. Na Figura 28 encontra-se a chapa 3 com a respetiva caixa para colocar o bloco moldante bucha.

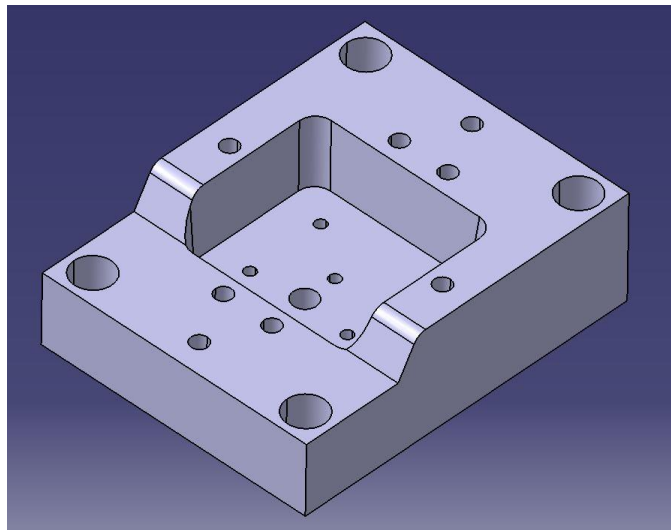


Figura 28 - Chapa das buchas adaptada

O molde utilizado neste projeto permite proceder à substituição do bloco moldante bucha sem ser necessário desmontar toda a extração e, conseqüentemente, sem retirar a estrutura do molde da máquina de injeção. Com esse propósito foram adicionadas 3 fixações pela parte da frente do bloco moldante possibilitando uma permuta rápida e eficaz. Fizeram-se ainda duas roscas M6 na zona central do bloco para facilitar a remoção do interior da chapa 3.

3.3. Simulação Numérica Computacional

Neste trabalho foi utilizado o *software Moldex3D R16* que permitiu realizar as simulações numéricas computacionais. Deste modo, foi estudado o enchimento, a compactação e o controlo de temperatura do caso de estudo, tendo-se procurado otimizar tanto o tempo de ciclo como a eficiência da remoção de calor dos canais de controlo de temperatura.

Antes de efetuar a importação dos modelos para o *Moldex3D R16* houve necessidade de preparar os ficheiros. Para isso, recorreu-se ao *software CAD CATIA V5 R18* que permitiu modelar a peça de estudo, o canal de alimentação e os circuitos de controlo de temperatura. Após este procedimento, realizou-se a preparação da malha no *Moldex3D Designer*. A peça foi importada em formato STL, adicionou-se o canal de alimentação (*cold runner*) e especificou-se o *melt inlet*, ou seja, a face onde o material vai entrar para o canal. De seguida importaram-se as superfícies exteriores correspondentes às chapas do molde no *moldbase* do *Moldex3D*. Posteriormente, as linhas de centro dos canais de controlo de temperatura foram importadas em formato IGS, tendo-se definido o respetivo diâmetro e as entradas/saídas do fluido. Por fim, gerou-se a malha mais refinada possível (nível 5), procurando ter um número de elementos inferior a dois milhões.

Na Tabela 1 encontram-se representados os principais dados da malha utilizada na simulação do modelo com canais convencionais.

Tabela 1 - Dados da malha utilizada na simulação do modelo convencional

Tipo de Malha (Nível)	<i>eDesign5</i> (Nível 5)
Nº de Elementos	780682
Volume do Artigo (cm ³)	11.79
Espessura Geral (mm)	2.00
Nº de Circuitos	3

Após este procedimento, a malha obtida foi importada para o *Moldex3D* e definiu-se que o material para este estudo era o PP *Moplen HP500N* presente na base de dados do *software*. Na Tabela 2 encontram-se as propriedades mais relevantes do termoplástico utilizado.

Tabela 2 - Propriedades do termoplástico utilizado nas simulações

Material	PP
Nome Comercial	<i>Moplen HP500N</i>
Percentagem de Fibra (%)	0.00
Temperatura de Fusão (°C)	220-250
Temperatura do Molde (°C)	20-50
Temperatura de Extração (°C)	103
Temperatura de Não Escoamento (°C)	122

Apesar do objetivo principal destas simulações ser o de estudar o controlo de temperatura, foi necessário realizar um estudo inicial de enchimento a fim de obter um valor coerente para esta fase do ciclo para depois prosseguir com as restantes análises. Deste modo, após realizar o estudo referido, verificou-se que o tempo de enchimento era de 0,62 segundos. Importa referir que este tempo se adequa aos dois modelos de canais, convencionais e conformáveis, visto que este não está diretamente relacionado com o sistema de controlo de temperatura, sendo o tipo de injeção o mesmo para as duas configurações (canal frio com ataque em filme). Na Figura 29 pode observar-se o resultado do tempo de enchimento.

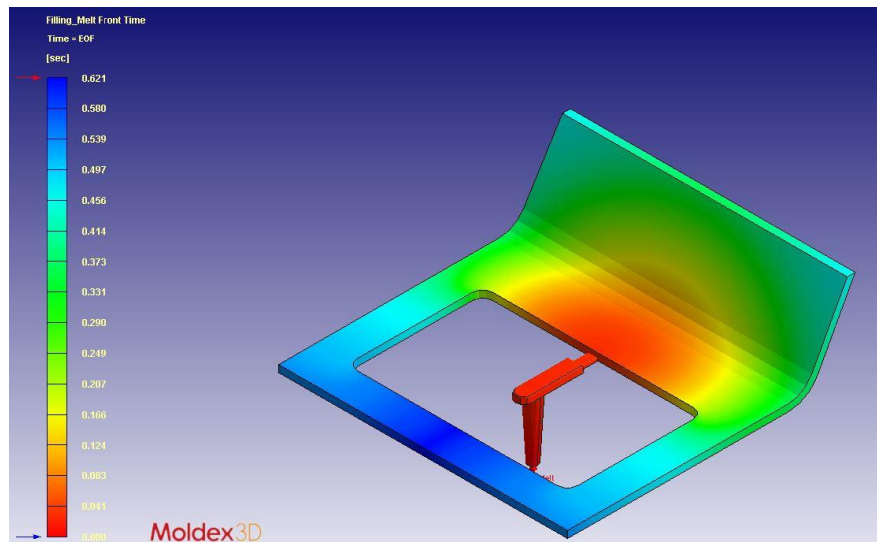


Figura 29 – Resultado da simulação do tempo de enchimento

Antes de iniciar a nova simulação, foi necessário definir as principais variáveis do processo (Tabela 3).

Tabela 3 - Principais variáveis de processamento

Tempo de Enchimento (s)	0,62
Temperatura do Fundido (°C)	220
Temperatura do Molde (°C)	35
Tempo de Compactação (s)	5
Tempo de Abertura do Molde (s)	5

A fase de compactação tem como função manter o material compactado até os canais solidificarem, dependendo, por isso, da configuração do sistema de controlo de temperatura. Neste trabalho verificou-se que o tempo de compactação varia entre 2,8 segundos para o modelo conformável e 3,9 segundos para o modelo de canais convencionais.

O controlo de temperatura, também designado por arrefecimento, ocorre desde o fim da fase de compactação até toda a superfície da peça apresentar uma temperatura abaixo da temperatura de extração.

Na Figura 30 encontra-se representada a distribuição de temperaturas na superfície da peça. Tal como expectável, verifica-se que a aba da peça apresenta um “*hot spot*”, ou seja, uma zona que possui uma maior dificuldade em arrefecer, devido ao défice de canais de controlo de temperatura naquela região, conduzindo a um aumento do tempo de ciclo.

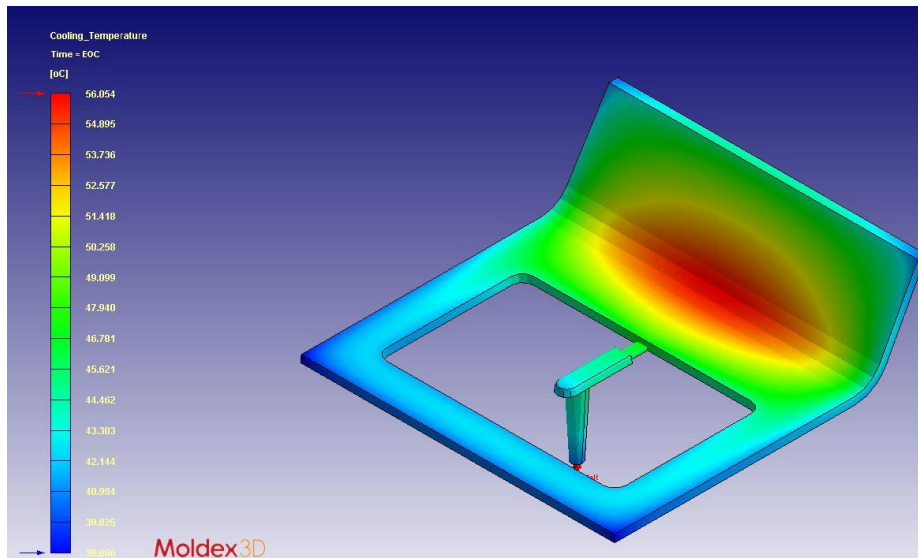


Figura 30 - Temperatura na superfície da peça após a fase de arrefecimento

Na Figura 31 observa-se a eficiência dos canais de controlo de temperatura relativamente à quantidade de calor que é transferido da peça para a zona moldante. Constatamos que o canal presente na bucha é o que apresenta maior eficiência (cerca de 39%), sendo que a média da eficiência ronda os 33%.

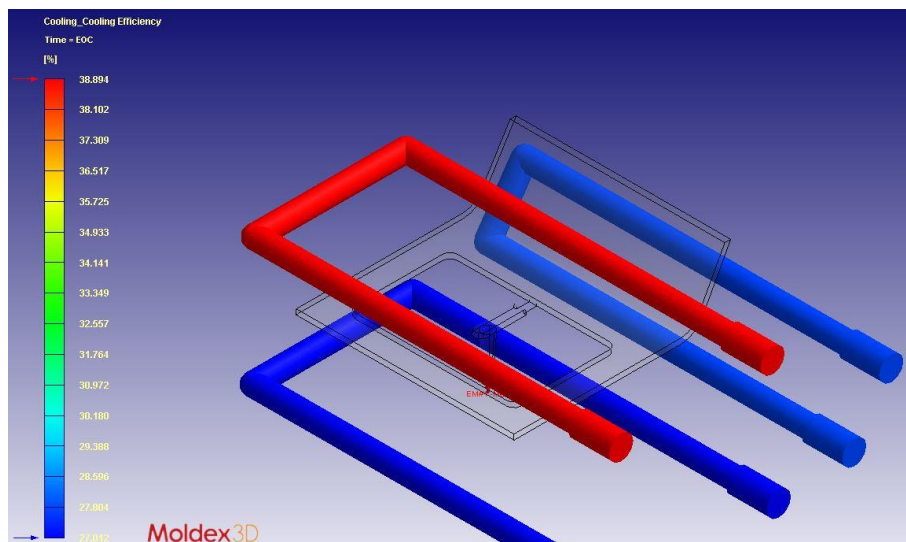


Figura 31 - Eficiência dos canais de controlo de temperatura convencionais

A Figura 32 mostra o tempo de arrefecimento, ou seja, o tempo que decorre entre o fim da compactação até a peça apresentar condições para ser extraída. Verifica-se que são necessários 7,95 segundos até a peça atingir a temperatura de extração, valor que se explica pelo “*hot spot*” demonstrado anteriormente.

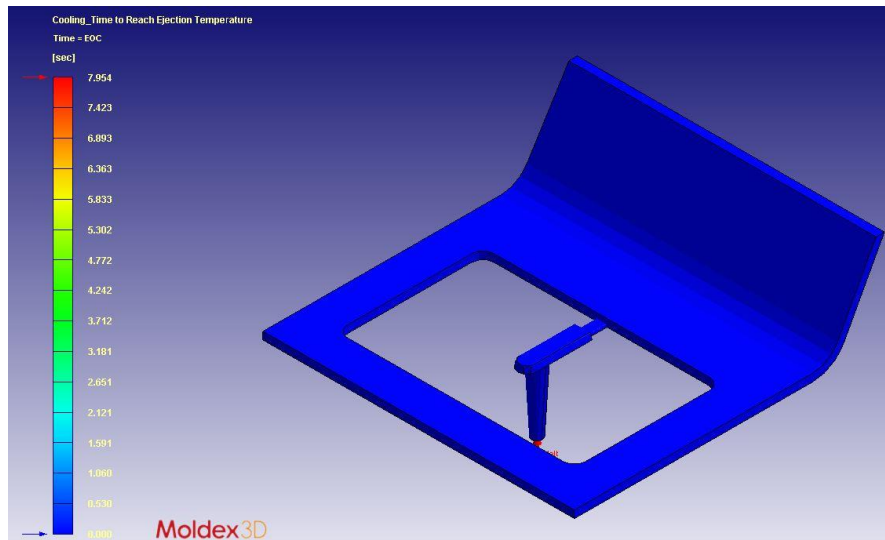


Figura 32 - Tempo de controlo de temperatura do modelo convencional

Visto que os resultados obtidos no modelo com canais convencionais mostram um défice no controlo de temperatura, optou-se por estudar uma configuração de canais conformáveis apenas na bucha, mantendo como referência a entrada/saída do fluido existente na chapa 3. Para além da configuração proposta pelos docentes, foi desenvolvido outro *layout* de circuitos conformáveis. No entanto, a proposta inicial revelou-se mais eficiente, optando-se apenas por mostrar estes resultados. Todo o processo de preparação de ficheiros, importação da malha e definição de parâmetros explicado anteriormente para o modelo convencional foi também realizado para o modelo de canais conformáveis.

Na Figura 33 observa-se a distribuição de temperaturas na peça após a fase de controlo de temperatura. Verifica-se que, apesar de ainda possuir um “*hot spot*”, este apresenta uma dimensão muito menor relativamente ao modelo convencional, não podendo ser totalmente eliminado visto que se irá utilizar a chapa 3 já existente com as respetivas entradas e saídas de fluidos já implementadas. De notar ainda que, a temperatura máxima atingida neste modelo é cerca de 6 graus inferior ao modelo de canais convencionais e que a sua distribuição apresenta uma maior uniformidade.

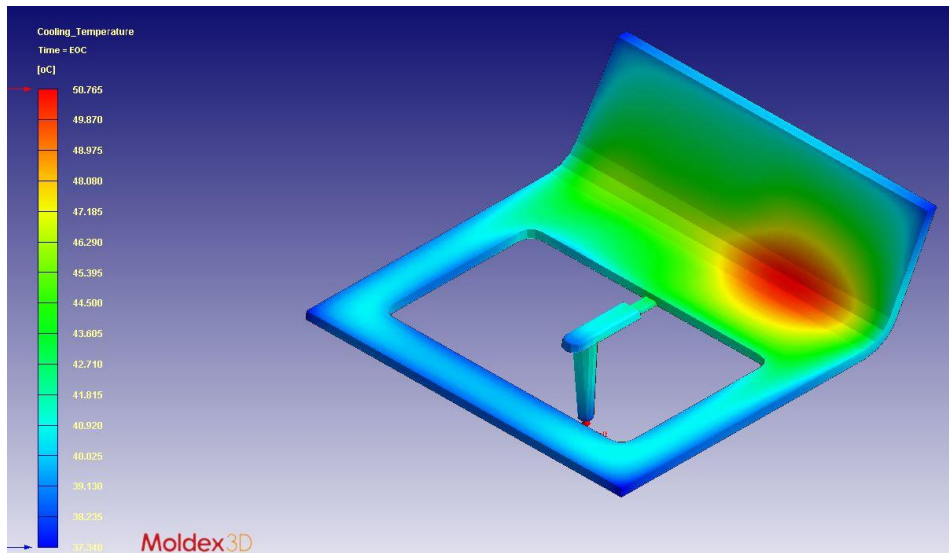


Figura 33 - Temperatura na superfície da peça após arrefecimento

Na Figura 34 encontra-se representada a eficiência dos canais de controlo de temperatura do modelo de canais conformáveis.

