



Projeto
Mestrado em Engenharia Mecânica - Produção Industrial

***Aplicabilidade do Fabrico Aditivo na Indústria dos
Moldes de Injeção***

Nilza Catarina Rodrigues Reis

Leiria, Março de 2017

Esta página foi intencionalmente deixada em branco



Projeto
Mestrado em Engenharia Mecânica - Produção Industrial

***Aplicabilidade do Fabrico Aditivo na Indústria dos
Moldes de Injeção***

Nilza Catarina Rodrigues Reis

Projeto de Mestrado realizada sob a orientação do Doutor Joel Oliveira Correia Vasco, Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria e coorientação da Doutora Fátima Maria Carvalhinhas Barreiros, Professora da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

Leiria, Março de 2017

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original. “

Albert Einstein

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Agradecimentos

Ao Doutor Joel Vasco, meu orientador, por todo o interesse, disponibilidade, orientação e acompanhamento do projeto na componente científica como a nível da realização dos casos práticos;

À Doutora Fátima Barreiros, coorientadora, pelo apoio, disponibilidade e conhecimento demonstrados;

À Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria (ESTG-IPLeiria), que me facultou todos os conhecimentos para a realização deste documento, bem como todo o material e equipamentos necessários e disponíveis;

Ao Engenheiro José Bolrão, que me auxiliou no desenvolvimento do projeto com os seus conhecimentos;

À empresa DimLaser, em particular à Engenheira Andreia Nabais, pela disponibilidade, partilha de conhecimento e interesse em participar no projeto;

À empresa Teste Lda, em particular ao Sr. Acácio Francisco, uma empresa que está sempre disposta a ajudar aqueles que mostram iniciativas próprias para melhorar o futuro, obrigada pelo equipamento disponibilizado, apoio e interesse em participar no projeto;

Por último, tendo consciência que sozinha nada disto teria sido possível, dirijo um agradecimento especial à minha família pelo carinho, apoio, motivação, parte fundamental para a realização do projeto.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Resumo

A indústria de moldes de injeção para plásticos, atualmente, é um dos setores mais sólidos de atividade a nível nacional, reconhecida mundialmente pela sua qualidade. No entanto, na agressiva e competitiva economia global dos dias de hoje, a inovação e consequente rapidez de resposta são dos fatores mais importantes de competitividade no mercado atual. Aliar a produção de moldes de injeção às novas tecnologias de fabrico aditivo surge como uma alternativa para a redução de tempos de ciclo e custos de produção.

De forma a estudar melhor a viabilidade da tecnologia aditiva nos moldes de injeção, três casos de estudo foram selecionados, com recurso à tecnologia de fusão seletiva por laser (*Selective Laser Melting*, SLM). Este processo foi o escolhido por apresentar produtos com características semelhantes às obtidas pelos métodos convencionais, no que se refere aos materiais, durezas, acabamento superficial, possibilidade de maquinação, entre outros.

No presente projeto, a tecnologia SLM foi utilizada para criar zonas moldantes com canais de refrigeração conformados, cujos resultados foram avaliados através de simulações numéricas e, posteriormente, comparados com os resultados práticos/reais.

São três os casos de estudo apresentados, as geometrias pertencem a dois tipos de indústria, médica e automóvel. O projeto pretende mostrar não só a versatilidade de geometria, mas também a possibilidade de minimizar os custos da tecnologia aditiva, por exemplo optar por zonas moldantes locais e híbridas.

De forma a quantificar o impacto da tecnologia aditiva no setor dos moldes, foi feita uma avaliação dos custos e tempos associados a esta tecnologia e identificadas as mais-valias que o processo possa trazer à indústria dos moldes de injeção.

Os resultados mostram que a tecnologia de fusão seletiva por laser não só viabiliza a redução de tempos de ciclo e de empenos das peças plásticas, como também mostra que é uma tecnologia com um custo significativo, a ser melhorada em alguns aspetos, tais como, rugosidade e limitações geométricas. O processo SLM, na maioria das vezes, não é uma tecnologia de fim de linha, requerendo assim uma integração adequada no processo de fabrico para fazer face às limitações apresentadas.

Palavras-chave: Molde de fabrico convencional, Molde de fabrico aditivo, SLM, Insertos, Canais conformados, Moldação por injeção.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Abstract

The injection molding industry for plastics is nowadays one of the most solid sectors of activity at the national level, recognized worldwide for its quality. However, in the aggressive and competitive global economy of today, innovation and consequent rapid response are the most important factors of competitiveness in today's market. Allying the production of injection molds to the new technologies of manufacturing additive appears as an alternative for the reduction of cycle times and production costs.

In order to better study the feasibility of additive technology in injection molds, three case studies were selected using the selective laser melting technology (SLM). This process was chosen because its products present similar characteristics to the ones obtained by conventional methods, concerning to materials, hardness, surface finish, possibility of machining, among others.

In the present project, the additive technology, SLM, was used to create molding areas with conformal cooling channels, the result of which was evaluated through numerical simulations and later with practical / real results.

There are three case studies presented, the geometries belong to two types of industry, medical and automobile, the project intends to show not only the versatility of geometry, but also the possibility of minimizing the costs of additive technology, for example, one part is made in the conventional process and the other in the additive process.

In order to quantify the impact of additive manufacturing on this industrial sector, an evaluation was made of the costs and times associated with the additive technology and the added value that the process could bring to the injection mold industry.

The results show that selective laser fusion technology (SLM) not only makes it possible the reduction of cycle times and warpage of plastic parts, but also shows that it is a technology with a significant cost, to be improved in some aspects, such as, roughness and geometric limitations. The SLM process, in most cases, is not an end-user technology, but rather requires adequate integration into the manufacturing process to respond to the limitations presented.

Keywords: Conventional Manufacturing Mold, *Additive Manufacturing Mold, SLM, Inserts, Conformal channels, Injection Molding.*

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Lista de figuras

FIGURA 1 – CANAIS EM MATRIZ (A); CANAIS CONFORMADOS (B) [9]	6
FIGURA 2 – CICLO DE MOLDAÇÃO [10]	8
FIGURA 3 – CONSTITUIÇÃO DA MÁQUINA DE INJEÇÃO [13]	9
FIGURA 4 – VISTA EM CORTE DE UM MOLDE DE INJEÇÃO [16]	12
FIGURA 5 – PRINCÍPIO DO FUNCIONAMENTO IMPRESSÃO 3D [19]	15
FIGURA 6 – PRINCÍPIO DO FUNCIONAMENTO FDME [21]	16
FIGURA 7 – PRINCÍPIO DO FUNCIONAMENTO SLM [24]	17
FIGURA 8 – PRINCÍPIO DO FUNCIONAMENTO EBM [11]	19
FIGURA 9 – PRINCÍPIO DO FUNCIONAMENTO LENS [26]	20
FIGURA 10 – PEÇAS CRIADAS EM SLM PARA DIFERENTES INDÚSTRIAS: MÉDICA – PRÓTESE DA ANCA (A); AERONÁUTICA – TURBINA (B); JOALHARIA – ANEL (C); AUTOMÓVEL – REFRIGERAÇÃO CONFORMADA (D) [42]	27
FIGURA 11 – GEOMETRIA <i>SUPPORT</i>	28
FIGURA 12 – ZONA MOLDANTE DO CASO DE ESTUDO 1 - <i>SUPPORT</i>	29
FIGURA 13 – GEOMETRIA DO <i>SENSOR HOUSING</i>	30
FIGURA 14 – EXEMPLOS DE PEÇAS PLÁSTICAS COM CHUPADOS [44]	30
FIGURA 15 – GEOMETRIA <i>BLENDE</i> [45]	31
FIGURA 16 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	34
FIGURA 17 – MOLDE DE FABRICO CONVENCIONAL PARA A GEOMETRIA <i>SUPPORT</i>	38
FIGURA 18 – TEMPO DE ARREFECIMENTO DO <i>SUPPORT</i> NO MOLDE DE FABRICO CONVENCIONAL	39
FIGURA 19 – TEMPERATURA DO <i>AMPCO 83</i> NO MOLDE DE FABRICO CONVENCIONAL, <i>SUPPORT</i>	39
FIGURA 20 – TEMPERATURA DE EXTRAÇÃO DO MOLDE DE FABRICO CONVENCIONAL, <i>SUPPORT</i>	40
FIGURA 21 – EMPENO DO <i>SUPPORT</i> , MOLDE DE FABRICO CONVENCIONAL	40
FIGURA 22 – ZONAS MOLDANTES DO MOLDE DE FABRICO CONVENCIONAL, <i>SENSOR HOUSING</i>	41
FIGURA 23 – <i>SENSOR HOUSING</i> : TEMPO DE ARREFECIMENTO (A); TEMPERATURA DE EXTRAÇÃO (B), MOLDE DE FABRICO CONVENCIONAL	41
FIGURA 24 – AMOSTRA DO <i>SENSOR HOUSING</i> , MOLDE DE FABRICO CONVENCIONAL	42
FIGURA 25 – EMPENO DO <i>SENSOR HOUSING</i> , MOLDE DE FABRICO CONVENCIONAL	42
FIGURA 26 – ZONA MOLDANTE DO MOLDE DE FABRICO CONVENCIONAL, <i>BLENDE</i>	43
FIGURA 27 – EMPENO DA <i>BLENDE</i> , MOLDE DE FABRICO CONVENCIONAL	44
FIGURA 28 – NORMA PARA FURAÇÃO DA REFRIGERAÇÃO NO MOLDE DE FABRICO CONVENCIONAL [48]	44
FIGURA 29 – MOLDE DE FABRICO ADITIVO PARA A GEOMETRIA <i>SUPPORT</i>	45
FIGURA 30 – TEMPERATURA DO FLUIDO DOS CIRCUITOS DE REFRIGERAÇÃO, MOLDE DE FABRICO ADITIVO	46
FIGURA 31 – TEMPO DE ARREFECIMENTO DO <i>SUPPORT</i> , MOLDE DE FABRICO ADITIVO	46

FIGURA 32 – TEMPERATURA DAS ZONAS MOLDANTES DO <i>SUPPORT</i> : BUCHA (A), CAVIDADE (B)	47
FIGURA 33 – TEMPERATURA DE EXTRAÇÃO DO <i>SUPPORT</i> , MOLDE DE FABRICO ADITIVO	47
FIGURA 34 – EMPENO DA GEOMETRIA <i>SUPPORT</i> , MOLDE DE FABRICO ADITIVO	48
FIGURA 35 – ZONAS MOLDANTES DO MOLDE DE FABRICO ADITIVO, <i>SENSOR HOUSING</i>	49
FIGURA 36 – <i>SENSOR HOUSING</i> : TEMPO DE ARREFECIMENTO (A), TEMPERATURA DE EXTRAÇÃO (B)	49
FIGURA 37 – EMPENO DA GEOMETRIA <i>SENSOR HOUSING</i> , MOLDE DE FABRICO ADITIVO	50
FIGURA 38 – INSERTO DO MOLDE DE FABRICO ADITIVO, <i>BLENDE</i>	50
FIGURA 39 – <i>SUPPORT</i> : MOLDE DE FABRICO CONVENCIONAL (A); MOLDE DE FABRICO ADITIVO (B)	52
FIGURA 40 – VISTA E CORTE TRANSVERSAL DO LADO DA INJEÇÃO DO MOLDE DE FABRICO ADITIVO	52
FIGURA 41 – VISTA E CORTE TRANSVERSAL DO LADO DA EXTRAÇÃO DO MOLDE DE FABRICO ADITIVO	53
FIGURA 42 – FUNCIONAMENTO DO MOLDE DE FABRICO ADITIVO DO <i>SUPPORT</i> : ABERTURA DO MOLDE (A); EXTRAÇÃO DA PEÇA PLÁSTICA (B)	53
FIGURA 43 – LADO DA INJEÇÃO DO MOLDE DE FABRICO ADITIVO, <i>SENSOR HOUSING</i>	54
FIGURA 44 – LADO DA EXTRAÇÃO DO MOLDE DE FABRICO ADITIVO, <i>SENSOR HOUSING</i>	55
FIGURA 45 – EQUIPAMENTO M1 <i>CUSING</i> DA <i>CONCEPT LASER</i> [21]	55
FIGURA 46 – CAVIDADE EM SLM: APÓS O PROCESSO OU <i>TAL QUAL</i> (A) E APÓS MAQUINADA A GEOMETRIA BASE (B)	56
FIGURA 47 – BUCHA EM SLM DEPOIS DE MAQUINADA	57
FIGURA 48 – INSERTO DA BUCHA, <i>SENSOR HOUSING</i>	57
FIGURA 49 – INSERTO DA BUCHA EM SLM, <i>SENSOR HOUSING</i>	58
FIGURA 50 – CAVIDADE EM SLM, <i>SENSOR HOUSING</i>	58
FIGURA 51 – LADO DA INJEÇÃO DA PEÇA <i>SUPPORT</i> : MOLDE DE FABRICO CONVENCIONAL (A); MOLDE DE FABRICO ADITIVO (B)	61
FIGURA 52 – LADO DA EXTRAÇÃO DA PEÇA <i>SUPPORT</i> : MOLDE DE FABRICO CONVENCIONAL (A); MOLDE DE FABRICO ADITIVO (B)	62
FIGURA 53 – <i>SENSOR HOUSING</i> : MOLDE DE FABRICO CONVENCIONAL (A); MOLDE DE FABRICO ADITIVO (B)	62
FIGURA 54 – <i>BREAK-EVEN</i> PARA O CASO DE ESTUDO 1, <i>SUPPORT</i>	66
FIGURA 55 – <i>BREAK-EVEN</i> PARA O CASO DE ESTUDO 2, <i>SENSOR HOUSING</i>	70
FIGURA 56 – <i>BREAK-EVEN</i> PARA O CASO DE ESTUDO 3, <i>BLENDE</i>	72

Lista de tabelas

TABELA 1 – PROCESSOS ADITIVOS QUE PROCESSAM METAIS [19]	14
TABELA 2 – EQUIPAMENTOS <i>3D SYSTEMS</i> [28]	21
TABELA 3 – EQUIPAMENTOS <i>CONCEPT LASER</i> [29]	22
TABELA 4 – EQUIPAMENTOS <i>SLM SOLUTIONS GMBH</i> [30]	22
TABELA 5 – EQUIPAMENTOS <i>EOS GMBH</i> [31]	23
TABELA 6 – EQUIPAMENTOS <i>REALIZER</i> [33]	24
TABELA 7 – EQUIPAMENTOS <i>TRUMPF</i> [34]	24
TABELA 8 – EQUIPAMENTOS <i>RENISHAW, SISMA GROUP, OOGI 3D E MATSUURA</i> [35 – 37, 39]	25
TABELA 9 – EQUIPAMENTOS <i>OPTOMECH</i> [40]	26
TABELA 10 – EQUIPAMENTOS <i>DMD3D E TRUMPF</i> [34, 41]	26
TABELA 11 – CAUSAS/SOLUÇÕES DOS CHUPADOS [20]	31
TABELA 12 – CAUSAS/SOLUÇÕES PARA O EMPENO [20]	32
TABELA 13 – CONDIÇÕES INICIAIS DO PROJETO DO MOLDE, <i>SUPPORT</i>	36
TABELA 14 – CONDIÇÕES INICIAIS DO PROJETO DO MOLDE, <i>SENSOR HOUSING</i>	36
TABELA 15 – CONDIÇÕES INICIAIS DO PROJETO DO MOLDE, <i>BLENDE</i>	36
TABELA 16 – PARÂMETROS DO EQUIPAMENTO M1 <i>CUSING</i>	56
TABELA 17 – PARÂMETROS DE INJEÇÃO DO MOLDE DE FABRICO ADITIVO, <i>SUPPORT</i>	59
TABELA 18 – PARÂMETROS DE INJEÇÃO DO MOLDE DE FABRICO ADITIVO, <i>SENSOR HOUSING</i>	60
TABELA 19 – CUSTOS E TEMPOS PARA O MOLDE DE FABRICO CONVENCIONAL, <i>SUPPORT</i>	63
TABELA 20 – CUSTOS E TEMPOS PARA O MOLDE DE FABRICO ADITIVO, <i>SUPPORT</i>	64
TABELA 21 – RESULTADOS REAIS DO MOLDE DE FABRICO CONVENCIONAL (MFC) E DO MOLDE DE FABRICO ADITIVO (MFA)	65
TABELA 22 – CUSTOS E TEMPOS PARA O MOLDE DE FABRICO CONVENCIONAL, <i>SENSOR HOUSING</i>	67
TABELA 23 – CUSTOS E TEMPOS PARA O MOLDE DE FABRICO ADITIVO, <i>SENSOR HOUSING</i>	68
TABELA 24 – RESULTADOS SIMULADOS DO MOLDE DE FABRICO CONVENCIONAL E DO MOLDE DE FABRICO ADITIVO, <i>BLENDE</i>	71
TABELA 25 – RESULTADOS SIMULADOS DO MOLDE DE FABRICO CONVENCIONAL E DO MOLDE DE FABRICO ADITIVO PARA OS CASOS DE ESTUDO	72
TABELA 26 – RESULTADOS REAIS PARA O TEMPO DE CICLO NO MOLDE DE FABRICO ADITIVO PARA OS CASOS DE ESTUDO	73

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Lista de siglas

FA – Fabrico aditivo
AM – *Additive Manufacturing*
E&T – *Engineering & Tooling*
ASTM – *American Society for Testing and Materials*
FDMe – *Fused Deposition of Metals*
EBM – *Electron beam melting*
SLM – *Selective Laser Melting*
LENS – *Laser Engineering Net Shaping*
DMD – *Direct Metal Deposition*
HRC – *Hardness Rockwell C*
CAE – *Computer Aided Engineering*
ISO – *International Standards Organization*
MFC – Molde de fabrico convencional
MFA – Molde de fabrico aditivo
YAG - *Yttrium aluminum garnet*
DIN – *Deutsches Institut für Normung e.v.*
ISO – *International Organization for Standardization*

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Índice

AGRADECIMENTOS	VII
RESUMO	IX
ABSTRACT	XI
LISTA DE FIGURAS	XIII
LISTA DE TABELAS	XV
LISTA DE SIGLAS	XVII
ÍNDICE	XIX
1. INTRODUÇÃO	1
2. ESTADO DA ARTE	5
2.1. Processo de injeção	7
2.1.1. Ciclo de moldação	7
2.1.2. Máquina de injeção	9
2.1.3. Molde de injeção	10
2.2. Simulação numérica	13
2.3. Processos aditivos	14
2.3.1. Impressão 3D de aglomerante	15
2.3.2. Deposição de material fundido	16
2.3.3. Fusão seletiva por laser	17
2.3.4. Fusão por feixe de elétrons	18
2.3.5. Deposição direta de energia	19
2.4. Equipamentos	21
3. CASOS DE ESTUDO	27
4. METODOLOGIA EXPERIMENTAL E RESULTADOS	33
4.1. Procedimento experimental	33
4.2. Análise numérica	35
	xix

4.2.1.	Moldes de fabrico convencional	35
4.2.2.	Moldes de fabrico aditivo	45
4.3.	Construção dos moldes de fabrico aditivo	51
4.3.1.	Projeto dos moldes	51
4.3.2.	Construção das zonas moldantes em SLM	55
4.4.	Ensaio experimentais	59
4.5.	Caracterização	61
5.	DISCUSSÃO DE RESULTADOS	63
6.	CONCLUSÕES	75
	BIBLIOGRAFIA	79

1. Introdução

Hoje em dia, a grande problemática associada às ferramentas para injeção de termoplásticos já não passa somente pela geometria dos próprios componentes. O acabamento superficial, distorções, linhas de soldadura, produtividade, consumo energético e desperdícios são os grandes desafios que se colocam às peças plásticas e à nova geração de ferramentas. A indústria depara-se com um enorme desafio: reduzir o consumo de matérias-primas, reduzir o consumo energético e, simultaneamente, aumentar a produtividade das unidades fabris de modo a dar resposta à crescente procura do consumidor [1, 2].

O Fabrico Aditivo (FA) ou também conhecido por *Additive Manufacturing* (AM), segundo a *ASTM International Committee*, é um processo de ligação de materiais para o fabrico de objetos a partir de dados 3D, normalmente camada a camada, opostamente às tecnologias de fabrico subtrativas bem conhecidas [1].

As tecnologias de fabrico aditivo estão em constante evolução e são processos que podem proporcionar soluções integradas a um conjunto de desafios a que as empresas estão expostas, nomeadamente, a crescente exigência do mercado no que respeita a oferta de produtos customizada e à redução do *time-to-market*. Reduzir o *time-to-market*, o tempo necessário para projetar, aprovar, construir e entregar um produto, proporciona às empresas um tempo de resposta competitivo [2].

No que respeita a equipamentos com aplicabilidade no setor de *Engineering & Tooling* (E&T) existem, sobretudo, duas grandes famílias, que estão segmentadas pela matéria-prima utilizada e não pela tecnologia que utilizam, equipamentos para o fabrico de produtos metálicos e equipamentos, que são na grande maioria, para fabrico de produtos poliméricos. Os equipamentos abordados neste projeto serão para o fabrico de produtos metálicos, em particular, ferramentas para o processo de injeção de termoplásticos.

A injeção de termoplásticos é um dos processos mais importantes de transformação, sendo um método de produção em massa. Devido ao elevado capital investido nas máquinas, moldes e equipamentos auxiliares, os aspetos de produtividade são de grande importância. Para o sucesso da moldação por injeção são determinantes as elevadas cadências de produção e a fiabilidade do processo [2].

O controlo de temperatura do molde durante o processo de injeção é um fator determinante para obter peças com um bom acabamento e rigor dimensional. Este controlo é também fulcral para a diminuição do tempo de arrefecimento da peça para que esta possa ser extraída o mais rápido possível. A otimização do processo de refrigeração do molde pode, indubitavelmente, conduzir a uma diminuição de tempo total útil do processo de injeção, permitindo um tempo de fabrico mais curto, o que conduz a uma diminuição de custos de produção. Neste sentido, a tecnologia de fabrico aditivo tem um grande potencial de evolução nos próximos tempos e envolverá o desenvolvimento de novos materiais que respondam às solicitações dos mercados mais exigentes [3 – 6].

De forma a minimizar o custo da ferramenta da tecnologia aditiva, começam a surgir no mercado as tecnologias híbridas, ou seja, novas tecnologias de fabrico que conjugam o fabrico aditivo com a fresagem num único equipamento. Estas soluções estão a ser desenvolvidas com o objetivo de procurar melhorar a qualidade do produto, a nível dimensional e geométrico, mas também permitir o acabamento de superfícies à medida que são realizadas evitando, assim, a necessidade de posterior intervenção com outras tecnologias/processos [2].

Outra forma de otimizar o custo da tecnologia aditiva é dividir a construção da peça, em que uma parte é obtida por meio dos processos convencionais de fabricação designando-se, normalmente, por base ou substrato, e a outra é construída numa base dos topos contendo a refrigeração conformada. Este tipo de peças visa a redução de tempo e custos quando comparada com uma peça totalmente aditiva.

A diluição dos custos acrescidos na aquisição de insertos obtidos por tecnologias aditivas com canais de refrigeração conformados, nos moldes de injeção, faz-se na fase de produção das peças plásticas. Trabalhar com um molde de injeção equipado com zonas moldantes obtidas por *Selective Laser Melting* (SLM) ou tecnologias similares, com canais de refrigeração conformados, permite uma redução no tempo de ciclo, reduz os defeitos das peças plásticas como os empenos e chupados, contribui para uma peça plástica mais robusta, esteticamente melhor e favorece estabilidade dimensional e de forma, reduzindo a taxa de rejeição. As vantagens em utilizar insertos produzidos por tecnologias aditivas, nomeadamente SLM, com canais de refrigeração conformados apresentam ganhos na produtividade, normalmente, até 30% [2 – 6].

O presente projeto consiste em identificar as principais tecnologias de processo aditivo que processam metais, principalmente os processos mais direcionados para a indústria dos moldes de injeção.

Como é referido anteriormente o processo de injeção de termoplásticos é o método mais utilizado para a transformação de termoplásticos devido à sua eficiência e capacidade de fabricação. O processo de injeção inclui quatro fases importantes: enchimento e compactação, arrefecimento e extração. A fase de arrefecimento é muito importante porque afeta a produtividade e a qualidade da peça injetada. Normalmente, 70 a 80 % do ciclo de injeção está compreendido na fase de arrefecimento da peça plástica [6]. Assim, na fase de projeto do molde, é importante definir uma refrigeração o mais uniforme possível, contudo, por vezes a geometria da zona moldante não o permite. Nestes casos, criar circuitos de refrigeração pelo método convencional torna-se impossível, pelo que o recurso ao processo aditivo pode ser uma mais-valia, sendo nesse sentido que surge o presente projeto, que destaca as vantagens em utilizar o processo aditivo em situações onde o método convencional não é exequível.

Assim, o grande objetivo deste projeto é mostrar como a tecnologia aditiva pode tornar a indústria de moldes mais competitiva no mercado.

O projeto divide-se em duas fases:

- Numa primeira fase do projeto é feito um levantamento das tecnologias aditivas e equipamentos que processam metais, possíveis de utilizar nos moldes de injeção. Das tecnologias encontradas é identificada qual a mais utilizada nos moldes de injeção.
- Numa segunda fase, sendo o objetivo deste projeto mostrar através de exemplos reais (casos de estudo) as aplicações possíveis do processo aditivo na indústria dos moldes, vantagens e limitações, são escolhidas três peças plásticas de duas áreas: indústria automóvel e indústria médica. As geometrias selecionadas para os casos de estudo apresentam alguns problemas de produção conhecidos: diferenças de espessura significativas que causam chupados, zonas difíceis de refrigerar que, consequentemente, aumentam o tempo de ciclo, empenos, entre outros.

Nos três casos de estudo que são utilizados neste trabalho, são comparados os resultados atuais obtidos por métodos convencionais recorrendo à simulação numérica e quais as

vantagens em utilizar alguns insertos ou mesmo zonas moldantes completas com refrigeração conformada produzidos pelo método aditivo. Dos três casos de estudo, dois deles foram materializados, ou seja, são conhecidos os resultados reais e numéricos no método convencional. Também são conhecidos os resultados numéricos e reais no método aditivo, tendo sido criados os insertos com refrigeração conformada e testado o molde.

Ainda, os custos e tempos de fabrico do processo convencional e do processo aditivo nos três casos de estudo são igualmente comparados.

2. Estado da Arte

No presente capítulo são identificadas as tecnologias de fabrico aditivo, destacando as que processam metais, dada a sua maior relevância para o objetivo deste projeto.

O interesse em utilizar as tecnologias de fabrico aditivo na indústria dos moldes de injeção está relacionado com a refrigeração dos moldes e, conseqüentemente, com a otimização dos tempos de ciclo. Os processos tradicionais apenas permitem fazer sistemas de refrigeração em matriz, canais retilíneos de diâmetro constante. Deste modo, como os canais de refrigeração estão relativamente afastados das zonas moldantes, a fase de arrefecimento do molde tem de ser relativamente elevada para compensar a ineficiência das trocas de calor. Como consequência, regista-se um acréscimo do tempo de ciclo de injeção [2, 7].

