



Projeto

Mestrado em Engenharia Mecânica – Produção Industrial

***Avaliação de custos de processos de fabricação aditiva  
na produção de moldes híbridos versus moldes  
convencionais***

**Cátia de Sousa Gomes**

Leiria, Setembro de 2015



Projeto

Mestrado em Engenharia Mecânica – Produção Industrial

***Avaliação de custos de processos de fabricação aditiva  
na produção de moldes híbridos versus moldes  
convencionais***

**Cátia de Sousa Gomes**

Projeto de Mestrado realizada sob a orientação do Doutor Mário Simões Correia, Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria e co-orientação do Doutor Pedro Miguel Gonçalves Martinho, Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

Leiria, Setembro de 2015

***“Sucesso é conseguir o que se quer;  
Felicidade é gostar do que se  
consegue.”***

Dale Carnegie

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

## ***Agradecimentos***

---

Agradeço a todos aqueles que, direta ou indiretamente, colaboraram na realização deste trabalho e, em particular:

Aos meus orientadores Doutor Mário Correia, e Doutor Pedro Martinho, ambos do departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Politécnico de Leiria, por todo o conhecimento, disponibilidade, apoio e motivação que me inculiram ao longo desta jornada.

Aos Engenheiros: António Selada, Carlos Dias, Gil Pinheiro, Ricardo Ramos e Jennifer Faustino e ao professor Doutor Carlos Vieira pela partilha dos seus conhecimentos e das suas experiências profissionais.

Aos amigos de mestrado pelo espírito de entreajuda e pelos momentos de amizade vividos neste período de esforço, mas em especial à Paula Ferreira, ao Pedro Barreiro, ao Pedro Garrido e ao Sérgio Guerreiro que sempre acreditaram em mim, motivando-me sem nunca me permitirem desistir.

Aos meus pais e irmão, que durante todo o meu percurso académico nunca colocaram em dúvida o meu trabalho, esforço, dedicação, humildade, respeito e sempre me transmitiram o máximo de confiança. E à Érica, Cila e Jorge que igualmente sempre acreditaram em mim e no meu valor.

Ao Tiago, pelo apoio incondicional em todas as fases, principalmente nas mais difíceis e por toda a paciência que precisou para mim e para as minhas ausências.

Obrigado não é suficiente, mas de qualquer forma, obrigado por tudo!

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

## Resumo

---

Com o aumento da exigência do mercado, conseqüente da evolução da indústria, existe a necessidade de dar resposta a essas mesmas exigências criando um constante desenvolvimento e procura de processos/produtos novos. A indústria de injeção de plásticos é uma destas indústrias. Nestas indústrias as ferramentas utilizadas eram exclusivamente fabricadas por processos convencionais, no entanto devido ao custo, tempo de produção/fabricação e alteração sistemática das necessidades dos clientes/produtos foi necessário encontrar novas alternativas como a utilização de técnicas de fabricação aditiva.

Com o avanço das tecnologias de fabricação aditiva é possível o uso de materiais metálicos e de resinas sintéticas em alguns componentes do molde. A inclusão destas técnicas em estruturas convencionais originou o conceito de molde híbrido. A introdução deste conceito teve o objetivo de satisfazer a necessidade de colocar pequenas séries de novos produtos no mercado em menor tempo e com preços mais competitivos.

Este estudo explora, essencialmente, a avaliação de custos de processos de fabricação aditiva na produção de moldes híbridos *versus* moldes convencionais. Também se comparou o salário base em Portugal com os países para os quais as empresas portuguesas exportam moldes. Essa comparação foi realizada com o objetivo de verificar a ameaça que pode representar para as empresas portuguesas de moldes o crescente interesse de países onde o custo de mão-de-obra é bastante diferenciado comparativamente com o caso português.

Definiu-se o *design* do bloco moldante de uma peça simples e este foi utilizado para a obtenção de cotação dos mesmos fabricados através de diferentes processos. Foram cotados blocos moldantes em processos convencionais e em processos de fabricação aditiva. Os processos convencionais utilizaram alumínio 7022 e aço P20. Já os processos de fabricação aditiva foram cotados para os processos de vazamento de resinas com 40% e

60% de cargas de alumínio, FDM, SLS e Polyjet.

*Palavras-chave: Moldes Convencionais, Moldes Híbridos, Fabricação Aditiva, Custo.*

## ***Abstract***

---

Given the market demand, increasing provided by industry evolution, it's necessary to attend to these demands by creating constant development and searching for new processes/products. The plastic injection molding industry is one of them. On those industries, the tools used were exclusively manufactured by conventional processes, however due to cost, time of production/manufacturing and systematically changing customer needs/products was essential to find some new alternatives as additive manufacturing techniques.

With the advancement of additive manufacturing technologies is possible to use metal materials and synthetic resins to some mold components. These techniques inclusion in conventional structures afforded the hybrid mold concept. The aim of these concept introduction was to satisfy the necessity in place small series of new products on the market in less time and with more competitive prices.

This study explores essentially to evaluation the additive manufacturing process costs in the production of hybrid molds versus conventional molds. Also was compared the base Portugal salary with other countries where Portuguese companies are molds exported. This comparison was performed in order to verify the threat it may represent to the Portuguese mold companies the growing interest of countries where the hand craft cost is very different compared to the Portuguese case.

Was defined the simple piece of molding blocks design it was used for obtaining the same listing manufactured through different processes. Molding blocks were listed in conventional processes and additive manufacturing processes. Conventional processes used steel P20 and aluminum 7022. Regarding the additive manufacturing processes were rated for the resin casting processes with 40% and 60% aluminum fillers, FDM, SLS and Polyjet.

Key-Words: Conventional Molds, Hybrid Molds, Additive Manufacturing, Cost.

## Índice de Figuras

---

FIGURA 1. 1 - GRÁFICO DOS PRINCIPAIS MERCADOS DE EXPORTAÇÃO DA INDÚSTRIA PORTUGUESA EM 2014 (CEFAMOL 2015). .	1
FIGURA 1. 2 – DIAGRAMA DOS PRODUTOS 3D (KIETZMANN ET AL. 2015) .....	3
FIGURA 2. 1 - REPRESENTAÇÃO DOS COMPONENTES DO MOLDE (MENGES ET AL. 2001).....	6
FIGURA 2. 2 - TÉCNICAS DE MOLDAÇÃO DE TERMOPLÁSTICOS (POUZADA N.D.). .....	7
FIGURA 2. 3 - MÁQUINA DE INJEÇÃO (SINOTECH 2014). .....	9
FIGURA 2. 4 - CICLO DE INJEÇÃO PLÁSTICA (CUNHA 1991).....	10
FIGURA 2. 5 - CONCEITO DE MOLDE HÍBRIDO (PONTES, QUEIRÓS, ET AL. 2005).....	13
FIGURA 2. 6 - CANAIS DE ARREFECIMENTO CONFORMÁVEIS (XU ET AL. 2001). .....	17
FIGURA 2. 7 - CLASSIFICAÇÃO DE RT (CHUA ET AL. 1999). .....	19
FIGURA 2. 8 - FASES DO PROCESSO GENÉRICO DE AM (GIBSON ET AL. 2010). .....	23
FIGURA 2. 9 - DIAGRAMA DE VAZAMENTO DE RESINAS (VASCONCELOS ET AL. 2004). .....	24
FIGURA 2. 10 - FLUXO DE OPERAÇÕES PARA FABRICAÇÃO ADITIVA E PROCESSOS CONVENCIONAIS (HOLTZ 2015). .....	30
FIGURA 3. 1 - CAVIDADE DO MOLDE REALIZADO POR DOMINGUES (DOMINGUES 2015). .....	33
FIGURA 3. 2 - CNC DMG-DMU 125 P DUOBLOCK® (MORI 2014). .....	34
FIGURA 3. 3 - IMPRESSORA 3D DIMENSION SST 1200 (STRATASYS 2015B). .....	36
FIGURA 3. 4 - EQUIPAMENTO SPRO™ 60 HD (3DSYSTEMS 2015).....	38
FIGURA 3. 5 - EQUIPAMENTO OBJET EDEN 330 UTILIZADO EM POLYJET (STRATASYS 2015A). .....	39
FIGURA 4. 1 - ESTRUTURA DO MOLDE DA <i>HASCO</i> . .....	45
FIGURA 4. 2 - GRÁFICO DE CUSTO TOTAL DE MOLDES .....	50
FIGURA 4. 3 - GRÁFICO REPRESENTATIVO DO SALÁRIO BASE DE CADA PAÍS IMPORTADOR DE MOLDES PORTUGUESES. ....	51
FIGURA 4. 4 - GRÁFICO REPRESENTATIVO DE RÁCIO DOS MOLDES PRODUZIDOS POR PROCESSOS CONVENCIONAIS. ....	52
FIGURA 4. 5 - GRÁFICO REPRESENTATIVO DE RÁCIO DOS MOLDES PRODUZIDOS POR VAZAMENTO DE RESINAS COM CARGAS DE ALUMÍNIO. ....	52
FIGURA 4. 6 - GRÁFICO REPRESENTATIVO DE RÁCIO DOS MOLDES PRODUZIDOS POR POLYJET E FDM. ....	53