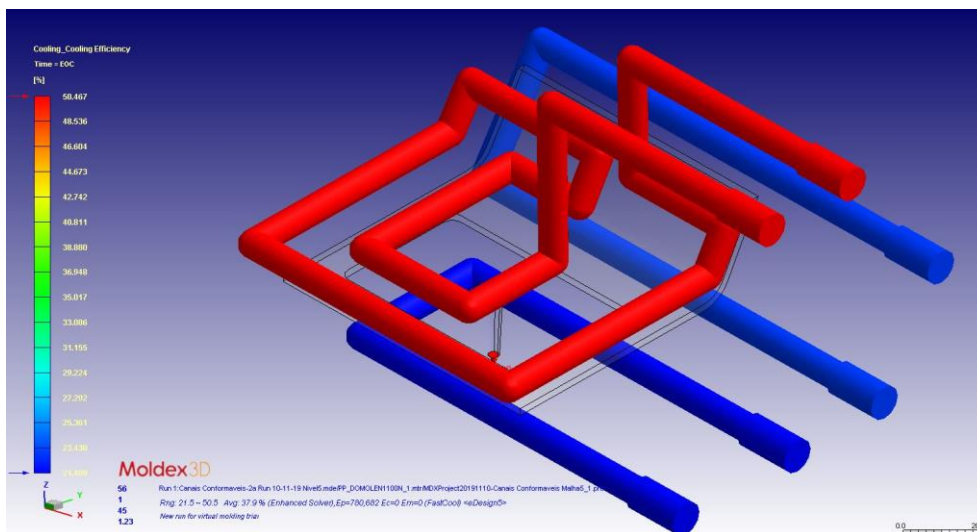


Figura 34 - Eficiência dos canais de controlo de temperatura conformáveis

Verifica-se que houve um aumento considerável da eficiência dos canais da bucha, tendo ocorrido um incremento de aproximadamente 12%. Este aumento justifica-se uma vez que existe uma maior área de canais próximos da moldação, permitindo assim uma transferência de calor mais eficiente. Este *layout* do sistema de arrefecimento, que acompanha a geometria da peça, nomeadamente da aba, traduz-se num aumento de eficiência dos canais de arrefecimento e conseqüente redução do respetivo tempo.

A Figura 35 mostra observar o tempo de arrefecimento para o modelo com os canais conformáveis.

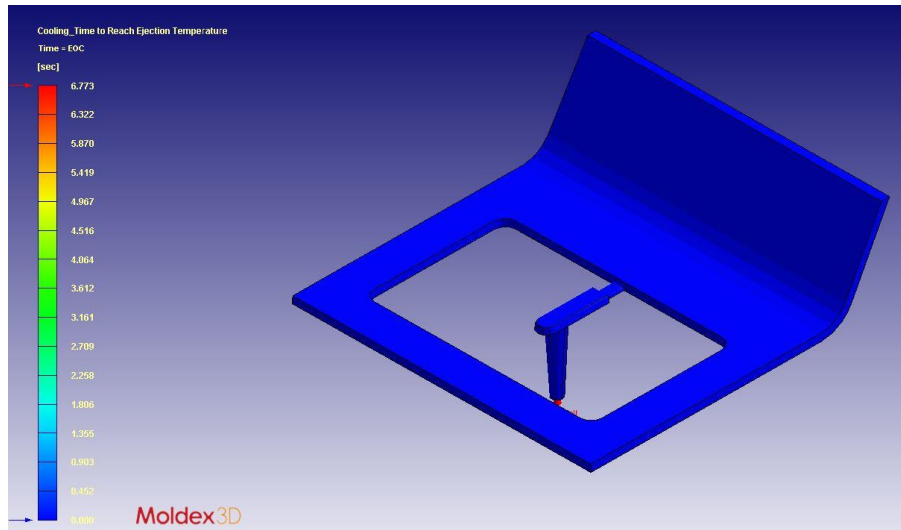


Figura 35 - Tempo de arrefecimento do modelo com canais conformáveis

Conclui-se que são necessários 6,77 segundos até a peça atingir a temperatura de extração, o que corresponde a uma diminuição de 1,2 segundos relativamente ao modelo com canais convencionais, ou seja, aproximadamente 15%.

O *Moldex3D* sugere por defeito que o tempo associado à abertura e fecho do molde, assim como à realização da extração seja de 5 segundos. Tendo em conta todas as fases do ciclo de injeção, verificou-se que a aplicação de canais conformáveis permitiu reduzir o tempo de ciclo total de 20 para 18,8 s, correspondendo a uma otimização de cerca de 6%.

Tal como já referido anteriormente, estas simulações numéricas tinham como objetivo tentar otimizar não apenas o tempo de ciclo e a eficiência do sistema de arrefecimento, mas também aumentar a qualidade final das peças, ou seja, diminuir eventuais defeitos que surgissem, como por exemplo “rechupes” e empenos.

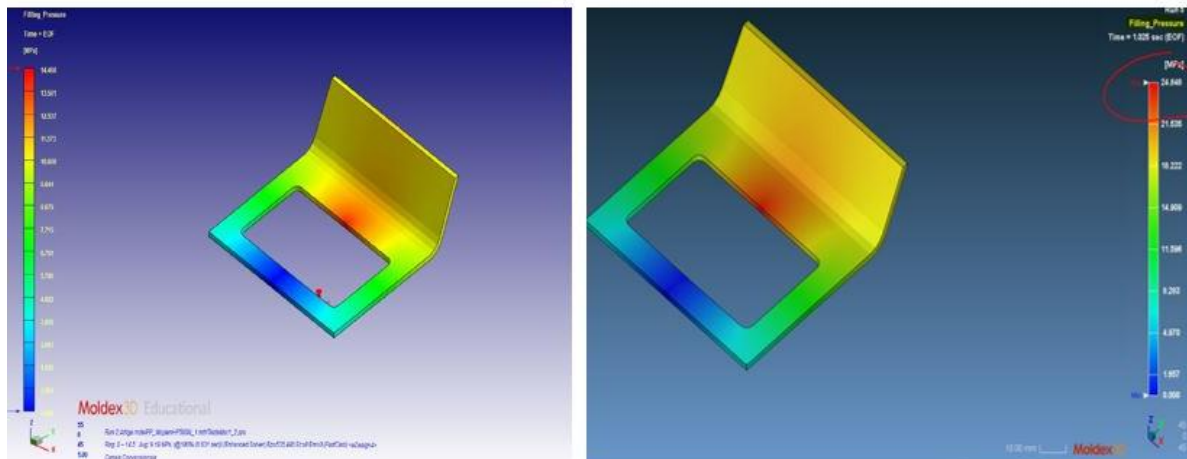
Todas estas simulações foram efetuadas sempre tendo em conta que o material do molde e das respetivas zonas moldantes é aço, visto que este é a referência neste trabalho e as peças obtidas através dele serão modelo de comparação para as que serão produzidas noutras zonas moldantes, em particular, buchas construídas com outros materiais/tecnologias.

No processamento com os blocos moldantes obtidos em materiais alternativos, quer através do vazamento de resina *epoxy* com cargas quer através do processo FDM, utilizaram-se variáveis de processamento mais conservadoras, ou seja, a pressão de injeção e de compactação foi reduzida em 20% e a sua duração foi prolongada 2 segundos, relativamente à solução de molde convencional (Aço/Aço). Na Tabela 4 apresentam-se as variáveis de processamento iniciais a aplicar tendo em conta o material dos blocos moldantes para o PP *Moplen HP500N*.

Tabela 4 - Variáveis de processamento para PP *Moplen* HP500N

Materiais Cavidade/Bucha	Aço/Aço	Aço/Epoxy
Temperatura de Injeção (°C)	220	220
Temperatura Arrefecimento (°C)	35	35
Tempo de Injeção (s)	2	2
Pressão de Injeção (MPa)	20	16
Pressão de Compactação (MPa)	16	12
Tempo de Compactação (s)	5	7
Tempo de Arrefecimento(s)	10	15
Abertura e Fecho (s)	5	5

Tal como já foi referido, o material utilizado nas simulações no *Moldex3D* foi o PP *Moplen* HP500N. No entanto, como um dos objetivos do trabalho consiste em avaliar o desgaste dos diversos blocos moldantes quando sujeitos à injeção de diferentes termoplásticos, foi necessário realizar um estudo adicional. Deste modo, tendo em conta o material disponível na ESTG, selecionou-se o PP *Hostacom* G2NO2 que possui 30% em fibra de vidro. Visto que por norma este tipo de materiais exige um aumento de algumas variáveis de processamento, foi realizada uma simulação numérica computacional mantendo todos os dados anteriormente referidos e modificando apenas o material a fim de perceber qual o impacto da alteração de material. Na Figura 36 encontra-se o valor de pressão de injeção sugerido para os dois materiais a injetar.

**Figura 36** - Pressão de injeção para PP *Moplen* HP500N (esq) e PP *Hostacom* G2NO2 (dir)

Relativamente aos valores obtidos, verifica-se que a pressão de injeção para o material com fibra de vidro sofreu um aumento bastante considerável, passando de 14,46 MPa para 24,85 MPa e a pressão de compactação um incremento de cerca de 55%. Importa referir que estes valores servirão apenas como referência para o início das injeções, tendo de ser ajustados a cada situação.

3.4. Construção dos Blocos Moldantes

Neste subcapítulo encontra-se todo o trabalho experimental desenvolvido no processo de construção dos blocos moldantes com recurso ao vazamento de resina *epoxy* com carga, desde o molde de silicone ao vazamento da mistura, incluindo as respetivas cura e pós-cura dos materiais utilizados. Descreve-se também o processo de construção dos blocos moldantes através de outras técnicas de fabrico aditivo utilizadas.

3.4.1. Vazamento de Resina *Epoxy* com Carga

Para a construção dos blocos moldantes em resina *epoxy* com carga de alumínio foi necessário construir um molde de silicone que permitisse realizar o vazamento desta mistura. O silicone é um material utilizado com frequência na construção de moldes para vazamento de resinas termoendurecíveis, pois para além de ser um processo de construção simples e rápido, apresenta uma enorme facilidade de reprodução de detalhes das peças a moldar e permite uma fácil desmoldação. Deste modo, o vazamento em vácuo sobre um modelo padrão (*master*) possibilita a obtenção de uma zona moldante com um elevado detalhe. A Figura 37 mostra o *master* utilizado na produção do molde de silicone, modelo existente com as dimensões ajustadas à chapa das buchas do molde em aço.



Figura 37 - Modelo (*master*) utilizado

Antes de iniciar a construção foi necessário definir vários aspetos técnico-construtivos, nomeadamente: o local de vazamento foi selecionado para que, aquando desta operação, o primeiro material a introduzir no molde entrasse em contacto com a zona moldante e a definição da linha de junta (*parting line*). Neste caso optou-se por defini-la na base do *master*, facilitando o processo de corte na separação das duas partes do molde de silicone. No entanto, há que ter em conta que, independentemente do local onde se realizasse o furo de vazamento, a desmoldação do bloco seria sempre dificultada uma vez que a saída das paredes se encontrava negativa em relação ao eixo de desmoldação. Tendo em conta que o silicone é um material flexível, definiu-se, pela simplicidade, que a linha de junta seria na base da peça e eventuais defeitos de construção apareceriam nesta base. Caso se tivesse optado pela outra opção, a linha de junta seria mais complexa dado que tinha de acompanhar

a geometria do artigo, o que traria dificuldades e imperfeições no processo de corte. Na Figura 38 encontra-se representado o esquema do molde de silicone com a respetiva linha de junta (*parting line*).

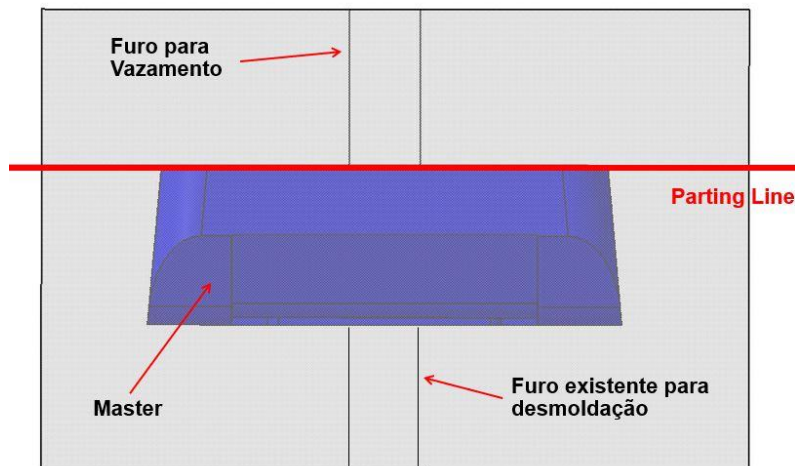


Figura 38 - Esquema do molde de silicone e respetiva linha de junta (*Parting Line*)

Após a definição do esquema do molde acima descrito, foi preparada uma estrutura de madeira com dimensões superiores ao *master* para que, quando fosse efetuado o vazamento, este ficasse com uma espessura de silicone em toda a sua envolvente. Foi aplicado agente desmoldante em todas as superfícies interiores da estrutura assim como no modelo de modo a facilitar a separação do molde de silicone da respetiva estrutura depois da cura e a desmoldação do *master*. De seguida, colou-se um espaçador de plástico ao *master* e posicionou-se esta montagem no centro da caixa pré-feita com o objetivo de criar elevação para que a bucha ficasse com uma base considerável de material. Houve necessidade de preencher os 3 furos já existentes no *master* com plasticina a fim de evitar a fuga de material aquando do vazamento. Estes furos correspondem à entrada e saída dos canais de controlo de temperatura e ao alojamento do extrator central que permite a remoção do canal de injeção. De forma a criar escape de gases aquando do vazamento, foram colocados 5 arames em contacto com a zona de ajustamento.

Após este procedimento, realizou-se a preparação da mistura. O silicone e o agente de cura utilizados foram fornecidos pela *Köraform* (Alemanha). A razão de mistura sugerida pelo fornecedor é de 10:1, ou seja, dez partes de resina para uma parte de agente de cura. Verificou-se que eram necessárias 3500g de silicone (*Köraform A 42 A*) e 350g de agente de cura (*Köraform A 42 B*) para preencher quase na totalidade a caixa e, conseqüentemente, o *master*. Estes dois constituintes foram colocados num recipiente e com o auxílio de um berbequim e de uma vareta misturadora homogeneizou-se a mistura durante 5 minutos. Importa salientar que o misturador com agitador mecânico acoplado a uma bomba de vácuo presente no laboratório não se encontrava a funcionar, razão pela qual não foi utilizado nesta fase do processo. De seguida, a mistura foi colocada na câmara de vácuo e levada até à pressão de 0,1MPa durante 15 minutos para desgaseificar. Após este intervalo de tempo, realizou-se o vazamento de forma lenta na caixa previamente construída. Seguidamente, com o objetivo de remover a totalidade das bolhas, efetuou-se uma nova desgaseificação durante

15 minutos e deixou-se fazer a cura durante 24 horas à temperatura ambiente. Na Figura 39 encontra-se presente o molde de silicone durante o processo de cura.



Figura 39 - Molde de silicone durante o processo de cura

Após o processo de cura, realizou-se o corte do molde de silicone pela linha de junta e removeu-se o *master*. Verificou-se que o silicone, para além de ter uma flexibilidade que permita uma fácil desmoldação, possibilitou a obtenção de uma zona moldante com elevado detalhe visto que reproduziu os pormenores do artigo a moldar. Por fim, o espaçador de plástico foi removido e obteve-se o furo que permitiu realizar o vazamento.

Após a obtenção do molde de silicone, iniciou-se a preparação deste para o vazamento da resina *epoxy* com a respetiva carga de alumínio. Dado que houve dificuldade em reproduzir e posicionar o tubo de cobre que permitia obter os canais de controlo de temperatura, optou-se por não realizar esta tarefa e efetuar, posteriormente, a furação manual.

Na Tabela 5 encontram-se as principais características da resina SR 1660 e do endurecedor SD 1305 da *Sicomín* utilizada.