O projeto do molde obedece a boas práticas e a construção dos canais de refrigeração inclui o seguinte [8]:

- Os circuitos devem ser independentes e simétricos relativamente à zona de enchimento, acompanhando o melhor possível a forma das peças. Assim, o arrefecimento das peças será similar em todos os pontos;
- Os circuitos não devem ser longos, minimizando perdas de carga do fluido refrigerante e, assim, evitar diferenças de temperatura acima dos 5°C;
- Em média, as linhas de água devem estar a uma distância mínima de 5 mm dos extratores ou de qualquer outro furo e a 15 mm das superfícies moldantes ou do exterior das chapas do molde;
- Os acessórios utilizados para as ligações da refrigeração devem ser normalizados;
- As saídas e entradas de fluido refrigerante não devem estar no topo do molde e idealmente devem estar no lado oposto ao operador.

Tecnologias e métodos alternativos de fabricação de insertos metálicos permitem a construção aditiva de formas livres, com capacidade de gerar geometrias complexas a partir da fusão completa de pós metálicos, gerando produtos com características semelhantes às produzidas pelos processos convencionais, assim como obter uma precisão da ordem da décima do milímetro [2].

Na Figura 1a pode ser observada uma refrigeração convencional, definindo uma matriz de canais que, devido ao processo de fabrico, não se pode conformar à geometria da zona moldante. Adicionalmente, na Figura 1b, observa-se uma solução realizada por processo aditivo, conferindo a flexibilidade geométrica requerida para os canais conformados.

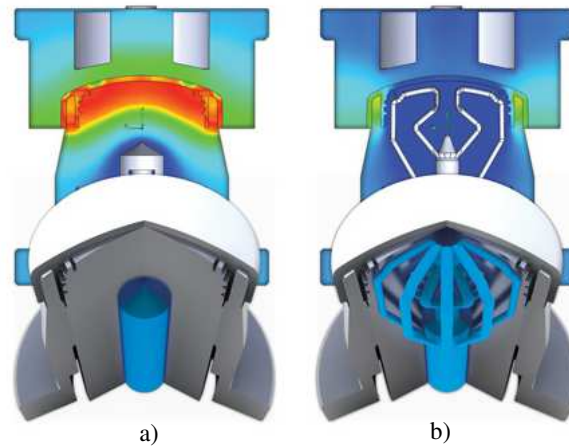


Figura 1 – Canais em matriz (a); Canais conformados (b) [9]

Na indústria dos moldes, uma das razões para a utilização das tecnologias de fabrico aditivo reside na possibilidade de gerar canais conformados para aquecimento e arrefecimento diretamente dentro da cavidade ou dos insertos do molde. As transferências de calor permitem, por um lado, reduzir o tempo de aquecimento e arrefecimento do molde, com implicações no tempo total do ciclo de injeção e, por outro, uniformizar o perfil térmico do molde, eliminando o sub ou sobreaquecimento de zonas moldantes não passíveis de gestão térmica com as soluções convencionais de furação dos canais do sistema de controlo de temperatura, melhorando assim a qualidade da peça moldada [2].

Outro motivo que leva a indústria dos moldes a utilizar o fabrico aditivo está relacionada com os prazos de entrega, pois como o processo permite uma otimização das condições de processamento, com moldações validadas nos primeiros ensaios do molde, evitam-se ajustes que causam atrasos no prazo de entrega do molde ao cliente. Em alguns casos, o processo aditivo pode ter um custo muito superior ao processo convencional, mas mesmo assim pode justificar-se o seu uso devido a apresentar tempos de fabrico altamente competitivos [2].

2.1. Processo de injeção

A descrição do processo de injeção de termoplásticos é resumida através da análise do processo em si, em particular do ciclo de moldação. Neste tópico, destacam-se ainda os detalhes da máquina de injeção e do molde, enquanto elementos fundamentais para a realização do processo.

2.1.1. Ciclo de moldação

O ciclo de moldação (Figura 2) é o conjunto de operações que se efetuam numa máquina injetora entre a produção de duas peças consecutivas. Resumidamente, o ciclo pode ser dividido nas seguintes etapas [10]:

1. Fecho do molde
2. Injeção do material
3. Compactação
4. Arrefecimento / Doseamento ou Plasticização
5. Abertura do molde
6. Extração

A operação fecho do molde corresponde ao início do ciclo e o tempo para esta operação depende do desempenho da máquina de injeção, das características do molde e da distância a percorrer (curso de fecho). Segue-se a injeção do material no interior da cavidade do molde onde, após o seu enchimento, se inicia a fase de compactação para compensar a contração do material devido ao arrefecimento. A etapa seguinte designa-se de arrefecimento (embora, efetivamente, esta decorra durante todo o processo), onde é necessário esperar que a peça atinja resistência suficiente antes da abertura do molde para a consequente extração, de forma a não danificar a moldação. Durante a fase de arrefecimento, ocorre o doseamento para o ciclo de moldação seguinte e a sua duração é tipicamente inferior à do arrefecimento, motivo pelo qual o seu tempo de duração não necessita de ser contabilizado. Por consequência, o tempo de ciclo, t_c , pode ser determinado através da equação 2.1.

$$t_c = t_f + t_{inj} + t_{comp} + t_{arref} + t_{extr} \quad (2.1)$$

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

A otimização do ciclo de injeção revela-se fundamental para assegurar a competitividade económica do processo, podendo ser otimizado com a tecnologia aditiva. A utilização de insertos com canais conformados permite uniformizar o arrefecimento da peça plástica e, conseqüentemente, uniformizar também a contração, diminuindo empenos e reduzindo o tempo de arrefecimento que, na maioria das vezes, é significativo devido a diferenças de espessura das peças plásticas [10, 11].

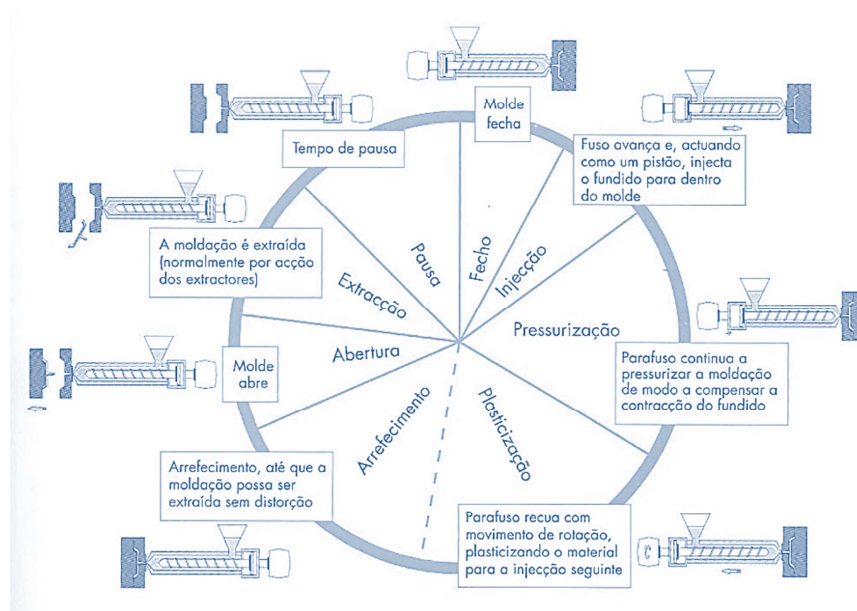


Figura 2 – Ciclo de moldação [10]

Existem três tipos de variáveis no ciclo de moldação, a saber [12]: variáveis associadas à máquina, das quais se realçam a velocidade de injeção, a pressão de injeção, o perfil de temperaturas do cilindro, a temperatura do molde e o tempo de pressurização; variáveis associadas ao processo, destacando a massa molecular, o índice de fluidez e a viscosidade; e variáveis associadas à peça, como o tipo de entrada do molde, a geometria da peça, entre outras.

2.1.2. Máquina de injeção

A constituição de uma máquina de injeção é baseada em quatro elementos principais (Figura 3) que asseguram o ciclo típico de transformação dos materiais plásticos envolvendo, sequencialmente, as seguintes etapas: aquecimento do material até este adquirir uma viscosidade suficientemente baixa, moldação sobre pressão e arrefecimento com consequente recuperação de rigidez [13, 14]:

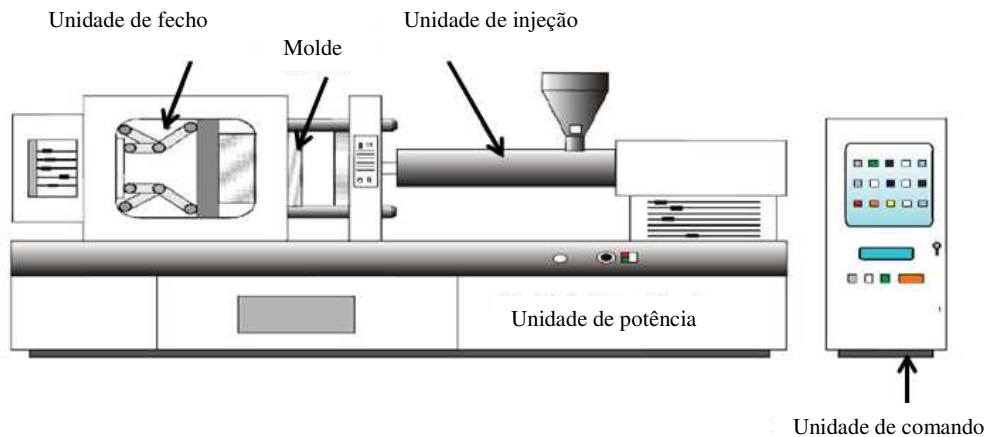


Figura 3 – Constituição da máquina de injeção [13]

A **unidade de injeção** promove o transporte, aquecimento, plasticização e homogeneização do material (normalmente acionando um fuso sem fim). Garante também a subsequente injeção e compactação do fundido.

A **unidade de fecho** assegura a fixação e a movimentação do molde, devendo ser capaz de o manter fechado durante as fases de injeção e de pressurização. Integra também os dispositivos necessários à extração das moldações.

A **unidade de potência** fornece a energia adequada aos diversos atuadores da máquina. É baseado num sistema de pressão óleo hidráulico, cuja bomba é acionada por um motor elétrico ou, eventualmente, baseado num sistema pneumático. Integra também os dispositivos necessários à extração das moldações.

A **unidade de comando** das operações incorpora os dispositivos necessários para assegurar a monitorização e controlo das diversas variáveis do processo. As principais variáveis do processo são a temperatura do material, a temperatura do molde, as pressões de injeção e de compactação, o tempo de enchimento e o tempo de compactação. Assegura, igualmente, a interface com o operador e as comunicações com periféricos ou sistemas de gestão da manutenção.

Existem equipamentos auxiliares à máquina de injeção. Designa-se por equipamento auxiliar o conjunto de dispositivos que integram a célula de moldação por injeção, para além da máquina de injeção e do molde. Uma célula típica é composta por [10]:

- Dispositivos para alimentação e preparação da matéria-prima: a máquina de injeção deve ser alimentada automaticamente a partir de um sistema centralizado;
- Controladores de temperatura: a temperatura das superfícies moldantes é uma variável crítica do processo, que deve ser criteriosamente controlada por questões de produtividade e de qualidade do produto final;
- Robôs e tapetes transportadores: a produção de moldações que não possam cair do molde por gravidade deverá ser assistida por dispositivos automáticos para garantir a completa extração do molde.

2.1.3. Molde de injeção

A utilização de tecnologias de construção aditivas na produção de cavidades e insertos moldantes implica não apenas uma alteração do conjunto de tecnologias de fabricação a dominar, mas também uma modificação nas soluções de engenharia de *design* do molde, desde a seleção de materiais ao projeto do sistema de refrigeração e de escapes de gases. Também as soluções associadas ao pós-processamento e à engenharia da superfície moldante, incluindo técnicas de polimento, de revestimento e de tratamento superficial em função das especificações de qualidade da peça moldada, devem ser reequacionadas [2].

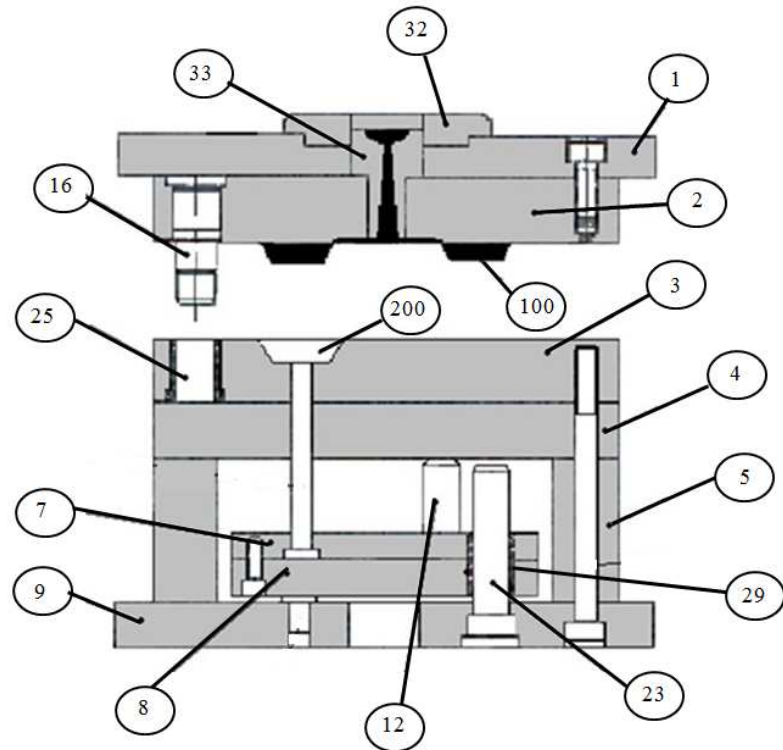
Um molde de injeção pode ser definido como um conjunto de sistemas funcionais que permitem que um espaço onde a peça vai ser materializada, definido pela cavidade e pela bucha (a moldação), seja preenchido com plástico fundido em condições controladas, pelos outros sistemas funcionais que garantem a qualidade dimensional e estrutural das peças produzidas [15]. Um molde é uma ferramenta que permite a produção de peças numa máquina de injeção, podendo variar em tamanho, tipo ou grau de complexidade, dependendo do modelo da peça a produzir. Na sua forma mais simples, como apresentado na Figura 4, um molde é constituído por duas metades ajustáveis, que definem uma ou várias moldações com o modelo que se pretende fabricar [10, 13].

A principal função do molde é dar forma ao material injetado, no entanto o mesmo é responsável por outras tarefas fundamentais, tais como a alimentação da matéria-prima desde o bico de injeção até à moldação, a vedação do material durante o tempo necessário, o arrefecimento da moldação e a sua extração. O molde deve ainda garantir a reprodutibilidade dimensional de ciclo para ciclo. A qualidade superficial do molde é determinante no acabamento superficial da peça moldada [10].

Tipo de material plástico a injetar, número de peças a produzir e aspetos funcionais e estéticos da peça são alguns dos principais aspetos económicos e tecnológicos que influenciam a complexidade do projeto de um molde [10].

De uma maneira geral, o projeto mecânico do molde é encarado com grande cuidado, desde o desenho rigoroso dos seus componentes à seleção dos materiais e à definição de tolerâncias e ajustes [10].

A Figura 4 esquematiza um molde de injeção típico. A numeração das chapas como de todos os componentes que constituem um molde de injeção corresponde a uma linguagem padrão.



Legenda:

- | | |
|-----------------------------------|---|
| 1. Chapa de aperto da injeção | 16. Guia principal |
| 2. Chapa das cavidades | 23. Guia das chapas extratoras |
| 3. Chapa das buchas | 25. Casquilho da guia principal |
| 4. Chapa de reforço das buchas | 29. Casquilho da guia das chapas extratoras |
| 5. Calço | 32. Anel de centragem |
| 7. Chapa dos extratores | 33. Injetor principal |
| 8. Chapa de aperto dos extratores | 100 . Cavidade |
| 9. Chapa de aperto da extração | 200 . Bucha |
| 12. Suporte | |

Figura 4 – Vista em corte de um molde de injeção [16]

2.2. Simulação numérica

A utilização de sistemas CAE - *Computed Aided Engineering* (Engenharia Assistida por Computador) permite verificar a funcionalidade e o comportamento da geometria final, confirmando a viabilidade de produção de forma a reduzir o tempo de fabrico e otimizar os custos da produção [17, 18].

Existem duas fases onde é possível utilizar os estudos de enchimento:

- Na fase inicial de projeto – nesta fase é possível identificar e corrigir os problemas de fabricação enquanto o produto está em desenvolvimento. Nesta etapa há mais liberdade para alterações e podem-se experimentar diversas configurações de projeto;
- Na fase avançada do projeto - neste caso, o objetivo é utilizar a simulação numérica como uma ferramenta de auxílio para diagnosticar as principais causas do problema em curso e a decisão é tomada conhecendo-se a causa raiz do problema.

São várias as vantagens em utilizar os sistemas CAE, podendo ser destacadas as seguintes [17]:

1. O tempo e custo utilizado na execução de um projeto tende a ser menor, o melhoramento do produto e respetivas possibilidades de correção podem ser realizadas de forma rápida;
2. A possibilidade de testar várias versões;
3. A eficiência do projeto é melhorada;
4. O aumento de produtividade, pois a realização de cálculos complexos na fase de engenharia por computador agiliza o processo devido à economia de tempo;
5. O aumento de competitividade.

No entanto, os sistemas CAE também apresentam algumas desvantagens, a saber:

1. Necessidade de postos de trabalho dedicados à realização de cálculos complexos;
2. Não existe informação acerca do problema, mas somente uma apresentação dos vários resultados que depois de interpretados identificam o problema.

2.3. Processos aditivos

Em 2010 foi criado um grupo de trabalho pela ASTM (*American Society for Testing and Materials*) para criar a norma F42 que formula um conjunto de diretivas que classificam a gama de processos aditivos em sete categorias [19].

As sete categorias referenciadas na norma ISO TC 261, transpostas da ASTM F42, são:

1. *VAT Photopolymerisation* (Fotopolimerização)
2. *Material Jetting* (Impressão 3D por Jato de material)
3. *Binder Jetting* (Impressão 3D de Aglomerante)
4. *Material Extrusion* (Deposição de material fundido)
5. *Power Bed Fusion* (Fusão em camada de pó)
6. *Sheet Lamination* (Laminação de folhas)
7. *Directed Energy Deposition* (Deposição direta de energia)

Das sete categorias apresentadas anteriormente, quatro podem processar metais. As tecnologias usadas no processamento, assim como os materiais normalmente usados e os respetivos fabricantes são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Processos aditivos que processam metais [19]

Categorias	Processos	Materiais	Fabricantes
Impressão 3D de Aglomerante	Metal 3D Print	Aço inoxidável	ExOne (EUA)
Deposição de material fundido	FDMe	<i>Feedstocks</i>	-
Fusão em camada de pó	SLM	Aço inoxidável	3D Systems (EUA)
		Aço ferramenta	Concept Laser (Alemanha)
		Ligas de alumínio	EOS GmgH (Alemanha)
		Ligas de titânio	SLM Solutions GmbH (Alemanha)
		Liga de cromo-cobalto	Renishaw (Reino Unido)
		Liga de níquel	Realizer GmbH (Alemanha)
			Sisma Group (Itália)
			OGGI 3D (China)
	EBM	Liga de titânio	
		Liga de cromo-cobalto	Arcam EB (Suécia)
Deposição direta de energia	LENS DMD	Aço inoxidável	
		Aço ferramenta	Optomec (EUA)
		Liga cromo-cobalto	POM Group (EUA)
		Ligas de titânio	Trumpf GmbH (Alemanha)
		Liga de níquel	

2.3.1. Impressão 3D de aglomerante

O processo de jato de aglomerante (Figura 5) utiliza dois materiais, o pó e uma resina aglomerante. O material de construção é o pó e o aglomerante atua como um adesivo entre as camadas de pó da peça. O processo inicia-se com a deslocação horizontal ao longo dos eixos x e y da cabeça de impressão, que deposita seletivamente o aglomerante nas secções da peça, sobre uma camada de pó metálico e o processo repete-se sucessivamente, até se obter a geometria pretendida [19]. A geometria que se retira da plataforma do processo não é final, sendo necessário remover o aglomerante e proceder à sinterização do pó metálico [19].

Devido ao método de ligação e às características de construção, este processo pode apresentar um acréscimo de tempo significativo no total do processo geral, devido às várias etapas requeridas até à obtenção do produto final, a saber [20]:

O primeiro passo é remover o excesso de pó das peças, normalmente é um processo simples, contudo pode requerer algum esforço extra para peças com geometrias complexas.

O segundo passo é o processo térmico, ou seja, as peças designadas por peças verdes (peças obtidas diretamente do processo impressão 3D de aglomerante) são colocadas num forno para remoção do aglomerante e sinterização do pó metálico.

O terceiro passo é a infiltração, nesta fase as peças podem ser infiltradas com um metal para aumentar as propriedades mecânicas, durabilidade e acabamento.

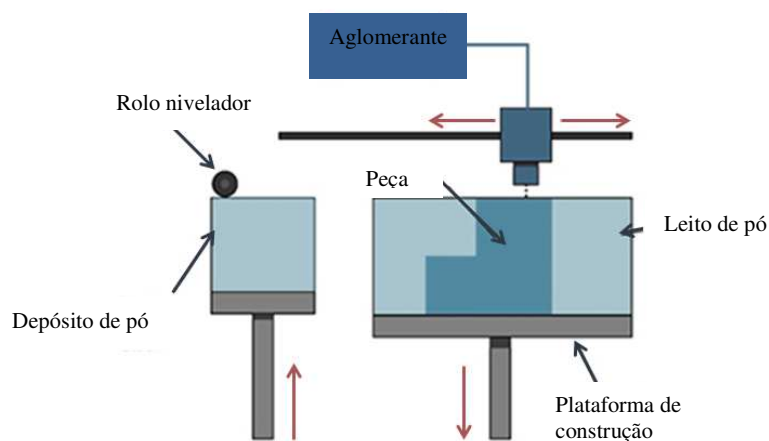


Figura 5 – Princípio do funcionamento Impressão 3D [19]

2.3.2. Deposição de material fundido

A deposição de metais (FDMe) é uma técnica desenvolvida para produzir componentes metálicos, com base na extrusão de misturas de metal com um ligante polimérico (*feedstocks*) para formar camada por camada objetos tridimensionais. A mistura deve conter um elevado teor de pó metálico para evitar a contração excessiva nos tratamentos térmicos, como a remoção de ligante e a sinterização, sem comprometer as propriedades reológicas adequadas durante o processo de extrusão [21].

O equipamento de deposição de material fundido (Figura 6) consiste numa extrusora de parafuso único vertical. O aquecimento do tambor é assegurado por dois aquecedores de banda. A peça é construída sobre uma mesa XY impulsionada por motores de passo para controlar trajetórias e deposição de material. O movimento descendente ao longo do eixo Z necessário para as camadas seguintes também é acionado por um motor passo a passo de modo que diferentes espessuras de camada sejam possíveis. Temperaturas de processamento e do movimento da plataforma de construção são controlados por um computador para a entrada de parâmetros (perfil de temperatura de fuso para as duas zonas de aquecimento, velocidade do parafuso de extrusão, taxa de material de deposição) e interface com o utilizador [21].

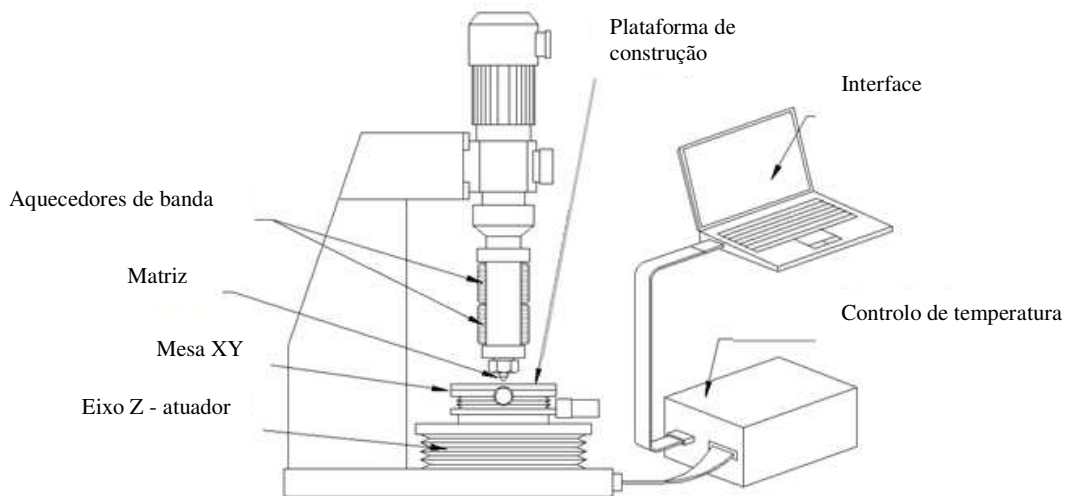


Figura 6 – Princípio do funcionamento FDMe [21]

2.3.3. Fusão seletiva por laser

A fusão seletiva por laser (SLM) é um processo de fabrico aditivo que utiliza pó metálico processado por um ou vários lasers com uma potência considerável, fazendo com que exista uma fusão total durante a fase de construção do componente (Figura 6). A conjugação de parâmetros como a potência do laser, as propriedades mecânicas do material e a velocidade de varrimento do feixe de laser pela camada depositada faz com que seja atingida uma densidade relativa de aproximadamente 100 % [2, 22, 23].

O processo de fabrico inicia-se com a colocação do pó na plataforma que servirá como base para a construção do processo. O laser realiza uma passagem pela plataforma ainda sem qualquer pó ter sido colocado sobre esta com o intuito de garantir uma melhor adesão aquando a sua introdução no sistema.

A granulometria do pó metálico pode variar entre 30 a 50 μm . A fusão total dos pós metálicos permite uma redução no número de etapas de acabamento, traduzindo-se numa redução do tempo de produção [2, 22, 23].

A precisão dimensional possível de obter pelo processo SLM encontra-se entre 40 a 80 μm . Este valor pode ser melhorado por maquinação e acabamentos posteriores ao processamento [19, 23].

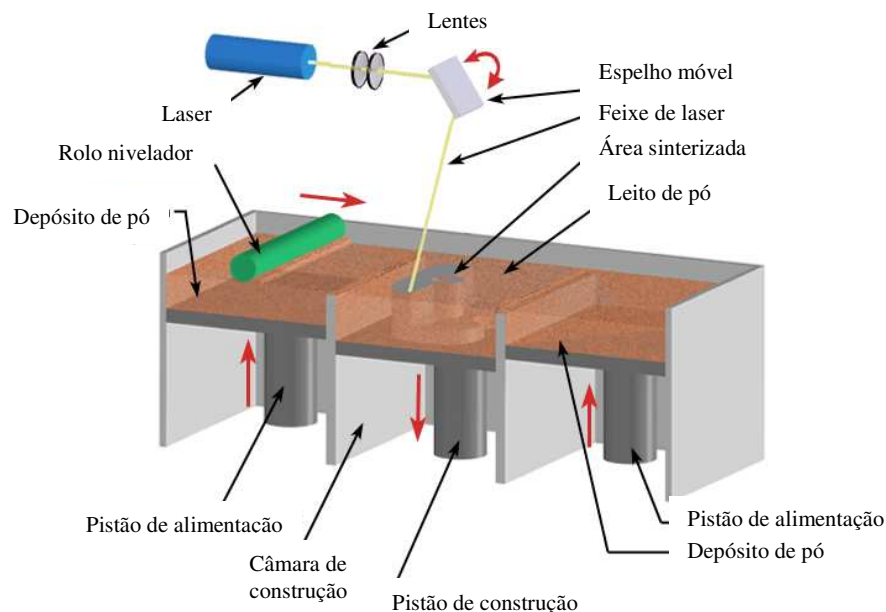


Figura 7 – Princípio do funcionamento SLM [24]

2.3.4. Fusão por feixe de eletrões

O processo de fusão por feixe de eletrões (EBM) apresenta-se como sendo um dos processos com maior capacidade de produção de peças metálicas densas com propriedades mecânicas semelhantes ao metal no seu estado forjado [19, 22]. Este processo de fabrico aditivo utiliza um feixe de eletrões, obtido por aquecimento de um filamento de tungsténio a altas temperaturas, como fonte energética responsável pela fusão total dos pós metálicos, permitindo uma eficiência energética de 90%. A atmosfera de trabalho, em vácuo, potencia um ambiente livre de oxigénio que assegura a pureza do material utilizado, garantindo a precisão do feixe de eletrões, uma vez que não existe contato com partículas do ar, assim como um bom isolamento térmico [19, 22]

A introdução de gás (hélio ou árgon) durante o processo evita a acumulação de carga elétrica nos pós metálicos, bem como, após finalizada a produção, permite um aumento da velocidade de arrefecimento. A elevada temperatura da câmara favorece a redução de tensões residuais durante o processo. A facilidade de obter diferentes potências caloríficas faz com que o processo EBM possibilite a construção de componentes numa vasta gama de materiais. A união de pós metálicos baseia-se na fusão total destes, sendo, neste aspeto, semelhante ao processo SLM [19, 22].