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

## Índice de Tabelas

---

TABELA 2. 1 – CARATERÍSTICAS TECNOLÓGICAS DE AM (WELLER ET AL. 2014).....	22
TABELA 2. 2- CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE AM SEGUNDO GIBSON (GIBSON ET AL. 2010).....	25
TABELA 2. 3 - DESCRIÇÃO DE MÉTODOS DE FOTOPOLIMERIZAÇÃO DAS TÉCNICAS DE AM (GIBSON ET AL. 2010; ROSOCHOWSKI & MATUSZAK 2000).....	26
TABELA 2. 4 - DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS DE EXTRUSÃO DAS TÉCNICAS DE AM (FISCHER 2014; GIBSON ET AL. 2010; LEE ET AL. 2014).....	26
TABELA 2. 5 - DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS DE FUSÃO DE PÓ DAS TÉCNICAS DE AM (GIBSON ET AL. 2010; FREITAS ET AL. 2012).....	27
TABELA 2. 6 - DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS DE IMPRESSÃO DAS TÉCNICAS DE AM (STRATASYS 2015A; 3DSYSTEMS 2015; FISCHER 2014; ZONDER & SELLA 2014).....	28
TABELA 2. 7 - DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS DE LAMINAÇÃO DAS TÉCNICAS DE AM (GIBSON ET AL. 2010; ROSOCHOWSKI & MATUSZAK 2000).....	29
TABELA 2. 8 - DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS DE DEPOSIÇÃO DE FEIXE DAS TÉCNICAS DE AM (BOCKING ET AL. 2002; GIBSON ET AL. 2010).....	29
TABELA 2. 9 - CARATERÍSTICAS ECONÓMICAS DE AM ADAPTADO DE WELLER (WELLER ET AL. 2014).....	31
TABELA 2. 10 - TABELA COMPARATIVA DE PRODUÇÃO DE PEÇAS ENTRE TÉCNICAS CONVENCIONAIS E DE AM.....	32
TABELA 3. 1 - CARATERÍSTICAS DA CNC DMG-DMU 125 P DUOBLOCK® (MORI 2014).....	34
TABELA 3. 2 - CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS E FÍSICAS DO ALUMÍNIO 7022 E DO AÇO P20.....	35
TABELA 3. 3 - CARATERÍSTICAS DA IMPRESSORA 3D DIMENSION SST 1200 (STRATASYS 2015B).....	36
TABELA 3. 4 - CARATERÍSTICAS DO ABSPLUS (STRATASYS 2015A).....	37
TABELA 3. 5 - CARATERÍSTICAS DA SPro™ 60 HD (3DSYSTEMS 2015).....	38
TABELA 3. 6 - CARATERÍSTICAS DO DURAFORM®PA PLASTIC (3DSYSTEMS 2015).....	38
TABELA 3. 7 - CARATERÍSTICAS DA OBJET EDEN 330(STRATASYS 2015A).....	39
TABELA 3. 8 - CARATERÍSTICAS DO FULLCURE® 720 (STRATASYS 2015A).....	40
TABELA 3. 9 - CUSTOS INDIRETOS ASSOCIADOS À FABRICAÇÃO DE MOLDES (NEVES 2015).....	41
TABELA 3. 10 - CUSTOS DIRETOS ASSOCIADOS À FABRICAÇÃO DE MOLDES CONVENCIONAIS (NEVES 2015).....	42
TABELA 3. 11 - CUSTOS DIRETOS ASSOCIADOS À FABRICAÇÃO DE MOLDES HÍBRIDOS.....	43
TABELA 4. 1 - CARACTERÍSTICAS E CUSTOS DOS CONSTITUINTES DA ESTRUTURA DO MOLDE RETIRADOS DA <i>HASCO</i> .....	46
TABELA 4. 2 - CUSTO ASSOCIADO À OBTENÇÃO DE BLOCOS MOLDANTES POR PROCESSOS CONVENCIONAIS USANDO O ALUMÍNIO 7022.....	47
TABELA 4. 3 - CUSTO ASSOCIADO À OBTENÇÃO DE BLOCOS MOLDANTES POR PROCESSOS CONVENCIONAIS USANDO O AÇO P20.....	48
TABELA 4. 4 - COTAÇÃO DE BLOCOS MOLDANTES FABRICADOS POR VAZAMENTO DE RESINAS COM 40% DE CARGAS DE AL.....	48
TABELA 4. 5 - COTAÇÃO DE BLOCOS MOLDANTES FABRICADOS POR VAZAMENTO DE RESINAS COM 60% DE CARGAS DE AL.....	49
TABELA 4. 6 - CUSTO ASSOCIADO AOS BLOCOS MOLDANTES POR PROCESSOS AM USANDO O FDM.....	49
TABELA 4. 7 - CUSTO ASSOCIADO AOS BLOCOS MOLDANTES POR PROCESSOS AM USANDO O SLS.....	50
TABELA 4. 8 - CUSTO ASSOCIADO AOS BLOCOS MOLDANTES POR PROCESSOS AM USANDO O POLYJET.....	50

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

## *Lista de Siglas*

---

**3D – 3 Dimensional System**

**3DP – 3 Dimensional Printing**

**ABS – Acrilonitrila Butadieno Estireno**

**AM – Additive Manufacturing**

**ASTM – American Society for Testing and Materials**

**BD – Beam Deposition**

**CAD – Computer Aided Design**

**CNC – Control Numérico Computadorizado**

**DLF – Directed Light Fabrication**

**DMD – Digital Micro-mirror Devices**

**DMLS – Direct Metal Laser Sintering**

**EDM – Electrical Discharge Machining**

**FDM – Fused Deposition Modelling**

**HSC – High Speed Cutting**

**HSM – High Speed Machining**

**LBMD – Laser-Based Metal Deposition**

**LENS – Laser Engineered Net Shaping**

**LFF – Laser Freeform Fabrication**

**LOM – Laminated object Manufacturing**

**PC – Policarbonato**

**PE – Polietileno**

**PLT – Paper Lamination Technology**

**PP – Polipropileno**

**PPSF – Polifenilsulfona**

**RIM – Reaction Injection Moulding**

**RP – Rapid Prototyping**

**RT – Rapid Tooling**

**SDM – Shaped Deposition Manufacturing**

**SL – Stereolithography**

**SLM – Selective Laser Melting**

**SLS – Selective Laser Sintering**

**SSM – Solid Slicing Manufacturing**

**STL – Structured Triangular Language**

# Índice

---

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>III</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>V</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>IX</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS</b> .....	<b>XI</b>
<b>LISTA DE SIGLAS</b> .....	<b>XIII</b>
<b>ÍNDICE</b> .....	<b>XV</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2. ESTADO DA ARTE</b> .....	<b>5</b>
2.1 MOLDES PARA INJEÇÃO DE MATERIAIS PLÁSTICOS .....	5
2.2 PROCESSOS DE INJEÇÃO DE POLÍMEROS .....	6
2.3 PROCESSOS DE FABRICO PARA MOLDES .....	11
2.3.1 MOLDES CONVENCIONAIS .....	11
2.3.2 MOLDES HÍBRIDOS .....	13
2.4 PROCESSOS DE FABRICO ADITIVO DE MOLDES .....	19
2.5 FLUXO DE OPERAÇÕES NA PRODUÇÃO DE MOLDES CONVENCIONAIS E MOLDES HÍBRIDOS .....	30
2.6 NÚMERO DE PEÇAS OBTIDAS E CUSTOS DE PROCESSOS .....	30
2.7 OBJETIVO E MOTIVAÇÃO DESTA TRABALHO .....	32
<b>3. CASOS DE ESTUDO</b> .....	<b>33</b>
3.1 BLOCO MOLDANTE .....	33
3.2 PROCESSOS PRODUTIVOS (BLOCO MOLDANTE) .....	34
3.3 CONSIDERAÇÃO PARA A AVALIAÇÃO DE CUSTOS .....	40
<b>4. CUSTOS DE PROCESSOS</b> .....	<b>45</b>
4.1 ESTRUTURA DO MOLDE .....	45
4.2 FABRICO DE ZONAS MOLDANTES .....	47
4.2.1 ALUMÍNIO .....	47
4.2.2 AÇO .....	47
4.2.3 RESINAS .....	48
4.2.4 FDM .....	49
4.2.5 SLS .....	49
4.2.6 POLYJET .....	50

4.3	CUSTO TOTAL.....	50
4.4	CUSTOS NOS PAÍSES .....	51
<b>5.</b>	<b>DISCUSSÃO .....</b>	<b>55</b>
	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>57</b>
	<b>TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>59</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>61</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>67</b>

## 1. Introdução

---

A Indústria Portuguesa de Moldes apresenta um crescimento e uma consolidação na sua notoriedade no mercado internacional, estimulada, quer pelo conjunto de competências e capacidades produtivas que oferece aos seus clientes, quer pela procura externa.

Em 2014 Portugal foi considerado como o 4º principal fabricante de moldes a nível europeu e 8º a nível mundial, ostentando uma exportação de 85% da produção anual. Na Figura 1. 1 verifica-se os países para os quais a indústria portuguesa exportou os seus moldes. Estes países são: Espanha, Alemanha, França, República Checa, Reino Unido, Polónia, Estados Unidos da América e Suécia (Cefamol 2015).