Tabela 5 - Principais características da resina SR 1660 e endurecedor SD 1305

Parâmetros	Valor
Razão de mistura de resina/endurecedor	100/32
Tempo de desmoldação	48h a 24°C
Tempo de pós cura	16h a 60°C; 4h a 120°C
Temperatura de Transição Vítreia (T_g)	147°C

Seguidamente, efetuou-se a preparação da mistura de resina *epoxy* com o endurecedor, respeitando a razão de mistura sugerida pelo fornecedor. De seguida, foi adicionado à mistura 60% em peso de pó de alumínio, tendo sido esta a percentagem utilizada tendo como base outros trabalhos realizados anteriormente.

De seguida, a mistura da resina final foi levada à câmara de vácuo até à pressão de 0,1 MPa durante cerca de 15 minutos com o objetivo de retirar as bolhas de ar existentes na mistura, melhorando assim as suas propriedades. Após este procedimento foi realizado o vazamento de forma lenta e cuidada no molde de silicone com o intuito de evitar que o ar ficasse aprisionado no seu interior (evitar a formação de bolhas de ar). Uma das principais dificuldades no processo de vazamento de resinas surge aquando da mistura ou durante o próprio vazamento. Daí ser prática comum efetuar o vazamento da mistura na câmara de vácuo, a fim de evitar aprisionamento de gases. Neste caso não foi possível realizar esta etapa visto que a parte deste equipamento onde é colocado o recipiente com a mistura não se encontrava operacional, tendo de se efetuar o vazamento fora da câmara. Seguiu-se uma desgaseificação da mistura vazada durante cerca de 20 minutos e que tinha como função retirar os gases presentes no interior do bloco moldante. Após esta operação, efetuou-se o processo de cura a 24°C durante 48 horas na estufa com rampa de temperatura presente no laboratório de fabrico rápido da ESTG. Por fim, realizou-se a pós cura do bloco, primeiro a 60°C durante 16h e depois a 120°C durante 4h, tal como o fornecedor sugere e que tem como objetivo melhorar as propriedades termomecânicas e resistência ao calor.

Na Figura 40 encontra-se um dos blocos moldantes obtidos sem defeitos na zona moldante.



Figura 40 - Bloco moldante com pó de alumínio obtido

Após a obtenção do primeiro bloco moldante com pó de alumínio sem defeitos superficiais, repetiu-se o mesmo procedimento 4 vezes. Apenas 2 dos blocos apresentaram umas imperfeições superficiais devido ao aprisionamento de gases no seu interior. No entanto, como os defeitos foram residuais, optou-se também por utilizar estes blocos e perceber a evolução destas pequenas falhas durante o processo de moldação por injeção.

3.4.2. Fused Deposition Modelling (FDM)

Após uma avaliação sobre as eventuais tecnologias de fabrico aditivo a utilizar na obtenção dos blocos moldantes, assim como os respetivos custos associados, optou-se por seleccionar o FDM. Depois de contactar algumas empresas, a Lismolde, Lda mostrou-se receptiva para produzir um bloco moldante com custos muito reduzidos em ABS. Após a preparação do ficheiro CAD já com a sobre espessura aplicada, a Lismolde, Lda, de acordo com a sua disponibilidade, começou a construção do bloco moldante na sua impressora, tendo-se obtido o elemento que se encontra presente na Figura 41.



Figura 41 - Bloco moldante em FDM

Na Figura 42 encontra-se a operação de acabamento realizada no bloco moldante obtido em FDM, onde foi efetuado um acabamento por níveis e um acabamento de planos com o objetivo de retirar a sobre espessura aplicada (0,8mm) antes da construção do bloco e que visava compensar a sua contração.

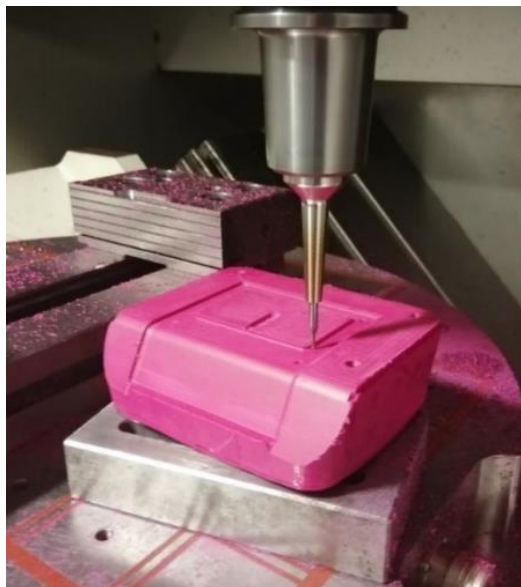


Figura 42 - Bloco em FDM durante a operação de acabamento

No decorrer deste trabalho, a ESTG adquiriu uma impressora 3D de FDM para o Laboratório de Fabrico Rápido. Por isso, decidiu-se que se iria utilizar este equipamento para construir um bloco moldante em ABS. O filamento obtido possui uma T_g de 94°C e uma HDT de 89°C.

Visto que a Lismolde, Lda já tinha produzido um bloco em FDM com a geometria original, optou-se por aumentar ligeiramente a complexidade do artigo a moldar através da inclusão de dois furos. Estas *features* traduzem-se na adição de dois castelos na zona moldante. A localização destes também foi premeditada, visto que se encontram próximo do centro e do local onde a moldação é injetada, ou seja, pontos onde a velocidade e pressão de injeção são mais elevadas. Na Figura 43 encontra-se o bloco moldante aquando do processo de impressão, tendo-se optado pela construção totalmente maciça.

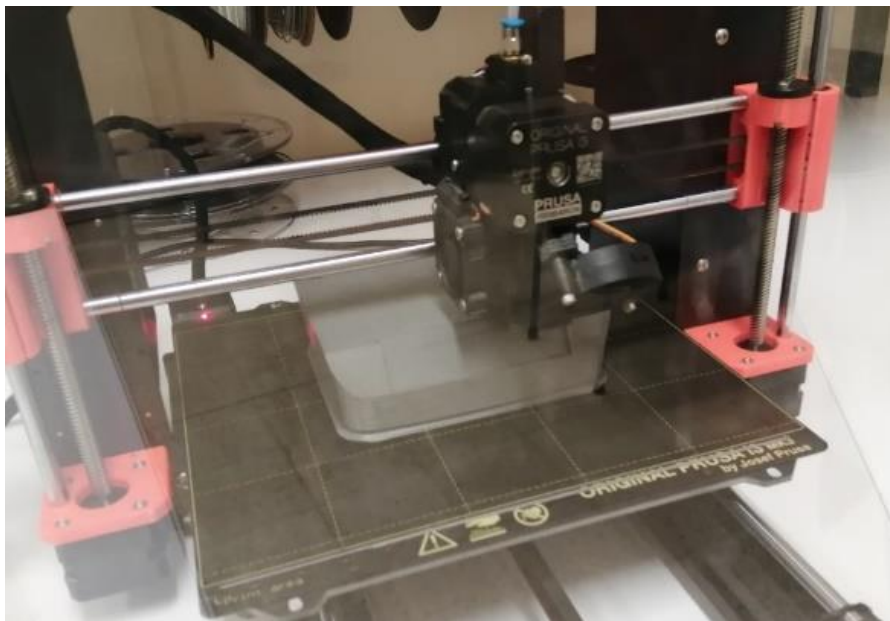


Figura 43 - Bloco moldante aquando da sua construção

Na Figura 44 encontra-se o bloco moldante obtido com as novas *features*. À semelhança do que aconteceu no bloco anterior, foi aplicada uma sobre espessura de 0,8mm antes de iniciar o processo de impressão a fim de compensar a contração.

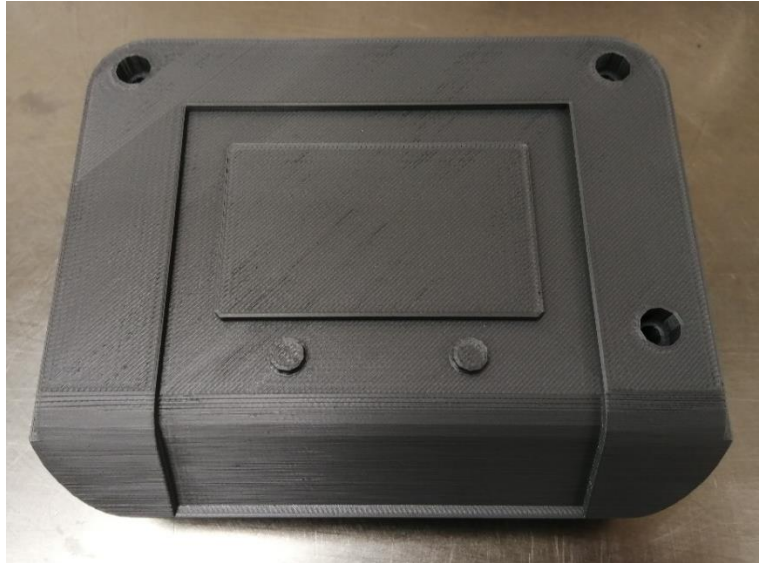


Figura 44 - Bloco moldante com novas *features*

Importa referir que o bloco moldante apenas foi obtido na segunda tentativa. Na primeira impressão verificou-se uma falta de adesão da zona moldante com a plataforma de construção, sendo necessário aplicar, antes do início do processo, uma cola apropriada na mesa da máquina com o objetivo de promover uma melhor adesão. O considerável empeno verificado na base da peça foi o fator que conduziu ao insucesso no primeiro ensaio visto que à medida que a cota de construção ia aumentando, a área de contacto com a plataforma diminuía, pelo que as forças inerentes ao processo acabaram por “arrancar” a peça da mesa quando já tinham decorrido 8 horas. Importa destacar que esta metodologia empírica foi sugerida pelos técnicos do laboratório dado que anteriormente já tiveram dificuldades em peças com um volume considerável.

Dado que não houve disponibilidade de máquina CNC, optou-se por não realizar a operação de pós-processamento neste bloco. Por consequência, o artigo irá apresentar um acréscimo de espessura e de massa, comparativamente com os outros obtidos.

3.5. Controlo Dimensional dos Blocos Moldantes

De forma a validar os blocos moldantes obtidos assim como as peças plásticas, decidiu-se realizar o seu controlo dimensional.

No processo de medição foi utilizada a tecnologia de Digitalização 3D, um método de aquisição de geometrias de peças físicas sem contacto. Segundo o técnico, esta tecnologia tem como princípio a criação de um campo tridimensional através da triangulação entre uma câmara e um projetor de luz LED estruturada. Nesse campo tridimensional, frequentemente denominado de área de trabalho, é colocado o componente a digitalizar (bloco moldante ou peça plástica) e a sua geometria é adquirida através da deformação da luz que é captada pela câmara. A informação é enviada para o *software* em forma de pontos tridimensionais e posteriormente criada a superfície 3D através da ligação dos pontos por segmentos de reta. Este controlo dimensional 3D possibilita a obtenção de relatórios de desvios com a máxima precisão através da comparação do modelo CAD com a peça digitalizada, analisando se as especificações estão dentro das tolerâncias estipuladas. Para além do controlo dimensional, o ficheiro gerado (geralmente em formato STL) pode ser utilizado para engenharia inversa, impressão 3D ou maquinação.

A Figura 45 mostra o controlo dimensional de um dos blocos moldantes obtidos, tendo-se aplicado a mesma metodologia para os restantes blocos. Convencionou-se uma tolerância de 0,30mm.



Figura 45 – Controlo dimensional de um bloco moldante

Na Figura 46 encontra-se a comparação entre o ficheiro CAD e um dos blocos moldantes obtidos. Verifica-se que toda a zona moldante e de ajustamento se encontra dentro de uma tolerância admissível dado que todos os pontos possuem uma diferença inferior a 0,021mm comparativamente com o ficheiro CAD.

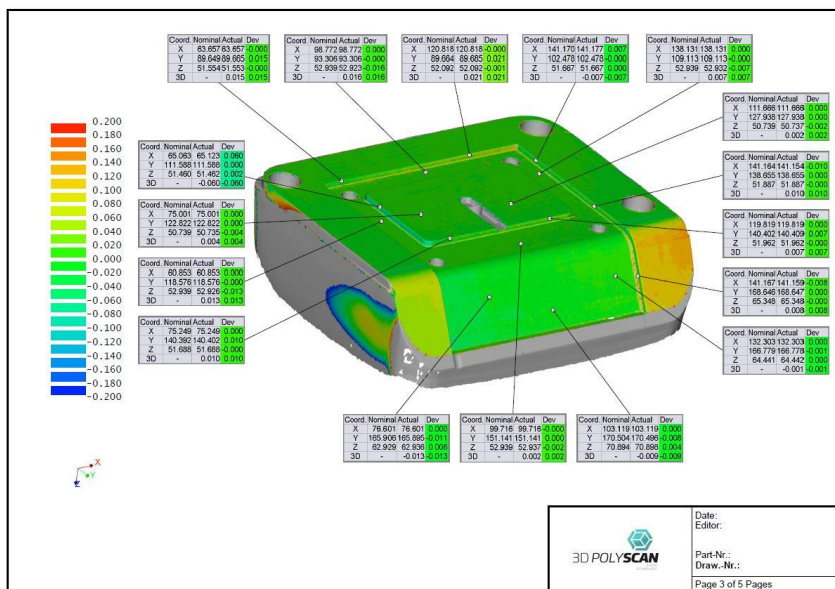


Figura 46 - Relatório do controlo dimensional de um dos blocos moldantes I

Na Figura 47 é possível observar outra perspetiva da comparação efetuada entre um dos blocos moldantes e o ficheiro CAD. Verifica-se que todos os pontos analisados se encontram dentro da tolerância acordada. Importa destacar que apenas o valor de um deles se encontra mais afastado dos restantes pontos examinados, embora ainda dentro da tolerância estipulada.

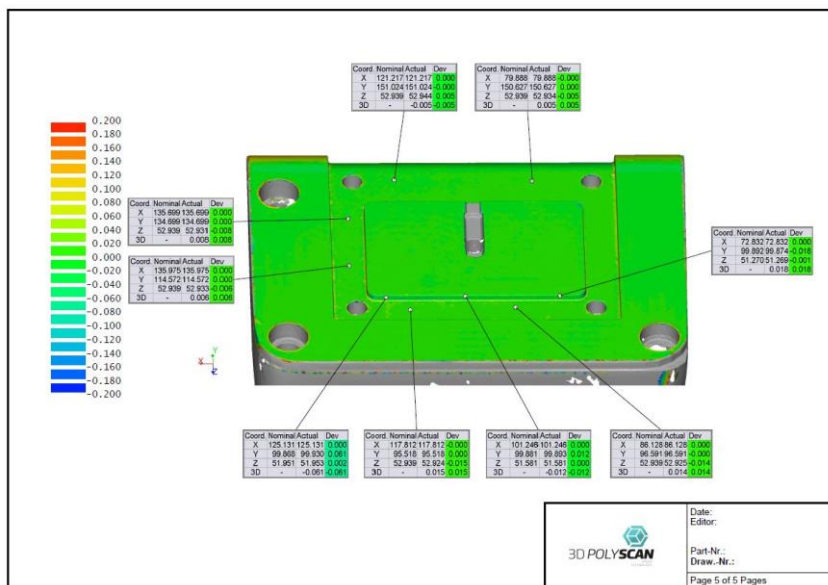


Figura 47 - Relatório do controlo dimensional de um dos blocos moldantes II

Deste modo, conclui-se que este elemento não apresenta áreas fora de tolerâncias geométricas e dimensionais, ou seja, reúne todas as condições para assegurar a reprodutibilidade na moldação por injeção. Este processo foi repetido para todos os outros blocos, tendo-se verificado no relatório dimensional que nenhum deles possuía zonas fora da tolerância estipulada, encontrando-se aptos para realizar os testes de injeção.

Tal como já foi referido anteriormente, a referência para este trabalho é o molde em aço presente no Laboratório de Tecnologia Mecânica da ESTG. Deste modo, antes de realizar os ensaios de injeção com os blocos moldantes produzidos, foram obtidas 10 moldações em PP *Moplen* HP500N para poder analisar e medir, servindo assim como referência para as peças injetadas nos blocos moldantes construídos.