A Figura 7 apresenta uma coluna de eletrões, típica de um equipamento de EBM assim como os seus constituintes. O filamento de tungsténio aquecido emite eletrões que são acelerados até uma energia cinética de, aproximadamente, 60 keV. O feixe de eletrões é controlado por dois anéis de bobinas eletromagnéticas: o primeiro é uma lente magnética que é responsável pela focalização do feixe até ao diâmetro desejado e o segundo é responsável pela deflexão do feixe para a coordenada de construção. A coluna de eletrões é fixa, não existindo movimento mecânico durante a construção de um determinado componente. A corrente do feixe varia, de forma controlada, entre 1 a 50 mA, e o seu diâmetro pode ser focado até valores de 0,1 mm. A espessura da camada depositada pode variar entre 0,05 a 0,2 mm sendo que esta sofre aquecimento duas vezes: a primeira passagem, a uma velocidade muito elevada, serve para aquecer os pós metálicos, e a segunda, a uma velocidade inferior, para garantir a sua total fusão e união [19, 22]. Este método pertence à Arcam, sendo denominado por Multibeam. É uma estratégia de fusão

possível devido à eletrônica de deflexão de última geração, que permite otimizar simultaneamente o acabamento da superfície, a precisão e a velocidade de construção [25].

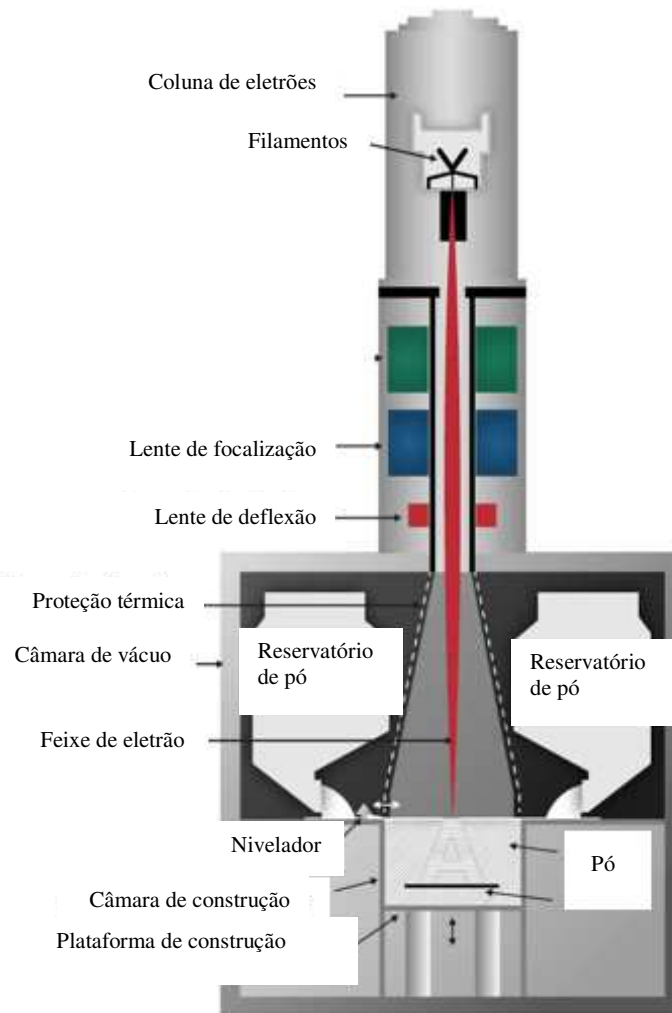


Figura 8 – Princípio do funcionamento EBM [11]

2.3.5. Deposição direta de energia

O processo de deposição direta de energia (LENS[®]) possui algumas similaridades com o processo SLM, no que concerne à capacidade de produzir protótipos de metal denso, com boas propriedades metalúrgicas e sob velocidades razoáveis de construção [26]. No processo são aplicadas camadas finíssimas e sucessivas de metal, diretamente a partir da informação CAD vinda do computador, até que a peça esteja inteiramente formada [26].

As partículas metálicas são inseridas através de um feixe laser focalizado, em que o feixe laser funde as partículas de metal sobre um substrato (Figura 9) [26].

O substrato é movido sob o feixe laser por meio de uma mesa de trabalho que, para além dos movimentos no plano XY, pode possuir outros graus de liberdade de rotação, permitindo a construção de peças de qualquer geometria e formato. Camadas sucessivas são depositadas, até que se forme a peça tridimensional pretendida [26].

O processo LENS[®] ocorre num ambiente controlado, de uma atmosfera de árgon, com baixíssima presença de oxigénio, não ocorrendo oxidação das finíssimas camadas de metal depositadas.

Podem ser usados pós metálicos diversos, tais como aço inoxidável e ligas de níquel, cobre, alumínio ou titânio. A potência do gerador de raio laser varia conforme o material usado, taxa de deposição, entre outros parâmetros, podendo oscilar desde algumas centenas até 20kW ou mais. Os protótipos produzidos requerem maquinação para acabamento, boa microestrutura e propriedades similares ao metal convencional [27].

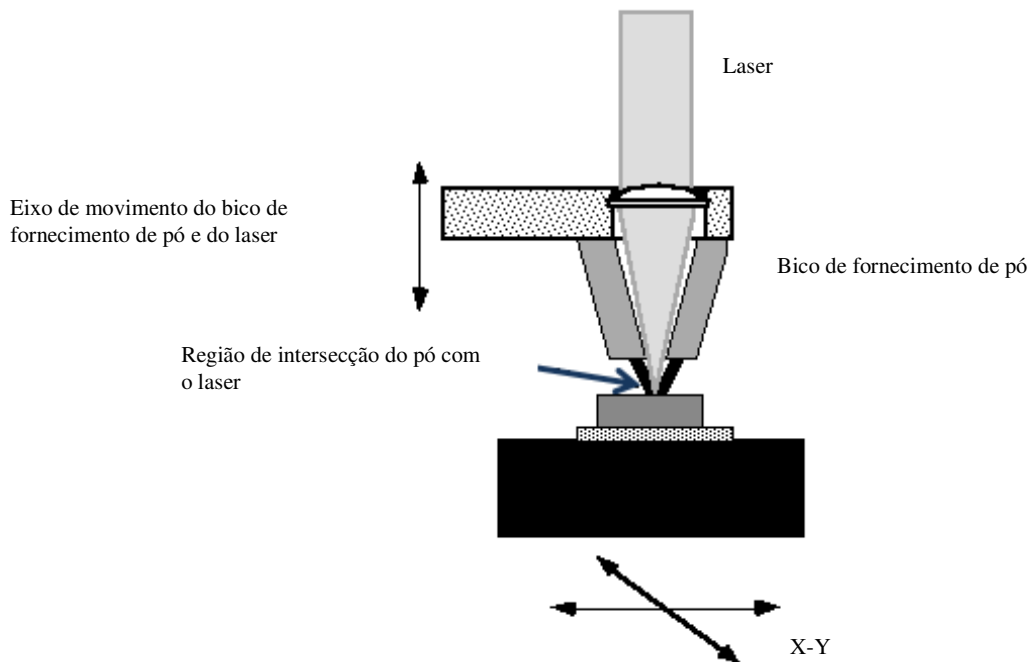


Figura 9 – Princípio do funcionamento LENS [26]

2.4. Equipamentos

O principal objetivo do presente projeto é identificar as tecnologias de processo aditivo que processam metais e que estão direcionadas para a indústria dos moldes de injeção, sendo que as tecnologias fusão seletiva por laser (SLM) e deposição direta de energia (LENS®) são as que melhor cumprem este propósito. Assim, as Tabelas 2 a 8 identificam os vários fornecedores e equipamentos para a tecnologia fusão seletiva por laser e na Tabela 9 e 10 estão identificados os equipamentos para a deposição direta de energia. Todos os fornecedores destacados permitem produzir peças em metal (várias ligas) com geometrias complexas que não são possíveis de produzir utilizando as tecnologias de subtração. As características selecionadas para termo de comparação entre fornecedores e equipamentos referem-se à aplicação da tecnologia na indústria dos moldes de injeção. O tipo de materiais, tipo de laser, espessura da camada, volume/área de construção, velocidade de varrimento e consumo de energia são as características em destaque.

A tecnologia impressão direta de metal do fornecedor *3D Systems* (EUA) possui quatro equipamentos (Tabela 2): ProX™ 100, ProX™ 200, ProX™ 300 e ProX™ 400 [28]. O equipamento ProX™ 400 é o mais avançado, ou seja, apresenta dois lasers com maior potência, o que permite processar uma maior espessura de camada, tendo também uma área de construção maior.

Tabela 2 – Equipamentos *3D Systems* [28]

Equipamento	ProX™ 100	ProX™ 200	ProX™ 300	ProX™ 400
Tipo de Laser	50W/Fibra	300W/Fibra	500W/Fibra	2x500W Fibra (1KW opcional)
Espessura da camada [µm]	10-50	10-50	10-50	10-100
Diâmetro do foco [µm]	-	-	-	-
Volume de construção [mm]	100x100x80	140x140x100	250x250x300	500x500x500
Velocidade de varrimento [m/s]	-	-	-	-
Consumo de energia [kw]	-	-	-	-
Materiais	Aço inoxidável, aço ferramenta, ligas não ferrosas, superligas			

A *Concept Laser GmbH* (Alemanha) é considerada uma das principais fornecedoras de equipamentos e tecnologia para o fabrico aditivo de componentes de metal, tendo registado o processo *LaserCusing*. Os equipamentos que se destacam são quatro (Tabela 3): M1 Cusing, M2 Cusing Multilaser, X Line 100R e X Line 200R [29]. O equipamento X Line

2000R é o que tem maior volume de construção e a possibilidade de maior potência de laser. A gama de materiais possíveis de utilizar com os equipamentos *Concept Laser* é bastante ampla e denota a ambição da empresa em atingir diversos mercados-alvo.

Tabela 3 – Equipamentos *Concept Laser* [29]

Equipamento	M1 cusing	M2 cusing Multilaser	X Line 1000R	X Line 2000R
Tipo de Laser	200W/Fibra (400W opcional)	2x200W/Fibra	1KW/Fibra	2x1KW/Fibra
Espessura da camada [μm]	20-80	20-80	30-200	30-150
Diâmetro do foco [μm]	50	50	100-500	100-500
Volume de construção [mm]	250x250x250	250x250x280	630x400x500	800x400x500
Velocidade de varrimento [m/s]	7	7	7	7
Consumo de energia [kw]	6,8	7,4	13	13
Materiais	Aço 1.4404/1.2709, aço inoxidável; ligas de cromo-cobalto/níquel	Aço 1.4404/1.2709; alumínio, titânio, ligas de cromo-cobalto/níquel	Alumínio, titânio, ligas de níquel	

O fornecedor *SLM Solutions GmbH* apresenta equipamentos que se destacam pela versatilidade de materiais, tipos de laser, consumo de energia, entre outros, destacando-se os seguintes (Tabela 4): SLM 125HL, SLM 280 HL e SLM 500HL [30].

Tabela 4 – Equipamentos *SLM Solutions GmbH* [30]

Equipamento	SLM 125 HL	SLM 280 HL	SLM 500 HL
Tipo de Laser	400W, YLR	400W/1000W, YLR	2x400W/2x1000W, YLR
Espessura da camada [μm]	20-75	20-75	20-200
Diâmetro do foco [μm]	60/70-90	70-120/700	80-150/700
Volume de construção [mm]	125x125x125	280x280x365	500x280x325
Velocidade de varrimento [m/s]	10	15	15
Consumo de energia [kw]	4KW/h	8KW/h	8KW/h
Materiais	Aço inoxidável, aço ferramenta, alumínio, titânio, ligas de níquel	Aço inoxidável, aço ferramenta, alumínio, titânio, ligas de níquel/cromo-cobalto	

O fornecedor *EOS GmbH* (Alemanha) iniciou-se no mercado com a técnica *Direct Metal Laser Sintering* (DMLS) no ano 1989 [31]. Os equipamentos que o fornecedor *EOS GmbH* oferece para a tecnologia fusão seletiva por laser são cinco (Tabela 5): *Precious M80*, *EOS M100*, *EOS M280*, *EOS M290*, *EOS M400-4* [32]. Estes equipamentos têm a mesma velocidade de construção, pelo que a respetiva comparação será baseada na área de construção e no material.

Tabela 5 – Equipamentos *EOS GmbH* [31]

Equipamento	Precious M80	EOS M100	EOS M280	EOS M290	EOS M400-4
Tipo de Laser	Yb Fibra/100W	Yb Fibra/200W	Yb Fibra/200W/400W	Yb Fibra/400W	Yb fibre laser; 4 x 400W
Espessura da camada [μm]	-	-	-	-	-
Diâmetro do foco [μm]	<30	40	100-500	100	100
Volume de construção [mm]	$\varnothing 80 \times 95$	$\varnothing 100 \times 95$	250x250x325	250x250x325	400x400x400
Velocidade de varrimento [m/s]	7	7	7	7	7
Consumo de energia [kw]	2,5	1,7	8,5	8,5	22
Materiais		Titânio, aço, ligas de crómio-cobalto	Desde metais leves a aço inoxidável		

O fornecedor *Realizer GmbH* (Alemanha) apresenta cinco equipamentos para a tecnologia fusão seletiva por laser que se diferenciam principalmente pelo tipo de laser e volume de construção (Tabela 6): *SLM 50*, *SLM100*, *SLM 125*, *SLM 250* e *SLM 300i* [33]. A *Realizer* descreve os seus equipamentos como sendo capazes de produzir componentes de impermeabilidade absoluta e boa qualidade, sendo os materiais que utiliza muito próximos dos materiais utilizados pelos métodos convencionais [33].

Tabela 6 – Equipamentos Realizer [33]

Equipamento	SLM 50	SLM 100	SLM 125	SLM 250	SLM 300i
Tipo de Laser	20W-120W Fibra	20W-200W Fibra	100W-400W Fibra	400W/Fibra	400W-1000W Fibra
Espessura da camada [μm]	20-50	20-100	20-100	20-100	20-100
Diâmetro do foco [μm]	50	50	50	50	50
Volume de construção [mm]	$\varnothing 70 \times 40$	125x125x200	125x125x200	250x250x300	300x300x300
Velocidade de varrimento [m/s]	-	-	-	-	-
Consumo de energia [kw]	-	-	-	-	-
Materiais	Titânio, aço, ligas crômio-cobalto	Titânio, aço, ligas crômio-cobalto, cerâmica, ouro	Titânio, aço, ligas crômio-cobalto	Titânio, aço, ligas crômio-cobalto/níquel	Titânio, aço, ligas crômio-cobalto

O fornecedor *Trumpf GmbH* (Alemanha) comercializa dois equipamentos que operam com a tecnologia fusão seletiva por laser: TruePrint 1000 e True Prit 3000 (Tabela 7) [34]. O equipamento TruPrint 3000 destaca-se pelo tipo de laser, volume de construção e velocidade de varrimento.

Tabela 7 – Equipamentos Trumpf [34]

Equipamento	TruPrint 1000	TruPrint 3000
Tipo de Laser	200W Fibra	500W Fibra
Espessura da camada [μm]	20	50
Diâmetro do foco [μm]	55	100 - 500
Volume de construção [mm]	$\varnothing 100 \times 100$	$\varnothing 300 \times 400$
Velocidade de varrimento [m/s]	6	11
Consumo de energia [kw]	-	-
Materiais	Aço inoxidável, alumínio, titânio, ligas de níquel/crômio/cobalto. Bronze	

A *Renishaw plc* (Reino Unido) descreve-se como sendo o único fornecedor do Reino Unido que concebe e fabrica máquinas industriais para a fusão seletiva por laser de metais. O equipamento de que é fabricante é o AM 250 (Tabela 8) [35].

O fornecedor *Sisma Group*, empresa fundada em *Schio*, em 1961, apresenta como equipamento para fusão seletiva por laser o *Mysint 100* (Tabela 8) [36].

OGGI 3D é um dos mais recentes fornecedores, de nacionalidade chinesa, tendo a empresa sido criada em dezembro de 2013, em *Shunde* (China). Define-se como sendo especializada no desenvolvimento, fabricação e vendas de impressoras industriais 3D (impressora SLS, impressora SLM e a impressora 3DP). O equipamento de que dispõe para a fusão seletiva por laser é o *High – Temperature SLM series* (Tabela 8) [37].

O fornecedor *Matsuura* (Japão) comercializa o equipamento Lumex Avance-25 (Tabela 8) [38]. Este equipamento opera com uma tecnologia híbrida, ou seja, possui um processo aditivo (SLM) e um subtrativo (maquinação) [38].

Tabela 8 – Equipamentos *Renishaw*, *Sisma Group*, *OGGI 3D* e *Matsuura* [35 – 37, 39]

Fornecedor	<i>Renishaw</i>	<i>Sisma Group</i>	<i>OGGI 3D</i>	<i>Matsuura</i>
Equipamento	AM 250	MYSINT 100	SLM Series (High Temperature)	Lumex Advance 25
Tipo de Laser	Yb200W Fibra	100W Fibra	-	Yb400W Fibra
Espessura da camada [µm]	-	10 - 30	-	-
Diâmetro do foco [µm]	-	50	-	-
Volume de construção [mm]	250x250x30	100x100x80	150x150 ou 300x300	250x250x100
Velocidade de varrimento [m/s]	-	2	-	-
Consumo de energia [kw]	-	-	-	31,2
Materiais	Aço inoxidável, alumínio, titânio, ligas de níquel/crómio/cobalto	Bronze, aço, ligas de crómio/cobalto	Aço, titânio, alumínio, cobre, ligas de níquel	Aço, titânio, aço inoxidável

O fornecedor Optomec Inc (EUA) oferece uma tecnologia que permite obter protótipos de metal mais densos, nomeadamente a tecnologia de deposição direta de energia (LENS). Os equipamentos disponíveis são: LENS 450, LENS MR-7, LENS 850-R e LENS Print Engine (Tabela 9) [40].

Tabela 9 – Equipamentos *Optomec* [40]

Equipamento	LENS 450	LENS MR-7	LENS 850-R	LENS Print Engine
Tipo de Laser	400W IPG/Fibra	500W/1KW/2 kW IPG Fibra	1/2//4 KW IPG Fibra	IPG Fibra
Espessura da camada [μm]	>80	>100	>500	-
Diâmetro do foco [μm]		-	-	-
Volume de construção [mm]	100x100x100	300x300x300	900x1500x900	-
Velocidade de varrimento [m/s]	0,060	0,060	0,060	-

A DM3D Technology LLC (EUA) comercializa o sistema DMD com um braço robótico com capacidade de 6 eixos. Estão disponíveis dois equipamentos, DMD 44R e DMD66R (Tabela 10) [34]. O sistema DMD é adequado para a reparação de ferramentas existentes, adicionando características a peças grandes ou para a fabricação de peças novas.

Tabela 10 – Equipamentos *DMD3D e Trumpf* [34, 41]

Fornecedor	<i>DMD3D</i>			<i>Trumpf</i>	
Equipamento	DMD 44R	DMD 66R	TrueLaser 3000	TrueLaser 7020	TrueLaser 7040
Tipo de Laser	Laser fibra 1000 a 5000W	Laser fibra 1000 a 5000W	8000W Laser	CO ₂ Laser 1500W YAG Laser 6600W	CO ₂ Laser 1500W YAG Laser 6600W
Espessura da camada [μm]	0,2 - 0,8	0,2 - 0,8	-	-	-
Diâmetro do foco [μm]	-	-	-	-	-
Volume de construção [mm]	1425x1020x1020	2330x1670x1670	800x600x400	2000x1500x750	4000x1500x750

3. Casos de estudo

Na injeção de peças plásticas, melhorar a qualidade do produto e reduzir o tempo do ciclo de injeção é o foco em todas as fases do projeto de um molde de injeção. Durante o processo de injeção, a fase do arrefecimento tem o impacto mais significativo sobre o tempo total do ciclo, além de influenciar diretamente as propriedades das peças injetadas. Assim, a refrigeração das peças deve ser tão uniforme e rápida quanto possível. Para atingir este objetivo, os canais de refrigeração nas cavidades devem ser projetados próximos da geometria do produto. No entanto, os métodos convencionais para a fabricação de canais de refrigeração permitem produzir apenas circuitos lineares. Como referido, a tecnologia fusão seletiva por laser (SLM) é uma tecnologia de fabrico aditivo à base de pó metálico, capaz de produzir peças camada a camada, diretamente a partir do modelo CAD, tal como mostra a Figura 10 [42]. Por ser uma tecnologia em que o respetivo produto final apresenta características semelhantes aos materiais utilizados na indústria dos moldes, pode ser utilizada para o fabrico de insertos para injeção de termoplásticos com canais de refrigeração complexos, conhecidos como canais de refrigeração conformados. Neste sentido, o processo SLM é o processo adotado nos casos de estudo apresentados neste capítulo.

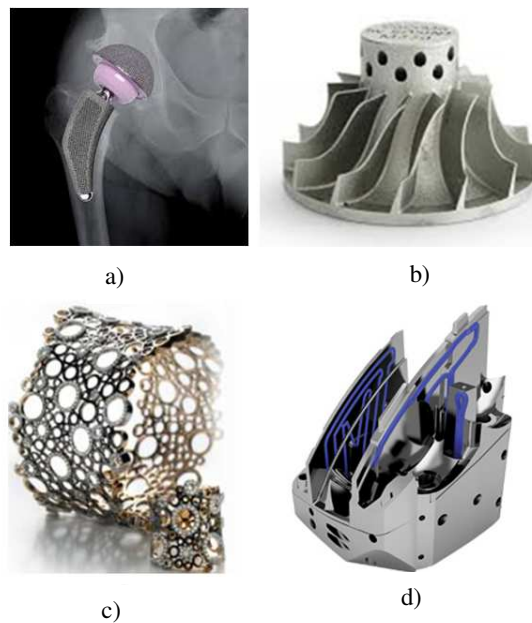


Figura 10 – Peças criadas em SLM para diferentes indústrias: médica – prótese da anca (a); aeronáutica – turbina (b); joalheria – anel (c); automóvel – refrigeração conformada (d) [42]

São três as geometrias selecionadas para os casos de estudo e pertencem a duas áreas distintas: indústria médica e indústria automóvel. As três geometrias apresentam problemas de moldação, nomeadamente chupados, tempo de ciclo elevado e empeno, sendo uma característica comum a dificuldade em otimizar a refrigeração pelo processo convencional.

A primeira geometria, **caso de estudo 1**, designa-se por *Support* e integra-se na indústria médica (Figura 11), apresentando uma variação de espessura de 0,63 mm, sendo a espessura máxima 1,4 mm e a espessura mínima 0,77 mm, e o volume de 80 cm³ com uma área projetada de 61,3 cm².

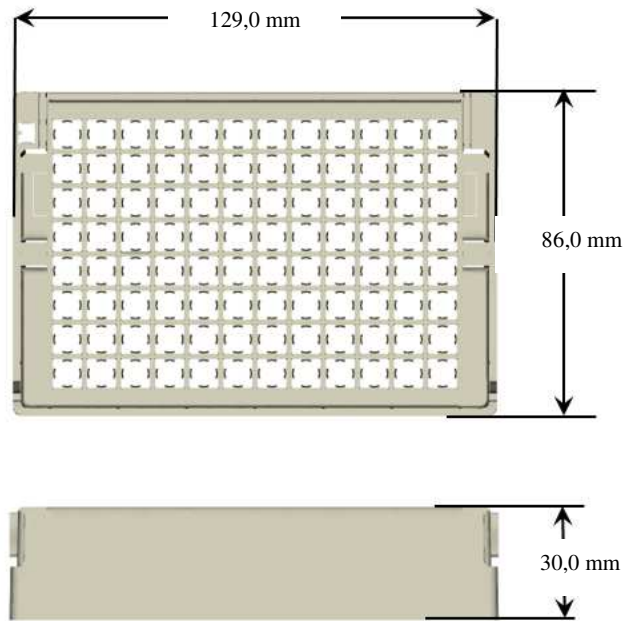


Figura 11 – Geometria *Support*

O facto de se ter uma geometria relativamente simples não significa que a construção do molde seja um processo fácil, sendo a geometria *Support* um bom exemplo. Neste caso, o cliente tem um molde semelhante, mas dadas as dificuldades de refrigeração, o tempo de ciclo assume um valor elevado, designadamente 38 segundos. O objetivo do cliente é reduzir o tempo de ciclo para 33 segundos.

A dificuldade em melhorar a refrigeração do molde está na geometria das zonas moldantes, dado que estas são constituídas por vários castelos de aço, com volumes que não permitem circuitos de refrigeração convencionais. Acresce a agravante de no lado da bucha serem necessários 107 extratores para extrair a peça plástica (Figura 12).

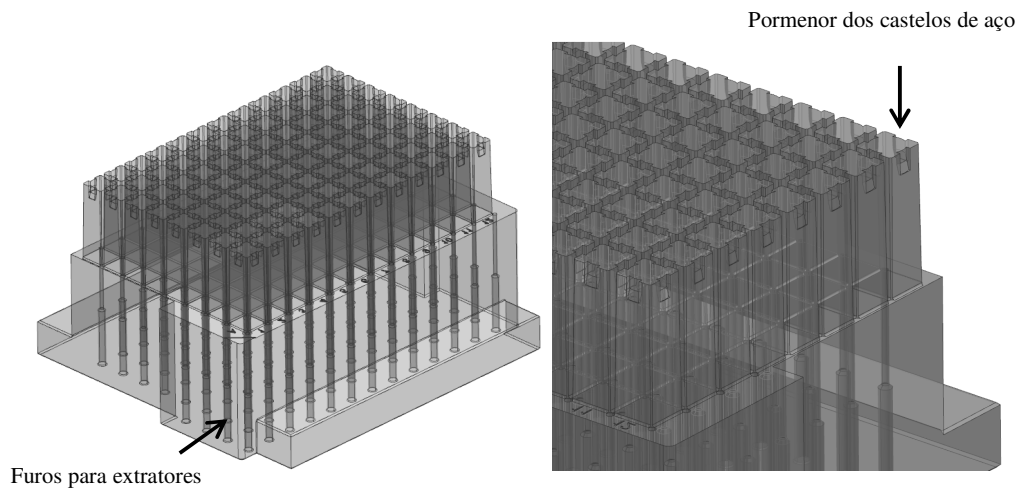


Figura 12 – Zona moldante do caso de estudo 1 - Support

Conhecendo o tempo de ciclo e o projeto do molde em produção verifica-se a necessidade de criar mais circuitos de refrigeração, se possível, que acompanhem a geometria da peça plástica, surgindo então a possibilidade de criar as zonas moldantes na tecnologia aditiva com canais de refrigeração conformados. Para avaliar a viabilidade desta opção recorreu-se a simulações numéricas e compararam-se resultados do molde de fabrico convencional (MFC) com o molde de fabrico aditivo (MFA) de forma a quantificar eventuais ganhos em implementar a tecnologia aditiva antes de avançar para a construção do molde.