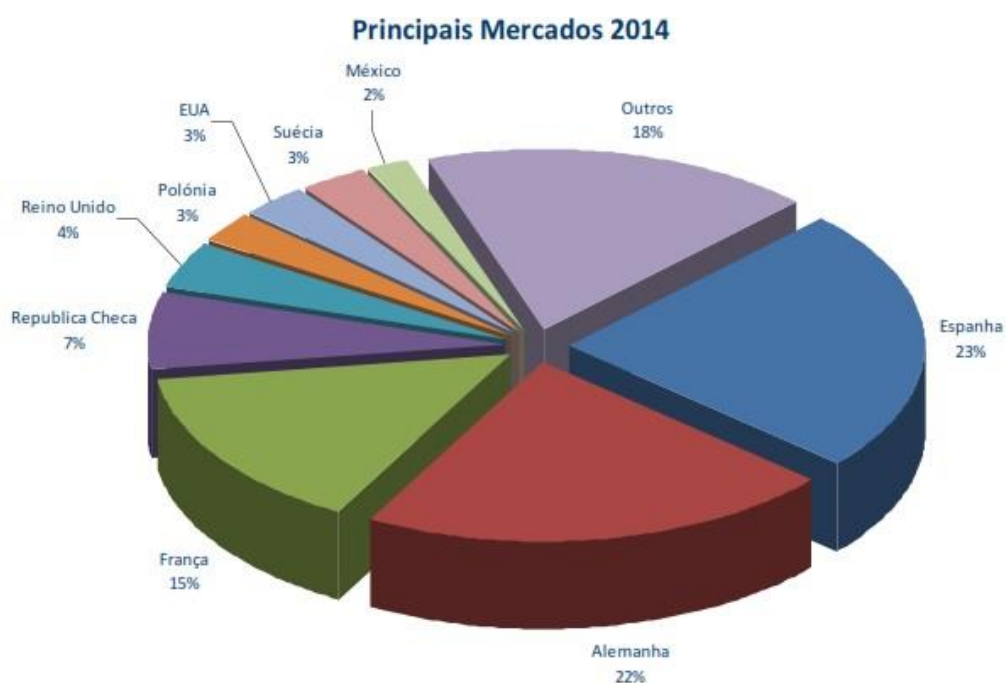


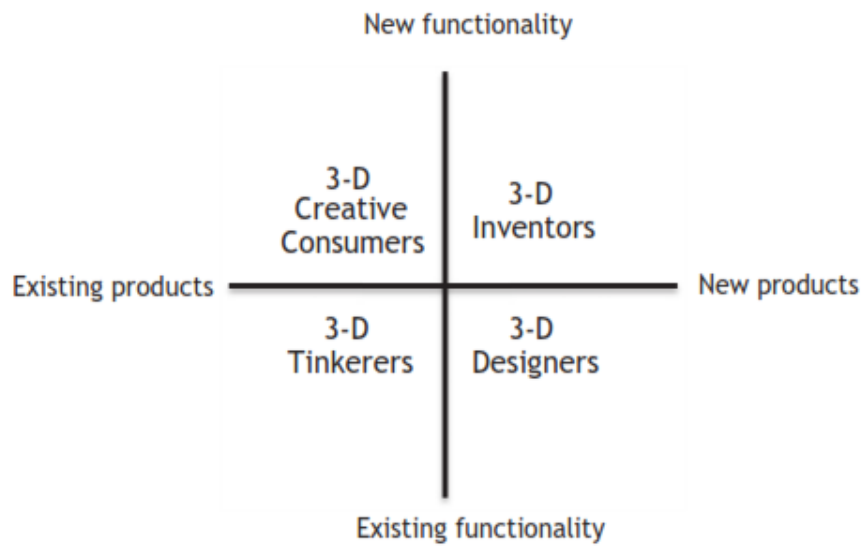
Figura 1. 1 - Gráfico dos principais mercados de exportação da indústria Portuguesa em 2014 (Cefamol 2015).

Deste modo as indústrias encontram-se numa incessante procura de diferenciação dos seus produtos quer no processo de desenvolvimento como na conceção do produto final, de forma a tornarem-se mais competitivas no mercado consumidor. A par desta procura pela diferenciação as indústrias procuram também uma redução do tempo de introdução do produto no mercado.

O setor dos produtos plásticos injetados é representado por pequenas e médias empresas que coexistem apesar de adotarem estratégias diferentes relativamente à qualidade do produto final e às expectativas do cliente focando-se mais nos produtos personalizados. Consequentemente o aumento da qualidade, a redução dos períodos para conceção e entrega de peças, a disponibilidade de novos materiais, os custos mais reduzidos através de mão-de-obra mais barata e a globalização dos mercados obriga a indústria a adotar decisões estratégicas no sentido de: utilização de diferentes métodos de engenharia, implementação de produtos e processos inovadores, promovendo o desenvolvimento sustentável e, finalmente utilização de mão-de-obra mais qualificada (Pouzada n.d.).

A produção de moldes recorre a métodos convencionais que utilizam a maquinaria através de diferentes processos, nos quais aplicam técnicas subtrativas para obter a geometria pretendida. Estes métodos centram-se na produção de peças ou componentes em grande escala (Glanvill & Denton 1994). Por outro lado as técnicas de AM (Additive Manufacturing) apareceram como solução para a crescente necessidade de produtos mais diferenciados e ciclo de vida de produto mais curtos. No entanto, o uso de técnicas de fabrico aditivo deve permitir que os produtos tenham propriedades semelhantes aos produzidos em processos de fabrico convencionais (Gibson et al. 2010)

Como é possível verificar na Figura 1. 2 pode afirmar-se que na área de AM existem consumidores com ideias de produtos existentes em 3D para criar novas funcionalidades e que os inventores de 3D podem criar novos produtos com novas funcionalidades. Deste modo, podemos afirmar que todos podemos criar e desenvolver produtos em 3D para a melhoria do quotidiano e, consequentemente pressionar a indústria produtora.



**Figura 1. 2 – Diagrama dos produtos 3D** (Kietzmann et al. 2015)

Os custos associados aos moldes convencionais e aos moldes híbridos, para moldes simples e de séries curtas, são bastante semelhantes, no entanto o seu custo final é diferente. Esta desigualdade justifica-se pelas diferenças associadas à matéria-prima, processo de fabricação e tempo de fabricação.

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

## **2. Estado da arte**

---

### **2.1 Moldes para Injeção de Materiais Plásticos**

Os moldes para injeção de materiais plásticos servem para produzir peças em plástico. É de esperar que no projeto da peça e do molde cuidados se tenha relativamente ao método mais apropriado para a sua conceção bem como a sua construção, e que o molde apresente uma solução económica e sólida. O molde apresenta a funcionalidade de produzir peças de qualidade, num tempo de ciclo mais curto possível tendo o mínimo de manutenção durante o tempo de serviço e desempenhando corretamente determinadas funções. Nomeadamente: definir os volumes com a forma das peças a produzir, assegurando a reprodutibilidade dimensional, de ciclo para ciclo; permitir o enchimento desses volumes com o polímero fundido; facilitar o arrefecimento do polímero e promover a extração das peças. A constituição dos moldes é, assim, determinada pela necessidade de realizar adequadamente as funções associadas à execução do ciclo de moldação. A maior parte dos moldes é produzida pela maquinação de um bloco sólido único ou pela composição e ajuste de blocos maquinados em separado (Glanvill & Denton 1994).

O ciclo de vida de um molde de injeção envolve cinco fases distintas. Sendo elas: conceção, fabricação, utilização, reciclagem e desativação. (Hernández et al. 2005) Geralmente, quando estes moldes se encontram no fim do ciclo de vida são armazenados e destruídos posteriormente. A reutilização destes moldes revela-se como uma importante estratégia, mas que comumente é negligenciada. As alternativas que se utilizam para melhorar a sua reutilização centram-se: em redesenhar moldes de forma a aumentar o seu ciclo de vida; reutilizar estruturas de moldes existentes; e utilizar materiais recicláveis para os blocos moldantes. (Correia et al. 2014)

O objetivo de produzir peças por injeção consiste em disponibilizar aos clientes um número de peças que varia entre apenas umas dezenas e vários milhares. Para uma produção rápida e com dimensões semelhantes é essencial dispor de moldes que, desta forma, são vistos

como ferramentas produtivas, sendo que a sua concepção deve ter como ponto de partida a função da tecnologia em que vai ser implementada (Throne 1987).

Os moldes convencionais de injeção de plásticos são constituídos por diversos componentes. A mola (1), o extrator (2), o prato móvel (3), o prato dos extratores (4), o pino extrator (5), o extrator do canal de injeção (6), o prato de suporte (7), os casquilhos (8 e 11), o prato de retenção das cavidades (9), a guia (10), a linha de junta (12), o prato de retenção da cavidade (13), o prato estacionário (14), o bocal para o sistema de arrefecimento (15), o anel de centragem (16), o canal de vazamento (17), a cavidade (18), a linha de arrefecimento (19), a bucha (20) e os calços (21), como se encontram representados na Figura 2. 1 (Menges et al. 2001).

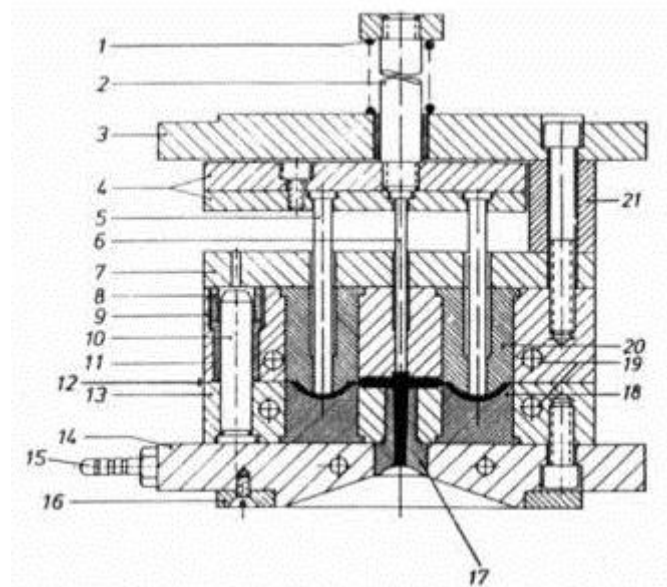


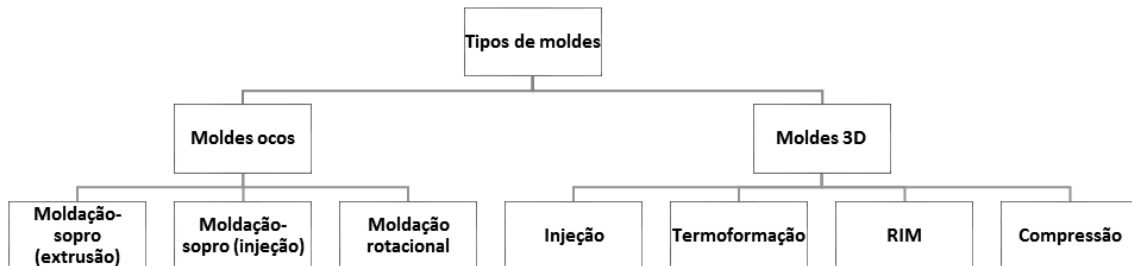
Figura 2. 1 - Representação dos componentes do molde (Menges et al. 2001).

## 2.2 Processos de Injeção de Polímeros

Os polímeros podem ser naturais, semi-sintéticos e sintéticos. Os polímeros sintéticos são os mais utilizados na indústria e podem ser divididos em elastómeros, termoplásticos e termoendurecíveis. Os materiais termoplásticos são os polímeros utilizados com mais frequência.

Os materiais poliméricos (plásticos e borrachas) podem ser agrupados em dois tipos principais: os de seção transversal, obtidos por extrusão e os produtos individualizados com formas tridimensionais mais ou menos complexos obtidos quase exclusivamente por processos de moldação.

Os materiais poliméricos podem ser transformados através de diferentes tecnologias. Estas diferem tanto nos tipos de material possível de processar bem como no custo associado à sua operação. De uma forma generalizada os produtos moldados agrupam-se em produtos ocos e em produtos que podem ser obtidos através de moldes em 3D (3 Dimensional System), constituídos por buchas e cavidades (Pouzada n.d.).