À semelhança dos blocos obtidos, as moldações foram digitalizadas para se poder avaliar se as cotas ainda se encontravam dentro de tolerâncias admissíveis, tendo sempre em conta de que o molde já apresenta alguma idade e, conseqüentemente, possui algum desgaste inerente à sua utilização. No entanto, ao contrário do que aconteceu nas zonas moldantes onde foi obtido um relatório dimensional, optou-se apenas por digitalizar as peças de plástico e obter o respetivo ficheiro STL.

Antes de efetuar a medição, foi necessário definir quais as cotas que seriam inspecionadas. Deste modo, ficou definido que a espessura junto ao canal de injeção (Zona A), próximo da linha de soldadura (Zona B) e a da aba (Zona C) seriam analisadas, assim como a largura da janela (Zona D), tal como é possível observar na Figura 48. Em teoria, a zona oposta ao canal (Zona B) será a menos sujeita ao desgaste, ao contrário da Zona A onde é expectável maior erosão.

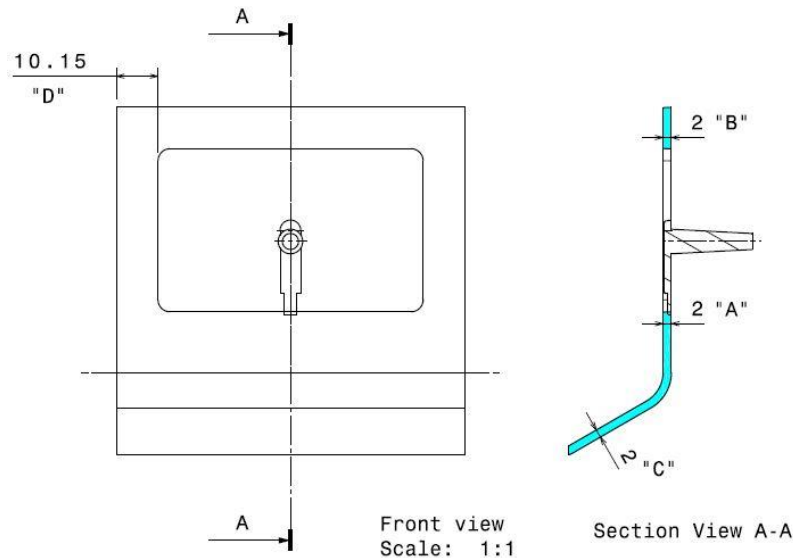


Figura 48 - Cotas de referência inspecionadas da peça plástica

Com o auxílio do programa *INSPECTplus*, o ficheiro STL obtido foi importado e retiraram-se as cotas dos pontos pretendidos, comparando-as com as dimensões do CAD. Na Figura 49 encontram-se as medições efetuadas a uma das peças de plástico.

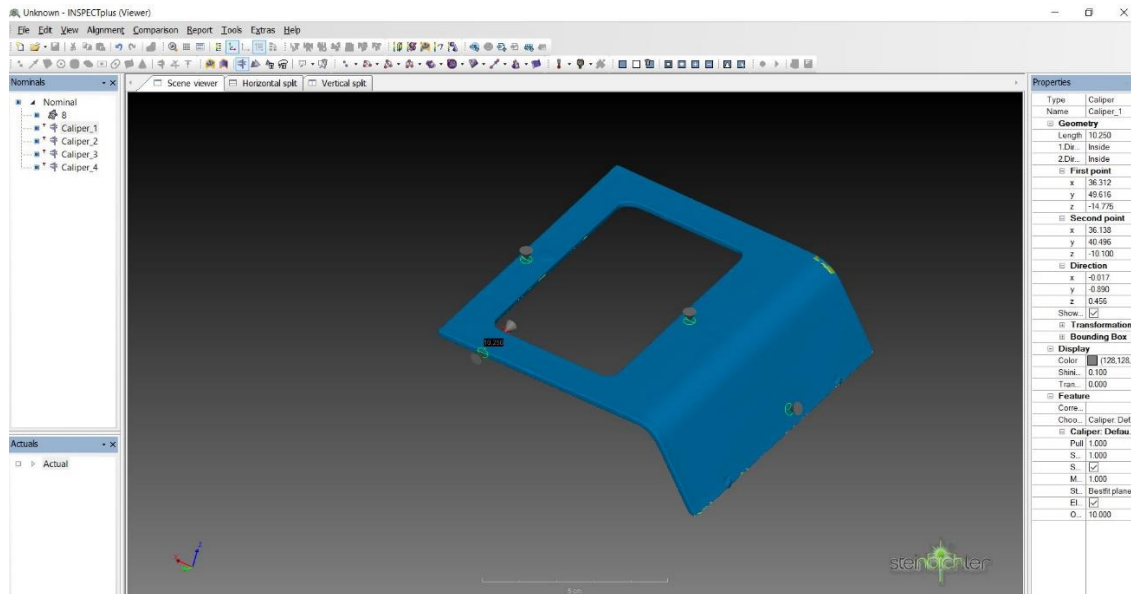


Figura 49 - Controlo dimensional de uma das moldações no *INSPECTplus*

Na Tabela 6 encontra-se o controlo dimensional realizado nas moldações obtidas no molde em aço.

Tabela 6 - Controlo dimensional das moldações obtidas com o molde em aço

Nº da moldação	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)	Massa (g)
1	2,02	2,03	1,98	10,23	9,28
2	2,03	2,02	1,97	10,24	9,28
3	2,02	2,02	1,97	10,23	9,28
4	2,02	2,00	1,96	10,24	9,28
5	2,01	2,01	1,95	10,25	9,28
6	2,03	2,02	1,96	10,25	9,28
7	2,02	2,01	1,98	10,26	9,28
8	2,03	2,02	1,97	10,25	9,28
9	2,03	2,03	1,98	10,24	9,28
10	2,02	2,03	1,97	10,25	9,28

Após análise dos valores da Tabela 6 verificou-se que nenhuma das moldações possui cotas fora da tolerância estipulada, servindo como referência para este trabalho.

3.6. Ensaaios de Injeção

Os ensaios de injeção foram realizados na máquina de injeção *Lien Yu D80* (Figura 50). Este equipamento possui uma força de fecho máxima de 80 toneladas e tem uma distância entre colunas de 350x350mm.



Figura 50 - Máquina de injeção *Lien Yu D80*

De forma a garantir que o gito fique agarrado ao lado móvel, optou-se por realizar duas zonas negativas (zonas de prisão) no extrator central com 5 graus (Figura 51). Deste modo, quando o molde abre, o canal de injeção acompanha o movimento de abertura, não sendo necessário atrasar o início do ciclo de moldação seguinte para proceder à sua remoção manual.

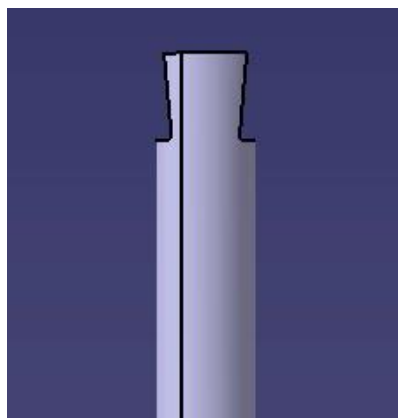


Figura 51 - Extrator central com zona negativa

4. Discussão de Resultados

Este capítulo tem como principal objetivo a apresentação dos resultados obtidos no processo de injeção com o molde híbrido com os blocos moldantes produzidos e utilizando materiais amorfos e semicristalinos. O procedimento experimental baseou-se na injeção de moldações em Polipropileno (PP) *Moplen* HP500N, PP *Hostacom* G2NO2 (com 20% de fibra de vidro) e Poliestireno (PS) *Polystyrol* 473 D com o objetivo de avaliar a reprodutibilidade dos blocos moldantes e, conseqüentemente, estabelecer uma relação entre a sua vida útil, os materiais injetados e as variáveis utilizadas.

4.1. Bloco *Epoxy* com Alumínio-Injeção de PP *Moplen* HP500N

No processo de injeção utilizando o molde híbrido com o bloco moldante bucha em resina *epoxy* com carga de alumínio, utilizou-se inicialmente o *Moldex3D* para avaliação das variáveis de processamento a definir tendo-se optado por reduzir o valor da pressão de injeção a fim de minimizar o desgaste da zona moldante. Na experiência prática foi utilizado um dos blocos moldantes para ajustar o processo. A velocidade de extração também foi ajustada de forma a causar o menor impacto na peça e na degradação do bloco moldante.

Após o ajustamento do processo, e principalmente das variáveis de processamento, foi montado no molde o bloco moldante bucha com resina *epoxy* e carga de alumínio para a realização experimental, com o objetivo de obter uma série protótipo mínima admissível de 500 moldações. Para este primeiro teste o material selecionado foi o Polipropileno *Moplen* HP500N (sem carga). Durante este processo, a ferramenta produziu em modo automático e sem qualquer tipo de ocorrência. No entanto, dada a baixa condutividade térmica comparativamente com o aço, a cada 60 ciclos de injeção o processo foi interrompido durante cerca de 30 segundos e procedeu-se à insuflação de ar comprimido na superfície moldante para diminuir a temperatura superficial. Com base noutros trabalhos realizados anteriormente, foi utilizado um tempo de controlo de temperatura de 20s.

De forma a avaliar a reprodutibilidade dos blocos, foi definida uma dimensão da amostra de 20 peças. Ou seja, a cada 20 moldações, um dos artigos foi inspecionado e procedeu-se à sua pesagem e medição das 4 zonas pré-definidas, conforme referido no capítulo 3.5. No final das 500 moldações, foi feita uma avaliação global ao desgaste da zona moldante e como não existiram alterações significativas no bloco moldante, tanto na superfície como dimensionalmente, continuou-se com a injeção de mais amostras. De notar ainda que os defeitos superficiais iniciais resultantes do vazamento também não apresentavam qualquer tipo de evolução.

O processo continuou sem qualquer tipo de incidentes até se obterem 1700 moldações. A partir deste instante, ocorreu uma remoção de material brusca na zona dos defeitos superficiais, primeiramente à esquerda e após 5 ciclos à direita, conduzindo à formação de 3 pequenas saliências. Por consequência, a peça plástica começou a apresentar excessos de material nas zonas referidas. Após este sinal de desgaste, não se verificou mais nenhuma

evolução da zona afetada. Ciente de que o bloco moldante se tinha deteriorado e, conseqüentemente, perdido a reprodutibilidade, isto é, a capacidade que tem em reproduzir a peça nas devidas condições, optou-se por continuar com a injeção para o levar até à rotura final e perceber a evolução do desgaste. Na moldação 1748 o bloco fissurou na zona da aba. A Figura 52 mostra o desgaste do bloco após 1750 moldações.



Figura 52 – Desgaste após 1750 moldações: (a) Deterioração Superficial; (b) Fissura Superficial

Apesar do aparecimento da fissura superficial, optou-se por prosseguir com a injeção de amostras para perceber a sua evolução. Na moldação 2217 ocorreu a sua propagação pelo zona de ajustamento do bloco, ditando o fim do processo. Nesta fase não se registava variância nas zonas analisadas.

Relativamente à reprodutibilidade do bloco moldante, verificou-se que perdeu a capacidade de produzir peças admissíveis na moldação 1700, altura em que ocorreu uma evolução dos defeitos superficiais. Na Figura 53 encontra-se a variação das espessuras “A” e “C” ao longo da produção. O valor mínimo e máximo medido de “A” foi de 2,02 e 2,05 mm, enquanto em “C” foi de 1,94 e 1,99mm, respetivamente.

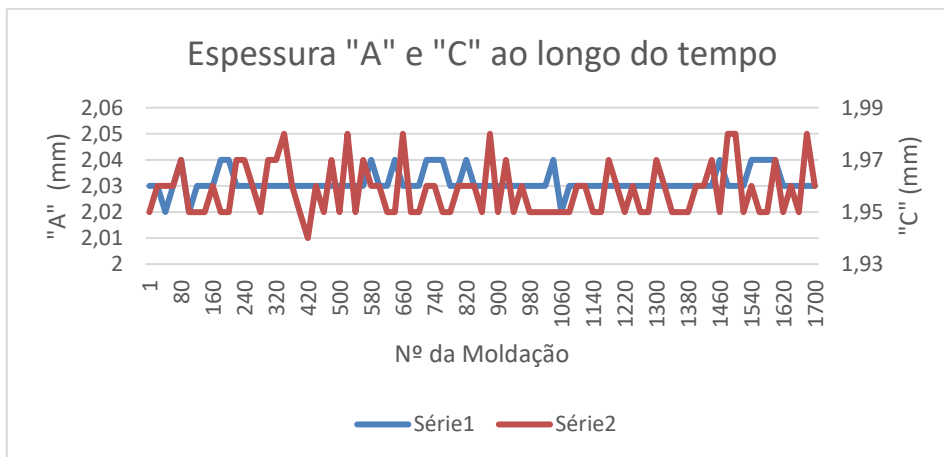


Figura 53 - Variação das espessuras “A” e “C” ao longo do tempo

Em relação à massa, todas as amostras foram pesadas numa balança calibrada com uma tolerância de 0,01g. Verificou-se que a partir da moldação 1700 a massa subiu de 9,49 para 9,91g, valor justificado pelo facto de ter sido arrancado material do bloco moldante.

4.2. Bloco *Epoxy* com Alumínio-Injeção de PP *Hostacom G2NO2*

Tal como o *Moldex3D* tinha sugerido aquando das simulações, para a injeção deste material foi necessário aumentar consideravelmente algumas variáveis quando comparadas com as utilizadas no PP *Moplen* HP500N. Neste caso específico, a pressão de injeção aumentou de 12 para 34 MPa e a pressão de compactação de 10 para 29 MPa, valores mínimos para obter uma moldação completa.

Neste bloco moldante denotou-se um aumento do desgaste na zona de ajustamento contígua ao canal de injeção, área sujeita às maiores pressões e temperaturas do ciclo, conduzindo à acumulação de plástico nessa zona que não se verificou no bloco anterior. Ou seja, a massa do canal de injeção foi aumentando progressivamente com o avolumar das moldações fruto da remoção de material nessa região. Na Figura 54 encontra-se a evolução do desgaste na zona do ataque à peça.

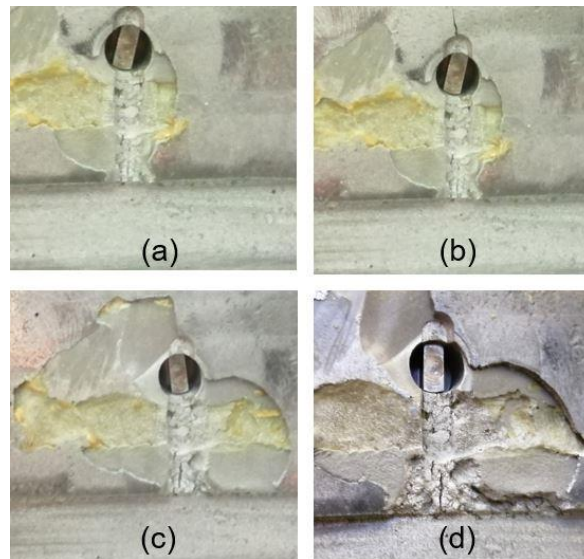


Figura 54 – Evolução do desgaste na zona do canal da injeção após 250 (a), 500 (b), 750 (c) e 1080 (d) moldações

Relativamente à produção, verificou-se essencialmente que o desgaste começou a ser mais significativo após as 500 moldações, altura em que se registou uma remoção mais incisiva de partículas de material “*chips*” na zona do canal e de ajustamento do bloco, restringindo-se até essa altura apenas na zona da injeção, tal como é possível observar na Figura 54. O facto de o material injetado ser mais viscoso do que o PP *Moplen* (sem carga) pode explicar os defeitos verificados dado que conduziu à remoção de “*chips*” na zona da injeção.

Durante a injeção de amostras também ocorreu o fenómeno de “*pitting*”, ou seja, remoção de pequenas partículas de material da superfície moldante. Tal como foi explicado anteriormente, o “*pitting*” pode estar associado a dois motivos distintos: a erosão originada pela constante pressão de injeção verificada ao longo do ciclo e a adesão entre as partículas de alumínio e o polímero injetado são as principais causas que conduzem à remoção de pequenas partículas da zona moldante e, conseqüentemente, à sua degradação (Figura 55).