A segunda geometria, **caso de estudo 2**, designada por *Sensor housing* (Figura 13), integra-se na indústria automóvel, que é uma área com grande participação na indústria dos moldes de injeção, responsável por mais de 70% da produção [43].

Os fatores que levam à escolha da geometria referida para caso de estudo são as variações de espessura e volume da peça plástica. A peça plástica apresenta uma variação de espessura de 2,75 mm, espessura mínima de 0,25 mm e espessura máxima de 3,0 mm com um volume de 2,7 cm³.

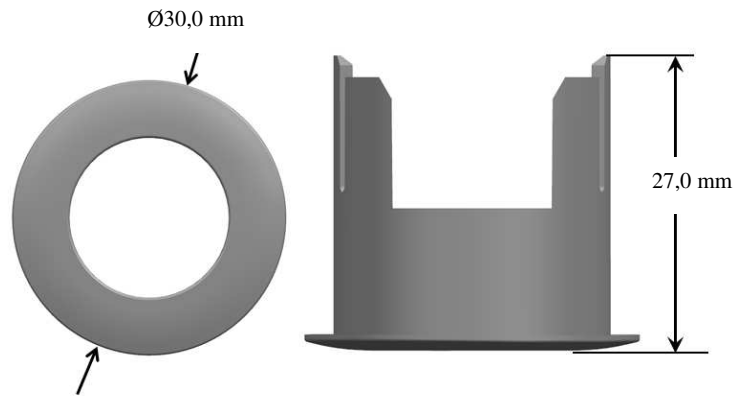


Figura 13 – Geometria do *Sensor housing*

No caso do *Sensor housing*, o molde de fabrico convencional apresenta um tempo de ciclo superior ao solicitado pelo cliente. O cliente pretende um tempo de ciclo de 15 segundos e, na prática, o molde funciona com um tempo de ciclo superior, de 17 segundos, para minimizar alguns dos defeitos presentes na peça plástica, em particular, os chupados.

Uma das causas dos chupados deve-se à variação de espessura na peça plástica. Chupados são depressões na superfície da moldação que surgem junto às nervuras, onde a acumulação de material é mais intensa, devido à contração excessiva e não uniforme do material ao longo da espessura (Figura 14). As causas destes chupados e possíveis soluções são apresentadas na Tabela 11.

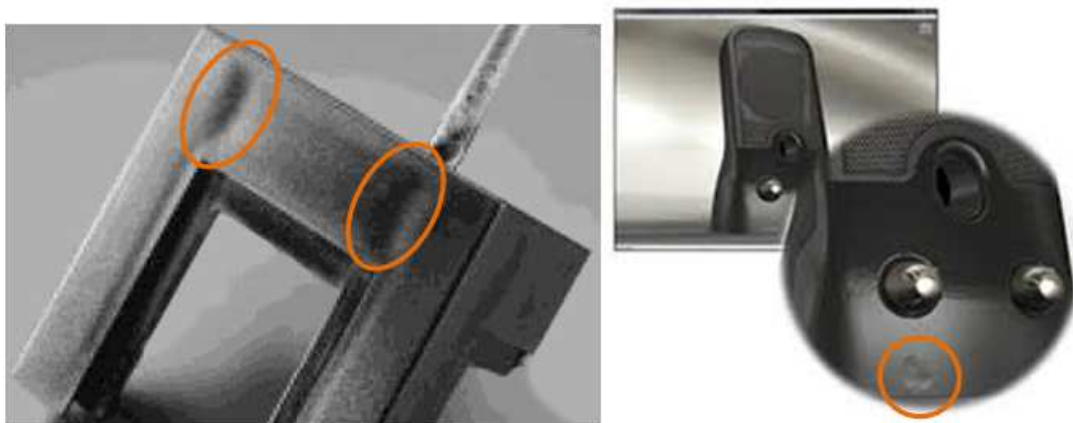


Figura 14 – Exemplos de peças plásticas com chupados [44]

Tabela 11 – Causas/soluções dos chupados [20]

Causas	Soluções
A seção do sistema de alimentação é insuficiente	Aumentar a seção dos canais de alimentação
Contração excessiva durante o arrefecimento	Diminuir a temperatura de molde
A moldação está muito quente quando é extraída do molde	Aumentar o tempo de arrefecimento / melhorar a eficiência do arrefecimento
A espessura da peça é muito grande e/ou não uniforme	Redesenhar a peça, colocando espessuras uniformes.
O circuito do arrefecimento do molde não é adequado	Tornar o arrefecimento do molde mais eficaz, de modo a manter a temperatura da superfície do molde uniforme

O que se pretende mostrar neste segundo caso de estudo são as dificuldades encontradas em refrigerar pelo método de fabrico convencional e identificar quais as vantagens em utilizar a tecnologia aditiva neste tipo de molde.

No sentido de mostrar a versatilidade de peças plásticas na indústria automóvel seleccionou-se uma outra geometria, **caso de estudo 3**, designada por *Blende*. Esta geometria tem espessura geral de 2 mm sendo que as zonas a otimizar a refrigeração têm uma espessura de 2,5 mm, um volume de 114 cm³ e uma área projetada de 212 cm² (Figura 15).



Figura 15 – Geometria *Blende* [45]

A *Blende* apresenta uma geometria complexa, apresentando vários pormenores de moldação tais como zonas de encaixe, nervuras altas de espessura fina (espessura de 0,9 mm e altura de 16 mm), variações de espessura pontuais e vários rasgos/aberturas, sendo que todas estas zonas necessitam de movimentos laterais para viabilizar a respetiva moldação. Os movimentos laterais para desmoldação criam obstáculos à refrigeração e esta quando é desequilibrada cria variações de contração que causam empenos. São estes os fatores que levam à seleção da geometria *Blende* para caso de estudo. Os resultados dos ensaios reais são conhecidos, assim como são conhecidas as fases de otimização necessárias para a validação das peças plásticas. O objetivo é identificar se pela implementação da tecnologia aditiva com refrigeração otimizada na fase de projeto podem ser evitados trabalhos posteriores para validação das moldações.

O empeno condiciona as especificações da peça, uma vez que esta faz parte integrante de um conjunto, e as moldações apresentam, de uma forma geral, empenos significativos que podem inviabilizar a sua montagem. A Tabela 12 identifica algumas das causas do empeno e possíveis soluções.

Tabela 12 – Causas/soluções para o empeno [20]

Causas	Soluções
Capacidade de arrefecimento do molde inadequada	Aumentar o caudal do fluido arrefecedor
O circuito de arrefecimento não provoca um arrefecimento uniforme da moldação	Se necessário, usar diferentes temperaturas em cada lado do molde. Colocar as linhas do fluido próximo da superfície de moldação, redefinir circuitos.
Contração diferencial devido a espessuras não uniformes da moldação	Uniformizar se possível as espessuras
Pontos de injeção mal localizados ou mal dimensionadas	Colocar os pontos de injeção nas zonas de maior espessura.

4. Metodologia experimental e resultados

No presente capítulo encontram-se os resultados das simulações numéricas realizadas ao molde de fabrico convencional (MFC) e ao molde de fabrico aditivo (MFA), assim como a descrição da construção do novo molde com tecnologia aditiva, destacando as fases de projeto e de conceção das novas zonas moldantes. Os ensaios experimentais realizados com os moldes e a caracterização das peças obtidas em moldes de fabrico aditivo também são descritos neste capítulo.

4.1. Procedimento experimental

O projeto tem como fase inicial a simulação numérica ao molde de fabrico convencional, pois esta fase valida os problemas existentes nas peças plásticas e possibilita a comparação com resultados futuros. São estes resultados que vão mostrar problemas existentes e ajudar a esquematizar soluções.

Depois de uma análise dos resultados numéricos e identificadas as áreas a otimizar nas peças plásticas, segue-se uma nova fase, a de reengenharia do projeto do molde por fabrico aditivo, em que é criado um novo modelo 3D das zonas moldantes com circuitos de refrigeração que acompanham a geometria da peça plástica. Após, é incorporado no novo projeto do molde a tecnologia aditiva. Para quantificar e validar esta solução são necessários novos estudos numéricos, resultando numa nova fase do projeto, que corresponde à simulação numérica do molde com refrigeração otimizada. Deste modo, a simulação numérica ajuda a tomar decisões, ou seja, é possível prever se os novos canais de refrigeração conformáveis contribuem para a otimização das condições de processamento ou se é necessário otimizar estes próprios circuitos de refrigeração (maior número de circuitos, nova localização, entre outros).

Com a definição do projeto do molde em função dos novos resultados numéricos, segue-se a construção do molde com refrigeração otimizada. No presente trabalho, foi construído um molde para os casos de estudo 1 e 2, com recurso à tecnologia SLM. Tal não foi possível para o caso de estudo 3 devido à inacessibilidade ao molde de fabrico

convencional, todavia, foi efetuada uma análise numérica simulando em zonas localizadas, coincidentes com as zonas a otimizar no molde convencional, insertos com refrigeração conformada.

Após construídos os moldes, seguem-se os ensaios experimentais e respetiva análise. Nesta fase, foram testados vários tempos de ciclo até atingir as condições de processamento ideais.

A caracterização das peças plásticas permite avaliar se a introdução do processo aditivo no fabrico de insertos moldantes é uma mais-valia, através da obtenção de moldações sem chupados, menores empenos, redução no tempo de ciclo, entre outros.

A comparação de custos entre molde de fabrico convencional e molde de fabrico aditivo permite avaliar um cenário do custo associado à tecnologia aditiva e mostrar que apesar de ter um custo significativo pode ser justificado na fase de produção. A Figura 16 mostra um fluxograma que representa de forma estruturada como foi abordado o trabalho efetuado ao longo do projeto.

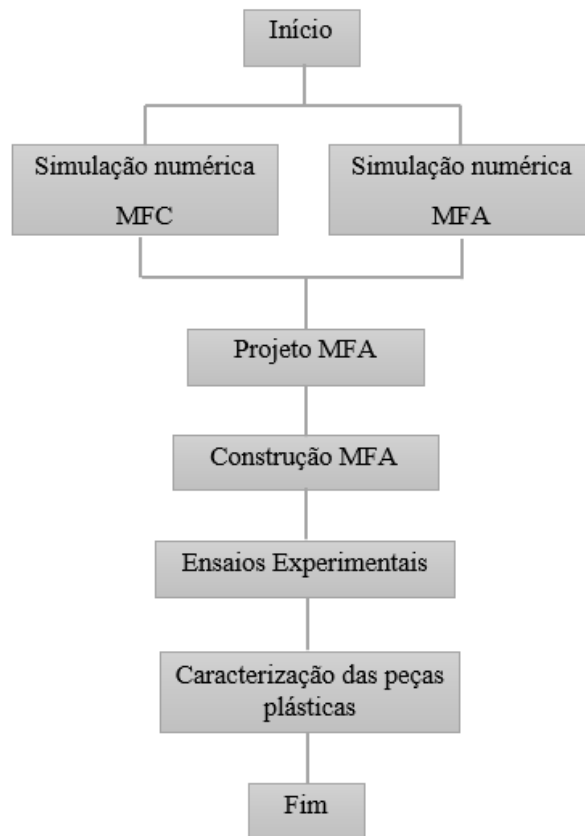


Figura 16 – Procedimento experimental

4.2. Análise numérica

As simulações numéricas realizadas aos moldes de fabrico convencional têm como objetivo validar os problemas identificados durante os ensaios do molde. Estes resultados são importantes para analisar quais as otimizações a fazer e comparar resultados entre os moldes de fabrico convencional (MFC) e os moldes de fabrico aditivo (MFA).

4.2.1. Moldes de fabrico convencional

Para iniciar cada projeto é sempre necessário saber o objetivo do cliente e o funcionamento das peças plásticas por forma a definir as melhores soluções a implementar na ferramenta molde.

No caso de estudo 1, *Support*, o cliente pretende construir um molde que produza 1 000 000 peças, com um tempo de ciclo de 33 segundos, numa máquina de injeção de 130 toneladas.

No caso de estudo 2 (*Sensor housing*) o objetivo do cliente é construir um molde para produzir 50 000 peças, com um tempo de ciclo de 15 segundos, numa máquina de injeção de 6 toneladas, tendo destacado a variação de espessura que a peça plástica apresenta.

Para o caso de estudo 3, *Blende*, o pretendido com a construção do molde é produzir 100 000 peças com um tempo de ciclo de 35 segundos numa máquina de injeção de 300 toneladas, tendo o cliente referido que o empeno da peça é um fator de validação da moldação.

As Tabelas 13 a 15 resumem a informação inicial, fornecida pelo cliente, para o projeto do molde.

Tabela 13 – Condições iniciais do projeto do molde, *Support*

Material a injetar	Policarbonato/acrilonitrilo-butadieno-estireno (PC+ABS)
Dimensões da peça plástica [mm]	129x86x30
Espessura geral [mm]	1,4
Volume [cm ³]	80
Massa [g]	81
Área projetada [cm ²]	62
Tipo de injeção	Canal quente direto na peça
Número de moldações	1 000 000
Tempo de ciclo objetivo [s]	33
Máquina de injeção	NB 130

Tabela 14 – Condições iniciais do projeto do molde, *Sensor housing*

Material a injetar	Politereftalato de butileno (PBT) com 15% de fibra de vidro
Dimensões da peça plástica [mm]	Ø30x27
Espessura geral [mm]	-
Volume [cm ³]	2,7
Massa [g]	3,6
Área projetada [cm ²]	5,74
Tipo de injeção	Canais frios de secção trapezoidal e duas injeções submarinas
Número de moldações	50 000
Tempo de ciclo objetivo [s]	15
Máquina de injeção	Babyplast 6t

Tabela 15 – Condições iniciais do projeto do molde, *Blende*

Material a injetar	Policarbonato/acrilonitrilo-butadieno-estireno (PC+ABS)
Dimensões da peça plástica [mm]	325x158x43*1
Espessura geral [mm]	-
Volume [cm ³]	114
Massa [g]	122,5
Área projetada [cm ²]	212
Tipo de injeção	Canais quentes e canais frios
Número de moldações	100 000
Tempo de ciclo objetivo [s]	35
Máquina de injeção	KM 300

O material plástico nos três casos de estudo pertence ao grupo dos termoplásticos de engenharia, que incluem um conjunto alargado de materiais com bom desempenho mecânico e térmico, assim como excelente aspeto superficial (em termos de brilho e/ou transparência) [46]. As fichas técnicas dos materiais usados, designadamente policarbonato/acrilonitrilo-butadieno-estireno (PC+ABS) e politereftalato de butileno (PBT) com 15% de fibra de vidro, constam, respetivamente, nos Anexos I e II.

Nos casos de estudo 1 e 3 os respetivos moldes possuem sistema de injeção de canal quente. A função do canal quente é manter o material fundido desde o bico da máquina de injeção até à zona moldante, evitando a solidificação prematura do sistema de alimentação e garantindo a minimização ou mesmo a eliminação do volume de material utilizado nos canais de injeção. A temperatura no canal quente é sempre superior ao nível térmico médio do respetivo molde.

Os moldes com canais quentes permitem a injeção direta nas peças, não sendo necessária extração nos canais de injeção, situação do caso de estudo 1 que tem um bico quente direto na peça plástica. O caso de estudo 3 apesar de ter canais quentes também tem canais frios e, neste caso, são necessários extratores para remover os gitos em cada ciclo, o que por vezes dificulta a refrigeração do molde.

O caso de estudo 2 tem um sistema de alimentação frio, pelo que tem de ser projetado por forma a evitar o arrefecimento do material que iria comprometer o enchimento da peça plástica. Este sistema de injeção gera algum desperdício de material, mas para moldar o *Sensor housing* é o mais aconselhado. É uma geometria que não permite colocar canais quentes por ser pequena, circular e visível.

Após a análise detalhada às condições iniciais de cada projeto, é também necessário selecionar os materiais mais adequados para o fabrico das zonas moldantes.

No caso de estudo 1 a opção do material para a construção das zonas moldantes foi uma liga de cobre, com designação comercial *Ampco 83* (Anexo III). A escolha deste tipo de material está relacionada com a condutibilidade térmica, pois permite melhorar a eficiência dos circuitos de refrigeração.

Nos casos de estudo 2 e 3 a escolha do material para a construção das zonas moldantes foi um aço de alta liga, com designação X40Cr14, segundo a norma DIN, também conhecido por aço 1.2083 (Anexo IV). Este material caracteriza-se por ser um material com excelente

polimento, resistente à corrosão, alta resistência ao desgaste e à compressão, baixa distorção e boa maquinação. Pode ser aplicado a moldes de várias indústrias como o caso da indústria alimentar, médica, automóvel e ótica [47].

Conforme referido, as zonas moldantes do **caso de estudo 1** do **molde de fabrico convencional** são construídas no material designado por *Ampco 83* e incluem canais de refrigeração lineares (Figura 17).

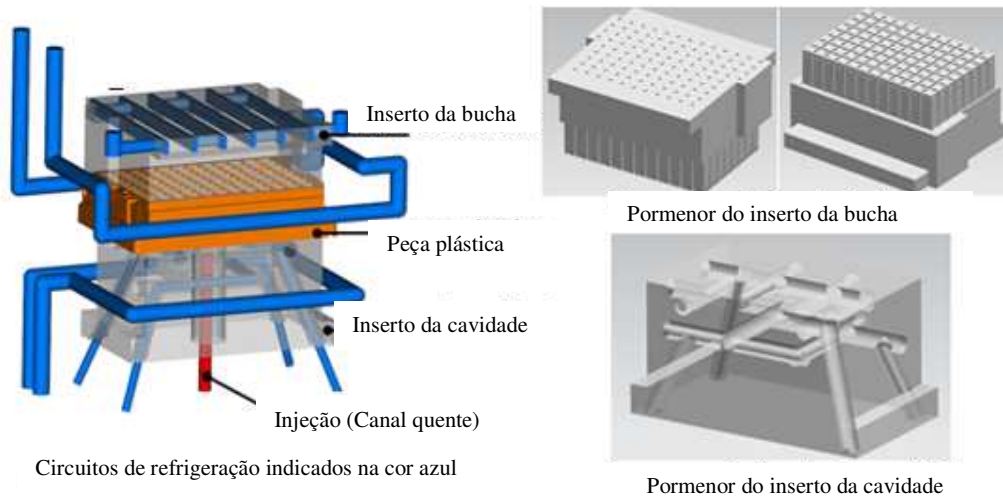


Figura 17 – Molde de fabrico convencional para a geometria *Support*

Os resultados numéricos confirmam o tempo de ciclo obtido no molde de fabrico convencional, que se verificou ser 38 segundos. Junto ao ponto de injeção, o tempo de arrefecimento é de 35,5 segundos. Em zonas da peça mais afastadas do ponto de injeção, mas que apresentam maior espessura, este tempo é de 25,5 segundos e em outras zonas de 14 segundos (Figura 18). As nervuras, como são as zonas da peça plástica de menor espessura, são as primeiras a arrefecer, tal como seria expectável. Considerando o tempo de arrefecimento máximo de 35,5 segundos, o tempo mínimo de 14 segundos e desprezando o tempo de arrefecimento das nervuras, a variação do arrefecimento da geometria *Support* é de 21,5 segundos.

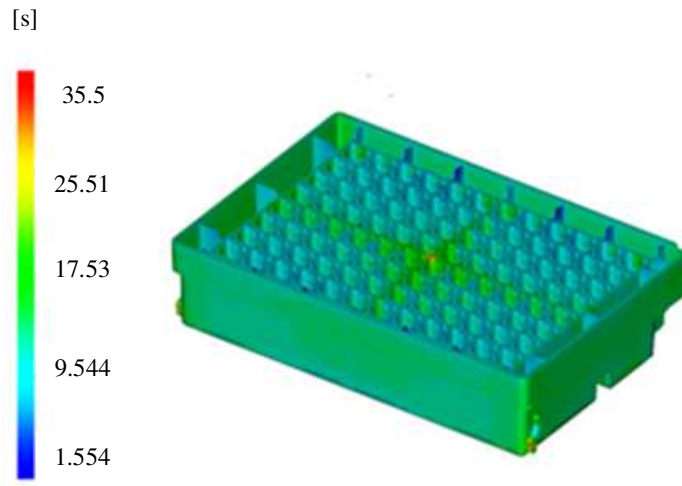


Figura 18 – Tempo de arrefecimento do *Support* no molde de fabrico convencional

As temperaturas resultantes entre o material da bucha e da cavidade, neste caso o *Ampco 83*, e os circuitos de refrigeração apontam para uma variação de 21°C (101°C-80°C), sendo a zona central a mais quente (Figura 19).

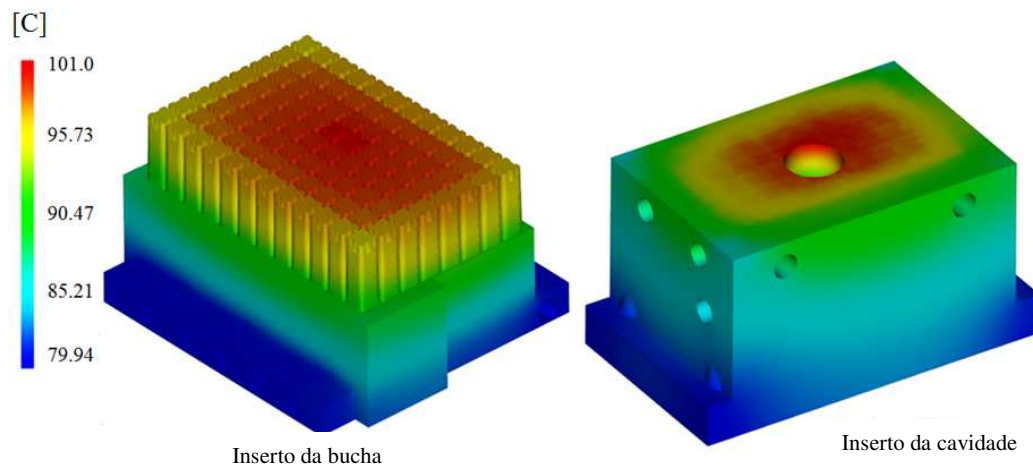


Figura 19 – Temperatura do *Ampco 83* no molde de fabrico convencional, *Support*

Os resultados da variação de tempos de arrefecimento e de temperaturas das zonas moldantes refletem-se na temperatura da peça aquando da extração. A peça apresenta uma temperatura variável (Figura 20).

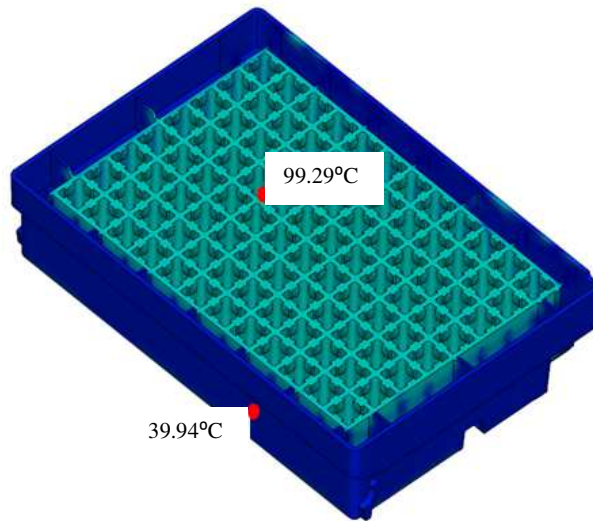


Figura 20 – Temperatura de extração do molde de fabrico convencional, *Support*

Uma consequência da baixa eficiência da refrigeração e da sua falta de uniformidade traduz-se no empeno final da peça plástica. No caso do *Support*, verifica-se que o empeno tem um valor máximo de 0,6 mm nos cantos da peça, valor este claramente causado pela elevada densidade de nervuras interiores que, ao contrair, deformam assim a peça (Figura 21).

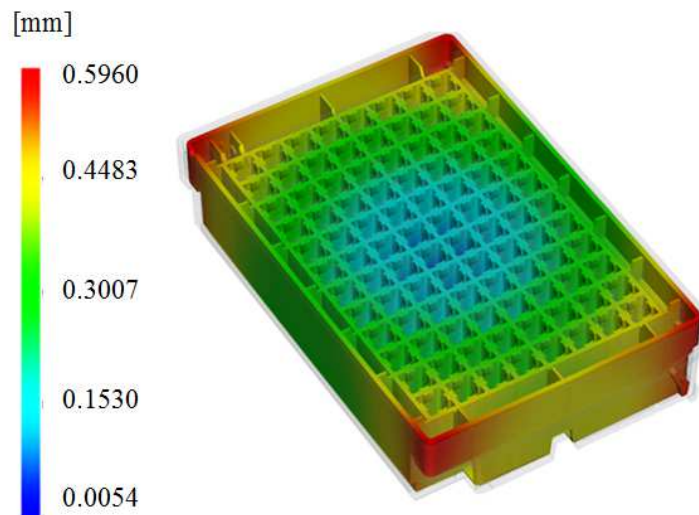


Figura 21 – Empeno do *Support*, molde de fabrico convencional

No caso de estudo 2 do molde de fabrico convencional, as zonas moldantes são constituídas por três peças: cavidade, bucha e um inserto da bucha (Figura 22).

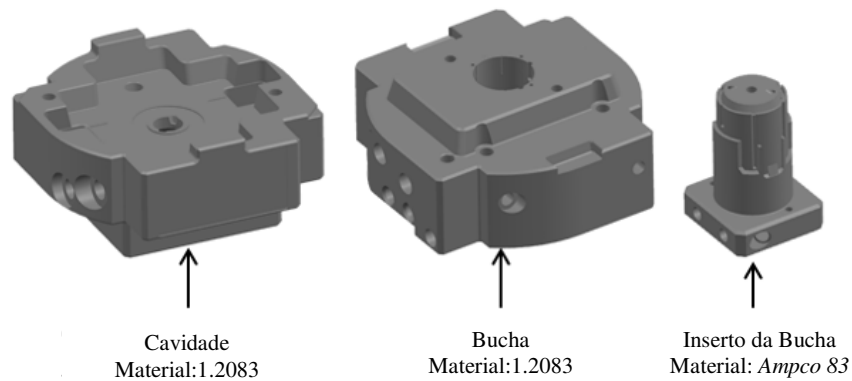


Figura 22 – Zonas moldantes do molde de fabrico convencional, *Sensor housing*

Os resultados numéricos apontam para a possibilidade de existirem chupados na zona visível da peça plástica, sendo uma das possíveis causas deste efeito a variação de espessura, e outra, a eficiência dos circuitos de refrigeração atuais do molde de fabrico convencional.