**Figura 2. 2 - Técnicas de moldação de termoplásticos (Pouzada n.d.).**

Como demonstrado na Figura 2. 2 os produtos ocos são obtidos por tecnologias como: moldação-sopro baseada na extrusão; moldação-sopro baseada na injeção; e na moldação rotacional, sendo que são produzidos produtos ocos por junção de várias peças obtidas por outras técnicas de moldação.

A moldação por injeção, a termoformação, a moldação por compressão e a moldação com reação (RIM - Reaction Injection Moulding) são as tecnologias de moldação mais utilizadas sendo que todas estas técnicas podem ser utilizadas com materiais termoplásticos (Throne 1987).

Os moldes de injeção de polímeros foram gerados ainda no século XIX. Um molde de injeção é definido como um conjunto de sistemas funcionais que criam um espaço definido pela bucha e pela cavidade onde a peça será materializada. Este espaço é preenchido pelo polímero fundido em condições controladas e por outros sistemas funcionais que garantem a qualidade dimensional e estrutural das peças finais. Os sistemas funcionais são:

- A estrutura que suporta a solidez estrutural do molde;
- O guiamento que mantém o alinhamento correto da cavidade com a bucha;
- A alimentação (jito, canais de alimentação e ataques), que permitem o percurso do material fundido desde o bico da injetora até à impressora;
- O controlo de temperatura facilita a que nas zonas moldantes a temperatura seja o

mais uniforme e que o arrefecimento aconteça rápida e eficientemente,

- A extração para que a peça seja retirada do molde (Pye 1989).

Os moldes mais elaborados podem ser dotados de sistemas especiais que garantam os movimentos, a monitoração da temperatura e de pressão, a extração controlada com robots ou o controlo independente da temperatura no sistema de alimentação (canais quentes).

O molde é o sistema funcional da máquina de injeção diretamente associado a um produto. Dependendo das peças a produzir os moldes utilizados podem ser agrupados em três tipos principais:

- Moldes convencionais ou de duas placas;
- Moldes de três placas;
- Moldes de canais quentes.

Os moldes de três placas e de canais quentes são os mais utilizados na produção de peças para embalagens, uma vez que permitem obter as peças separadas do sistema de alimentação.

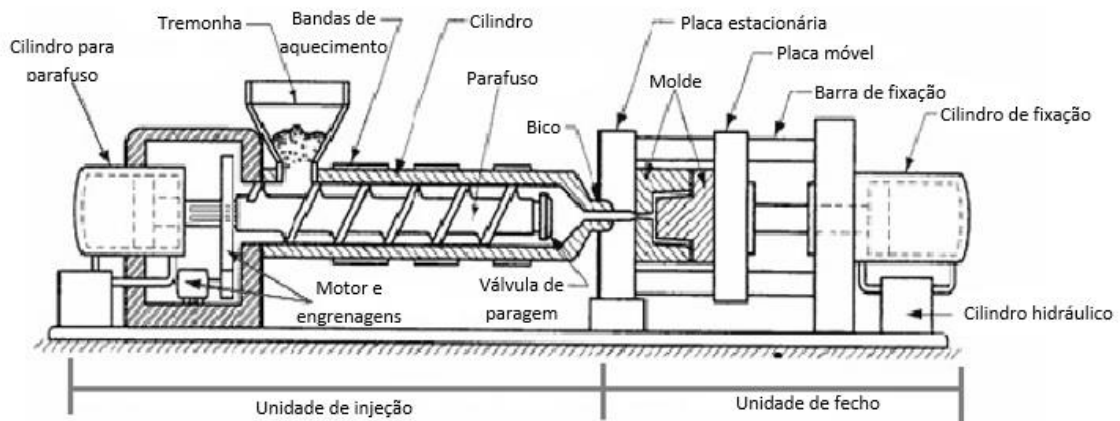
Nos moldes convencionais e nos de três placas é necessário fazer-se a reciclagem do material do sistema de alimentação, contudo, nos moldes de canais quentes, esta reciclagem não é necessária porque o material permanece sempre dentro do molde.

O arrefecimento é garantido, devido á água circulante nos canais de refrigeração distribuídos na bucha e na cavidade, que acompanham tanto quanto possível a geometria da peça. Para os materiais de engenharia, moldados a temperaturas mais elevadas, como o policarbonato, o líquido de arrefecimento é um óleo com uma temperatura superior a 100°C. Para que o controlo de temperatura do molde seja eficaz este fluído deve ser preservado a uma temperatura constante, utilizando termo-reguladores (para as temperaturas superiores a 40-50°C) ou refrigeradores para temperaturas inferiores à temperatura ambiente (Pye 1989).

O processo de injeção é um método bastante utilizado na indústria devido a diversos fatores, tais como: elevadas taxas de produção; produção de peças com grandes volumes; custo de mão-de-obra relativamente barata; acabamento de peças ser reduzido e ainda possibilidade das peças serem moldadas com insertos metálicos. Este processo apresenta também desvantagens, entre elas: mercado competitivo proporcionando uma margem de lucro baixa e o elevado custo dos moldes de injeção comparativamente a outros moldes (Sinotech

2014).

As máquinas de moldação por injeção são classificadas em máquinas de pistão e máquinas de fuso, sendo que a diferença encontra-se na plasticização. Nas máquinas de moldação por injeção de pistão a plasticização do material é realizada num cilindro aquecido, já nas máquinas de fuso a plasticização é executada num fuso, em que este é acionado através de um motor elétrico ou hidráulico. As máquinas de injeção de fuso são mais rápidas na injeção, uma vez que o fuso atua no material já fundido e apresentam, também, uma boa homogeneização do polímero. Devido a estas características, este tipo de máquinas é o mais utilizado na indústria (Cruz 2013). Na Figura 2. 3 é possível observar a construção genérica de uma máquina de moldação por injeção (Sinotech 2014).

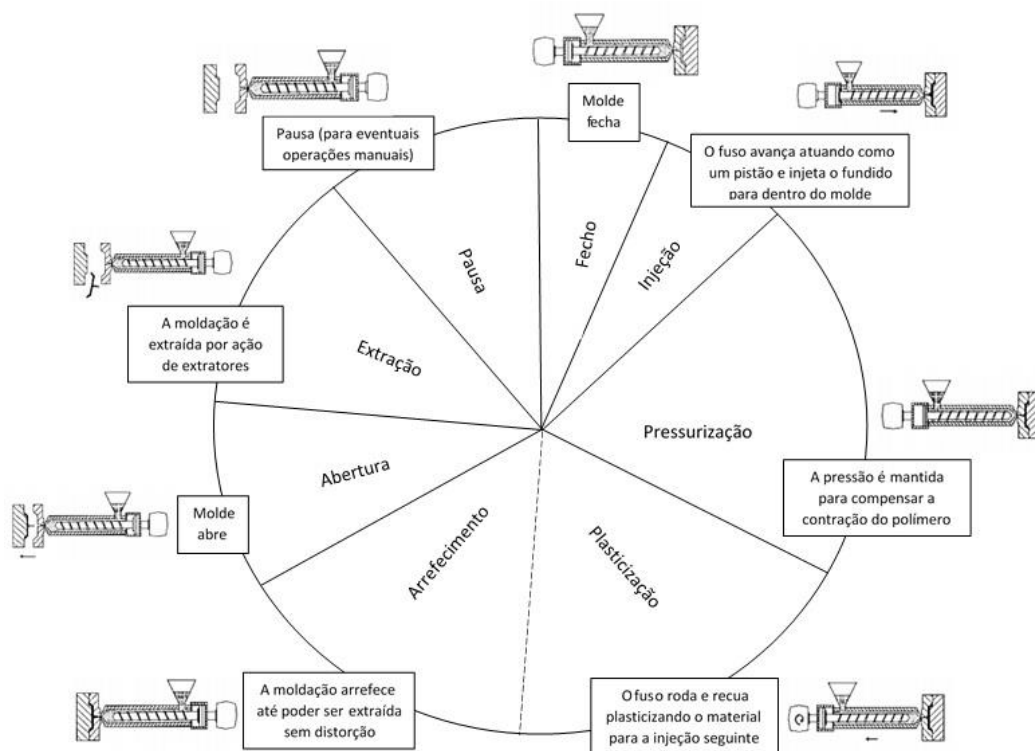


**Figura 2. 3 - Máquina de injeção (Sinotech 2014).**

As máquinas de injeção são constituídas por quatro unidades de funcionamento: a unidade de potência, a unidade de injeção, a unidade de fecho e a unidade de comando.

As máquinas de injeção podem ser consideradas de diversos tipos, consoante a utilização e a escolha de materiais aplicados. Existem máquinas de moldação por injeção horizontais, máquinas de moldação por injeção verticais e ainda máquinas de moldação por injeção híbridas (compostas por unidades horizontais e verticais). A máquina de moldação por injeção horizontal é constituída por uma unidade de fecho horizontal que abre e fecha o molde e uma unidade de injeção horizontal para injetar plástico pelo parafuso ou êmbolo. Na máquina de moldação por injeção vertical, estas duas unidades dispõem-se verticalmente, enquanto a máquina de moldação por injeção híbrida utiliza as duas orientações, sendo uma orientação para a unidade de fecho e outra para a unidade de injeção (Kamal et al. 2009).

Na moldação por injeção o polímero é inserido de forma manual ou automática, no estado sólido, na tremonha da injetora. O polímero passa para a câmara cilíndrica, geralmente contendo um parafuso ou pistão que funciona como plastificador e homogeneizador da massa polimérica, permitindo aquecer o material gradualmente até à sua fundição. Quando o polímero atinge a viscosidade adequada é injetado sob pressão para o interior do molde, tendo este a geometria pretendida do produto final. Após o enchimento do molde, o polímero fundido arrefece até solidificar o suficiente para ser extraído finalizando assim o ciclo. O novo ciclo inicia-se com o fecho do molde. As etapas encontram-se apresentadas na Figura 2. 4 (Cunha 1991).