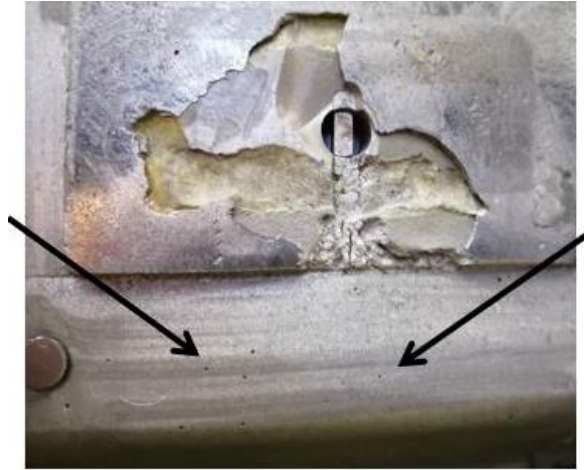


Figura 55 – Remoção de partículas “Pitting”

Apesar de se ter verificado o fenómeno de “*pitting*” na zona próximo do canal de injeção, importa destacar o facto de mais nenhuma zona ter apresentado qualquer tipo de desgaste ou deterioração, mantendo a sua rugosidade inicial.

Após 1080 ciclos, optou-se por encerrar a produção. O critério para ter interrompido foi o facto de a operação de remoção do gito ser extremamente difícil, dado o acumular de matéria plástica nesta zona fruto da crescente degradação da zona do canal de injeção. Até esta fase, esta operação era simples.

Em relação à reprodutibilidade, verificou-se que o bloco permitiu a obtenção de 1080 peças plásticas sem variância. Na Figura 56 encontra-se a variação das espessuras “A” e “C” ao longo da produção. O valor mínimo e máximo registado em “A” foi de 2,02 e 2,04 mm, enquanto em “C” foi de 1,94 e 1,99 mm, respetivamente.

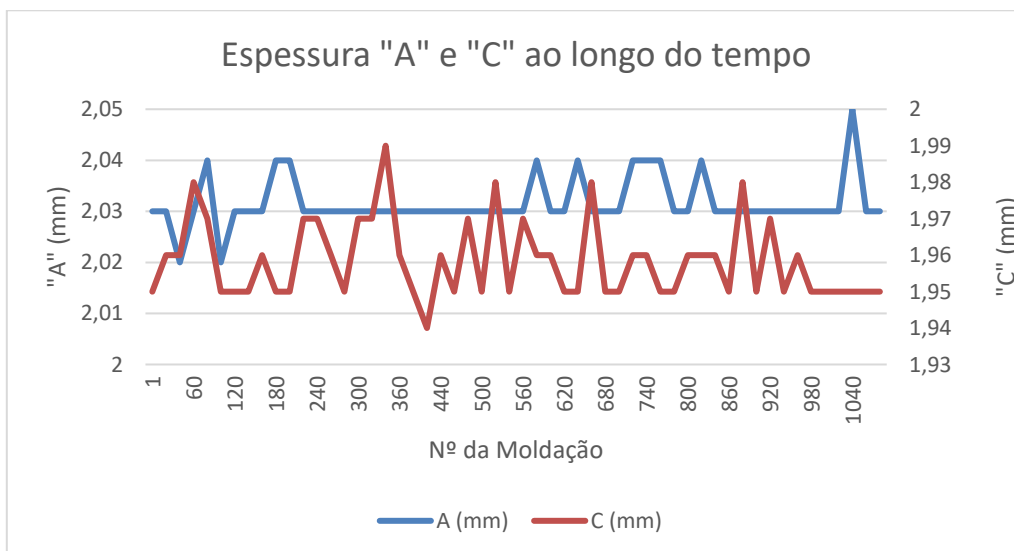


Figura 56 - Variação das espessuras “A” e “C” ao longo do tempo

Tal como no bloco anterior, a massa foi outra das características medida e analisada em todas as moldações obtidas. Verificou-se que, após a operação de remoção do canal de injeção, a massa se manteve praticamente constante ao longo de toda a produção (Figura 57).

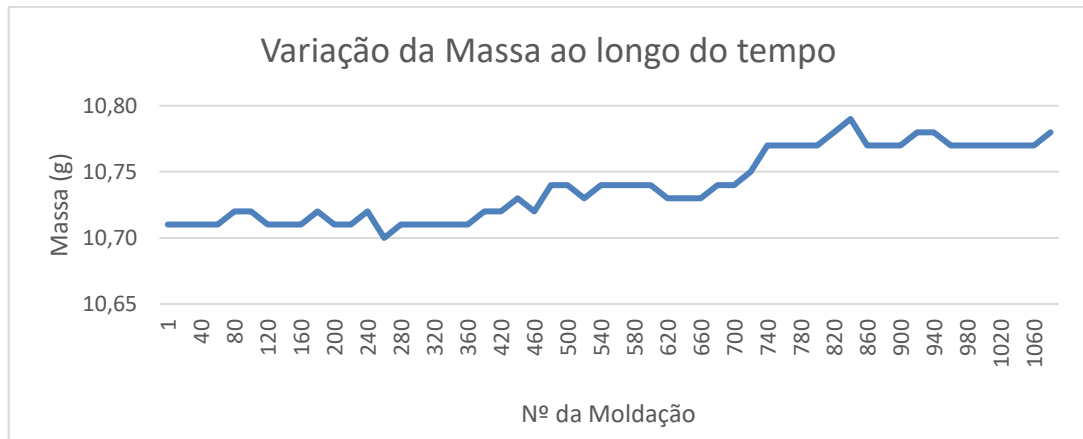


Figura 57 - Variação da massa ao longo do tempo

A pequena variação registada poderá estar relacionada com o facto de a operação de remoção do canal de injeção ser manual. O aumento do desgaste com o decorrer dos ciclos tornou esta tarefa cada vez mais trabalhosa, havendo situações em que poderá ter ficado algum resto de material do canal no artigo, aumentando ligeiramente a sua massa.

A título de curiosidade, a propagação do desgaste na zona do canal de injeção conduziu a um aumento do peso da moldação de 12,25g para 13,77g. Ou seja, o peso do artigo com o respetivo canal sofreu um acréscimo de 1,52g, o que é bastante representativo do desgaste ocorrido na zona da injeção (Figura 58).



Figura 58 – Desgaste após 1080 moldações

4.3. Bloco *Epoxy* com Alumínio-Injeção de Poliestireno (PS)

Após o ensaio dos dois primeiros blocos com um material semicristalino (PP), seguiu-se a avaliação da reprodutibilidade recorrendo a um material amorfo (Poliestireno).

Para este bloco moldante havia alguma expectativa sobre a evolução do desgaste com o decorrer da produção dado que apresentava 2 pequenos defeitos superficiais. Ou seja, havia curiosidade para perceber quais as consequências que estas imperfeições iriam trazer ao nível da reprodutibilidade do bloco e se inviabilizavam a sua utilização.

Após o ajuste inicial das variáveis, iniciou-se a produção até atingir as 500 moldações. Verificou-se o estado do bloco e, tal como expectável, tinha ocorrido uma evolução dos defeitos iniciais (Figura 59).

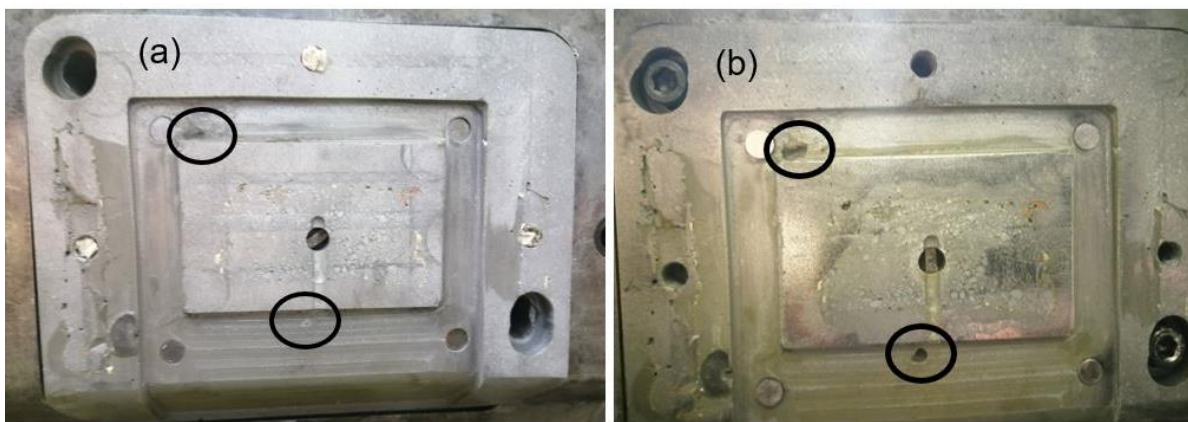


Figura 59 – Evolução dos defeitos superficiais após 5 (a) e 500 (b) moldações

Tendo em conta que os defeitos no bloco afetaram a qualidade da peça, conclui-se que houve perda da reprodutibilidade na moldação 498, apesar de não se verificar variância nas medições efetuadas. Deste modo, tal como aconteceu no primeiro bloco, optou-se por continuar com a injeção a fim de compreender a evolução do desgaste.

A produção decorreu sem problemas e foram alcançadas com facilidade as 2000 moldações, sempre com uma avaliação a cada 250 ciclos. Os defeitos mantiveram-se estáveis até à moldação 2137, altura em que ocorreu fratura da extremidade no canto superior esquerdo do castelo central de ajustamento (Figura 60). No ciclo seguinte o plástico cobriu esta falha.



Figura 60 - Fratura da extremidade no canto superior esquerdo

A fratura desta extremidade, aliado ao facto de o bloco já apresentar defeitos iniciais, ditou o fim da série.

Em relação à reprodutibilidade do bloco moldante, verificou-se que perdeu a capacidade de produzir peças admissíveis na moldação 498, altura em que se registou uma evolução significativa dos defeitos superficiais e, conseqüentemente, afetou a qualidade do artigo moldado.

Na Figura 61 encontra-se a variação das espessuras "A" e "C" até à moldação 480. O valor mínimo e máximo registado em "A" foi de 2,02 e 2,04 mm, enquanto em "C" foi de 1,94 e 1,98 mm, respetivamente.

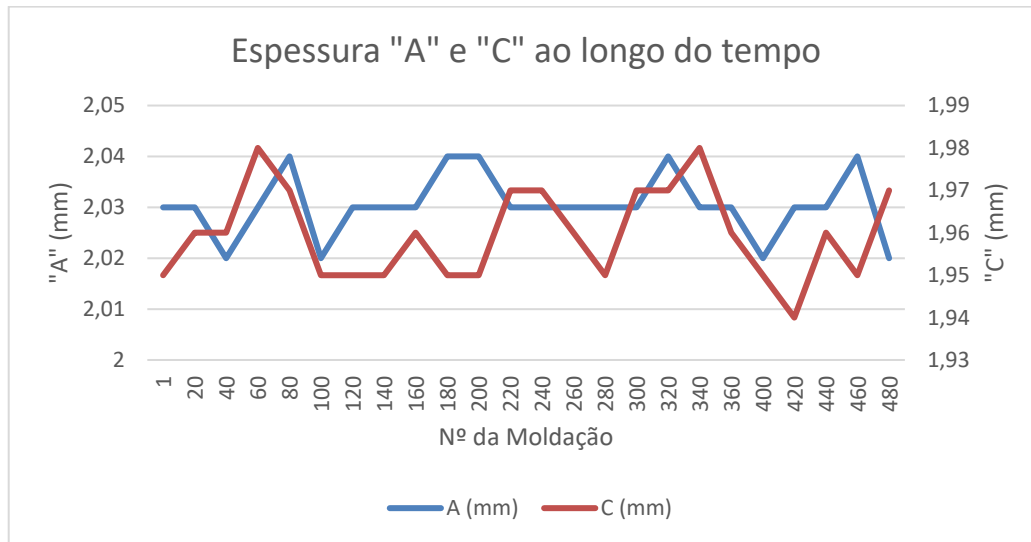


Figura 61 - Variação das espessuras "A" e "C" ao longo do tempo

À semelhança do que aconteceu anteriormente, procedeu-se à análise da massa em todas as moldações recolhidas. Verificou-se um aumento da massa de 10,31 para 10,79g da moldação 480 para a 500, justificado pela remoção brusca de partículas na região das imperfeições.

4.4. Bloco FDM (Original)-Injeção de PP *Moplen* HP 500N

Em relação às condições de processamento, optou-se por aplicar as mesmas variáveis de processamento utilizadas na injeção do PP *Moplen* no bloco com resina *epoxy*, à exceção do tempo de controlo de temperatura que foi aumentado de 20 para 40s, dada a baixa condutividade térmica do material do bloco. A definição deste valor está relacionado com a bibliografia consultada que sugere que não se deve utilizar um tempo excessivo de forma a não danificar o bloco aquando da extração. A Figura 62 mostra o bloco em FDM (original) montado na chapa do molde com o sistema de extração funcional.



Figura 62 - Bloco FDM ajustado à chapa do molde

Após a introdução dos valores na máquina, iniciou-se a injeção de amostras. Ao contrário do que aconteceu nos testes realizados anteriormente, o molde não produziu em modo automático, sendo que após a extração do artigo procedeu-se à insuflação de ar comprimido durante 15s com o objetivo de diminuir a temperatura da superfície e, conseqüentemente, aumentar a vida útil do molde.

À medida que o número de ciclos foi aumentando, assistiu-se a um avolumar do desgaste na zona do canal de injeção, culminando com o rompimento total desta zona ao sexto ciclo. Na Figura 63 encontra-se o desgaste do bloco moldante após 6 e 10 ciclos.

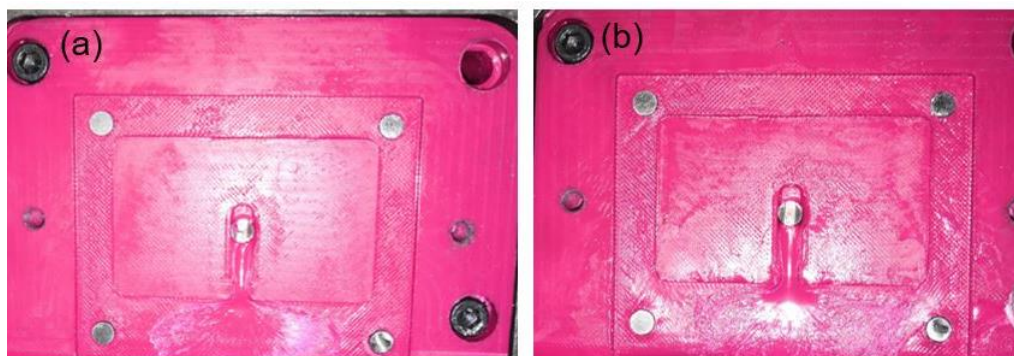


Figura 63 - Desgaste do bloco após 6 (a) e 10 (b) ciclos

Apesar das variáveis utilizadas, nomeadamente a pressão de injeção e de compactação, serem iguais às aplicadas nos blocos com resina *epoxy*, denotou-se o efeito da frente de fundido (movimento da injeção) sobre a superfície do bloco. No décimo ciclo verificou-se um aumento da secção de ataque fruto da remoção de partículas de material nesta região. Nesta altura apenas a zona referida apresentava desgaste significativo.