O tempo de arrefecimento máximo que a peça apresenta são 11,2 segundos, valor que se localiza na zona visível da peça plástica e que coincide com a zona onde a temperatura de extração é máxima, 165°C. Este resultado indica que a eficiência dos circuitos de refrigeração nesta zona é baixa, confirmado pela proximidade dos circuitos a estas zonas (Figura 23). O tempo de ciclo do molde convencional são 17 segundos.

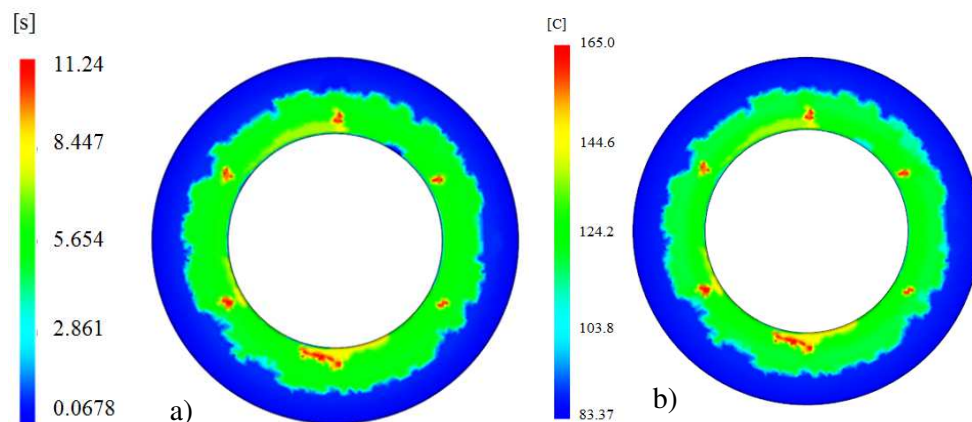


Figura 23 – *Sensor housing*: Tempo de arrefecimento (a); Temperatura de extração (b), molde de fabrico convencional

A amostras obtidas nos testes do molde de fabrico convencional confirmam a presença de chupados na zona visível da geometria do *Sensor housing*, o que é indesejável dado o carácter estético desta peça (Figura 24).



Figura 24 – Amostra do *Sensor housing*, molde de fabrico convencional

O empeno máximo obtido por simulação numérica assume o valor 0,37 mm, contudo, não é um resultado crítico porque se localiza na zona de encaixe da peça, uma zona não visível. Como a tendência do empeno neste caso é comprimir a peça, esta fica justa quando está em funcionamento (Figura 25).

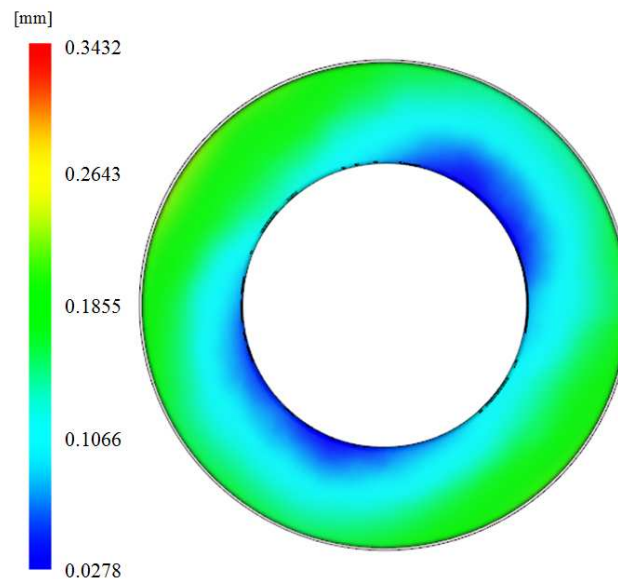


Figura 25 – Empeno do *Sensor housing*, molde de fabrico convencional

No **caso de estudo 3**, dada a complexidade da geometria *Blende*, há necessidade de dividir as zonas moldantes para que seja possível a moldação, tal como foi referido no Capítulo 3. As zonas moldantes do **molde de fabrico convencional** neste caso de estudo são constituídas por insertos, elementos móveis e balancés, e esta divisão cria fortes limitações na refrigeração. As zonas assinaladas na Figura 26 indicam as áreas da peça onde a eficiência da refrigeração pelo método de fabrico convencional é reduzida.

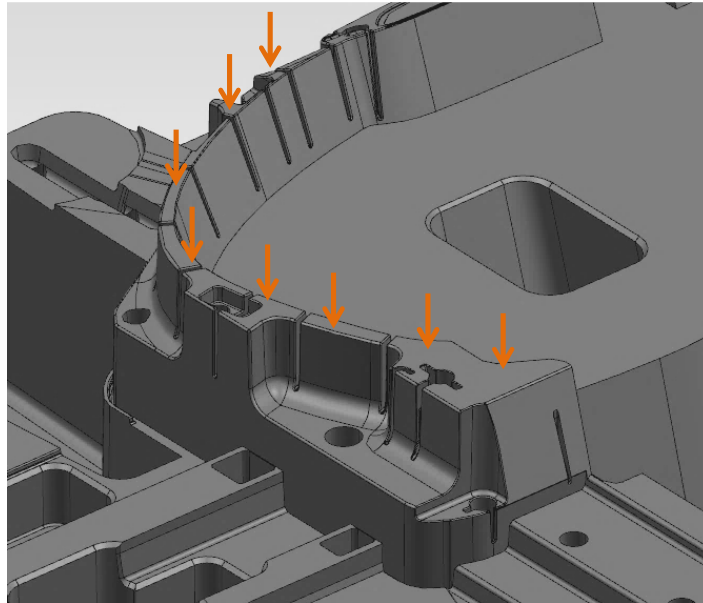


Figura 26 – Zona moldante do molde de fabrico convencional, *Blende*

A simulação numérica realizada confirma a zona indicada na Figura 26 como sendo a zona de maior empeno da peça plástica. Os resultados apontam para que uma das causas sejam as diferenças de contração que, por sua vez, advêm das diferenças de temperatura existentes na peça plástica. Outra possibilidade é a configuração da própria geometria, constituída por paredes altas e pouco estruturadas.

O molde de fabrico convencional tem um tempo de ciclo de 40 segundos e o empeno máximo é de 2,6 mm, valor que excede claramente a tolerância admitida de $\pm 0,7$ mm (Figura 27).

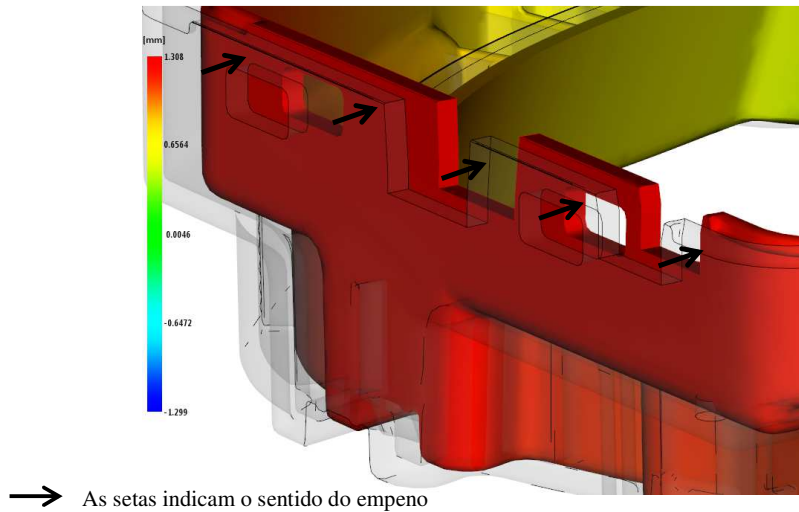


Figura 27 – Empeno da *Blende*, molde de fabrico convencional

Para melhorar os resultados do empeno é necessário criar circuitos de refrigeração que acompanhem a geometria da peça plástica e que, de acordo com as regras de projeto, devem estar afastados das paredes exteriores 5 mm. No entanto, como os castelos de aço que definem a geometria periférica da peça possuem uma espessura de 4 mm, não é possível realizar a refrigeração pelo método convencional (Figura 28).

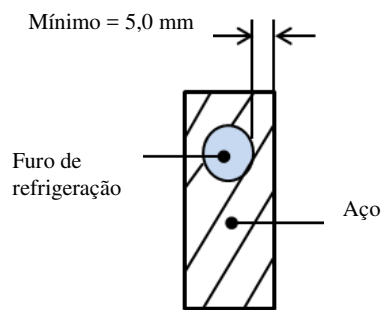


Figura 28 – Norma para furação da refrigeração no molde de fabrico convencional [48]

As soluções encontradas para otimizar este tipo de situações passam por adicionar mais pontos de injeção, aumentar as seções dos pontos de injeção, propor alteração de geometria, neste caso, reforçar estruturalmente as paredes de maior empeno, criar diferenças de temperatura nos circuitos de refrigeração para contrariar o empeno, entre outras. Todos estes trabalhos atrasam o prazo de entrega do molde e têm custos adicionais ao projeto.

4.2.2. Moldes de fabrico aditivo

Com o objetivo de melhorar os resultados dos moldes de fabrico convencionais, foi proposto alterar as zonas moldantes, totalmente ou parcialmente, para geometrias criadas na tecnologia fusão seletiva por laser (SLM) com canais de refrigeração conformados, que acompanham de forma homogênea a geometria da peça plástica.

Para o **caso de estudo 1**, *Support*, optou-se por criar novas zonas moldantes, cavidade e bucha, totalmente feitas no processo aditivo, com canais de refrigeração conformados (Figura 29). Neste caso, toda a cavidade é um bloco e toda a bucha é outro bloco, aliás, motivo que levou à opção de fazer toda a zona moldante no processo aditivo.

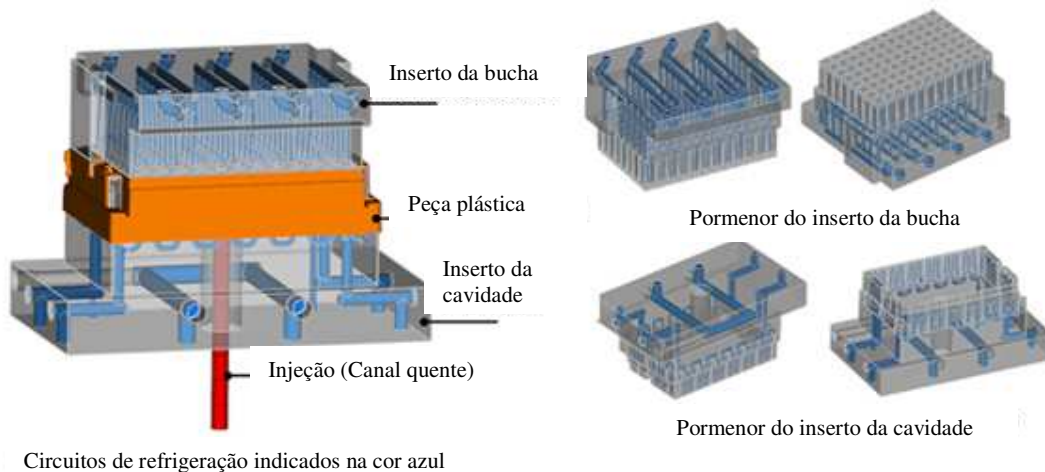


Figura 29 – Molde de fabrico aditivo para a geometria *Support*

O processo aditivo permite realizar vários circuitos de refrigeração independentes, onde é possível colocar o fluido refrigerante a diferentes temperaturas. Uma das vantagens dos circuitos independentes neste caso de estudo reside numa área da geometria do *Support* com dimensões reduzidas, em que o próprio processo aditivo tem alguma dificuldade em construir furos para refrigerar. No entanto, é possível criar um circuito refrigerado a ar, à temperatura ambiente. A opção de ar e não água, mesmo que esta fosse utilizada à temperatura ambiente, está relacionado com os resíduos resultantes da má qualidade da água que, ao longo do tempo, se vão acumulando e obstruindo os circuitos de refrigeração (Figura 30).

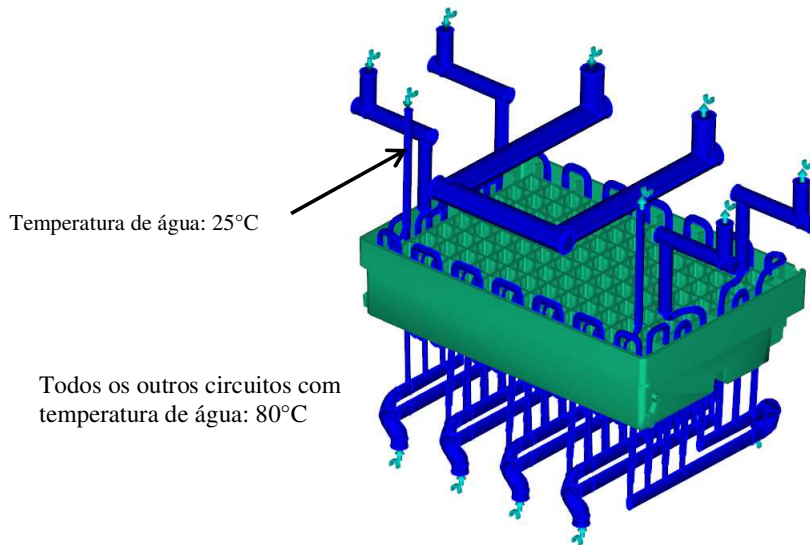


Figura 30 – Temperatura do fluido dos circuitos de refrigeração, molde de fabrico aditivo

Para as novas condições de refrigeração, os resultados numéricos mostram um tempo de arrefecimento máximo de aproximadamente 18 segundos (Figura 31) que, comparado com o molde de fabrico convencional, representa uma redução no tempo de ciclo de 30% (desprezando o valor máximo de 35,5 segundos junto ao ponto de injeção e considerando como resultado numérico do molde convencional um tempo de arrefecimento máximo de 25,5 segundos).

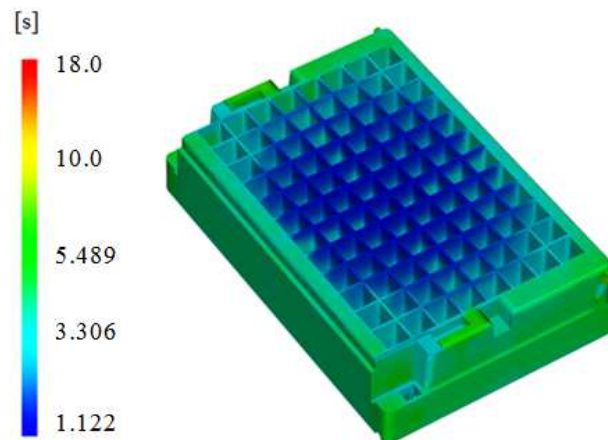


Figura 31 – Tempo de arrefecimento do *Support*, molde de fabrico aditivo

A temperatura do aço, tendo em consideração os circuitos de refrigeração durante o ciclo de injeção, também melhorou significativamente, tendo sido registadas temperaturas uniformes de acordo com a temperatura inicial da água (Figura 32).

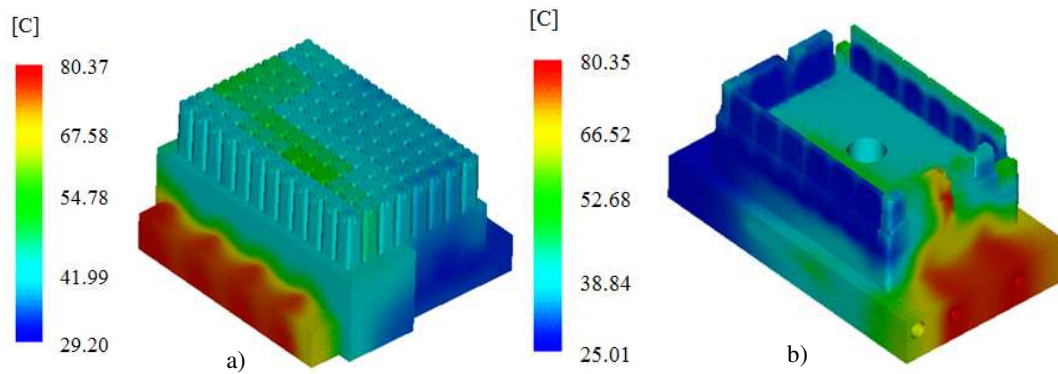


Figura 32 – Temperatura das zonas moldantes do *Support*: bucha (a), cavidade (b)

Outro resultado com variações significativas é a temperatura de extração da peça plástica, havendo uma redução da temperatura máxima de 54,59 °C (Figura 33).

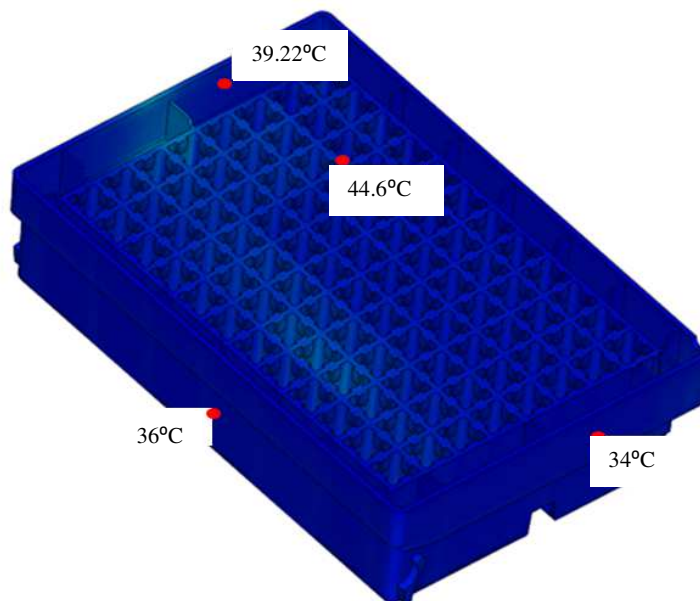


Figura 33 – Temperatura de extração do *Support*, molde de fabrico aditivo

No que respeita ao empeno não se verifica uma diferença significativa, sendo o empeno máximo de 0,59 mm, resultado este que era expectável devido à estabilidade da própria geometria (Figura 34).

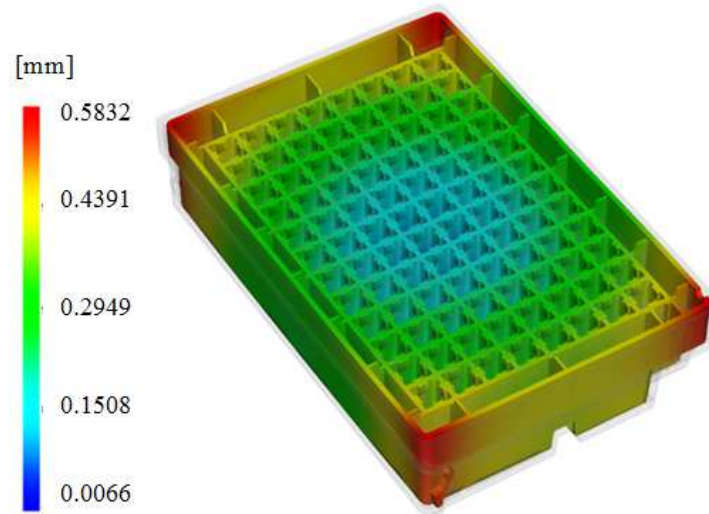


Figura 34 – Empeno da geometria *Support*, molde de fabrico aditivo

No **caso de estudo 2**, *Sensor housing*, a opção das zonas aditivas é um pouco diferente do caso de estudo 1. Mediante a análise dos resultados do molde com refrigeração otimizada optou-se por criar toda a área da cavidade na tecnologia SLM e um inserto local na zona da bucha. A zona de refrigeração do lado da cavidade também podia ter sido feita com um inserto local com o mesmo circuito de refrigeração, todavia, os resultados finais seriam idênticos.

As zonas moldantes criadas no processo aditivo possuem canais de refrigeração conformados que acompanham a geometria da peça plástica, conforme é possível constatar na Figura 35.

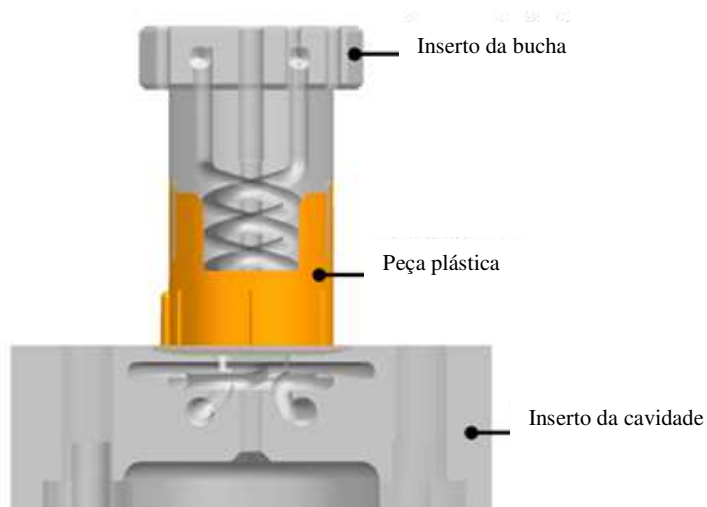


Figura 35 – Zonas moldantes do molde de fabrico aditivo, *Sensor housing*

Para as novas condições de molde, os resultados numéricos indicam uma redução no tempo de arrefecimento de 4,2 segundos, pelo que comparando com o tempo de ciclo do molde de fabrico convencional (17 segundos), representa um ganho de 25%. A temperatura máxima de extração tem uma redução de 51,3°C (Figura 36).

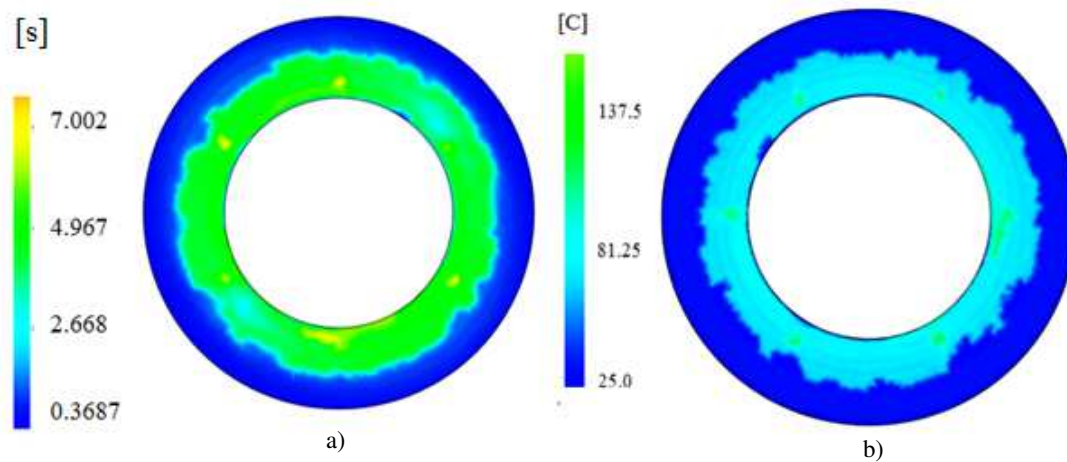


Figura 36 – *Sensor housing*: Tempo de arrefecimento (a), Temperatura de extração (b)

No que concerne ao empeno, os novos resultados mostram uma redução no empeno máximo de 16% (Figura 37).

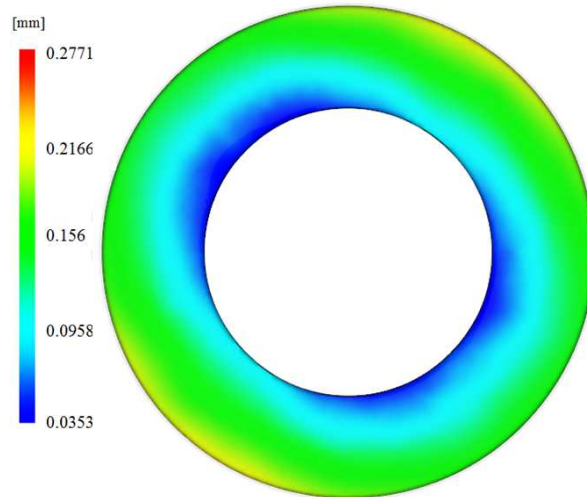


Figura 37 – Empeno da geometria *Sensor housing*, molde de fabrico aditivo

Com o objetivo de melhorar os resultados do empeno da peça plástica, **caso de estudo 3**, *Blende*, criou-se um inserto local com canais de refrigeração conformados à geometria do inserto (Figura 38). O inserto é criado pelos dois processos, convencional e aditivo, pois como o objetivo é reduzir custos, uma parte do inserto é obtido pelo processo convencional, com altura de base de 90 mm, e a zona com os canais de refrigeração conformados é feita no processo aditivo.

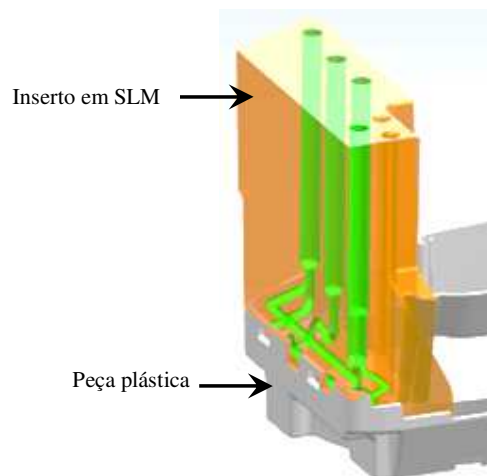


Figura 38 – Inserto do molde de fabrico aditivo, *Blende*

Os resultados simulados indicam que existe uma redução no tempo de arrefecimento de 6 segundos, o que representa uma redução no tempo de ciclo de aproximadamente 17%.

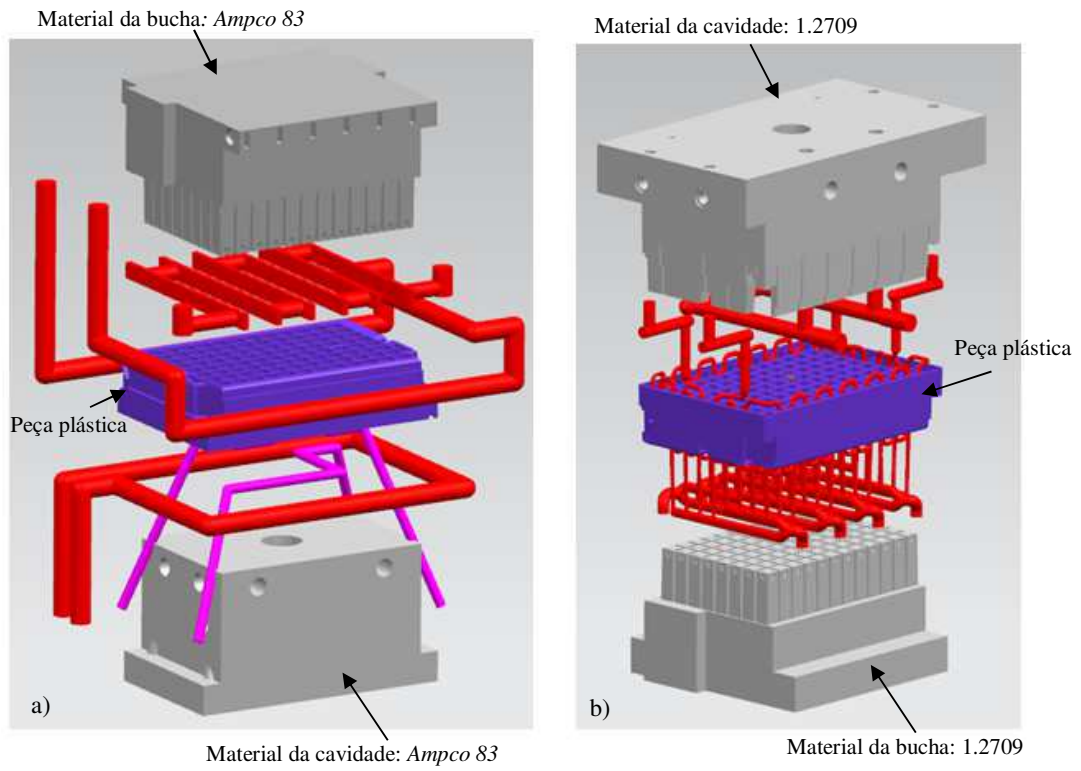
4.3. Construção dos moldes de fabrico aditivo

Para os casos de estudo 1 e 2, *Support* e *Sensor housing*, construíram-se novas zonas moldantes através da tecnologia fusão seletiva por laser (SLM). De realçar que no caso de estudo 3 (*Blende*), a optimização só foi possível de quantificar através de simulações numéricas, por falta de acesso ao molde original. Este molde é muito complexo e recriar as suas zonas moldantes exigiria muito tempo e, previsivelmente, um custo elevado.