**Figura 2. 4 - Ciclo de injeção plástica (Cunha 1991).**

Atualmente, os moldes de injeção de termoplásticos são construídos em vários tipos de materiais desde os aços de alta liga usados em moldes para séries muito longas e mais exigentes, até aços de carbono para peças menos críticas e séries mais curtas. Para além disso, para séries protótipo ou para séries muito curtas são usadas ligas de alumínio ou, mais recentemente, materiais não metálicos nas zonas moldantes, dando origem ao que se designa por molde híbridos (isto é, com matérias metálicas e não metálicas). Também se utilizam moldes em que as buchas e cavidades são obtidas, quase diretamente, por recurso a técnicas de prototipagem rápida que fazem a sinterização de partículas metálicas (Menges et al. 2001).

As condições de processamento por moldação por injeção e as propriedades das peças injetadas diferem consoante o processo de fabrico dos blocos moldantes, uma vez que as propriedades dos blocos moldantes são distintas se forem produzidas por processos convencionais ou produzidas por processos de AM. O tempo de ciclo vai depender diretamente destas propriedades e deve ser ajustado consoante as características térmicas dos materiais utilizados. Um bloco moldante produzido por vazamento de resinas vai sofrer uma contração devida à pressão exercida aquando da injeção do material (Martinho et al. 2008).

## ***2.3 Processos de Fabrico para moldes***

Atualmente a procura por produtos mais personalizados e baratos tende a aumentar, de forma a colmatar esta incessante procura surgiram novos métodos de fabrico, reduzindo a utilização dos moldes convencionais. Os processos de fabrico encontram-se divididos em processo de fabrico por tecnologias convencionais e processos de fabrico por tecnologias de fabrico aditivo.

Para a fabricação de um molde deve-se considerar as propriedades necessárias para a determinação do material a utilizar na cavidade de injeção. Essas propriedades baseiam-se: na fabricação económica; capacidade de tratamento térmico sem problemas; rigidez e resistência suficiente; elevada condutividade térmica; resistência à corrosão e estabilidade dimensional. Além destas propriedades a escolha do material é condicionada por vários fatores, como o custo e tempo de desenvolvimento do produto e ainda o tamanho do lote que se pretende para o molde de injeção (Granja 2003; Menges et al. 2001).

### ***2.3.1 Moldes Convencionais***

Presentemente os moldes mais utilizados na indústria são os moldes convencionais. Um molde convencional é uma ferramenta complexa, que utiliza diversos componentes, e que através dos quais é possível dar a forma pretendida a um polímero. Para tal o polímero segue um complexo ciclo de transformação termo-mecânica. Esta complexidade é proveniente do elevado grau de interação com as restantes áreas de conhecimento envolvidas, tais como, a transferência de calor, mecânica de fluídos, entre outras. Estes moldes são elaborados através de métodos convencionais, tanto na estrutura do molde como nos blocos moldantes.

A grande maioria dos moldes é concebida através da maquinação de um único bloco sólido ou pela composição e ajuste de blocos maquinados separadamente (Glanvill & Denton 1994).

Os moldes convencionais utilizam processos subtrativos para obter a geometria que se pretenda e que têm o seu domínio de aplicação concentrado na produção de peças ou componentes em grande escala.

Os processos convencionais centram-se na maquinação, nomeadamente: torneamento, fresagem, maquinação a alta velocidade e electroerosão (EDM).

O torneamento consiste na maquinação de uma cavidade ou cavidade circular ou parcialmente circular. Este método é rápido e direto, o que proporciona um menor custo nos moldes circulares. O equipamento utilizado neste processo é o torno. Este equipamento é utilizado também para acabamentos finais do molde. Com a evolução surgiram as máquinas CNC (Controlo Numérico Computadorizado), que tem as mesma funcionalidade mas que são controladas por um computador que direciona as ferramentas através de coordenadas (Glanvill & Denton 1994).

Outro processo de maquinação é realizado por fresadoras que estão equipadas com ferramentas de corte (fresas) que através do movimento rotativo, das mesmas e do seu deslocamento num plano definido cortam, desbastam, entalham e perfuram os materiais. Inicialmente estas fresadoras eram quase exclusivamente mecânicas e comandadas por um operador que determinava os movimentos da fresa, através de volantes e manípulos.

A maquinação a alta velocidade, HSM (High Speed Milling) e a HSC (High speed cutting) é caracterizada por mudanças evidentes fase à maquinação universal, no que se refere aos materiais que podem ser maquinados por esta tecnologia, aos equipamentos e respetivos acessórios, as ferramentas e respetivas estratégias de operação. O processo permite a maquinação em materiais de baixa maquinabilidade como ligas duras ou materiais endurecidos. Com a evolução surgiram as máquinas CNC que tem as mesma funcionalidade mas que são controladas por um computador que direciona as ferramentas através de coordenadas. A maquinação universal utiliza fresadoras universais e fresadoras de cabeçote rotativo, enquanto a maquinação em CNC é realizada em máquinas de CNC de 3, 4 ou 5 eixos (El-Hofy 2013).

O processo EDM consiste na maquinação que utiliza a energia elétrica para a remoção do material da peça. O material é removido por vaporização, através de descargas elétricas sucessivas num espaço de tempo muito curto. As partículas do material removido são transportadas por um fluido dielétrico que separa a peça do eletrodo. O material a maquinar tem de ser condutor elétrico, mas as suas propriedades mecânicas não são relevantes. Este

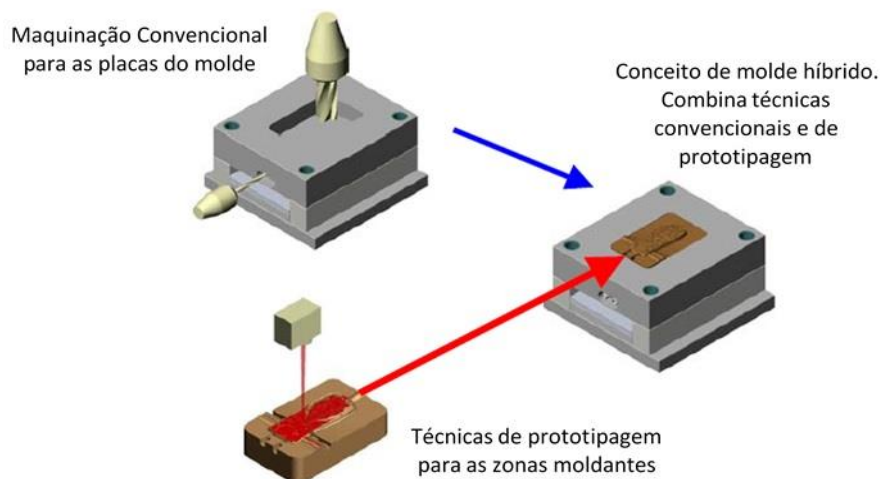
processo pode ser de dois tipos: por penetração ou por fio. Na eletroerosão por penetração o elétrodo toma a forma negativa da forma (cavidade) pretendida na peça, sendo esta formada pelo avanço em direção á peça. A peça e o elétrodo encontram-se numa tina com o líquido dielétrico que é um hidrocarboneto aromático ou parafínico. Na eletroerosão por fio o elétrodo é um fio condutor, geralmente de latão que corta o material em toda a sua espessura. Neste processo o líquido dielétrico é normalmente água desionizada (El-Hofy 2013).

Todos estes processos necessitam de métodos de acabamento superficial, para tal são utilizados o polimento e as retificadoras.

### **2.3.2 Moldes Híbridos**

O conceito de moldes híbridos surgiu devido á necessidade de construir moldes com blocos moldantes fabricados em materiais metálicos ou em materiais sintéticos (Saraiva et al. 1999).

Para produzir os moldes híbridos são utilizadas técnicas de AM, para os blocos moldantes e técnicas de maquinação convencionais para a estrutura do molde, como é demonstrado na Figura 2. 5. As técnicas de AM são também implementadas na fabricação de ferramentas e de elementos protótipos ou produtos finais, recorrendo a processos, materiais e metodologia alternativas de produção em métodos não convencionais (Pontes, Gago, et al. 2005).



**Figura 2. 5 - Conceito de molde híbrido** (Pontes, Queirós, et al. 2005).

O objetivo destes moldes consiste em produzir zonas moldantes de materiais alternativos tão rápido quanto o possível de forma preservar os padrões de qualidade e as características

mecânicas. Sendo que também tem o intuito de reduzir custos e tempos de produção (Segal & Campbell 2001).

Os moldes híbridos são perfeitamente adequados para muitas aplicações industriais. Estes moldes híbridos podem ser usados em pequenas e médias séries de injeção, sendo que o seu ciclo de vida e precisão depende da minimização do desgaste. As propriedades dos materiais dos produtos de AM destacam uma nova fase do *design*.

Para desenvolver moldes híbridos é necessário seguir determinadas regras, tais como:

- Variedade de tamanhos de peças;
- Facilidade na troca de blocos moldantes sem retirar o molde por completo da máquina de injeção;
- Possibilidade de uso de canais de refrigeração conformes, ou seja, canais que contornem a peça;
- Tolerância no posicionamento dos pinos extratores de acordo com a geometria da peça;
- Flexibilidade de adaptação aos sistemas de injeção.

Deste modo, a forma da peça, a estrutura do molde e o *design* mecânico devem ser considerados de forma cautelosa para garantir que o desgaste permaneça nos valores aceitáveis durante a vida útil do molde (Saraiva et al. 1999). Os moldes híbridos de injeção devem garantir um ciclo de moldação por injeção tão curto quanto o possível.

O ciclo de vida destes moldes é ajustado paralelamente à série limitada de produção. Os moldes híbridos são produzidos em materiais mais macios que o aço, sendo que a resistência mecânica e térmica é mais baixa o que facilita a produção de séries pequenas e médias de peças de plástico. A fabricação é mais simples e os prazos de entrega mais cumpríveis quando se empregam materiais macios. Sendo que a utilização deste tipo de materiais levanta problemas relativamente ao ciclo de vida do molde e a influência nas suas propriedades (King & Tansey 2002).