Após a décima moldação, começou a assistir-se a uma evolução bastante mais significativa do desgaste na zona próxima do canal. A frente de fundido começou a arrancar partículas de material de forma mais incisiva, alastrando-se até próximo da zona dos extratores e propagando-se até à aba da peça. Ao décimo segundo ciclo ocorreu uma adesão entre o artigo e o bloco moldante e no ciclo seguinte verificou-se deformação/amolecimento de duas zonas específicas da aba do bloco. Também começou a denotar-se uma deformação na zona central próximo do canal de injeção, resultando num aumento de espessura do artigo. Este fenómeno está relacionado com a T_g do material. À medida que o polímero entra na zona moldante e começa a arrefecer, ocorre transferência de calor, aumentando a temperatura do bloco. A uma certa fase do ciclo, a temperatura da ferramenta ultrapassa a T_g do material do bloco, conduzindo à deformação da superfície da ferramenta (fadiga térmica). Apesar de a temperatura do molde (35°C) ter sido mantida abaixo da T_g do material antes de cada injeção, o contacto com o polímero fundido conduziu ao aumento da temperatura e, por consequência, originou estes defeitos. Na Figura 64a é possível observar o fenómeno de adesão verificado entre o artigo e o bloco moldante e na Figura 64b encontra-se a deformação e, consequentemente, os defeitos originados.

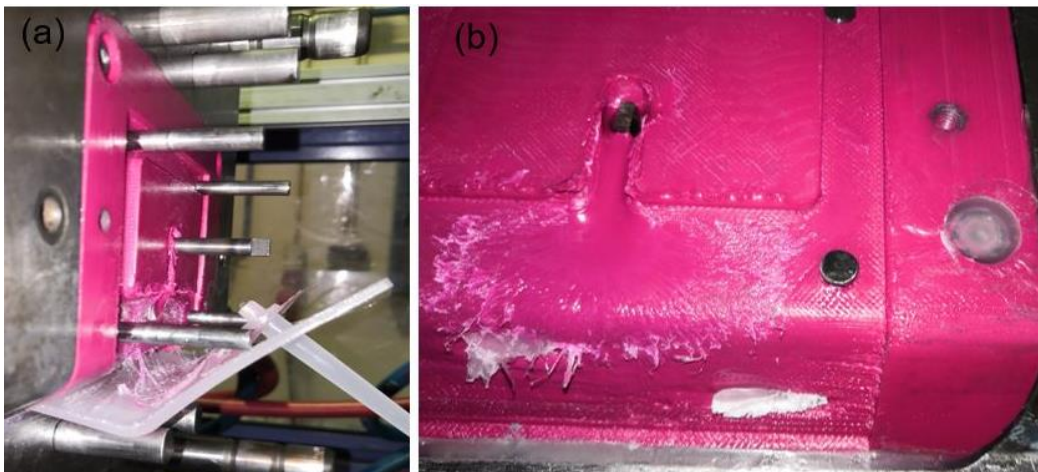


Figura 64 – Fenómeno de adesão entre artigo e bloco (a); Deformação da superfície ao 13º ciclo (b)

Ciente de que o bloco se tinha deteriorado e, consequentemente, perdido a reprodutibilidade, optou-se apenas por realizar mais dois ciclos de injeção para o levar até à rotura final. Verificou-se uma evolução significativa da deformação na zona central e o aparecimento de fissuras na zona da aba. A Figura 65 mostra o estado final do bloco após 15 moldações.

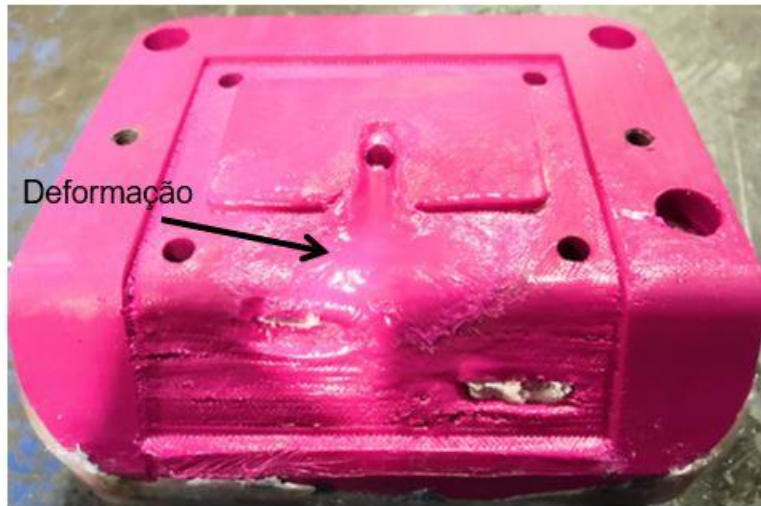


Figura 65 - Bloco após 15 ciclos de moldação

Em relação à reprodutibilidade, verificou-se que até à décima primeira moldação o bloco não apresentou uma variação significativa na espessura “A” e “C” e permitiu a obtenção de peças admissíveis. No entanto, a deformação ocorrida na zona central do bloco conduziu, primeiro ao aumento considerável da dimensão “A” e depois de “C”, quando se verificou deformação na zona da aba, obrigando a interromper o processo quando já estavam fora da tolerância desejada. Ou seja, tendo em conta a tolerância pré-estabelecida, verificou-se que este bloco permitiu a obtenção de 12 moldações admissíveis. Na Figura 66 encontra-se a variação das espessuras “A” e “C” ao longo da série.

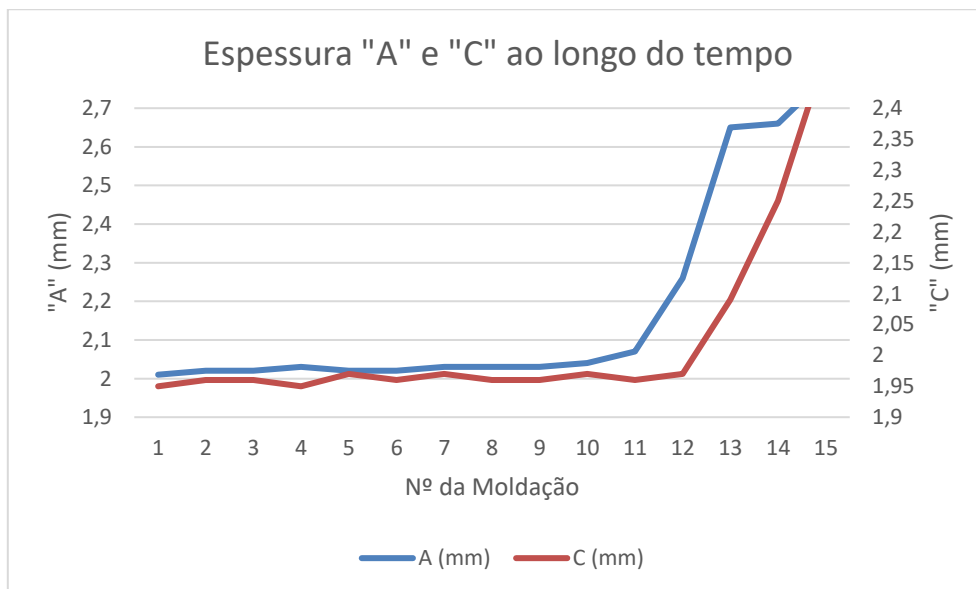


Figura 66 - Variação das espessuras “A” e “C” ao longo do tempo

Tal como esperado, a massa do artigo manteve-se praticamente constante até à décima primeira moldação, começando a aumentar de forma significativa, fruto da crescente deformação verificada, até às 11,68g no final da série (Figura 67).

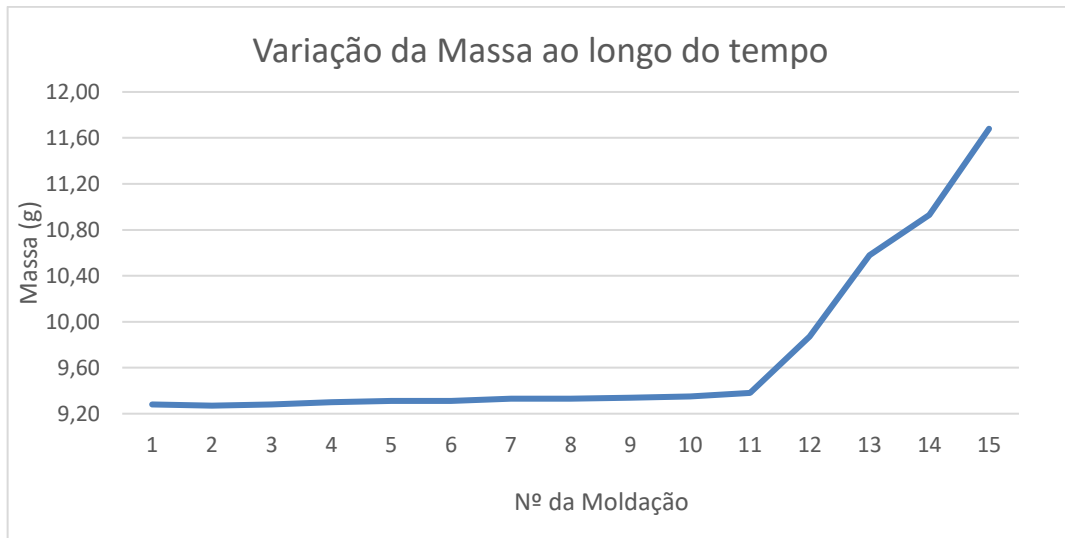


Figura 67 - Variação da massa ao longo do tempo

Apesar do bloco ter apresentado os defeitos explanados anteriormente na zona próxima do canal de injeção, importa destacar o facto de a qualidade superficial à volta do castelo central de ajustamento não ter sido afetada, mantendo a sua textura/rugosidade original e permitindo obter moldações com uma boa estabilidade dimensional nesta região (Figura 68).

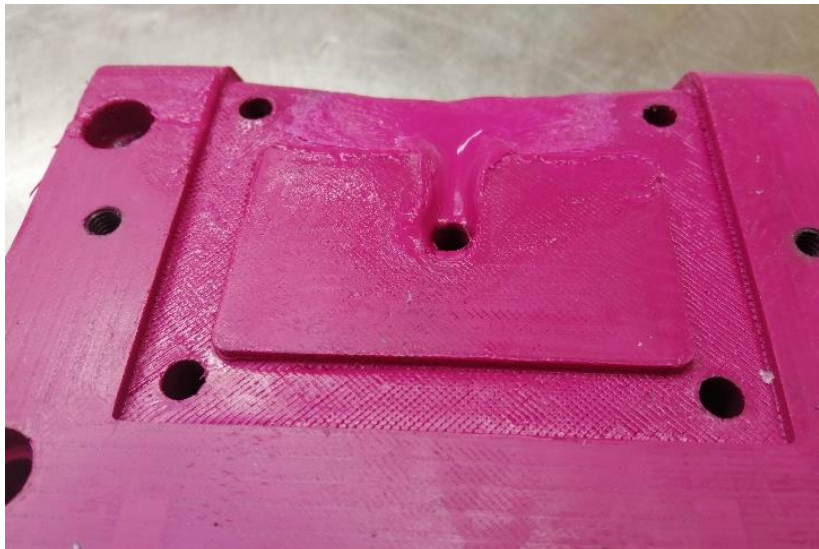


Figura 68 - Estado final da superfície moldante

4.5. Bloco FDM (Modificado)-Injeção de PP *Moplen* HP 500N

Dado que no bloco anterior foi evidente o efeito da frente de fundido sobre a superfície moldante, optou-se por tentar reduzir a velocidade de injeção em 30% e aumentar o tempo de injeção de 2 para 3s a fim de tentar minimizar os defeitos visuais. O tempo de controlo de temperatura também foi reduzido para 35s com o objetivo de evitar o fenómeno de adesão ocorrido no bloco anterior. Todas as outras condições de processamento aplicadas foram iguais às da bucha antecedente, incluindo o tempo de paragem entre moldações para insuflar ar comprimido. Na Figura 69 encontra-se o bloco moldante montado na chapa 3.

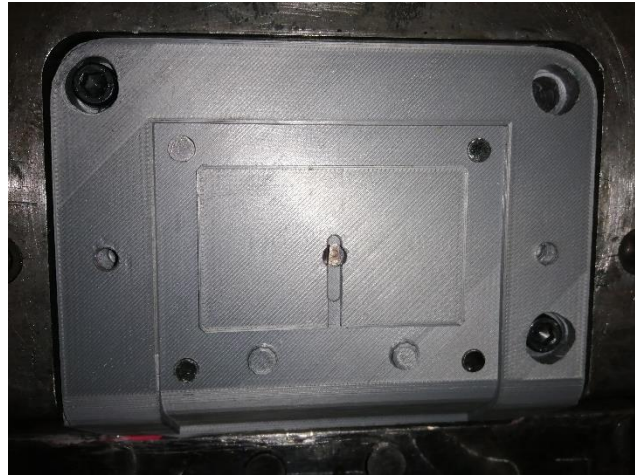


Figura 69 - Bloco FDM montado na chapa 3

Após o ajuste inicial das variáveis, obtiveram-se as primeiras moldações. Na Figura 70 encontra-se presente o desgaste do bloco após 6 e 10 ciclos de moldação.

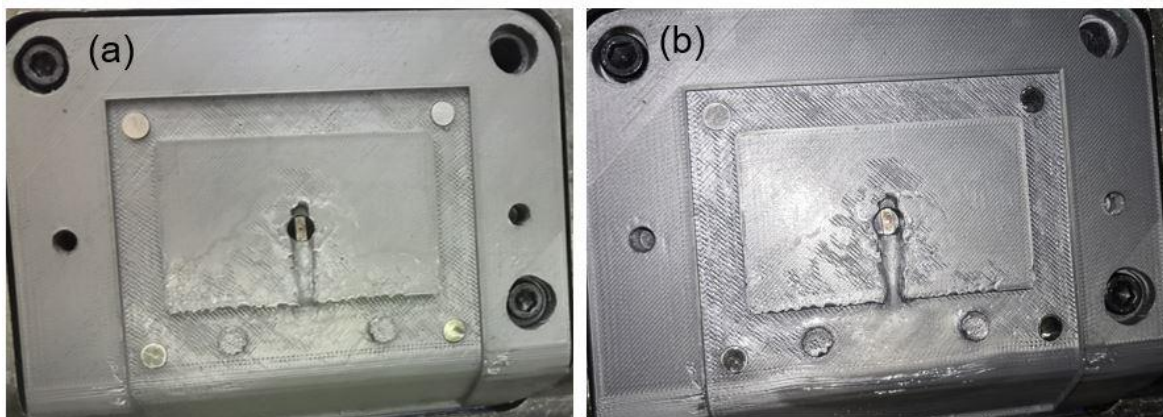


Figura 70 - Desgaste do bloco após 6 (a) e 10 (b) ciclos

Analisando a Figura 70 constata-se que o pequeno acerto realizado tanto na velocidade como no tempo de injeção prolongou a qualidade superficial, comparativamente com o bloco anterior, uma vez que nos primeiros dez ciclos não se verificou um desgaste tão significativo no canal de injeção e na zona moldante contígua. Além disso, a conservação das *features* é outro indicador de que a velocidade de injeção foi adequada e conservadora.

Depois da décima moldação intensificou-se o desgaste na zona do canal de injeção, acabando por aumentar a secção de ataque à peça. Na décima primeira moldação começou a denotar-se o efeito da frente de fundido, embora não tão pronunciado como no bloco anterior. Além disso, a zona de ajustamento dos dois castelos com a cavidade também começou a evidenciar sinais de desgaste fruto do avolumar da série e da pressão sofrida ao longo do ciclo. Ao décimo segundo ciclo o bloco começou a deformar na zona central próximo do canal de injeção, resultando num aumento de espessura do artigo, tal como já tinha acontecido no bloco anterior.

No décimo terceiro ciclo o desgaste provocado pela frente de fundido começou a alastrar-se para a zona da aba da peça, conduzindo também à sua deformação e conseqüente aumento de espessura na zona C. A partir desta moldação também se começou a registar o aparecimento de pequenas fissuras nesta região.

Tendo em conta os defeitos originados e a conseqüente perda da reprodutibilidade, optou-se, à semelhança do que aconteceu no bloco anterior, por realizar mais alguns ciclos de injeção. Registou-se o aparecimento de novas fissuras na zona da aba, optando-se por encerrar a produção. A Figura 71 mostra o estado final do bloco após 16 moldações.