4.3.1. Projeto dos moldes

O novo projeto de molde do **caso de estudo 1**, *Support*, não é muito diferente do molde de fabrico convencional. A avaliar pelos resultados das simulações numéricas, a opção foi criar novas zonas moldantes no processo aditivo, com a vantagem de ter uma refrigeração uniforme que consegue acompanhar a geometria da peça, ou seja, as zonas moldantes convencionais à base de *Ampco 83* são substituídas por novas zonas moldantes construídas num material designado por *CL 50WS*, também conhecido por aço 1.2709 (Anexo V). Este tipo de material é caracterizado por ter propriedades mecânicas muito boas, é um aço pré-ligado de elevada resistência e, em forma de pó fino, é ideal para a fabricação de ferramentas para moldes de injeção. Os parâmetros de processamento utilizam a fusão completa de toda a geometria, tipicamente com uma espessura de camada de 40 μm . A vantagem em utilizar os parâmetros padrão favorece as propriedades mecânicas que são uniformes em todas as direções. O aço 1.2709 pode ser facilmente pós-endurecido a mais de 50HRC. Aplica-se aos moldes de injeção de alta resistência e a insertos de moldação para termoplásticos padrão, com uma vida de ferramenta atingível até milhões de peças [8].

A configuração do molde de fabrico aditivo manteve-se igual à do molde de fabrico convencional (Figuras 39 a 41).



As zonas indicadas na cor vermelha são os circuitos de refrigeração

Figura 39 – Support: Molde de fabrico convencional (a); Molde de fabrico aditivo (b)

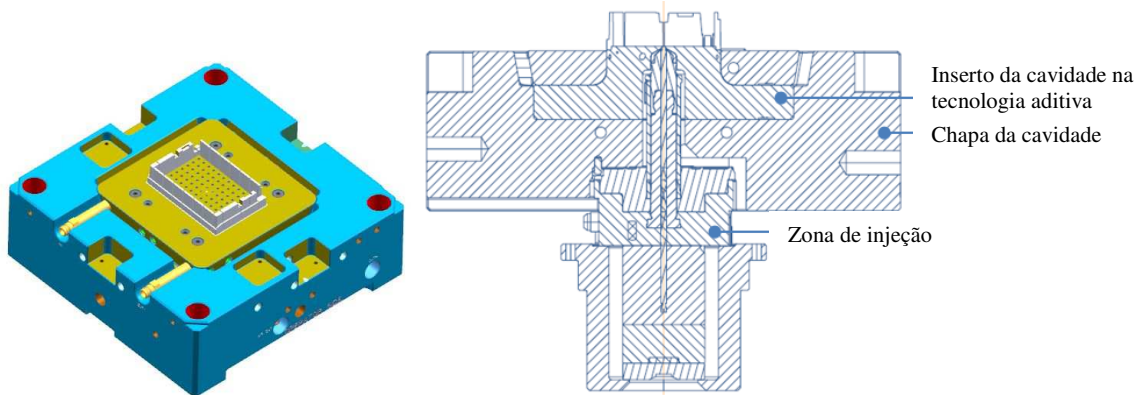


Figura 40 – Vista e corte transversal do lado da injeção do molde de fabrico aditivo

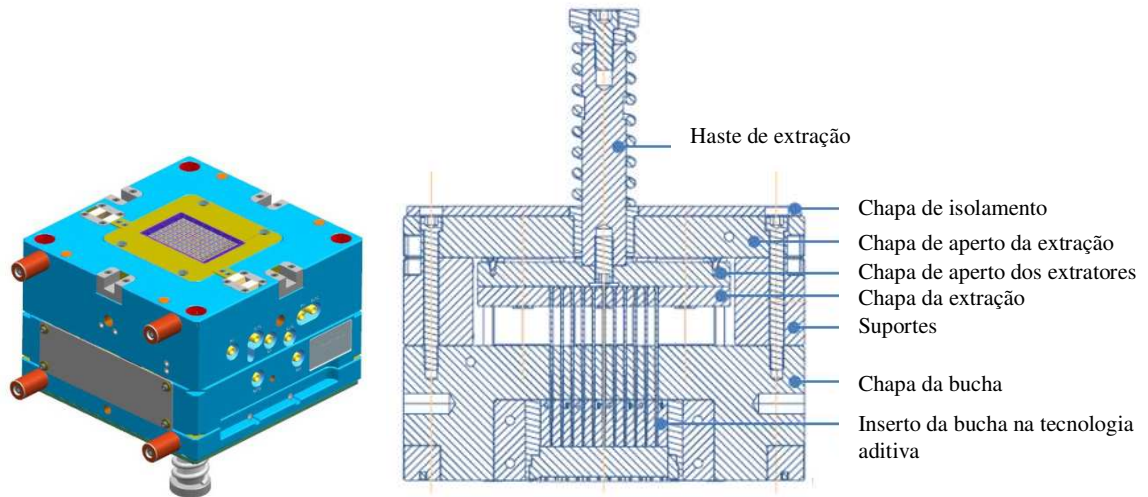


Figura 41 – Vista e corte transversal do lado da extração do molde de fabrico aditivo

A Figura 42 ilustra o funcionamento do novo molde na máquina de injeção, nomeadamente a abertura do molde e a extração da peça plástica.

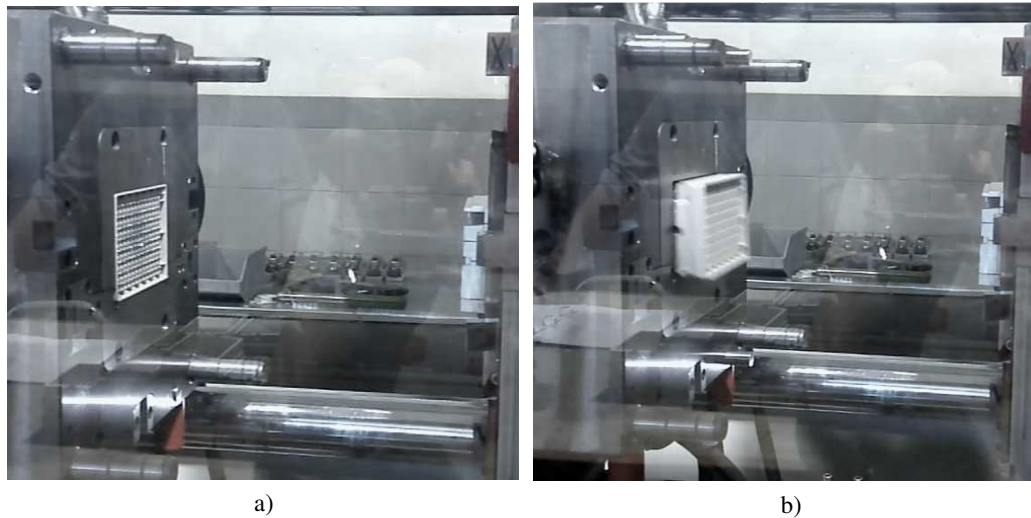


Figura 42 – Funcionamento do molde de fabrico aditivo do *Support*: abertura do molde (a); extração da peça plástica (b)

Para validar os resultados obtidos na simulação numérica do **caso de estudo 2**, *Sensor housing*, construiu-se um molde constituído por duas partes: lado da injeção e lado da extração, no Anexo VI encontra-se o desenho 2D do molde.

Lado da injeção

O lado da injeção é a parte fixa do molde, que está fixo no prato da máquina do lado do injetor, constituído por uma chapa isoladora, uma chapa de aperto da injeção, a cavidade feita no processo SLM, guias que permitem o guiamento do molde entre o lado da injeção e o lado da extração e fixações necessárias (Figura 43).

A opção de fazer toda a zona de injeção no processo aditivo teve a ver com o volume da cavidade, pois como a peça era pequena, seria vantajoso construir toda a cavidade em SLM, evitando assim outros acessórios e mais maquinações.

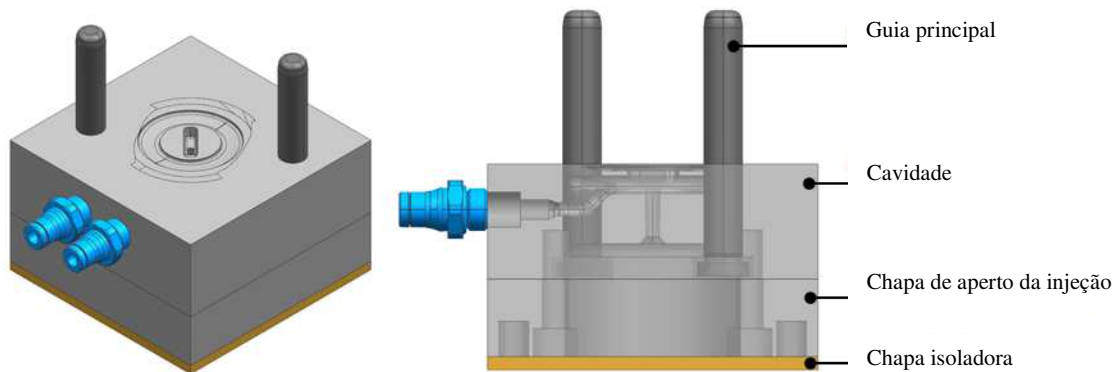


Figura 43 – Lado da injeção do molde de fabrico aditivo, *Sensor housing*

Lado da extração

O lado da extração, parte móvel do molde, é constituída por um inserto na bucha fabricado em SLM com canais de refrigeração conformados, chapa da bucha, extratores que permitem a extração da peça plástica, chapa dos extratores e chapa de aperto dos extratores, haste de extração e parafusos para fixações (Figura 44).

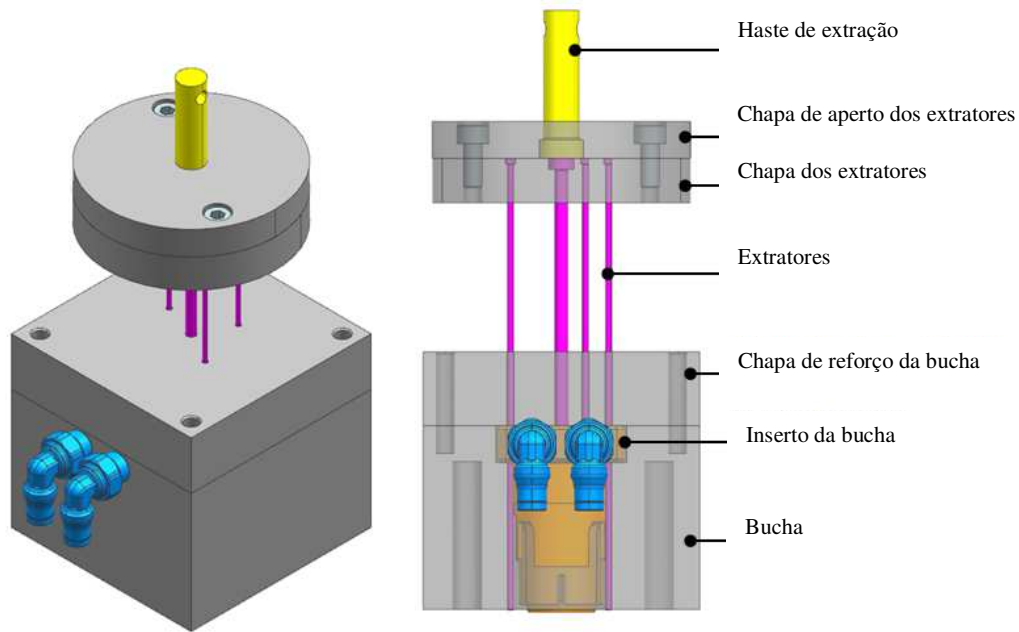


Figura 44 – Lado da extração do molde de fabrico aditivo, *Sensor housing*

4.3.2. Construção das zonas moldantes em SLM

O equipamento de SLM utilizado nos dois casos práticos, *Support* e *Sensor housing*, foi o equipamento M1 cusing da *Concept Laser* (Figura 45). Alguns parâmetros deste equipamento são apresentados na Tabela 16.



Figura 45 – Equipamento M1 cusing da *Concept Laser* [21]

Tabela 16 – Parâmetros do equipamento M1 *cusing*

Parâmetros	Condições de processamento
Tipo de laser	200W/Fibra
Espessura da camada [μm]	30
Velocidade de varrimento [m/s]	7
Material utilizado na construção das zonas moldantes	CL 50WS

A construção das zonas moldantes no processo aditivo não são finais, uma vez que o próprio processo deixa uma sobre espessura definida como 0,2 mm por lado, para ser possível corrigir as geometrias recorrendo ao processo convencional.

No **caso de estudo 1**, *Support*, no lado da cavidade, foi necessário abrir nervuras com espessura 0,768 mm e retificar toda a cavidade (Figura 46). O mesmo aconteceu no lado da bucha, onde as nervuras foram maquinadas pelo processo convencional, assim como foi aberta a furação para a passagem dos 107 extratores e retificada a peça (Figura 47).

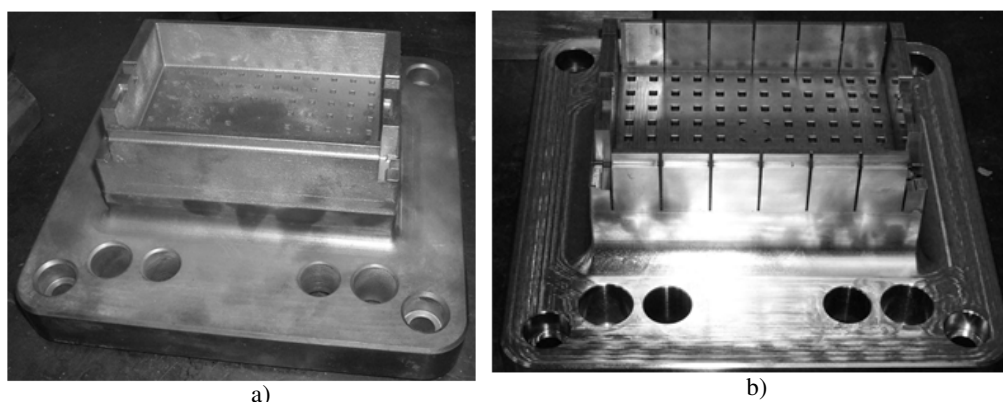


Figura 46 – Cavidade em SLM: após o processo ou *tal qual* (a) e após maquinada a geometria base (b)

O mesmo acontece no lado da bucha, as nervuras foram maquinadas pelo processo convencional, assim como aberta a furação para a passagem dos 107 extratores e retificada a peça (Figura 47).

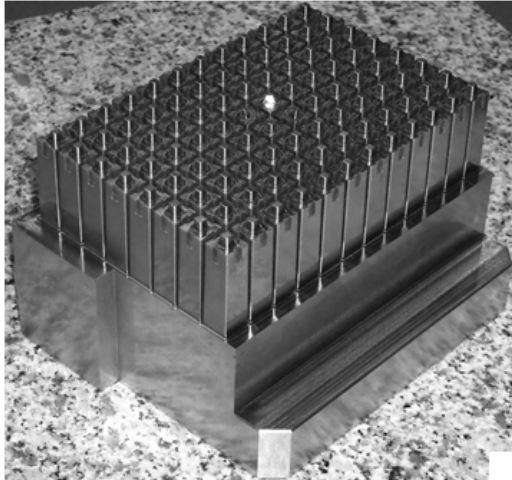


Figura 47 – Bucha em SLM depois de maquinada

No **caso de estudo 2**, *Sensor housing*, em que as duas peças foram feitas no processo aditivo, o inserto da bucha representa a geometria mais complexa. Este inserto é híbrido, ou seja, uma parte foi feita no processo convencional e a outra parte, a zona com os canais de refrigeração conformados, foi feita no processo aditivo (Figura 48). De referir que o inserto em SLM foi todo maquinado pelo processo convencional, fresagem, retificação e polimento, de forma a atingir a qualidade superficial requerida para a moldação. A furação do extrator central de diâmetro 3,5 mm e as duas injeções submarinas foram calibradas pelo método convencional (Figura 49).

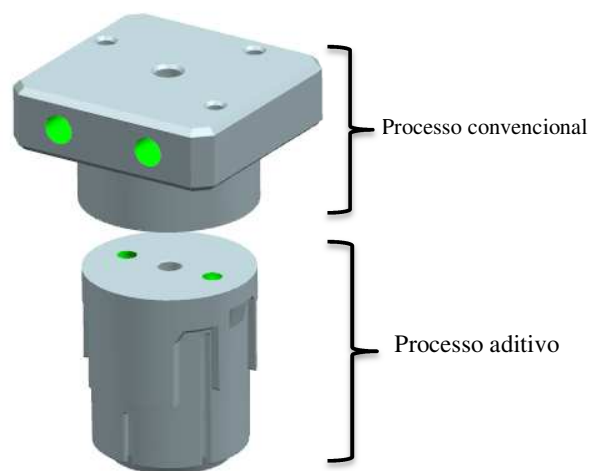


Figura 48 – Inserto da bucha, *Sensor housing*



Figura 49 – Inseto da bucha em SLM, *Sensor housing*

Como o lado da injeção apresenta uma geometria mais simples, as operações de acabamento posteriores ao processo SLM foram retificar a cavidade e polir a zona moldante (Figura 50).



Figura 50 – Cavidade em SLM, *Sensor housing*

4.4. Ensaios experimentais

O primeiro ensaio de injeção do **caso de estudo 1**, *Support*, superou as expectativas, já que existia algum receio de que a peça plástica pudesse ficar presa na extração por causa da contração da peça devido à refrigeração, no entanto, tal não aconteceu. Depois de afinados os parâmetros do processo de injeção e o molde estabilizar com os parâmetros introduzidos, o processo decorreu sem problemas (Tabela 17).

Tabela 17 – Parâmetros de injeção do molde de fabrico aditivo, *Support*

Temperatura do material [°C]		270
Temperatura do molde [°C]	Cavidade	75
	Bucha	75
Tempo de injeção [s]		1,18
Tempo de arrefecimento [s]		17
Tempo de ciclo [s]		25
Massa da moldação [g]		87,0

Como referido anteriormente, os resultados numéricos do molde otimizado para o *Support* previam uma redução de 30% no tempo de ciclo, valor que foi superado no ensaio experimental, uma vez que após o molde funcionar sem problemas se registou um tempo de ciclo de 25 segundos, ou seja, uma redução de 34% em relação ao molde de fabrico convencional (com um tempo de ciclo de 38 segundos).

No **caso de estudo 2**, *Sensor housing*, houve necessidade de proceder à otimização do molde, devido a diversos problemas que ocorreram durante os ensaios de injeção efetuados. Numa primeira fase, ocorreu um problema no canal de alimentação, em que o gito não tinha ângulo/saída suficiente para extrair e o acabamento superficial apresentava rugosidade que criava atrito e dificultava a extração. De lembrar que o canal de alimentação está no lado da cavidade e foi criado no processo aditivo. Para melhorar a qualidade superficial e corrigir o ângulo de saída foi necessário recorrer ao método de fabrico convencional.

Após o problema do canal de alimentação estar resolvido, numa segunda fase, surgiu um outro problema no inserto da bucha. Similarmente, o inserto da bucha feito no processo aditivo apresentava uma rugosidade elevada. A peça plástica tendia a ficar agarrada ao

inserto, o que causava um acréscimo de força na extração. Como os extratores localizados na parte exterior do corpo do *Sensor housing* têm um diâmetro de 1,6mm, ou seja, pouca área de contato com a peça plástica, acabavam por perfurar a moldação. A solução encontrada passou por retificar e polir o inserto de forma a evitar atrito, diminuindo a rugosidade.

Finalmente, numa terceira fase, o funcionamento do molde já se enquadrava dentro do previsto pelos resultados numéricos. Os parâmetros de injeção foram ajustados em cada moldação e os resultados experimentais mostraram uma diminuição no tempo de arrefecimento de 6,2 segundos, o que representou uma redução no tempo de ciclo de aproximadamente 29%. O molde de fabrico aditivo apresenta um tempo de arrefecimento de 5 segundos, sendo que o molde de fabrico convencional tem um tempo de arrefecimento de 11,2 segundos e um tempo de ciclo de 17 segundos.

A Tabela 18 mostra vários testes de injeção efetuados com o molde de fabrico aditivo do *Sensor housing*, usando diferentes condições de processamento, por modificação de algumas variáveis, como a temperatura do molde e o tempo de arrefecimento. O oitavo teste é o que apresenta as melhores condições de processamento, com um tempo de arrefecimento de 5 segundos. Nestas condições, a moldação não apresentava chupados nem rebarbas. A temperatura de molde à superfície foi de 53°C.

Tabela 18 – Parâmetros de injeção do molde de fabrico aditivo, *Sensor housing*

		1º Teste	2º Teste	3º Teste	4º Teste
Temperatura material [°C]		250	250	250	250
Temperatura molde [°C]	Cavidade	80	60	60	60
	Bucha	80	60	60	60
Tempo de arrefecimento [s]		20	22	20	18
Massa da moldação [g]	Amostra	3,56	3,54	3,53	3,54
		5º Teste	6º Teste	7º Teste	8º Teste
Temperatura material [°C]		250	250	250	250
Temperatura molde [°C]	Cavidade	60	60	60	60
	Bucha	60	60	60	60
Tempo de arrefecimento [s]		10	6	6	5
Massa da moldação [g]	Amostra	3,54	3,55	3,55	3,55

4.5. Caracterização

Comparando duas amostras do **caso de estudo 1**, *Support*, uma resultante do molde de fabrico convencional e outra do molde de fabrico aditivo, verifica-se que o resultado final, nomeadamente o aspeto entre moldações, é bastante semelhante, o que configura um resultado positivo. As moldações resultantes da nova geometria, molde de fabrico aditivo, têm maior massa devido à espessura das nervuras, mas mesmo assim foi possível reduzir o tempo de ciclo em 34%. As nervuras foram aumentadas na espessura para evitar criar recessos para colocar os extratores (Figuras 51 e 52). Como mostra a Tabela 17, em geral, as moldações do molde de fabrico convencional têm 74,5 g e as moldação do molde de fabrico aditivo 87,0 g, sendo a diferença de massa devida ao aumento de espessura criada nas nervuras do novo molde para otimizar a extração da peça. Não obstante o aumento da massa, os resultados foram melhores.

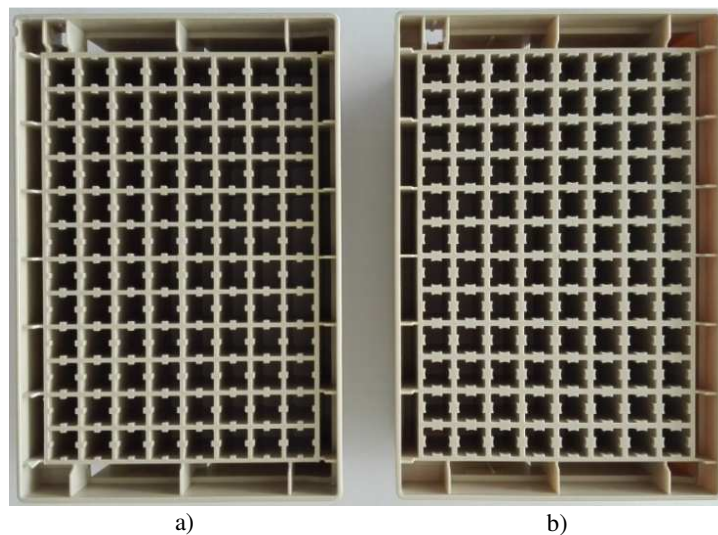


Figura 51 – Lado da injeção da peça *Support*: molde de fabrico convencional (a); molde de fabrico aditivo (b)

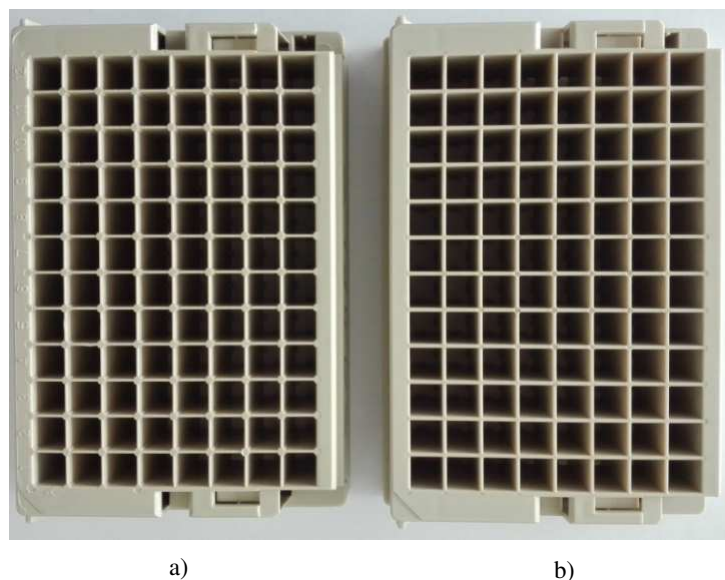


Figura 52 – Lado da extração da peça *Support*: molde de fabrico convencional (a); molde de fabrico aditivo (b)

No caso de estudo 2, *Sensor housing*, a amostra do molde de fabrico aditivo apresenta melhores resultados quando comparada com a amostra do molde de fabrico convencional (Figura 53). A amostra do MFA apresenta-se sem chupados, sem rebarbas, compactada e o tempo de ciclo é inferior ao solicitado pelo cliente (o cliente indica 15 segundos, enquanto o tempo de ciclo conseguido para injetar a amostra foi de 12 segundos). A massa da peça plástica é homogénea entre moldações, para condições de processamento diferentes (Tabela 18). Estes resultados indicam que para um tempo de ciclo de 12 segundos a peça está compactada.