A definição de molde híbrido leva a diversas características que devem ser abordadas, tais como: a diversificação de novos materiais; as melhorias necessárias na força, acabamento

superficial, precisão, repetibilidade e fiabilidade; moldes híbridos deveriam ser produzidos à primeira tentativa, o que significaria a melhoria de computadores de simulação de modo a abonar na confiabilidade do projeto. (Correia et al. 2014)

Este tipo de moldes apresenta diversas vantagens, tais como: a eficiência, reduzindo o desperdício e consumo de energia; agilidade para permitir a personalização; e flexibilidade para a modificação e implementação de conceitos de *design* (Martinho et al. 2008). Contudo apresentam enormes desvantagens em parâmetros importantes, como o comportamento térmico e mecânico dos materiais usados nos posições moldantes, que ainda são pouco conhecidos e compreendidos. O conhecimento das características destes materiais possibilitará otimizar o projeto e fabrico de moldes através de técnicas não convencionais. (Rajitha et al. 1996)

Não é possível selecionar apenas um material que concentre várias características, como a produtividade do processo, baixo custo, rapidez na fabricação e qualidade desejada nas peças num único material (Menges et al. 2001). Idealmente, o material polimérico ou compósito deve ter a capacidade de manter a dureza, resistência à tração e resistência à compressão ao longo do ciclo de injeção (Vasconcelos et al. 2006).

Ao fabricar moldes híbridos, onde são utilizados processos de fabricação aditiva deve-se ter em consideração alguns aspetos relativos ao planeamento do processo. O planeamento fundamenta-se na qualidade do ficheiro STL (Structured Triangular Language) e nos parâmetros de configuração, sendo estes distintos consoante o processo. No entanto, existem aspetos gerais que devem ser considerados, tais como: a orientação da peça, a anisotropia, o efeito degrau, a construção de suportes e o pós-processamento (Hotza 2009).

A orientação da peça apresenta elevada importância para a sua construção, tendo como principal razão evitar defeitos indesejados na construção por adição camada-a-camada. A anisotropia designa-se pela diferença de propriedades mecânicas, em cada eixo. Como a construção se realiza normalmente na direção Z, os eixos X Y da peça vão apresentar fragilidades devido à incorporação do material. Com o intuito de diminuir estas fragilidades adaptam-se os parâmetros do processo, sendo estes, a forma de preenchimento da camada, potência do laser e adaptações de temperaturas para que o material se agregue melhor entre as camadas. A maquinação convencional é caracterizada pela isotropia na direção dos três eixos (Bertol 2008).

O efeito degrau é causado pela espessura nas camadas, que leva a uma falta de

continuidade das camadas afetando a qualidade da peça e a resistência mecânica da mesma. Uma das soluções encontradas para este inconveniente é a diminuição da espessura da camada o que originará um efeito de degrau menor, mas que permanece como inconveniente na peça e que aumenta também o tempo de produção da mesma. Outra forma de reduzir o efeito de degrau é alterar a orientação da peça (Jesus 2005).

A construção de suportes é bastante utilizada nos processos aditivos de forma a garantir a estabilidade do protótipo. A quantidade de suportes deve ser a menor possível tornando-se assim, fundamental a escolha da orientação e construção da peça. A remoção dos suportes poderá ser realizada de três formas distintas: mecanicamente, por agentes corrosivos e por fusão. Quanto ao tipo de remoção a utilizar deve-se ter em consideração as características do material da peça para que não danifique a peça e não perda as propriedades do material (Bertol 2008).

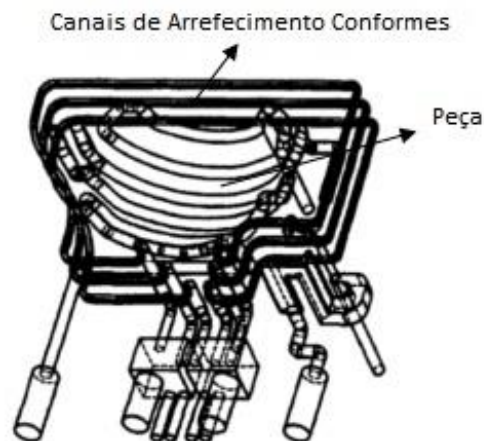
O pós-processamento compreende a finalização de um processo já iniciado na fabricação aditiva. Este pós-processamento ou tarefa de acabamento serve para que a peça fique com as características estéticas desejadas para a peça, dependendo da sua funcionalidade e que são impossíveis de obter na fabricação aditiva. Estas tarefas de acabamento baseiam-se na colagem, polimento, pintura e revestimento. (Hotza 2009)

Nos moldes híbridos deve-se considerar os aspectos térmicos e mecânicos, como a injeção e a contração do material do molde, a dimensão e disposição dos canais de arrefecimento e ainda o sistema de extração. Os compostos de resina utilizados nestes tipos de moldes apresentam uma condutividade térmica reduzida. Assim esta baixa condutividade é que determina que os ciclos de moldação por injeção sejam muito mais longos que nos moldes convencionais devido à baixa taxa de arrefecimento antes da extração (Pouzada 2009). Os compostos de resina apresentam uma condutividade térmica muito inferior à dos metais, o que eleva significativamente o ciclo de injeção. Esta condutividade térmica inferior contribui para um maior regime de temperaturas do molde. Contudo, a temperatura que um molde consegue sustentar deve ser inferior à temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) dessa resina (Ragaert et al. 2006). A temperatura de transição vítrea, temperatura de deflexão e a resistência ao calor são características bastante importantes para avaliar a capacidade do material do molde (Pouzada 2009).

Após a conclusão da fase de injeção é aplicada uma pressão de compactação, denominada de pressurização com o intuito de reduzir o efeito de contração por arrefecimento e evitar o

refluxo do material fundido (Cunha 1991).

O processo de arrefecimento é uma questão-chave nos moldes híbridos. Um sistema de arrefecimento adequado solicita a uniformidade da temperatura das paredes dos moldes e uma redução gradual da temperatura do polímero, de forma a reduzir o tempo de ciclo e cristalizar corretamente o material (Lima et al. 2003). A disposição dos canais de arrefecimento influencia significativamente o arrefecimento uniforme, pois avalia a distribuição de temperatura da superfície moldante e a evolução durante o período de arrefecimento. O sistema de arrefecimento deve ser concebido, tendo em consideração diversos aspetos, tais como: o diâmetro/área da seção transversal, o distanciamento entre os canais e o espaçamento entre o canal e a parede do molde (Malloy 2010). No entanto, aquando da definição das dimensões necessárias para os canais de refrigeração, surgem problemas relacionados com a perda de pressão proveniente da área e da disposição do canal. Zollner, em 1997 apontou o posicionamento mais correto dos canais de arrefecimento, sendo que para os materiais termoplásticos recomendou o valor resultante da relação entre 2,5 e 5%, e para materiais amorfos entre 5 e 10% (Zollner 1997). Os canais conformáveis de refrigeração, como representado na Figura 2. 6 têm sido empregados para a uniformidade de arrefecimento e redução significativa do tempo de arrefecimento (Lima et al. 2003).



**Figura 2. 6 - Canais de arrefecimento conformáveis (Xu et al. 2001).**

Xu e colaboradores concluíram, nas suas pesquisas que o controlo eficiente e uniforme da temperatura do molde recorrendo aos canais de arrefecimento conformáveis é fundamental para a gestão da dinâmica térmica no processo de moldação por injeção de moldes com qualidade e produtividade. Os canais de arrefecimento conformes são facilmente produzidos durante a produção dos blocos moldantes através de técnicas de fabrico rápido (Xu et al. 2001).

Os canais de arrefecimento conformáveis são utilizados possibilitando a circulação de um fluído, normalmente água ou óleo, que flui com o intuito de regular a temperatura do molde. A taxa do fluxo determina o regime de circulação do fluído. Voet *et al.* investigaram a influência do arrefecimento de fluídos turbulentos e laminares em três moldes diferentes e concluíram que a capacidade de arrefecimento aumenta com o aumento do caudal. Concluíram também que a utilização de canais de arrefecimento conformes paralelos é benéfica para o arrefecimento uniforme, visto que a queda de pressão no molde é inferior. Esta configuração de canais de arrefecimento conformes não é aplicável em todos os moldes, pois limita a conexão de todos os circuitos de arrefecimento no molde (Voet et al. 2007). A variação dimensional dos materiais utilizados nas cavidades dificulta o processo de extração, sendo este um parâmetro que se deve ter em consideração aquando da escolha dos matérias e da disposição dos canais de arrefecimento conformes (Bareta et al. 2006).

Os moldes podem sofrer três tipos de desgaste: abrasivo, erosivo e adesivo (Hernández et al. 2005). O desgaste abrasivo advém aquando da remoção do material por partículas duras. As partículas encontram-se na superfície de um segundo material ou podem existir como partículas soltas entre as superfícies. O desgaste erosivo é originado pelas partículas que embatem numa superfície de extremidade ou componente, e o material é removido devido ao impulso. Analogamente o desgaste adesivo ocorre quando duas superfícies sólidas deslizam uma sobre a outra sob pressão. As projeções de superfícies são plasticamente deformadas e, eventualmente soldadas nos locais de maior pressão (Tsouknidas 2011).

Relativamente aos moldes híbridos, o desgaste está relacionado com a contração e atrito durante a extração. Na fase de extração são originadas forças de atrito entre a peça de plástico e o núcleo de material duro. O coeficiente de atrito entre os plásticos e os aços depende da textura de superfície do núcleo e a temperatura de extração (Pouzada et al. 2006). A força de extração é considerada como o resultado da interação entre a parte geométrica da peça, a parte geométrica do molde e material, o material de moldação e as condições de transformação (Pontes & Ferreira 2004).

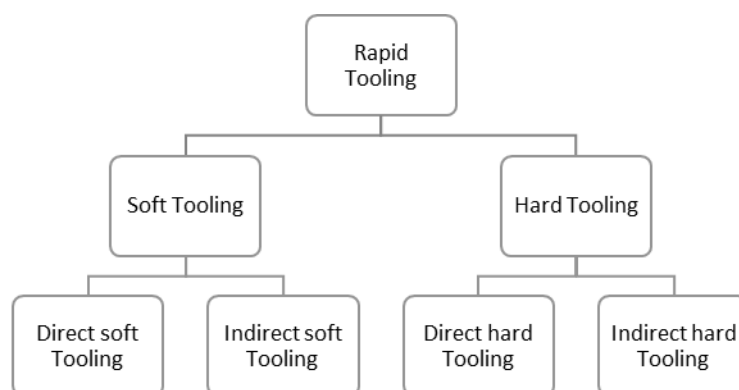
A abertura e extração da peça da máquina de injeção são consideradas operações críticas do ponto de vista produtivo, já que este processo pode ter consequências na qualidade da peça, em termos de empenos, deformações e marcas do sistema de extração na peça plástica processada (Cunha 1991).