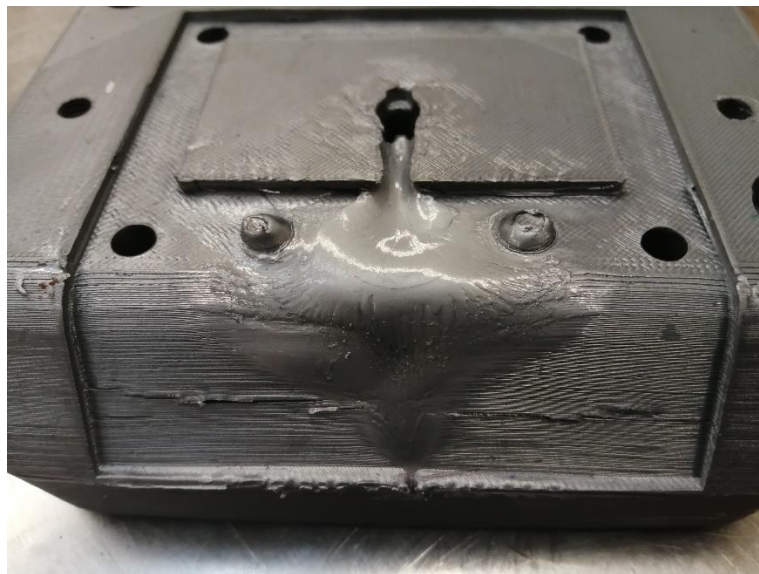


Figura 71 – Bloco após 16 ciclos de moldação

À semelhança do que aconteceu no bloco anterior, importa destacar o facto de a restante superfície moldante ter mantido a sua textura (rugosidade) original, ao contrário da zona adjacente ao canal de injeção que sofreu o maior desgaste.

Em relação aos castelos adicionados, verificou-se que estes praticamente não sofreram qualquer tipo de desgaste nas primeiras dez peças. À décima primeira moldação a zona de ajustamento abateu, fruto da pressão sofrida ao longo da produção, não “vedando” com a cavidade e conduzindo à acumulação de plástico nesta zona.

Tal como já foi referido, após a construção deste bloco não foi realizada nenhuma operação de maquinação. Deste modo, o artigo moldado apresentou um acréscimo de espessura e de massa comparativamente com o original.

Relativamente à reprodutibilidade, verificou-se que o bloco permitiu a obtenção de 12 peças admissíveis e dentro das tolerâncias definidas. Na Figura 72 encontra-se a variação das espessuras “A” e “C” ao longo da série. A maior variação de “A” ocorre na moldação número 12 quando a deformação começou a destacar-se, enquanto em “C” acontece no ciclo seguinte, altura em que se registou uma propagação para a zona da aba.

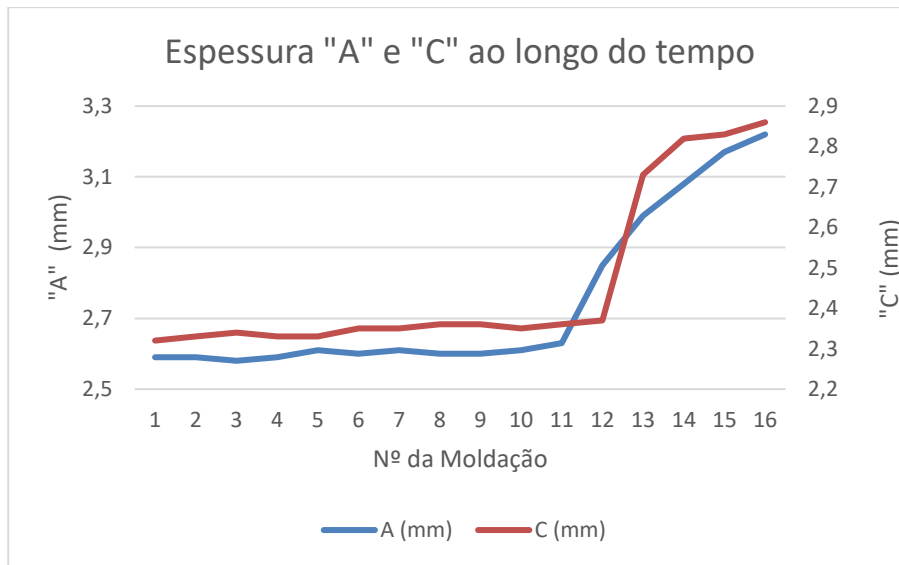


Figura 72 - Variação das espessuras “A” e “C” ao longo do tempo

Tal como esperado, a massa do artigo manteve-se praticamente constante até à décima moldação, começando a aumentar de forma expressiva, até atingir 13,46g no final da série (Figura 73).

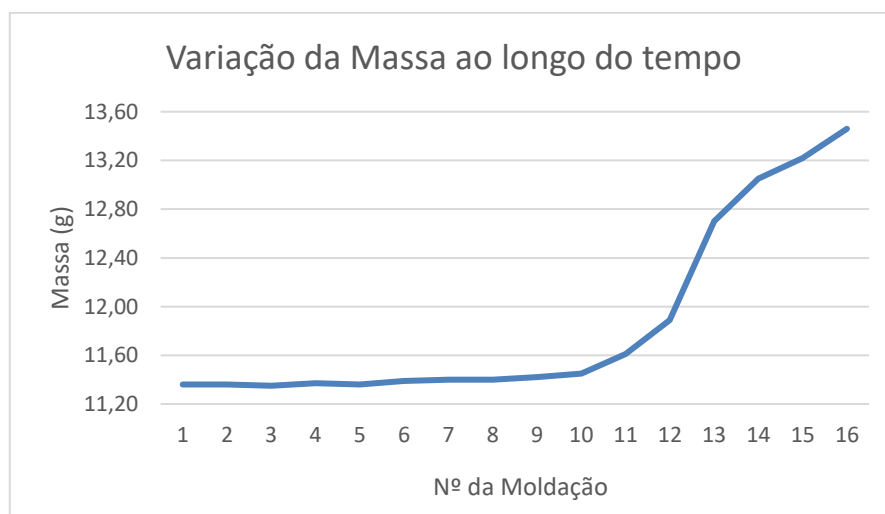


Figura 73 - Variação da massa ao longo do tempo

5. Conclusão

Neste trabalho foram construídos blocos moldantes com recurso a diversas técnicas, nomeadamente, vazamento de resina *epoxy* com carga de Al e FDM com o objetivo de avaliar o seu desempenho e a precisão dimensional das moldações obtidas.

Relativamente à produção dos blocos moldantes buchas em resina *epoxy* com carga de alumínio, em dois dos cinco blocos obtidos surgiram defeitos na superfície moldante relacionados com o aprisionamento de ar/gases durante o vazamento. Estes defeitos estão associados ao facto desta etapa não ter sido realizada na câmara de vácuo, como recomendado no processo, uma vez que à data a existente não se encontrava operacional. No entanto, a presença destas imperfeições revelou-se interessante, visto que permitiu perceber a evolução do desgaste com o avolumar das moldações.

Um dos blocos moldante bucha em FDM foi construído pela Lismolde, Lda e o outro foi produzido no laboratório de fabrico rápido da ESTG. A obtenção do bloco em FDM (modificado) foi particularmente interessante uma vez que permitiu perceber e executar todas as fases do processo, desde a preparação e orientação do ficheiro até à sua construção, assim como ultrapassar as dificuldades encontradas, nomeadamente em relação à falta de aderência do material à mesa de trabalho do equipamento.

Após esta fase, foi utilizada a estrutura do molde monobloco em aço para injetar amostras que serviu como referência para este trabalho. Posteriormente, foi montada a chapa das buchas já existente e realizou-se o processo de ajuste e furação dos blocos obtidos de forma a garantir um correto funcionamento do molde. A colocação de fixações pela frente foi essencial porque permitiu uma troca rápida do bloco sem desmontar o molde da máquina de injeção.

O ajuste das variáveis de processamento foi um dos pontos a destacar neste trabalho, pela importância que se deve ter na definição das condições de processamento quando se utilizam blocos moldantes produzidos em materiais alternativos tendo em vista a maximização da sua vida útil. Antes de iniciar os ensaios de injeção, um dos blocos obtidos foi usado exclusivamente para ajustar as variáveis de processamento para os diversos materiais de injeção utilizados e entender o processo de desgaste. Como apoio na definição das variáveis de processamento realizaram-se primeiro algumas simulações CAE utilizando o *software Moldex3D*. No total foram realizados mais de 5900 ciclos de moldação nos diversos blocos que permitiram obter uma janela de processamento para cada termoplástico injetado.

A realização dos testes de injeção nos blocos com resina *epoxy* permitiu concluir que para o material mais abrasivo, o PP *Hostacom G2NO2*, o desgaste está essencialmente ligado à remoção de partículas de material no canal de injeção e de zonas próximas (*pitting*), destacando-se a excelente qualidade superficial na restante área após as 1080 moldações.

O desgaste evidenciado pelos outros dois blocos, cujos materiais injetados foram PP *Moplen* e PS, está relacionado com os defeitos superficiais iniciais, não se tendo verificado remoção

de partículas na zona da injeção, dado que estes materiais não são tão abrasivos como o PP *Hostacom*. Tendo em conta que o objetivo deste trabalho era avaliar a reprodutibilidade dos blocos moldantes, isto é, a capacidade que tem em reproduzir a peça de plástico nas devidas condições, verifica-se que foram obtidas para o PP *Moplen* e para o PS, respetivamente, 1700 e 498 moldações sem variância. No entanto, apesar da evolução dos defeitos iniciais e da consequente perda da reprodutibilidade, optou-se por continuar com a injeção para os levar até à rotura final e perceber a evolução do desgaste. Obtiveram-se 2217 moldações com o PP *Moplen* e 2137 com o PS sem uma variância dimensional significativa. Estes factos vem reforçar a classificação proposta pela *Stratasys*, onde o PP (sem carga) e o PS se encontram na categoria A e o PP com fibra de vidro na categoria B, classe mais abrasiva que as anteriores, justificando assim a menor série obtida com este material.

A bibliografia consultada sugere que o limite de um bloco moldante com geometria relativamente simples obtido por vazamento de resina *epoxy* com carga de alumínio sujeito à injeção de um material pouco abrasivo (por exemplo PP sem carga) e com parâmetros conservadores ronda as 2000 moldações. No entanto, os ensaios realizados com 2 materiais diferentes (PP sem carga e PS) provaram que é possível ultrapassar esse valor.

Em relação aos blocos em FDM, foram apenas obtidas 12 moldações dentro da tolerância pré-estabelecida. Tal como esperado, a maior dificuldade relaciona-se com o baixo valor de temperatura de transição vítrea (T_g) dos materiais utilizados nestes processos de fabrico, originando a deformação da superfície próximo do canal de injeção e conduzindo ao aumento da espessura nesta região. A diminuição do tempo de controlo de temperatura também se revelou importante uma vez que no segundo bloco em FDM não se verificou adesão entre o artigo e a zona moldante. A insuflação de ar comprimido entre moldações também permitiu diminuir a temperatura superficial e, conseqüentemente, aumentar a vida útil dos blocos.

De um modo geral, os objetivos desta dissertação foram cumpridos com sucesso visto que foi possível estabelecer uma relação entre a vida útil do bloco moldante bucha, os materiais/processos utilizados quer na sua construção quer na injeção e as variáveis aplicadas, permitindo assim avaliar a capacidade de cada ferramenta (bloco moldante) em produzir peças dentro de tolerâncias admissíveis e a sua reprodutibilidade.

A realização deste trabalho permitiu concluir que a utilização de resina *epoxy* com cargas metálicas (*epoxy based composite*) em blocos moldantes de moldes híbridos constitui uma boa opção para obter pequenas/médias séries de peças de plástico dentro de especificações geométricas e dimensionais. Por outro lado, os blocos construídos em FDM não permitiram obter um número relevante de peças de plástico, devendo-se considerar a sua utilização apenas para a produção de um baixo número de peças protótipo.

6. Trabalhos Futuros

Durante esta dissertação foram encontradas algumas limitações e oportunidades que aqui se propõem como possíveis trabalhos futuros:

- Utilização de outro tipo de cargas de reforço na resina *epoxy* a fim de estudar a sua influência no processo de injeção. Por exemplo, o pó de grafite é uma possibilidade visto que apresenta uma boa condutividade térmica;
- Seleção de outro tipo de processos de fabrico aditivo para construção de blocos moldantes. Apesar dos elevados custos associados, o *Selective Laser Melting* (SLM) é uma hipótese dado que em teoria permitirá obter uma dimensão de série bastante interessante;
- Aumentar a complexidade da peça plástica através da introdução de *ribs*, castelos, paredes com espessura reduzida e furos em diferentes localizações do artigo, com destaque para as zonas mais próximas e mais distantes do local de injeção e efetuar um estudo semelhante ao realizado neste trabalho, isto é, com vários blocos moldantes e injetando materiais diferentes. Caso não exista a possibilidade de construir ferramentas novas (chapas do molde ou *masters*), podem ser colocados postigos “intermutáveis” apertados pela frente que permitam uma troca rápida sem desmontar o molde;
- Aumentar a secção de ataque de forma a diminuir a pressão de injeção necessária para encher a moldação e melhorar o escoamento do material;
- Durante os ensaios de injeção houve uma certa dificuldade em controlar o aparecimento de rebarba na zona inferior da aba nalguns blocos moldantes, tendo em conta a modelação atual. Ou seja, o bloco deveria de ser aumentado de forma a garantir pelo menos 5mm de zona de ajustamento com a cavidade, a fim de evitar qualquer desencontro entre bucha e cavidade, garantindo que “veda” corretamente e que não há fuga de material (Figura 74). Esta proposta de melhoria implicaria uma alteração do design da bucha e da chapa 3, assim como a maquinação da chapa das buchas e de um novo *master*;

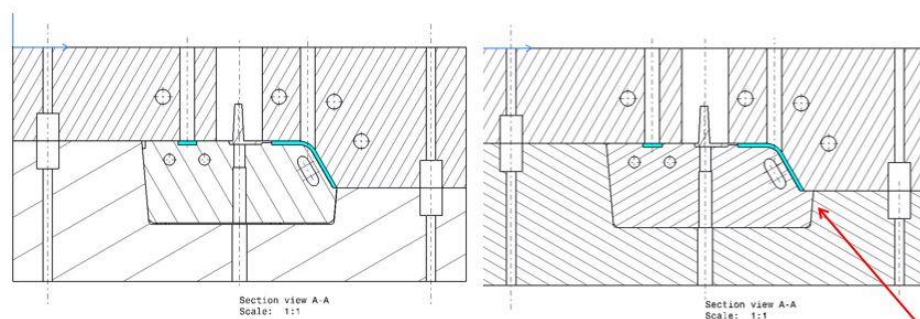


Figura 74 - Proposta de melhoria da modelação do bloco moldante

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

7. Referências Bibliográficas

- Abreu, S. A. (2015). *Impressão 3D baixo custo versus impressão em equipamentos de elevado custo*. Porto: Faculdade de Engenharia Universidade do Porto.
- Bagalkot, A., Pons, D., Symons, D., & Clucas, D. (2019). *Categorization of Failures in Polymer Rapid Tools Used for Injection Molding*. University of Canterbury, Mechanical Engineering, New Zealand. Obtido em 17 de Dezembro de 2020
- Barclift, M. W., & Williams, C. B. (2012). Examining variability in the mechanical properties of parts manufactured via polyjet direct 3D printing.
- Barthés-Labrousse, M. G., Marsh, J., Minel, L., & Gorse, D. (1998). *Interaction of epoxy model molecules with aluminium, anodised titanium and copper surfaces: an XPS study*. *Applied Surface Science*,. Obtido em 10 de Janeiro de 2021
- Bom, T. J. (2014). *Comparação do desempenho de tecnologias alternativas de fabrico de moldes de injeção de plásticos*. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre, Instituto Superior Técnico, Engenharia Mecânica, Lisboa. Obtido em 5 de Março de 2021
- Boxström, J. (2017). *Improving the product development process of injection molded parts by utilization of additively manufactured molding tools*. Aalto University School of Engineering, Degree Programme in Mechanical Engineering, Finland. Obtido em 6 de Dezembro de 2020
- Broeck, S. V. (2017). *Guidelines on the design and implementation of stereolithographic 3D printed moulds for low volume injection moulding*. Faculty of Engineering and Architecture, Department of Industrial Systems Engineering and Product Design, Ghent, Belgium. Obtido em 15 de Dezembro de 2020
- Chua, C. K., Hong, K. H., & Ho, S. L. (1999). *Rapid tooling technology. Part I: A comparative study*. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp.604–605. Obtido em 20 de Março de 2021
- Codi. (2020). *Digital ABS*. Obtido em 10 de Março de 2021, de Simule plásticos de produção para prototipagem e ferramentaria rápidas: <https://www.codi.pt/produto/digital-abs/>
- Cordeiro, M. J. (2014). *Análise e optimização dos parâmetros processuais e dos sistemas funcionais de uma impressora 3D, que se baseia na técnica Deposição de Plástico Fundido (FDM)*. Instituto Superior Técnico, Engenharia Mecânica, Lisboa. Obtido em 26 de Abril de 2021
- Cruz, S. (2004). *"Moldes de Injeção", 2ª Edição, Revista e Ampliada*. Obtido em 20 de Novembro de 2020