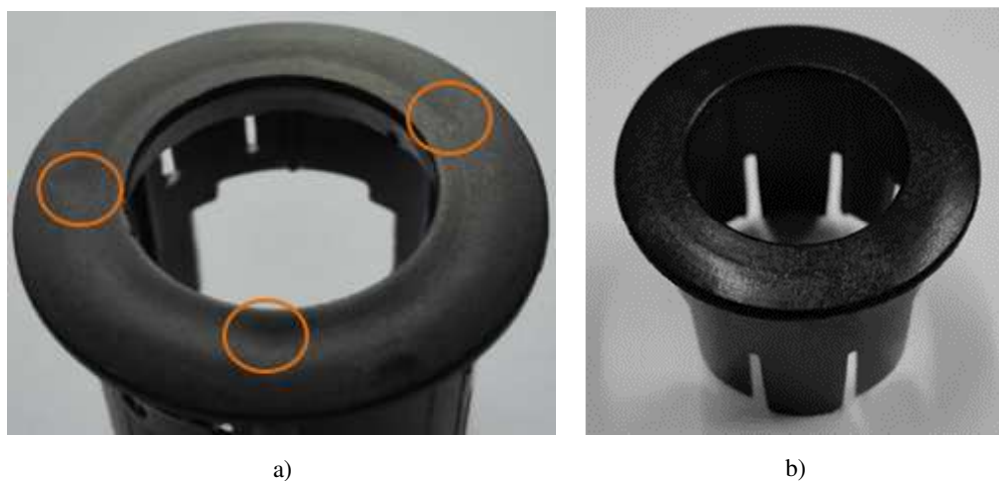


Figura 53 – *Sensor housing*: molde de fabrico convencional (a); molde de fabrico aditivo (b)

5. Discussão de resultados

Os resultados de dois dos casos práticos, casos de estudo 1 e 2, mostram que utilizar a tecnologia de fusão seletiva por laser (SLM) traz vantagens evidentes ao processo de injeção.

No **caso de estudo 1**, *Support*, substituir as zonas moldantes do fabrico convencional por novas zonas moldantes no processo aditivo com canais de refrigeração conformados, reduziu o tempo de ciclo em 24%. O tempo de ciclo solicitado foi 33 segundos enquanto o tempo de ciclo no ensaio experimental foi 25 segundos. Sabendo que o molde de fabrico convencional trabalha com um tempo de ciclo de 38 segundos, o ganho é ainda maior, pois a redução no tempo de ciclo é de 34%.

Os custos e tempos associados ao fabrico das zonas moldantes pelo método de fabrico convencional e pelo processo aditivo SLM, para o **caso de estudo 1**, são apresentados nas Tabelas 19 e 20.

Tabela 19 – Custos e tempos para o molde de fabrico convencional, *Support*

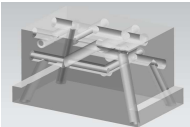
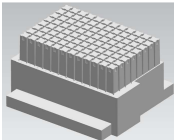
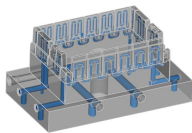
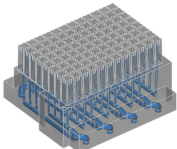
Tipo de peças	Tipo de maquinaria	Tempo (h)	Custo €
 Volume: 593 511 mm ³	Furação	8	320,00
	Fresagem	4	140,00
	Retificação	4	120,00
Cavidade  Volume: 357 570 mm ³	Furação rápida	20	800,00
	Fio (rasgos e calibração dos furos)	64	2 250,00
	Furação	8	320,00
	Fresagem	4	140,00
	Retificação	4	120,00
Bucha	Polimento	16	480,00
	Dois blocos em <i>Ampco 83</i>		493,20
Totais		132	5 183,20

Tabela 20 – Custos e tempos para o molde de fabrico aditivo, *Support*

Tipo de Peças	Tipo de maquinaria	Tempo (h)	Custo (€)
 Altura máxima: 80mm Volume: 740 000 mm ³ Cavidade	SLM	118	8 860,00*
	Fio	8	280,00
	Retificação	4	120,00
 Altura máxima: 69mm Volume: 570 000 mm ³ Bucha	SLM	95	7 200,00*
	Fio (rasgos e calibração dos furos)	64	2 250,00
	Furação	8	320,00
	Retificação	4	120,00
	Polimento	16	480,00
Totais		317	19 630,00

*os custos contemplam produção, tratamento térmico, conceção 3D dos canais conformados, corte a fio e transporte.

Analisando isoladamente os custos da produção das zonas moldantes, é possível constatar que o custo da tecnologia aditiva é aproximadamente quatro vezes superior ao método de fabrico convencional. O tempo de fabrico também é significativo. Para fabricar as duas zonas moldantes, cavidade e bucha, o método convencional tem um tempo de fabrico de 132 horas, enquanto o método de tecnologia aditiva 317 horas. A diferença de tempos para a fabricação das peças entre processos, convencional e aditivo, é significativa, e acontece porque as peças na tecnologia aditiva não são um produto final. De facto, após o processo SLM é necessário finalizar as peças recorrendo ao processo convencional, e a este acabamento acresce um tempo e um custo de fabrico maior.

O molde do *Support* produz 1 000 000 peças, considerando um tempo de ciclo total de 38 segundos (tempo de ciclo real obtido no molde de fabrico convencional), pelo que para produzir o número de peças indicado são necessárias 10 556 horas. Sendo o preço/hora da máquina de injeção de 40€/h, a produção das peças plásticas resulta num custo final de 422 240 €.

Com o método aditivo, SLM, o tempo de ciclo do molde reduz-se significativamente em 13 segundos, passando agora o tempo de ciclo total para 25 segundos. Assim, o número de horas necessário para assegurar o mesmo volume de produção é de 6 945 horas, a este valor deve-se acrescentar 185 horas, diferença de tempos entre o método de fabrico convencional e a tecnologia aditiva na construção das zonas moldantes, resultando num custo de produção de 285 200€.

Como a redução do tempo de ciclo é notória e o número de moldações é significativo, no conjunto, existe um ganho de 137 040€, ou seja, o custo que inicialmente parecia elevado, quatro vezes superior ao molde convencional, é amortizado várias vezes no valor do ganho.

Outro ganho resultante da opção por zonas moldantes fabricadas por tecnologia aditiva, que permite o fabrico de zonas com canais de refrigeração conformados, é a satisfação do cliente, dado que o molde teve apenas um ensaio até à primeira moldação conforme.

É verdade que o processo aditivo tem uma diferença de custo significativo para a produção de 1 000 000 peças, comparado com o processo convencional (quatro vezes maior). No entanto, este custo, apesar de significativo, é diluído na fase de produção (Tabela 21).

Tabela 21 – Resultados reais do molde de fabrico convencional (MFC) e do molde de fabrico aditivo (MFA)

	MFC	MFA
Tempo de ciclo (s)	38	25
Tempo de construção das zonas moldantes (h)	132	317
Custo da construção das zonas moldantes (€)	5 183,20	19 630,00
Custo da produção 1 000 000 peças (€)	422 240	285 200
Ganho na produção (€)	137 040	

A Figura 54 mostra que ao fim de 100 0000 moldações o molde de fabrico aditivo começa a ser rentável, ou seja, os custos do molde de fabrico convencional (MFC) e molde de fabrico aditivo (MFA) igualam-se, a este ponto designa-se *break-even*. Para avaliar este resultado foi considerado o custo das zonas moldantes em ambos os moldes, MFC e MFA,

o custo por moldação tendo em consideração o tempo de cada moldação, o número de moldações a fabricar e o custo/hora da máquina de injeção.

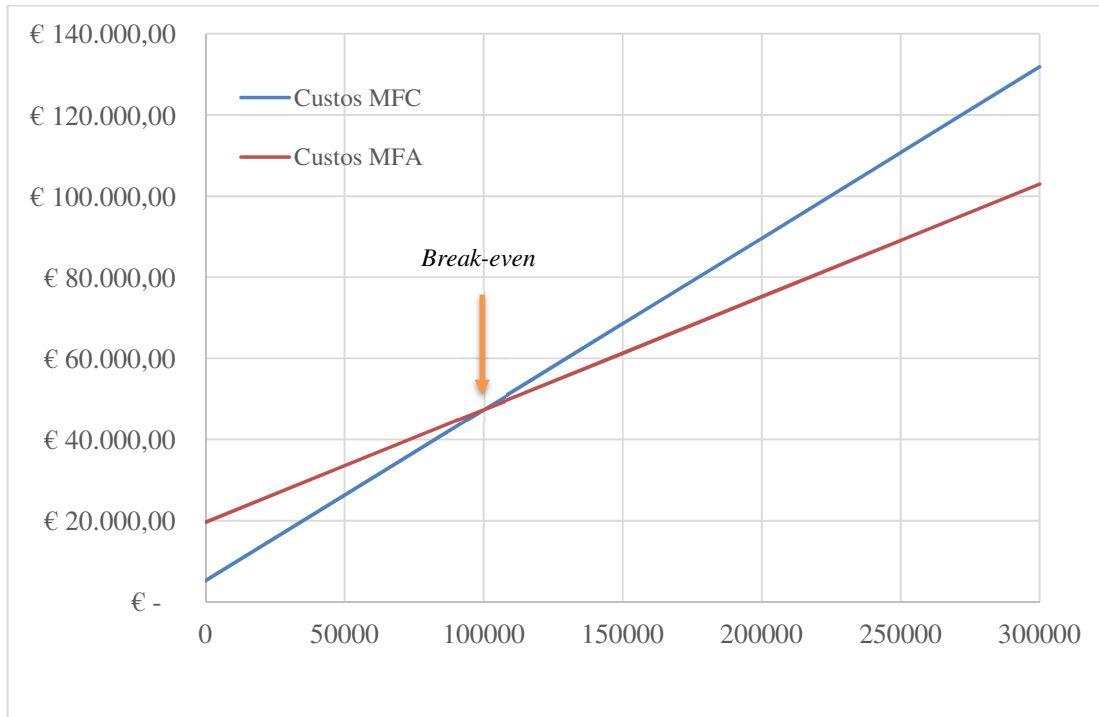


Figura 54 – Break-even para o caso de estudo 1, Support

O ganho obtido advém das otimizações implementadas no projeto do molde, usando canais de refrigeração uniformes que acompanham a geometria da peça, que permitem um arrefecimento uniforme e temperaturas homogéneas, conseqüentemente, menores variações na contração, logo menor empeno. Neste caso prático, o empeno não é um fator preferencial, porque a peça plástica é estruturada. Assim, apesar de não se verificar um melhoramento significativo no empeno, este é conseguido no tempo de ciclo e, neste caso específico, o objetivo da redução do tempo de ciclo foi plenamente cumprido.

No segundo caso prático, *Sensor housing*, a tecnologia aditiva também foi vantajosa, principalmente na zona da cavidade. Como esta é uma peça que durante o seu funcionamento está exposta, sendo visível, requer cuidados de natureza estética. Deste modo, quando a peça apresenta variações de espessura, aparecem chupados que implicam a sua rejeição, pois a qualidade superficial da zona visível fica comprometida. Assim, a

colocação de circuitos de refrigeração conformados, principalmente no lado da cavidade, permitiu um arrefecimento mais próximo junto das zonas de maior espessura. A peça plástica tem um tempo de arrefecimento uniforme com temperaturas homogéneas e, conseqüentemente, uma zona visível sem chupados. O tempo de ciclo foi reduzido em 20%, quando comparado com o tempo de ciclo solicitado de 15 segundos. Comparando com o tempo de ciclo do molde convencional, o ganho foi ainda maior, com uma redução de 29% (o molde convencional apresenta um tempo de ciclo de 17 segundos, enquanto o tempo total de ciclo conseguido no ensaio experimental foi de 12 segundos).

As Tabelas 22 e 23 mostram os tempos e custos associados ao fabrico das zonas moldantes pelo método convencional e pelo processo aditivo SLM, para o **caso de estudo 2**.

Tabela 22 – Custos e tempos para o molde de fabrico convencional, *Sensor housing*

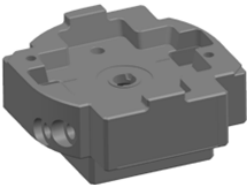



Tipo de peças	Tipo de maquinaria	Tempo (h)	Custo €
	Fresagem	8	180,00
	Furação	2	60,00
	Retificação	3	90,00
Volume: 760 438 mm ³ Cavidade			
	Eletroerosão (elétrodo+erosão)	4	120,00
	Furação	1	30,00
	Fresagem	2	60,00
	Retificação	1	30,00
	Polimento	2	60,00
Volume: 35 146 mm ³ Inserto da bucha			
Dois blocos em aço (cavidade e inserto da bucha)			50,00
Totais		23	680,00

Tabela 23 – Custos e tempos para o molde de fabrico aditivo, *Sensor housing*

Tipo de peças	Tipo de maquinação	Tempo (h)	Custo (€)
 Volume: 146 250 mm ³ Cavidade	SLM	45	2 860,00*
	Furação	1	40,00
	Retificação	2	60,00
	Polimento	4	120,00
 Volume: 35 146 mm ³ Inserto da bucha			
	Total (duas peças)	52	3 080,00

*os custos contemplam produção, tratamento térmico, conceção 3D dos canais conformados, corte a fio e transporte.

Para a produção de 50 000 peças, com um tempo de ciclo de 17 segundos, o molde de fabrico convencional precisa de 236 horas. Como a máquina de injeção tem um custo/hora de 25 €; o custo total da produção assume o valor de 5 900 €.

Pelos resultados práticos constata-se que ao adicionar insertos com canais de refrigeração conformados existe uma redução de 29% no tempo de ciclo, ou seja, o tempo de ciclo do molde com refrigeração otimizada é de 12 segundos. Assim, para o mesmo número de peças a produzir, 50 000, o tempo total de produção é reduzido para 167 horas, com o acréscimo de 29 horas (tempo que o processo SLM tem a mais que o processo convencional) perfazendo um tempo total de 196 horas, sendo o custo 4 900 €. Existe uma redução de 40 horas no tempo de produção e de 1 000 € no custo.

O valor ganho em produção é inferior ao custo dos dois insertos na tecnologia aditiva, mas não deixa de ser vantajoso, porque se consegue ter um tempo de ciclo de 12 segundos no primeiro ensaio, e com uma peça plástica sem os problemas de chupados que o molde de fabrico convencional apresentava para um tempo de ciclo de 17 segundos. De referir que

para minimizar os chupados da peça plástica no molde de fabrico convencional é necessário voltar a maquinar algumas zonas do molde, por exemplo: aumentar as dimensões e o número de pontos de injeção, redefinir espessuras, entre outros. Todos estes parâmetros a otimizar acrescem custos ao molde e problemas com prazos de entrega.

No caso prático 2, como a peça plástica é pequena, o molde é pequeno, a máquina de injeção irá ter um custo menor, pelo que o custo da tecnologia aditiva é mais notório.

Os dois insertos conformados pela tecnologia SLM têm um custo superior ao ganho da fase de produção (custo da tecnologia aditiva é 3 080€, ganho da produção de 50 000 peças é 1 000€), ou seja, comparando com o molde de fabrico convencional um valor três vezes superior. No entanto, convém não esquecer que o molde de fabrico convencional origina peças plásticas rejeitadas devido à presença de chupados, mesmo com um tempo de ciclo de 17 segundos, que é superior ao tempo solicitado de 15 segundos. Como já referido anteriormente, para otimizar o processo de injeção são necessários custos extra: voltar a redefinir zonas de injeção, espessuras da peça, fazer novos programas de maquinação, maquinar, testar, entre outros. Deste modo, todo o trabalho extra pode ser evitado ao otimizar a refrigeração pelo método aditivo, pelo que o custo deixa de ser um fator preferencial.

A Figura 55 indica que ao fim de 69 000 moldações o custo do molde de fabrico convencional (MFC) e molde de fabrico aditivo (MFA) igualam-se, quer isto dizer que após 69 000 moldações o MFA começa a ser rentável. Este resultado foi avaliado com a interseção de alguns parâmetros, a saber: custo das zonas moldantes nos moldes convencional e de fabrico aditivo, custo por moldação tendo em consideração o tempo de cada moldação, número de moldações a fabricar e custo/hora da máquina de injeção.

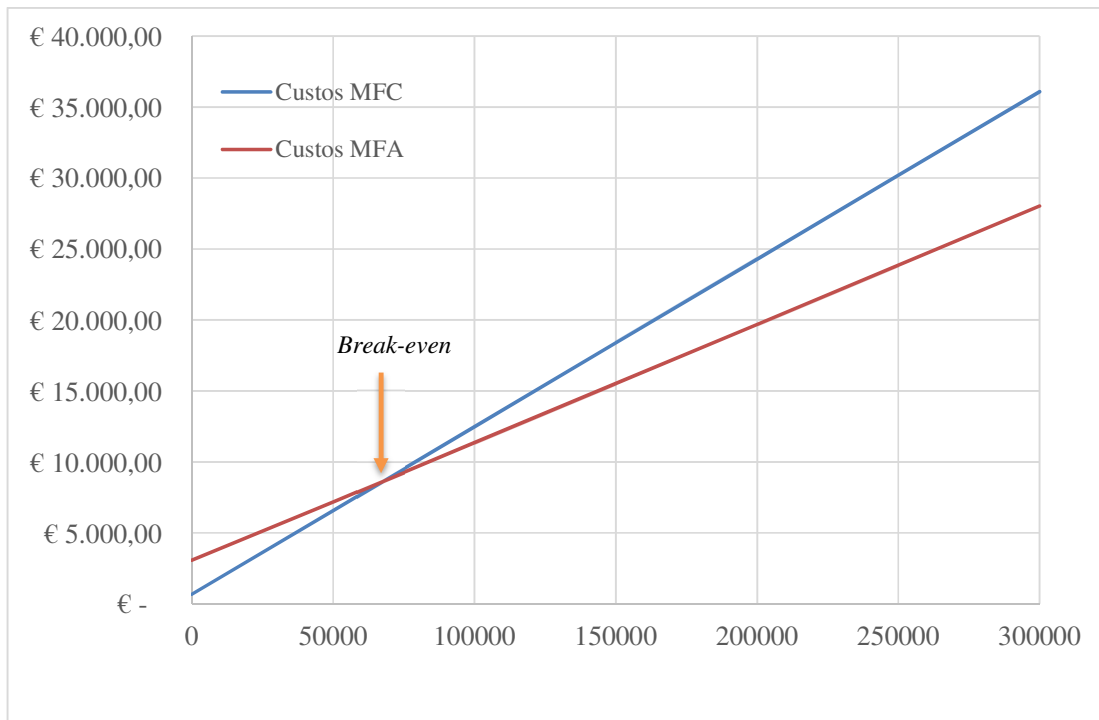


Figura 55 – Break-even para o caso de estudo 2, Sensor housing

No **caso de estudo 3, Blende**, a solução encontrada no sentido de minimizar o empeno da peça plástica, o tempo para a construção dos dois insertos no processo SLM são 220 horas com um custo 5 000,00€.

O molde produz 100 000 peças, com um tempo de ciclo de 40 segundos (este tempo de ciclo é o atual do molde de fabrico convencional), sendo necessárias 1 112 horas, pelo que considerando o preço hora/máquina de 40 €, origina um custo de produção de 44 480 €.

Ao adicionar os dois insertos fabricados na tecnologia aditiva verifica-se uma redução de 17,5% no tempo de ciclo, assim para a produção das 100 000 peças são necessárias 917 horas com um custo da produção de 36 680 €. Verifica-se um ganho de 7 800€ superior ao custo dos dois insertos em SLM.

Para o caso de estudo 3 não existem resultados reais com a tecnologia aditiva, pelos motivos já mencionados no Capítulo 4, ou seja, falta de acesso ao molde de fabrico convencional e custo elevado para a criação de um novo molde. Todavia, é possível comparar os resultados numéricos provenientes das simulações de injeção realizadas entre o molde de fabrico convencional e o otimizado (Tabela 24).

Tabela 24 – Resultados simulados do molde de fabrico convencional e do molde de fabrico aditivo, *Blende*

	MFC	MFA
Tempo de ciclo [s]	40	37
Tempo de arrefecimento [s]	36	33
Empeno [mm]	2,6	2,0
Custo da construção dos insertos [€]		5 000,00
Custo da produção 100 000 peças [€]	44 480,00	36 680,00
Ganho na produção (€)	7 800,00	

A avaliar pelos resultados das simulações numéricas, existe um ganho de 23% na conformidade das peças pela redução do empeno e um ganho de 7,5% no tempo de ciclo, em que o custo dos insertos com canais de refrigeração conformados é superior ao ganho obtido na fase de produção (ganho da produção 7 800€).

Estimando um custo de 45 000€ para o fabrico das zonas moldantes no processo convencional, e de 53 000€ para o fabrico das zonas moldantes no processo aditivo, prevê-se o break-even ao fim de 250 000 moldações (Figura 56). Como o molde produz 100 000 moldações o custo do processo aditivo não é diluído na fase de produção. Neste caso, o processo aditivo é vantajoso para validar a peça plástica quanto ao empeno.

O ponto de interseção dos dois custos, *break-even*, foi calculado tendo por base o custo das zonas moldantes no MFC e MFA, o custo por moldação tendo em consideração o tempo de cada moldação, o número de moldações a fabricar e o custo/hora da máquina de injeção.

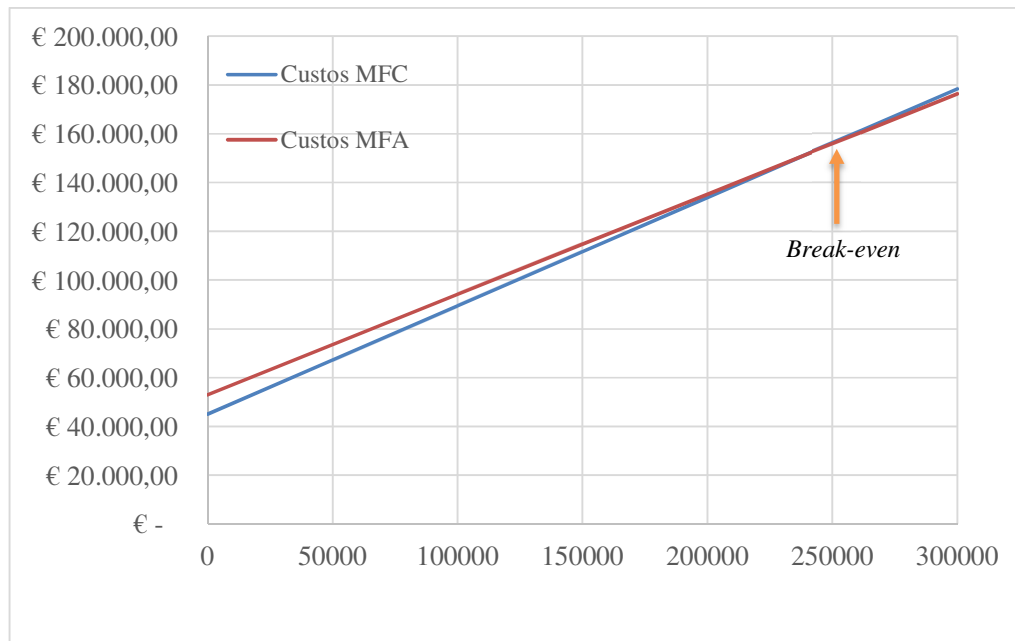


Figura 56 – Break-even para o caso de estudo 3, Blende

A Tabela 25 compara os resultados simulados de algumas variáveis de injeção obtidos com o molde de fabrico convencional e molde de fabrico aditivo para os três casos de estudo. Em qualquer dos casos, é possível constatar um ganho significativo no tempo de arrefecimento usando a tecnologia aditiva. Ainda, é de realçar a redução do empeno nos casos de estudo 2 e 3. Assim, a opção de utilizar zonas com canais de refrigeração conformados na tecnologia SLM foi favorável.

Tabela 25 – Resultados simulados do molde de fabrico convencional e do molde de fabrico aditivo para os casos de estudo

Variáveis	MFC	MFA	Ganho
<i>Support</i>			
Pressão de injeção (MPa)	131,0	142,0	-
Tempo de arrefecimento (s)	35,5	18,0	49,0%
Empeno (mm)	0,60	0,59	1,7%
<i>Sensor housing</i>			
Pressão de injeção (MPa)	28,0	34,0	-
Tempo de arrefecimento (s)	11,2	7,0	37,7%
Empeno (mm)	0,37	0,31	16,2%
<i>Blende</i>			
Pressão de injeção (MPa)	106,9	110,0	-
Tempo de arrefecimento (s)	36,0	30,0	17,0%
Empeno (mm)	2,6	2,0	23,0%

Uma outra variável que importa salientar diz respeito ao tempo de ciclo. Os resultados reais indicam que a tecnologia aditiva proporcionou uma redução no tempo de ciclo significativa (Tabela 26).

Tabela 26 – Resultados reais para o tempo de ciclo no molde de fabrico aditivo para os casos de estudo

	Tempo original (s)	Novo tempo obtido (s)	Ganho (%)
<i>Support</i>	38	25	34
<i>Sensor housing</i>	17	12	29
<i>Blende</i>	40	33	17.5

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

6. Conclusões

O presente projeto consistiu na avaliação da aplicabilidade do processo aditivo nos moldes de injeção. Selecionaram-se três casos de estudo que permitiram analisar a viabilidade técnica e económica da tecnologia aditiva para diferentes peças plásticas, pertencentes à indústria médica e automóvel.

Assim, resumidamente, verifica-se que a tecnologia de fusão seletiva por laser (SLM) é um processo em constante evolução, tendo alguns aspetos a serem otimizados, destacando-se o acabamento superficial. Os insertos obtidos na tecnologia aditiva, nos casos de estudo 1 e 2, apresentavam uma rugosidade que não é adequada nos moldes de injeção, porque não permitem o acabamento superficial desejado para peças plásticas.

Também existem geometrias que o processo ainda não consegue recriar, como é o caso da furação (furos para os extratores), nervuras de reduzida espessura (ex. 1 mm), pontos de injeção, entre outros. O produto obtido no processo aditivo não é final, requerendo operações posteriores pelo método convencional.

Outro aspeto menos positivo é o custo associado à tecnologia aditiva, pois quando as peças têm volume reduzido, o custo tende a ser superior ao ganho da produção, não se justificando de imediato. Apesar de poder ser uma mais-valia, o custo inerente ao processo aditivo neste tipo de geometria não deixa de ser notório.

Visto a tecnologia de fusão seletiva por laser ter uma componente económica significativa que leva a ponderar o seu uso, é importante efetuar estudos através de simulações numéricas e em paralelo com o projeto do molde, sobre quais os pontos fortes e pontos fracos na utilização do processo aditivo, ponderando várias opções, tais como: utilizar só insertos aditivos em zonas pontuais, zonas moldantes completas, insertos híbridos, a melhor localização, entre outras.

A elaboração deste projeto permitiu uma avaliação direta da tecnologia aditiva, tendo sido criadas quatro zonas moldantes no processo fusão seletiva por laser, SLM. A opção em utilizar este processo para a construção das zonas moldantes foi devidamente analisada entre os vários processos existentes no mercado, tipo de construção, características do material utilizado, possíveis acabamentos, limitações do processo, entre outras. A análise

dos diferentes processos de construção aditiva utilizando metal acrescentou conhecimento técnico sobre a evolução desta tecnologia aditiva.

Analisar a integração da nova tecnologia na fase de projeto de molde foi uma etapa importante na construção deste projeto. Foi efetuada uma análise detalhada das falhas da refrigeração do molde de fabrico convencional e criaram-se novas zonas moldantes com canais de refrigeração conformados à geometria da peça, não alterando o funcionamento do molde. Os estudos numéricos foram uma fase muito importante pois ao permitirem validar os resultados reais, viabilizaram uma análise detalhada de possíveis otimizações recorrendo ao uso da tecnologia SLM, ou seja, foi possível quantificar a vantagem de construções aditivas com canais de refrigeração conformados, assim como prever qual a melhor localização para os novos circuitos de refrigeração.