Atualmente, os investigadores procuram outros materiais com capacidade estrutural, boa condutividade térmica e que permitam uma modelação rápida e simples (Pouzada 2009).

## **2.4 Processos de Fabrico Aditivo de Moldes**

Relativamente aos moldes de injeção, as tecnologias de fabrico aditivos são consideradas as mais apropriadas, o que fomentou uma nova geração de técnicas de fabricação de ferramenta, ou seja, a ferramenta rápida (RT – Rapid Tooling). RT é definida, por vários autores, através de conceitos distintos. Em 1999, Chua et al, considerou RT como sendo RP (Rapid Prototyping) aplicada à fabricação de moldes para injeção (Chua et al. 1999). Rosochovski et. al, consideram RT uma extensão natural de RP (Rosochowski & Matuszak 2000). Em 2002 King e Tansey referenciaram que RT consiste na aptidão de construir protótipos de ferramentas diretamente contrários aos modelos de CAD (Computer Aided Design), originando um menor período de tempo para apresentar soluções ao mercado (King & Tansey 2002).

Com a constante descoberta de novas técnicas de RP, Chua et al. em 1999 classificou-as como demonstrado na Figura 2. 7. A classificação de Chua et al. tem por base a rigidez dos materiais para as ferramentas, assim como, a estratégias de fabricação direta e indireta (Chua et al. 1999).



**Figura 2. 7 - Classificação de RT (Chua et al. 1999).**

Atualmente, Chua et al, considera RP e AM (Fabricação Aditiva) como sendo um grupo de tecnologias com a capacidade de criação de objetos tridimensionais concebidos de forma aditiva, camada a camada (Chua et al. 2014).

Investigadores e utilizadores das técnicas de AM têm vindo a constatar que este termo não se encontra adequado e que não descreve corretamente as aplicações atuais da tecnologia. A melhoria contínua das máquinas utilizadas nestas tecnologias, demonstra que a qualidade das peças à saída destas tem aumentado e ficado muito próximo do produto final. Muitas peças já são fabricadas nestas máquinas, logo já não são consideradas protótipos. O termo RP tem por base as tecnologias de AM, em que fabricam peças usando um método aditivo. O Comité Técnico do ASTM International (American Society for Testing and Materials) concorda que se deve adotar uma nova terminologia, sendo que até se encontrar a nova terminologia utiliza-se o termo AM (Gibson et al. 2010).

As ferramentas para fabricação de séries curtas, são muitas vezes conhecidas como *soft tooling*, visto serem de maior facilidade de trabalhar que as ferramentas em aço. Ferramentas para fabricação de séries maiores são executadas com *hard tooling* e normalmente utilizam aços ferramenta. Nos processos de *direct tooling* a ferramenta é obtida através de processos AM, ao contrário dos processos *indirect tooling* (Chua et al. 1998).

AM é considerado por ser um método rápido para a produção de moldes de injeção a curto e médio prazo, o que implica processos diretos e indiretos.

Os processos indiretos envolvem sempre a fabricação de um *master* por um processo de AM, adequado para as especificações do produto final e as técnicas apropriadas para produzir os blocos moldantes (Pham & Dimov 2003). Moldes de silicone, moldes de resina e moldes produzidos por pulverização de pós metálicos estão relacionados com a produção de moldes de injeção por processos indiretos de AM (Chua, C. K. et al. 1999).

Os processos diretos produzem componentes do molde (normalmente blocos moldantes) diretamente dos equipamentos de prototipagem rápida, sem a necessidade de usar processos intermédios. Estes processos iniciam com um modelo em CAD 3D, que é convertido para um ficheiro STL (Structured Triangular Language) que é utilizado pelo equipamento do processo de AM. As tecnologias AM utilizadas em processos diretos são: Selective Laser Sintering (SLS), Laminated Objects Manufacturing (LOM), Fused Deposition Modeling (FDM), Polyjet e 3D Printing (3 DP) (Queirós 2005).

As tecnologias de AM foram desenvolvidas para criar modelos de visualização dos produtos e como eles são desenvolvidos, sendo que os modelos podem ser muito mais úteis que os desenhos. Deste modo as tecnologias de AM têm sido empregadas para fornecer informações importantes como os “ três f’ : *form, fit e function*. Mas não é correto afirmar que AM apenas é útil para criação de modelos. AM quando usada em conjunto com outras tecnologias para formar cadeias de processamento, pode ser usado para encurtar significativamente os tempos e custos de desenvolvimento da peça. Recentemente, algumas destas tecnologias têm sido desenvolvidas para que as peças aquando da saída das máquinas se encontrem como produto final. O que esclarece a evolução da terminologia de RP para AM (Gibson et al. 2010).

A tecnologia AM encontra-se mais aplicada a nichos de mercado. O principal objetivo desta tecnologia consiste em oferecer uma rápida e acessível forma de obter um *feedback* durante o processo de desenvolvimento do produto. Inicialmente a variedade de materiais concentrava-se em volta de materiais poliméricos, ceras e laminados de papel, sendo que a gama de materiais tem vindo a aumentar ao longo dos anos. Atualmente varia de materiais poliméricos, cerâmicos e metais, basicamente qualquer material que possa ser fundido e solidificado novamente (Gibson et al. 2010).

AM permite criar peças personalizadas diretamente de modelos 3D armazenados em CAD, sem incorrer em penalidades de custo na fabricação, não precisando de ferramentas nem de moldes. Esta tecnologia permite a produção de moldes funcionais complexos e integrados num processo de apenas um único passo, reduzindo potencialmente a necessidade de trabalhos de montagem (Weller et al. 2014).

As tecnologias de AM ainda apresentam, várias restrições que delimitam a sua aplicação. Estas restrições consistem nos materiais disponíveis, escolha de cores e acabamentos de superfície, assim como o limite das dimensões do produto que é restringido pelo espaço de construção das máquinas de AM. As faltas de resistência a influências ambientais, a cedência da peça quando exposta a elevado *stress* e a falta de precisão também são consideradas restrições (Lipson & Kurman 2013). As características de AM encontram-se enumeradas na Tabela 2. 1, como vantagens e limitações (Weller et al. 2014).

**Tabela 2. 1 – Características tecnológicas de AM (Weller et al. 2014).**

<b>Vantagens</b>	<b>Limitações</b>
Fabrico direto de produtos 3D sem necessidade de ferramentas ou moldes.	Espaço limitado a matérias “imprimíveis” (por exemplo, materiais não combinados) e limite físico do espaço de construção.
Mudança de <i>design</i> de produto sem penalidade nos custos de fabricação.	Questões relacionadas com a qualidade das peças: reprodutibilidade limitada de peças, falta de resistência a influências ambientais.
Aumento da complexidade de <i>design</i> sem penalidade de custos na fabricação.	Necessidade de melhoria no acabamento superficial.
Elevada flexibilidade de fabricação: produtos podem ser produzidos em qualquer ordem aleatória sem penalidade de custos.	Sem ferramentas de <i>design</i> nem diretrizes para explorar todas as funcionalidades de AM.
Produção de peças de <i>design</i> funcionalmente integrado numa etapa.	Baixa velocidade de produção.
Menos desperdícios e menos matéria-prima necessária.	Mão-de-obra especializada e com experiência.

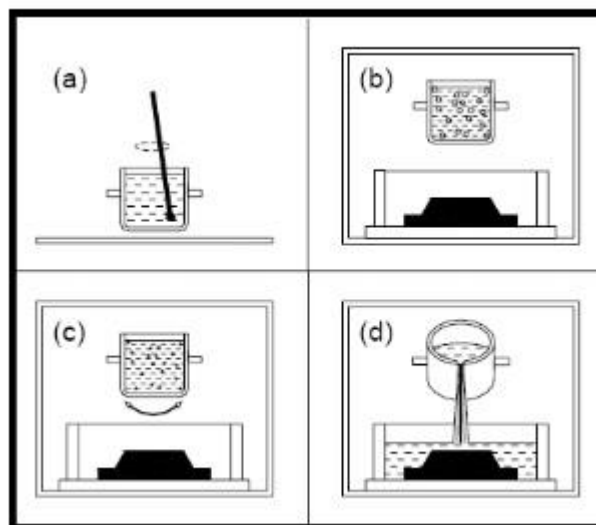
As técnicas de AM envolvem uma série de procedimentos entre o ficheiro CAD e o produto final, como apresentado na Figura 2. 8. Todas as peças AM começam a partir de um *software* que descreve totalmente a geometria externa em CAD. Após a obtenção do ficheiro CAD, este é convertido para um ficheiro STL, que descreve as superfícies exteriores do modelo CAD original bem como a forma de construção camada a camada. Transfere-se este ficheiro STL para a máquina a usar, e configura-se a mesma com os parâmetros de construção (limitações de materiais, fonte de energia, espessura de camada, tempos, etc...). A máquina procede à construção da peça que pode ser construída sem supervisão. Após a construção concluída, as peças devem ser removidas da mesma e realizado o pós-processamento. As peças estão agora prontas a ser utilizadas se não necessitarem de um processo de acabamento (Gibson et al. 2010)



**Figura 2. 8 - Fases do processo genérico de AM (Gibson et al. 2010).**

Os moldes de silicone e os moldes de resina são produzidos por fundição no processo de vácuo. As resinas são espalhadas (em vácuo) em torno da matriz para produzir os componentes do molde. O *master*, modelo físico da peça, é a referência utilizada para a criação da peça. A função essencial do *master* consiste na reprodução da peça ou componente do molde com precisão e textura de superfície (Pham et al. 1998). Os blocos moldantes dos moldes de silicone são utilizados para moldar uma variedade de materiais a baixas temperaturas, baixo volume e com processo de baixa pressão (Du et al. 2002). Estes moldes são bastante utilizados para a produção de peças plásticas em poliuretano (Chua et al. 1999). Este tipo de moldes são utilizados para a fundição de resinas com a finalidade de produzir os elementos de moldação para os moldes híbridos. A duração do molde de silicone encontra-se dependente do acabamento superficial da matriz (Sabino-Neto et al. 2008). A flexibilidade dos moldes de silicone representa a sua maior vantagem, visto facilitar a desmoldagem da peça do molde independentemente da complexidade da geometria. Este tipo de moldes, ao utilizar o processo de fundição necessita de um menor intervalo de tempo para a obtenção de geometrias comparativamente ao corte convencional (Ramos et al. 2003).