- Dang, X.-P., & Park, H.-S. (2012). *Design and simulation-based optimization of cooling channels for plastic injection mold*. Obtido em 20 de Março de 2021
- Domingues, L. C. (2015). *Análise comparativa do uso de tecnologias de fabrico rápido no processo produtivo de elementos moldantes para moldes de injeção de plásticos*. IPL-Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Mestrado em Engenharia Mecânica-Produção Industrial, Leiria. Obtido em 5 de Fevereiro de 2021
- Fernandes, J. F. (2016). *Estudo da Influência de Parâmetros de Impressão 3D nas Propriedades Mecânicas do PLA*. Instituto Superior Técnico, Engenharia Mecânica, Lisboa. Obtido em 26 de Abril de 2021
- Gomes, C. d. (2015). *Avaliação de custos de processos de fabricação aditiva na produção de moldes híbridos versus moldes convencionais*. IPL-Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Mestrado em Engenharia Mecânica – Produção Industrial, Leiria. Obtido em 25 de Novembro de 2020
- Martinho, P. G. (2010). *Mechanical design of hybrid moulds-Mechanical and thermal performance*. Universidade do Minho, Ciência e Engenharia de Polímeros, Braga. Obtido em 5 de Março de 2021
- Martinho, P. M. (2002). *Estudo do empeno em peças moldadas por injeção*. Tese para Obtenção do Grau de Mestre, Universidade do Minho, Dissertação e Fabrico de Moldes, Braga.
- Neves, A. F. (2014). *Avaliação da Morfologia da Peça Moldada em um Molde Híbrido com Inseto Macho Fabricado pelo Vazamento de Resina Époxi-Fibras Curtas de Aço e Adição de Nanoargila na Injeção de Polipropileno*. Tese para Obtenção do Grau de Doutor, Universidade de Santa Catarina, Ciência e Engenharia de Materiais, Florianópolis. Obtido em 5 de Dezembro de 2020
- Otte, T. B., Grundfos, & Stratasys. (2015). *Choosing the Right Material for Injection Molds: an Evaluation of Various 3D Printing Techniques*. Obtido em 28 de Dezembro de 2020
- Pontes, A. J., Queirós, M., & et al. (2005). *A Study on Design and Performance of Hybrid moulds for Injection Moulding*. Bled, Slovenia. Obtido em 21 de Dezembro de 2020
- Pouzada, A. (2009). *Hybrid moulds: A case of integration of alternative materials and rapid prototyping for tooling*. Obtido em 29 de Novembro de 2020
- Pouzada, P. S. (2015). *Integração das tecnologias de maquinagem de alta velocidade no processo de fabrico de peças por prototipagem rápida com rigor dimensional*. Tese para Obtenção do Grau de Mestre, Universidade do Minho, Engenharia Mecânica, Braga. Obtido em 1 de Dezembro de 2020
- Ragaert, K. C. (2006). *Hybrid injection molds: a practical approach for implementation*. In *Rapid Produced Development*. Marinha Grande. Obtido em 1 de Dezembro de 2020

- Reis, N. C. (2017). *Aplicabilidade do Fabrico Aditivo na Indústria dos Moldes de Injeção*. IPL-Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Mestrado Engenharia Mecânica-Produção Industrial, Leiria. Obtido em 25 de Janeiro de 2021
- Relvas, C. (2018). *O Mundo da Impressão 3D e o Fabrico Digital*. Porto: Quântica Editora – Conteúdos Especializados, Lda. Obtido em 15 de Março de 2021
- Saraiva, V., Lima, M., & Pouzada, A. (1999). Towards a new conceptual design of injection moulds. In *44th International Scientific Colloquium*. Ilmenau, Germany.
- Sena, M. A. (2014). *Otimização da eficiência térmica de moldes de injeção*. Dissertação para obtenção de Grau de Mestre, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Engenharia Mecânica, Coimbra. Obtido em 10 de Fevereiro de 2021
- Stratasys. (2015). Precision Prototyping: The role of 3D printed molds in the injection molding industry.
- Stratasys. (2016). Technical Application Guide: PolyJet For Injection Molding. Obtido em 10 de Dezembro de 2020
- TEXER. (s.d.). *TEXER Mold Technology*. Obtido em 25 de Janeiro de 2021, de Thermal Analysis.
- Tsouknidas, A. (2011). *Friction induced wear of rapid prototyping generated materials: A review*. *Advances in Tribology*. Aristotle University of Thessaloniki, School of Mechanical Engineering. Obtido em 10 de Janeiro de 2021
- Vasco, J., & Correia, M. (2017). *Textos de Apoio de Processos Industriais Avançados: Rapid Tooling (Moldes Híbridos)*. IPL-Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Mestrado Engenharia Mecânica-Produção Industrial, Leiria.
- Vasconcelos, P. V., Lino, F. J., Batista, A. M., & Neto, R. J. (2006). *Tribological behaviour of epoxy based composites for rapid tooling*. *Wear*. Obtido em 10 de Janeiro de 2021

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Anexos

Anexo A- Ficha Técnica da Resina SR 1660 e do Endurecedor SD 1305



		SR 1660 / SD 1305		
		48 h TA + 16 h 60 °C + 6 h 100 °C	48 h TA + 16 h 60 °C + 4 h 120 °C	48 h TA + 16 h 60 °C + 3 h 150 °C
Cure cycles				
Tension				
Modulus of elasticity	N/mm ²	3300	3000	3000
Maximum resistance	N/mm ²	90	80	83
Resistance at break	N/mm ²	89	78	81
Elongation at max. resistance	%	5.1	4.0	5.0
Elongation at break	%	5.1	4.0	5.0
Flexion				
Modulus of elasticity	N/mm ²	3100	2900	2700
Maximum resistance	N/mm ²	133	126	126
Elongation at max. resistance	%	5.2	5.3	6.5
Elongation at break	%	5.4	5.3	6.7
Compression				
Compressive yield strength	N/mm ²	127	127	120
Offset compressive yield	%	8.6	9.8	10.8
Charpy impact strength				
	KJ/m ²	23	17	19
Glass Transition / DSC				
Tg1	°C	121	147	159
Tg1 max.	°C			157

Tests carried out on samples of pure cast resin, without prior degassing, between steel plates.

Measures undertaken according to the following norms :

Tension: NF T 51-034
 Flexion : NF T 51-001
 Compression: NF T 51-101
 Charpy impact strength: NF T 51-035
 Glass transition DSC : ISO 11357-2 : 1999 -5°C to 180°C under nitrogen gaz
 Tg1 or Onset : 1st point at 20 °C/mn
 Tg1 maximum or Onset : second passage

AT : Ambient Temperature

Sicomin, 31 avenue de la Lardière, 13220 Châteauneuf les Martigues, France
 T: +33 (0)4 42 42 30 20 / F: +33 (0)4 42 81 29 29 / E: info@sicomin.com / www.sicomin.com

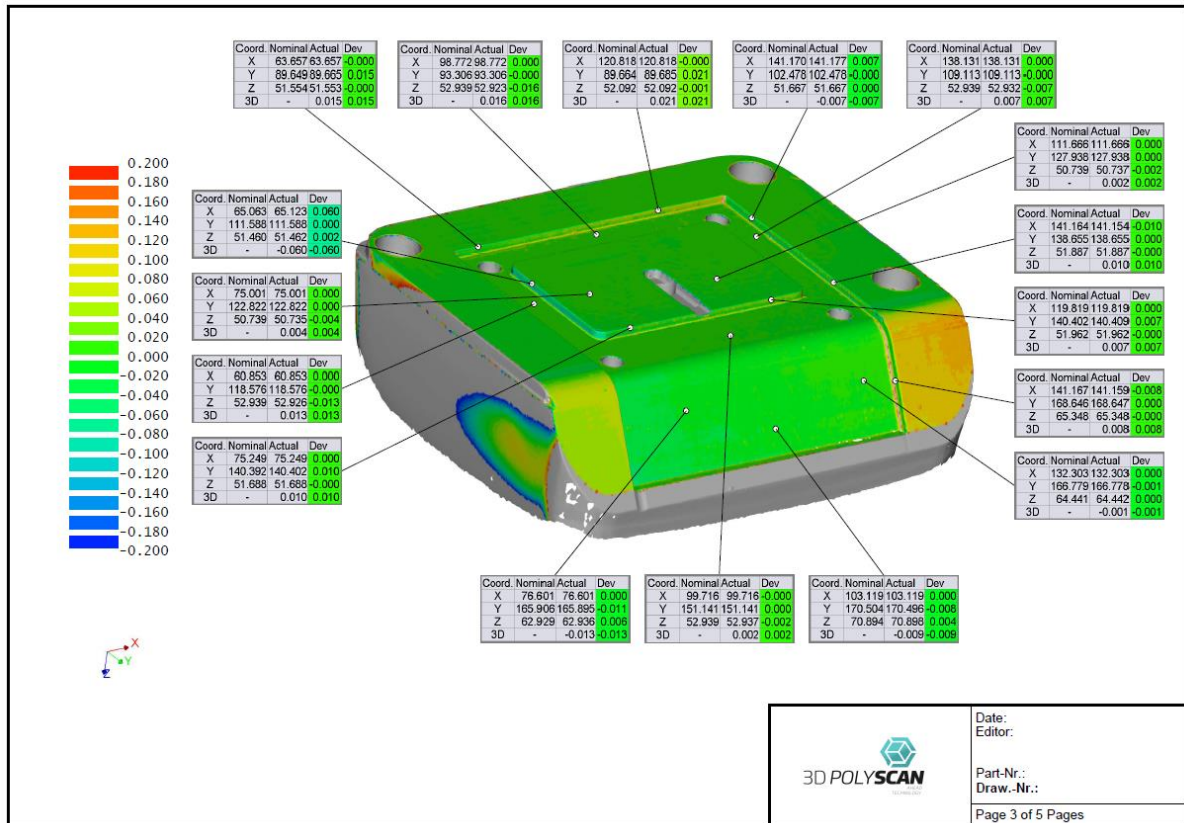
Anexo B- Ficha Técnica do Filamento de ABS para FDM



TECHNICAL DATA SHEET FOR PRODUCT:
ABS FILAMENT

Use	is a material for the FDM (FFF) 3D printing additive technology		
Material	Acrylonitrilbutadienstyrene, petroleum product		
Diameters	1,75 or 2,90 mm		
Tolerance	± 0,05 mm		
Weight	0,5 kg netto ± 5% / 0,7 kg brutto ± 5%		
	1,0 kg netto ± 5% / 1,3 kg brutto ± 5%		
Packing	spool in Vacuum ZIP bag, inserting to paper box, all in LDPE foil		
Colours	views on web https://www.filament-pm.com/abs-not-dead		
Solvents	Acetone		
Printing Properties:			
Temperature HE	220 – 250 °C		
Temperature HB	100 °C		
Surface bed	kapton, ultem, PET foil, commons for FDM printing		
Cooling print object	NO		
Nozzle	All diameters		
Printer space	Open / Close		
Material Properties:			
Thermal	vicat softening temperature	ISO 306	94 °C
	heat deflection temperature	ISO 75	89 °C
Mechanical	impact strength	ISO 179	20 kJ/m ²
	flexural modulus	ISO 178	1800 MPa
Physical	Density	ISO 1183/B	1,04 g/cm ³
	Melt Flow Index	ISO 1133	40 g/10 min

Anexo C- Relatório Controlo Dimensional



Date:
Editor:
Part-Nr.:
Draw.-Nr.:
Page 3 of 5 Pages

Anexo D-Ficha Técnica PP *Moplen* HP500N

Technical Data Sheet

Moplen HP500N

Polypropylene, Homopolymer



Product Description

Moplen HP500N is a homopolymer used for general purpose injection moulding applications. It exhibits good flow and stiffness. *Moplen* HP500N is suitable for food contact.

Regulatory Status

For regulatory compliance information, see *Moplen* HP500N [Product Stewardship Bulletin \(PSB\) and Safety Data Sheet \(SDS\)](#).

Status	Commercial: Active
Availability	Africa-Middle East; Asia-Pacific; Europe
Application	Furniture; Housewares
Market	Compounding; Consumer Products; Rigid Packaging
Processing Method	Compounding; Injection Blow Molding
Attribute	Medium Flow; Medium Stiffness

Typical Properties	Nominal Value	Units	Test Method
Physical			
Melt Flow Rate, (230 °C/2.16 kg)	12	g/10 min	ISO 1133-1
Density	0.90	g/cm ³	ISO 1183-1
Mechanical			
Tensile Modulus	1400	MPa	ISO 527-1, -2
Tensile Stress at Yield	35	MPa	ISO 527-1, -2
Tensile Strain at Break	> 50	%	ISO 527-1, -2
Tensile Strain at Yield	10	%	ISO 527-1, -2
Impact			
Charpy Impact Strength - Notched, (23 °C, Type 1, Edgewise, Notch A)	4	kJ/m ²	ISO 179
Thermal			
Vicat Softening Temperature			
(A/50 N)	153	°C	ISO 306
(B50)	85	°C	ISO 306
Heat Deflection Temperature B, (0.45 MPa, Unannealed)	95	°C	ISO 75B-1, -2

Anexo E- Ficha Técnica PP *Hostacom G2NO2*

Technical Data Sheet

Hostacom G2 N02

Polypropylene Compounds



Product Description

Hostacom G2 N02 is a glass fiber reinforced PP homopolymer with low melt flow rate.

Regulatory Status

For regulatory compliance information, see *Hostacom G2 N02* [Product Stewardship Bulletin \(PSB\) and Safety Data Sheet \(SDS\)](#).

Status	Commercial: Active
Availability	Europe; North America
Application	Automotive Parts
Market	Automotive
Processing Method	Injection Molding

Typical Properties	Nominal Value	Units	Test Method
Physical			
Melt Flow Rate, (230 °C/2.16 kg)	1.0	g/10 min	ISO 1133-1
Melt Volume Flow Rate, (230 °C/5.0 kg)	5.5	cm ³ /10 min	ISO 1133-1
Density			
(23 °C)	1.05	g/cm ³	ISO 1183-1
(23 °C)	1.05	g/cm ³	ISO 1183-1/A
Mechanical			
Flexural Modulus			
(23 °C)	4400	MPa	ISO 178
(23 °C, Tech. A)	4000	MPa	ISO 178/A1
Tensile Modulus, (23 °C)	4500	MPa	ISO 527-1, -2
Tensile Stress at Yield			
(23 °C)	65	MPa	ISO 527-1, -2
(23 °C, 50 mm/min)	70	MPa	ISO 527-1, -2
Tensile Strain at Yield, (23 °C)	4	%	ISO 527-1, -2
Impact			
Charpy Impact Strength - Notched			
(23 °C)	10	kJ/m ²	ISO 179-1/1eA
(23 °C)	10	kJ/m ²	ISO 179
Charpy Impact Strength - Unnotched, (23 °C)	40	kJ/m ²	ISO 179-1/1eU
Thermal			
Vicat Softening Temperature, (B50)	125	°C	ISO 306
Deflection Temperature Under Load, (0.45 MPa, Unannealed)	130	°C	ISO 75B-1, -2
Additional Information			
Mold Shrinkage			ISO 294-4
Please contact LyondellBasell for shrinkage recommendations.			