Os custos e tempos da tecnologia aditiva foram previstos neste projeto. Conclui-se que a construção aditiva, fusão seletiva por laser, tem um custo significativo que nem sempre é diluído no custo da produção. No entanto, não deixa de ser uma mais-valia, dependendo do objetivo, pois pode produzir outros efeitos benévolos para a conformidade das peças.

A construção das zonas moldantes em SLM mostrou limitações do processo. A fusão seletiva por laser ainda apresenta limitações na reprodução de alguns tipos de geometria, como sejam a furação dos 107 extratores da zona moldante da *Blende*, as nervuras de reduzida espessura no *Sensor housing*, os pontos de injeção, o detalhe da geometria, o acabamento, entre outros.

No **caso de estudo 1**, *Support*, adicionar zonas moldantes de fabrico aditivo SLM, com canais de refrigeração conformados, aumenta 185 horas no fabrico das zonas moldantes. Apesar do custo ser aproximadamente quatro vezes superior ao do fabrico das zonas moldantes pelo método convencional, permite uma redução do tempo de ciclo de 34%, verificando-se o *break-even* para o ganho ao fim de 100 000 moldações.

Para o **caso de estudo 2**, *Sensor housing*, o processo SLM com canais de refrigeração conformados aumenta 29 horas no tempo de fabrico das zonas moldantes, apresentando um custo sensivelmente cinco vezes superior. O *break-even* verifica-se ao fim de 69 000 moldações (o molde produz 50 000 peças), contudo, existe uma redução no tempo de ciclo de 29%. A tecnologia aditiva neste caso é uma mais-valia porque viabiliza a obtenção de moldações válidas com um tempo de ciclo inferior ao solicitado pelo cliente (tempo de

ciclo obtido 17 segundos vs o indicado pelo cliente 12 segundos), o que não acontece no molde convencional mesmo com um tempo de ciclo de 17 segundos.

Na situação do **caso de estudo 3**, *Blende*, apenas é possível comparar resultados simulados; no molde de fabrico aditivo verifica-se uma redução de 17,5% no tempo de ciclo e um *break-even* ao fim de 250 000 moldações, sendo que o molde produz 100 0000 peças. O facto de o *break-even* se verificar neste caso para além da tiragem da peça poderia constituir uma forte limitação, contudo, a contribuição da tecnologia aditiva para melhorar outros aspetos pode ser um fator decisivo.

De uma forma geral, este projeto mostra que a fusão seletiva por laser (SLM) é uma tecnologia promissora, que permite a fabricação de peças e produtos metálicos com boas propriedades mecânicas, possíveis de implementar nos moldes de injeção, com vantagens significativas na redução do tempo de ciclo e na redução de não conformidades.

Trabalhos futuros

A realização deste projeto permitiu avaliar o impacto da tecnologia aditiva nos moldes de injeção, assim como avaliar a própria tecnologia. A tendência do processo aditivo é poder oferecer uma fabricação para o projeto, e não projetar para a fabricação. Para avançar nesta área são necessários estudos de alguns pontos-chave que deveriam ser alvo de trabalhos futuros, nomeadamente:

- Otimizar parâmetros de produção para obter superfícies com melhor qualidade;
- Reduzir as limitações ao processo otimizando os parâmetros de produção;
- Verificar se diferentes direções de construção influenciam as características das estruturas;
- De forma a reduzir material e a minimizar custos, criar geometrias com zonas ocas e validar através de ensaios de tração, compressão e fadiga, comparando com as estruturas maciças adquiridas convencionalmente;
- Analisar a viabilidade da tecnologia em equipamentos híbridos, caso da *Matsuura*;
- Analisar em que medida estes equipamentos podem minimizar os problemas existentes com a fusão seletiva por laser (SLM).

Bibliografia

- [1] Gao,W., Zhang, S. e Zavattieri, D. (Dezembro de 2015). The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-Aided Design*.Volume 69. pp. 65-89.
- [2] Fidelis, J.,Gaspar, R., Domingues, M. (Abril de 2015). Fabricação Aditiva. *O Molde N°105*. pp.27-35.
- [3] Mayer, S. Optimised mould temperature control procedure using DMLS. *EOS GmbH*. Acedido a 6 de Junho de 2016. Disponível em: <http://gpiprototype.com/files/dmls/Whitepaper - Optimised Mould Temperature Control Procedure Using DMLS.pdf>
- [4] GPI Prototype & Manufacturing Services. *Conformal Cooling Using DMLS*. Acedido a 6 de Junho de 2016. Disponível em: <http://gpiprototype.com/files/dmls/Whitepaper%20%20Conformal%20Cooling%20Using%20DMLS.pdf>
- [5] Nyrhila, O., Syvanen, T., Kotila, J. (Boston 2002). Rapid Manufacturing with Direct Metal Laser Sintering. *Materials Research Society Symposium Proceedings*.pp.17-22.
- [6] Park, H., Dang, X. Design and Simulation-Based Optimization of Cooling Channels for Plastic Injection Mold. Acedido a 6 de Junho de 2016. Disponível em: <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/34669.pdf>
- [7] Kruth, J., Mercelis, P., Craeghs, T. (2007). Feedback control of Selective Laser Melting. in *Proceedings of the 3rd International Conference on on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping*. pp.7. Acedido a 10 de Junho de 2016. Disponível:<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875389210005043?via%3Dihub>
- [8] Ficha técnica. Aço 1.2709. Acedido e 28 de Fevereiro de 2017. Disponível em: <http://www.3trpd.co.uk/wp-content/uploads/2013/03/maraging-steel-127092012.pdf>
- [9] Texer. Acedido em 10 de Março de 2017. Disponível em: <http://www.texerdesign.it/en/technical-services/thermal-analysis/>

- [10] Cunha,A., Pontes, A., Manual do projetista. *Moldação Por Injecção e Materiais Plásticos*. Volume 2. pp.17.
- [11] Sena, M. (2014). *Otimização da eficiência térmica de moldes de injeção*. Tese de mestrado em Equipamentos e Sistemas Mecânicos. Instituto Superior de Engenharia de Coimbra. pp.4-6.
- [12] Transformação de Polimeros. Capítulo 5. Acedido a 16 de Março de 2017. Disponível em: http://www.dep.uminho.pt/mcpaiva/pdfs/IP_UCI_I/0809F03.pdf
- [13] Bom,T. (2014). *Comparação do desempenho de tecnologias alternativas de fabrico de moldes de injeção de plásticos*. Tese de mestrado em Engenharia Mecânica. Técnico - Lisboa.
- [14] Cunha, A., Brito, A., Matos, A., Manuel do projetista. *Tipificação de Moldes*. Volume 3. pp.16-17.
- [15] Matos, A., Pouzada, A.,Pontes, A. Manual do projetista. *Moldes na Indústria de Transformação*. Volume1. pp.49.
- [16] Acedido a 16 de Março de 2017. Disponível em: https://www.google.pt/search?q=MOLDE+DE+INJE%C3%87%C3%83O&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjdu7ye4NrSAhUEbRQKHS9xDYUQ_AUIBigB&biw=1209&bih=596#imgdii=OrUTAX_C6BK_ZM:&imgrc=nDss086Syju1QM:
- [17] ESSS. Engenharia assistida por computador (8 de Agosto de 2014). Acedido a 25 de Março de 2017. Disponível em: <http://www.esss.com.br/blog/2014/08/engenharia-assistida-por-computador-o-que-e-e-como-funciona/>
- [18] Additively. Acedido a 23 de Março de 2017. Disponível em: <https://www.additively.com/en/learn-about/binder-jetting#read-chain>
- [19] H. & K. and Team. Additive Manufacturing Research Group. *University, Loughborough*. Acedido a 11 de Abril de 2016. Disponível em: <http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing>
- [20] Paulo, H. Manual do Projetista. *Manutenção corretiva e preventiva de moldes*. Volume10. pp.54-55.

- [21] Cruz, N., Santos, L., Vasco, J., Barreiros, F. Binder System for fused deposition of metals. *in Proceedings*. Volume 2. pp. 3–5.
- [22] Safdar, Adnan, (2010). *Microstructures and surface roughness of EBM produced Ti-6Al-4V*. Tese de mestrado Mecânica dos Sólidos. Lund University.
- [23] Industrial Heating, (4 de Abril de 2016). *Sistemas avançados de feixes de elétrons para fusão e revestimento desenvolvidos na Alemanha*. Acedido a 10 de Junho de 2016. Disponível em: <http://revistaih.com.br/sistemas-avancados-de-feixes-de-eletrons-para-fusao-e-revestimento-desenvolvidos-na-alemanha/>
- [24] Custompart.net. Selective Laser Sintering. Acedido a 23 de Maio de 2016. Disponível em: <http://www.custompartnet.com/wu/selective-laser-sintering>
- [25] Arcam. Acedido em 10 de Março de 2017. Disponível em: <http://www.arcam.com/technology/electron-beam-melting/>
- [26] Inovação Tecnológica, (Setembro de 2003). Prototipagem rápida de peças metálicas. Acedido a 23 de Maio de 2016. Disponível em: <http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=010170030925>
- [27] Gorni, A. (Março 2001). Introdução à Prototipagem Rápida e seus Processos. *Revista Plástico Industrial*. Acedido a 23 de Maio de 2016. Disponível em: <http://www.gorni.eng.br/protrap.html>
- [28] 3D Systems. Acedido a 28 de Março de 2016. Disponível em: <http://www.3dsystems.com/3d-printers/production/overview>
- [29] Concept Laser GmbH. Acedido a 28 de Março de 2016. Disponível em: <http://www.concept-laser.de/en/company/downloads.html>
- [30] SLM Solutions GmbH. Acedido a 28 de Março de 2016. Disponível em: http://stage.slm-solutions.com/index.php?products_en
- [31] EOS. Acedido a 28 de Março de 2016. Disponível em: http://www.eos.info/systems_solutions/metal/systems_equipment
- [32] EOS-GmbH. Acedido a 17 de Maio de 2016. Disponível em: http://www.eos.info/press/customer_case_studies/salcomp
- [33] Realizer. Acedido a 12 de Abril de 2016. Disponível em: <http://www.realizer.com>

- [34] DM3D (*POM*). Acedido a 12 de Março de 2017. Disponível em: <http://www.pomgroup.com/> e http://3d.globatek.ru/pdf/dmd_44r66r.pdf
- [35] *Renishaw*. Acedido a 28 de Março de 2016. Disponível em: <http://www.renishaw.com/en/am250--15253>
- [36] *Sisma Group*. Acedido a 28 de Março de 2016. Disponível em: <http://www.sisma.com/eng/jewellery/news/new-products/my-sint-additive-manufacturing.php>
- [37] *OGGI 3D*. Acedido a 28 de Março de 2016. Disponível em: <http://www.oggi3d.com/en/3d-printers/tg-3d-printers/slm-series>
- [38] *Matsuura, Lumex Advance-25*. Acedido a 8 de Junho de 2016. Disponível em: http://www.matsuura.co.jp/english/pdf/2013/Matsuura_PR_LUMEX_Avance-25_Release_in_North_America.pdf
- [39] *Matsuura*. Acedido a 8 de Junho de 2016. Disponível em: <http://www.makrum.fi/wp-content/uploads/2012/08/Esite-LUMEX-Avance-25-82012.pdf>
- [40] *Optomec*. Acedido a 28 de Março de 2016. Disponível em: <http://www.optomec.com/3d-printed-metals/lens-printers/>
- [41] *Trumpf*. Acedido a 12 de Março de 2017. Disponível em: <http://www.trumpf-laser.com/en/products/3d-printing-systems.html>
- [42] *TWI*. Acedido a 16 de Março de 2017. Disponível em: <http://www.twi-global.com/news-events/case-studies/selective-laser-melting-technology-to-develop-an-economical-manufacturing-process-for-customised-medical-implants-556/>
- [43] *Jornal de Leiria*. (Março 2017). Acedido a 13 de Março de 2017. Disponível em: <https://www.jornaldeleiria.pt/noticia/exportacoes-da-industria-de-moldes-atingiram-626-milhoes-em-6014>
- [44] Acedido a 16 de Março de 2017. Disponível em: https://www.google.pt/search?q=pe%C3%A7as+pl%C3%A1sticas+com+defeitos&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiD086W-trSAhVHPxoKHVFQAekQ_AUIBigB&biw=1051&bih=584

- [45] Audi. Acedido em 18 de Fevereiro de 2017. Disponível em:
<http://www.audi.pt/pt/brand/pt/modelos/a3/the-new-audi-a3/Catalogo.html>
- [46] Cunha, A. Manual do Projetista. *Moldação por Injeção e Materiais plásticos*. Volume 2. pp.49.
- [47] Ficha técnica . *Aço 1.2083*. Acedido e 28 de Fevereiro de 2017. Disponível em:
http://www.lucefin.com/wp-content/files_mf/1.2083x40cr14inglese.pdf
- [48] Brito, A., Matos,A., Mendes, S.Manual do Projetista. *Sistemas de contolo de temperatura*. Volume7. pp.12-14.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Anexos

Anexo I – Ficha técnica do PC+ABS (*Bayblend T85 XF*)



Bayblend® T85 XF

Standard grades / Non reinforced
ISO Shortname

(PC+ABS)-Blend; Vicat/B 120 temperature = 130 °C; Improved flow compared with T85
PC+ABS

Property	Test Condition	Unit	Standard	typical Value
Rheological properties				
C Melt volume-flow rate	260 °C; 5 kg	cm ³ /10 min	ISO 1133	19
Melt viscosity	1000 s ⁻¹ ; 260 °C	Pa·s	b.o. ISO 11443-A	250
Molding shrinkage, parallel	150x105x3 mm; 260 °C / MT 80 °C	%	b.o. ISO 2577	0.5 - 0.7
Molding shrinkage, normal	150x105x3 mm; 260 °C / MT 80 °C	%	b.o. ISO 2577	0.5 - 0.7
Mechanical properties (23 °C/50 % r. h.)				
C Tensile modulus	1 mm/min	MPa	ISO 527-1,-2	2300
C Yield stress	50 mm/min	MPa	ISO 527-1,-2	54
C Yield strain	50 mm/min	%	ISO 527-1,-2	4,7
Stress at break	50 mm/min	MPa	ISO 527-1,-2	50
Strain at break	50 mm/min	%	b.o. ISO 527-1,-2	> 50
Izod impact strength	23 °C	kJ/m ²	ISO 180-U	N
Izod impact strength	-30 °C	kJ/m ²	ISO 180-U	N
Izod notched impact strength	23 °C	kJ/m ²	ISO 180-A	48
Izod notched impact strength	-30 °C	kJ/m ²	ISO 180-A	35
Thermal properties				
C Temperature of deflection under load	1.80 MPa	°C	ISO 75-1,-2	107
C Temperature of deflection under load	0.45 MPa	°C	ISO 75-1,-2	126
C Vicat softening temperature	50 N; 50 °C/h	°C	ISO 306	128
Vicat softening temperature	50 N; 120 °C/h	°C	ISO 306	130
C Coefficient of linear thermal expansion, parallel	23 to 55 °C	10 ⁻⁶ /K	ISO 11359-1,-2	0.75
C Coefficient of linear thermal expansion, transverse	23 to 55 °C	10 ⁻⁶ /K	ISO 11359-1,-2	0.8
C Burning behavior UL 94 [UL recognition]	0.85 mm	Class	UL 94	HB
Electrical properties (23 °C/50 % r. h.)				
C Relative permittivity	100 Hz	-	IEC 60250	3.1
C Relative permittivity	1 MHz	-	IEC 60250	3.0
C Dissipation factor	100 Hz	10 ⁻⁴	IEC 60250	20
C Dissipation factor	1 MHz	10 ⁻⁴	IEC 60250	85
C Volume resistivity		Ohm·m	IEC 60093	1E14
C Surface resistivity		Ohm	IEC 60093	1E16
C Electrical strength	1 mm	kV/mm	IEC 60243-1	35
C Comparative tracking index CTI	Solution A	Rating	IEC 60112	225
Other properties (23 °C)				
C Water absorption (saturation value)	Water at 23 °C	%	ISO 62	0.7
C Water absorption (equilibrium value)	23 °C; 50 % r. h.	%	ISO 62	0.2
C Density		kg/m ³	ISO 1183-1	1140
Processing conditions for test specimens				
C Injection molding-Melt temperature		°C	ISO 294	260
C Injection molding-Mold temperature		°C	ISO 294	80
C Injection molding-injection velocity		mm/s	ISO 294	240

C These property characteristics are taken from the CAMPUS plastics data bank and are based on the international catalogue of basic data for plastics according to ISO 10350.

Impact properties: N = non-break, P = partial break, C = complete break

Anexo II – Ficha técnica *Crastin SK602 NC010*

Product Information

DuPont™ Crastin® PBT

thermoplastic polyester resin

Crastin® SK602 NC010

Crastin® SK602 NC010 is a 15% glass fiber reinforced, lubricated polybutylene terephthalate resin for injection molding.

Property	Test Method	Units	Value
Identification			
Resin Identification	ISO 1043		PBT-GF15
Part Marking Code	ISO 11469		>PBT-GF15<
Mechanical			
Stress at Break	ISO 527	MPa (kpsi)	109 (15.8)
Strain at Break	ISO 527	%	3.5
Tensile Modulus	ISO 527	MPa (kpsi)	5800 (840)
Tensile Creep Modulus	ISO 899	MPa (kpsi)	
1h			5300 (769)
1000h			4300 (624)
Flexural Modulus	ISO 178	MPa (kpsi)	5200 (750)
Flexural Strength	ISO 178	MPa (kpsi)	160 (23.2)
Notched Charpy Impact Strength	ISO 179/1eA	kJ/m^2	
-40°C (-40°F)			7
-30°C (-22°F)			7
23°C (73°F)			7
Unnotched Charpy Impact Strength	ISO 179/1eU	kJ/m^2	
-40°C (-40°F)			40
-30°C (-22°F)			45
23°C (73°F)			45

Contact DuPont for Material Safety Data Sheet, general guides and/or additional information about ventilation, handling, purging, drying, etc.
ISO Mechanical properties measured at 4.0mm, ISO Electrical properties measured at 2.0mm, and all ASTM properties measured at 3.2mm.
Test temperatures are 23°C unless otherwise stated.

The DuPont Oval Logo, DuPont™, The miracles of science™ and Crastin® are trademarks or registered trademarks of DuPont Company. Copyright© 2005.

050330/050331

The information provided in this data sheet corresponds to our knowledge on the subject at the date of its publication. This information may be subject to revision as new knowledge and experience becomes available. The data provided fall within the normal range of product properties and relate only to the specific material designated; these data may not be valid for such material used in combination with any other materials, additives or pigments or in any process, unless expressly indicated otherwise. The data provided should not be used to establish specification limits or used alone as the basis of design; they are not intended to substitute for any testing you may need to conduct to determine for yourself the suitability of a specific material for your particular purposes. Since DuPont cannot anticipate all variations in actual end-use conditions DuPont makes no warranties and assumes no liability in connection with any use of this information. Nothing in this publication is to be considered as a license to operate under or a recommendation to infringe any patent rights. DuPont advises you to seek independent counsel for a freedom to practice opinion on the intended application or end-use of our products. Caution: Do not use this product in medical applications involving permanent implantation in the human body. For other medical applications see "DuPont Medical Caution Statement", H-50102.

Anexo III – Ficha técnica da liga de cobre (*Ampco 83*)



AMPCO METAL
Excellence in engineered alloys

Technical Data Sheet **AMPCOLOY® 83** Extrusions

Nominal composition:

Beryllium	(Be)	1.9%
Cobalt + Nickel	(Co + Ni)	0.5%
Others		0.5% max.
Copper	(Cu)	balance

Specifications:

EN	101C	A4/2
D	DIN 17672	W. Nr. 2.1247
F	AFNOR	UBe2
GB	BS	
USA	CDA RWMA	C17200 Class 4

Mechanical and physical properties	Units	Nominal Values
Tensile strength Rm	MPa	1250
Yield strength Rp 0.5	MPa	1000
Elongation A5	%	4
Brinell hardness	HBW 10/3000	380
Rockwell hardness	HRC	40
Modulus of elasticity E	GPa	131
Density ρ	g / cm ³	8.26
Coefficient of expansion α	10 ⁻⁶ / K	17.5
Thermal conductivity λ	W / m · K	106
Electrical conductivity γ	m / Ω · mm ²	12.8
Electrical conductivity	% I.A.C.S.	22
Specific heat Cp	J / g · K	0.38

Assurances given with respect to properties or uses are subject to written approval from AMPCO METAL.

AMPCOLOY® 83 is a 1.9 % Beryllium copper alloy which displays very high mechanical properties with a reasonably good electrical and thermal conductivity.

APPLICATIONS:

Wherever good wear resistance or high mechanical properties are desired coupled with a good electrical or thermal conductivity, such as:

Flash butt welding and butt welding

Parts for electrical components

In the plastic mould industry AMPCOLOY® 83 is sometimes used as chill plates and inserts in the moulds, cooling pins and neck rings or bottom plates for blow moulds of plastic bottles.

WARNING

Since the alloy contains 1.9 % Beryllium, it is recommended that during any operation which is liable to create dust or fumes (for example dry grinding, polishing or welding) precautions should be taken to ensure there is no inhalation or exposure to eyes or skin. Conventional machining (for example milling and turning) is not generally considered hazardous.

Anexo IV – Ficha técnica do aço 1.2083

Quality	X40Cr14		Supply conditions:					
According to standards	EN ISO 4957 : 2002		Annealed or					
Number	1.2083		Quenched and Tempered					
Chemical composition								
C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%			
	max	max	max	max				
0,36-0,42	1,00	1,00	0,030	0,030	12,50-14,50			
± 0,03	± 0,05	± 0,04	+ 0,005	± 0,005	± 0,15			
Product deviations are allowed								
Temperature °C								
Hot-forming	Preheating	Quenching +Q		Tempering +T		Tempering +T		
1100-850	850, pause, then ▲	▲ 980-1010 oil or polymer		180 (HRC 53)		see table		
Soft annealing +A				Pre-heating welding		Stress-relieving after welding		
750-800 slow cooling in furnace (HB max 241)				300		550		
				Ac1		Ms		
				845		160		
the symbol ▲ indicates the temperature rise to°C ▲								
Tempering table values at room temperature on round of Ø 25 mm after quenching at 1010 °C in oil								
HRC	54	53	52	52,5	54	52	50	46
R N/mm²	2010	1950	1880	1880	1915	2010	1880	1760
Tempering at °C	100	200	300	350	400	450	500	550
							550	600
Nitriding in gaseous ammonia. The material should be hardened and tempered before nitriding.								
Temperature °C	Time h	Depth of hardening mm			Surface hardness HV			
525	20	0,20			1000			
525	30	0,30			1000			
525	60	0,40			1000			
Thermal expansion	10 ⁻⁶ .K ⁻¹	▶	10,5	11,0	11,5	12,0	12,0	
Modulus of elasticity	long. GPa	210		205	198	190	177	
Tensile strength Rm	N/mm ²	1350 ¹⁾		1100 ¹⁾				
Yield stress Rp	N/mm ²	1200 ¹⁾		980 ¹⁾				
Specific heat capacity	J/(Kg.K)	460						
Thermal conductivity	W/(m.K)	16,5			19,8		24,1	
Density	Kg/dm ³	7,80		7,75		7,70		
Specific electric resistivity	Ohm.mm ² /m							
Electrical conductivity	Siemens.m/mm ²	1,5						
°C		20	100	200	250	300	400	500
¹⁾ values obtained on material quenched in oil at 980 °C and tempered at 550 °C The symbol ▶ indicates temperature between 20 °C and 100 °C, 20 °C and 200 °C ...								
Europe	Germany	China	Japan	India	R. of Korea	Russia	USA	
EN	DIN	GB	JIS	IS	KS	GOST	AISI/SAE	
X40Cr14	X40Cr14						420 ~	

Martensitic stainless steel resistant to corrosion

- good toughness and homogeneous mechanical properties throughout the mould
- good micro-purity level and little segregation
- excellent machinability, suitable for embossing, wear resistance and weldability
- suitable for moulds subject to corrosive plastic materials (PVC, polymers) and humid/salty atmosphere
- applications: *moulds for corrosive plastic materials, synthetic resins and for the automotive industry (head lamp components), moulds for food industry products, cosmetics, rubber pressing, dies and gauges for PVC extrusion*

THE DATA CONTAINED HEREIN ARE INTENDED AS REFERENCE ONLY AND ARE SUBJECT TO CONSTANT CHANGE. LUCEFIN S.P.A. DISCLAIMS ANY AND ALL LIABILITY FOR ANY CONSEQUENCES THAT MAY RESULT FROM THEIR USE.

Anexo V – Ficha técnica do aço CL 50WS

CL 50WS Hot-work steel

Hot-work steel 1.2709 (powder)

CL 50WS is a powder material for the production of components for tool inserts with conformal cooling. These tool inserts can be used for series injection moulding as well as for die-casting. Furthermore the material can also be used for functional components.

26
Fe
55,847



Source: Werkzeugbau Gießerei Hofmann GmbH

CHEMICAL COMPOSITION

Component	Indicative value (%)
Fe	Balance
C	≤ 0,03
Si	≤ 0,10
Mn	≤ 0,15
P	≤ 0,010
S	≤ 0,010
Cr	≤ 0,25
Mo	4,50 - 5,20
Ni	17,0 - 19,0
Ti	0,80 - 1,20
Co	8,50 - 10,0

RANGE OF APPLICATION

Tool Inserts with conformal cooling in the area of injection moulding and die-casting as well as functional components.

TECHNICAL DATA AFTER RECOMMENDED HEAT TREATMENT

Yield Point R_p^1	1.550 N/mm ²
Tensile Strength R_m^1	1.650 N/mm ²
Elongation A ^{1,2}	2-3 %
Young's modulus ³	approx. 200 · 10 ³ N/mm ²
Thermal conductivity λ^3	approx. 20 W/mK
Hardness ⁴	up to 52 HRC

¹ Tensile test at 20°C according to DIN EN 50125

² By using a special heat treatment a higher elongation can be achieved.

³ Specification according to the material manufacturer's data sheet.

⁴ Hardness test according to DIN EN ISO 6506

CL 50WS

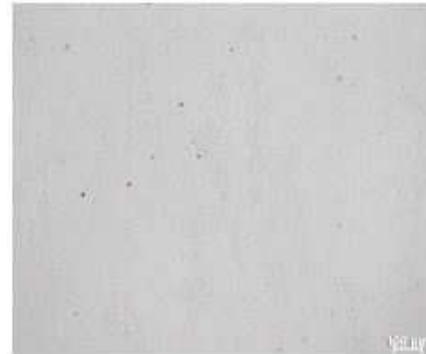
Hot-work steel
1.2709

MICROSECTION

Test piece (x 20 magnification)



Test piece (x 100 magnification)



HEAT TREATMENT

Heat up with 100°C/h up to 540°C. Maintain temperature for 6-10 hours. Allow the components to cool down in the oven with 100°C/h.

MICROSTRUCTURE

Components made from hot-work steel CL 50WS display a homogeneous, dense structure after they are manufactured by means of the metal laser melting process LaserCUSING®.

Concept Laser GmbH
An der Zeil 6
D 96215 Lichtenfels

Sales Department
info@concept-laser.de
T: +49 (0)9571.949 238
F: +49 (0)9571.949 249

A company of
HOFMANN
Innovation group

www.concept-laser.de

Anexo VI – Desenho 2D (Caso de estudo 2, *Sensor housing*)