O material compósito com base de resina pode ser utilizado para produzir blocos moldantes de duas formas diferenciadas. Por fundição num processo de vácuo num molde de silicone, normalmente produz o elemento de uma só vez. Ou por uma fundição num processo de vácuo numa estrutura preparada com a matriz, canais de refrigeração e canal de entrada. Neste último processo o molde tem maior possibilidade de defeito, devido ao manuseamento dos materiais antes da fundição dos mesmos (Lima et al. 2003). A resina é preenchida com pó metálico (habitualmente alumínio) para melhorar a transferência de calor e reduzir o desgaste da ferramenta (Vasconcelos et al. 2006).



**Figura 2. 9 - Diagrama de vazamento de resinas** (Vasconcelos et al. 2004).

O processo de vazamento de resinas encontra-se representado na Figura 2. 9.

Os moldes de resinas é o método mais rápido de concluir pequenas séries de peças funcionais através de moldação por injeção (Pontes, Queirós, et al. 2005).

Os processos de AM podem ser classificados de diversas formas. Ao longo de diversos anos, vários pesquisadores sugeriram diferentes formas de os classificar. A classificação mais atual e completa é a demonstrada na Tabela 2. 2.

**Tabela 2. 2- Classificação dos processos de AM segundo Gibson (Gibson et al. 2010).**

<b>Processo de Fotopolimerização</b>	<b>Processo de Extrusão</b>	<b>Processo de Fusão de Pó</b>	<b>Processo de Impressão</b>	<b>Processo de Laminação</b>	<b>Processo de deposição de feixe</b>
SL.	FDM.	SLS, SLM.	3 DP Polyjet	LOM, SSM, PLT, SDM.	BD, LENS, DLF, DMD, LBMD, LFF DMLS.

Este trabalho segue a classificação realizada por (Gibson et al. 2010) e nas: Tabela 2. 3 à Tabela 2. 8 encontram-se descritos os métodos mais utilizados na indústria atualmente

**Tabela 2. 3 - Descrição de métodos de fotopolimerização das técnicas de AM** (Gibson et al. 2010; Rosochowski & Matuszak 2000).

	Processo	Descrição	Materiais	Vantagens	Desvantagens	Aplicações
Fotopolimerização	SL	<p>Laser incide (através de espelho) numa resina fotossensível provocando a fotopolimerização, solidificando o material numa camada. Processo continua até concluir as camadas necessárias.</p> <p>Camada com 0.002 in de espessura.</p>	<p>Resinas acrílicas e epóxicas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>•ABS;</li> <li>•PE;</li> <li>•PP.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Bom acabamento superficial e precisão.</li> <li>•Elevada velocidade de construção;</li> <li>•Peças complexas;</li> <li>•Modelos ocios.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Processo lento;</li> <li>•Estruturas de suporte;</li> <li>•Pós-cura e pós-processamento;</li> <li>•Material com custo elevado, tóxico e sensível á luz solar.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Protótipos;</li> <li>•Peças com elevada precisão e detalhe;</li> <li>•Modelos médicos;</li> <li>•Peças de utilização final.</li> </ul>

**Tabela 2. 4 - Descrição dos métodos de extrusão das técnicas de AM** (Fischer 2014; Gibson et al. 2010; Lee et al. 2014).

	Processo	Descrição	Materiais	Vantagens	Desvantagens	Aplicações
Extrusão	FDM	<p>Numa câmara, a uma temperatura ligeiramente inferior ao ponto de fusão do material a extrudir é passado um filamento do material a ser extrudido por uma microesfera e posteriormente depositado na plataforma de construção. O filamento é alimentado sob a forma de fio de uma bobine, depositado no cabeçote de extrusão. Existem duas microfieiras (uma para a peça e outra para os suportes) que se deslocam das direções X e Y.</p> <p>Camada com 0.014 in de espessura</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•ABS;</li> <li>•Nylon;</li> <li>•PC,</li> <li>•PC-ISO;</li> <li>•PC-ABS;</li> <li>•ABS-M30i;</li> <li>•ULTEM 9085;</li> <li>•PPSF.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Tecnologia simples;</li> <li>•Peças com resistência ao calor, produtos químicos e ambientes húmidos;</li> <li>•Uso simultâneo de dois materiais;</li> <li>•Peças com cavidades complexas;</li> <li>•Peças biocompatíveis;</li> <li>•Não necessita pós-cura.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Processo lento com taxa de fluxo de material limitada;</li> <li>•Processo com baixa precisão;</li> <li>•Criação de suportes para as superfícies inclinadas;</li> <li>•Pós-processamento para a remoção dos suportes;</li> <li>•Baixa resistência mecânica na direção do Z.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Protótipos funcionais;</li> <li>• Peças de uso final;</li> <li>• Ferramentas de fabricação.</li> </ul>

**Tabela 2. 5 - Descrição dos métodos de Fusão de Pó das técnicas de AM (Gibson et al. 2010; Freitas et al. 2012).**

	<b>Processo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Materiais</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>	<b>Aplicações</b>
<b>Fusão de pó</b>	<b>SLS</b>	<p>Camada de pó espalhada numa plataforma. O laser é direcionado para a plataforma consoante o ficheiro CAD e sinteriza o pó tornando-o sólido. A plataforma é movida para baixo e uma nova camada de revestimento em pó é espalhada e o processo repetido até á conclusão da peça.</p> <p>Camada com 0.022 in de espessura.</p>	<p>Polímero, metal, cerâmica e vidro.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Alumínio;</li> <li>• Fibras de Carbono;</li> <li>• Nylon.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rápido, preciso e produz peças complexas funcionais.</li> <li>• Não necessita de suportes de construção,</li> <li>• Vasta variedade de materiais.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mau acabamento superficial;</li> <li>• Elevado custo do equipamento;</li> <li>• Elevado consumo energético do laser.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Insetos de moldes de injeção;</li> <li>• Eletrónica;</li> <li>• Embalagens;</li> <li>• Medicina;</li> <li>• Componentes aeroespaciais.</li> </ul>
	<b>SLM</b>	<p>Processo semelhante a SLS. Mas neste processo são utilizados dois lasers de elevada potencia que fundem os pós metálicos numa atmosfera inerte.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ligas metálicas;</li> <li>• Pós poliméricos;</li> <li>• Pós cerâmicos;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Otimizar o uso de material;</li> <li>• Geometria complexa;</li> <li>• Peças funcionais.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fornecimento de gases inertes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Medicina;</li> <li>• Indústria aeroespacial.</li> </ul>

**Tabela 2. 6 - Descrição dos métodos de Impressão das técnicas de AM** (Stratasys 2015a; 3DSystems 2015; Fischer 2014; Zonder & Sella 2014).

	<b>Processo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Materiais</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>	<b>Aplicações</b>
<b>Impressão</b>	<b>3D Printing</b>	Distribuição de uma camada de pó aglutinante, através da passagem de rolos, sobre a plataforma de construção. A solidificação do pó ocorre após a passagem de um jato que deposita líquido ligante sobre o pó.	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Compósitos;</li> <li>•Materiais para fundição;</li> <li>•Elastómeros;</li> <li>•Ceras fundidas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Peças complexas e com boa precisão;</li> <li>•Versatilidade de aplicações;</li> <li>•Peças de cor;</li> <li>•Precisa de suportes;</li> <li>•Não gera desperdício;</li> <li>•Elevada velocidade.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Dificuldade na remoção do pó não ligante em peças ocas;</li> <li>•Dimensão reduzida de protótipos;</li> <li>•Rugosidade na superfície;</li> <li>•Pós-processamento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Medicina;</li> <li>• Indústria aeroespacial,</li> <li>• Indústria automóvel;</li> <li>• Produtos comerciais.</li> </ul>
	<b>Polyjet</b>	Utiliza um sistema de jato de tinta para deposição da resina em pequenas gotas sobre uma bandeja. Após a deposição do material é lançada uma luz UV para curar a camada. Camada com 0.040 in de espessura	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Resinas da família FullCure.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Bom acabamento superficial;</li> <li>•Rápida fabricação;</li> <li>•Elevada flexibilidade;</li> <li>•Não requer pós-cura.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Necessidade de suporte em regiões não conectadas do produto;</li> <li>•Pós-processamento para remoção dos suportes;</li> <li>•Pequena variedade de materiais.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Protótipos detalhados;</li> <li>• Formas complexas com detalhes intrincados e superfícies lisas;</li> <li>• Peças com cor e material diverso.</li> </ul>

**Tabela 2. 7 - Descrição dos métodos de Laminação das técnicas de AM** (Gibson et al. 2010; Rosochowski & Matuszak 2000).

	Processo	Descrição	Materiais	Vantagens	Desvantagens	Aplicações
Laminação	LOM	Deposição sucessiva de folhas de materiais possíveis de processar por esta tecnologia. Após a deposição da segunda folha passa um rolo com a capacidade de ativar o adesivo das folhas de material unido-as.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Polímero;</li> <li>• Papel;</li> <li>• Cerâmica;</li> <li>• Tecido;</li> <li>• Folhas metálicas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Não necessita pós-cura nem de suportes;</li> <li>• Processo rápido (laser percorre só o perímetro da peça e não a área);</li> <li>• Possibilidade de fazer perfurações na peça;</li> <li>• Peças de grandes dimensões.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dificuldade da adesão de várias camadas;</li> <li>• Pouca variedade de materiais;</li> <li>• Limitações na aplicabilidade das peças devido à não flexibilidade do material;</li> <li>• Necessidade de tratamento de superfície.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Protótipos e testes de montagem.</li> </ul>

**Tabela 2. 8 - Descrição dos métodos de Deposição de feixe das técnicas de AM** (Bocking et al. 2002; Gibson et al. 2010).

	Processo	Descrição	Materiais	Vantagens	Desvantagens	Aplicações
Deposição de feixe	DMLS	Sinterização de pós 100% metálicos. Através do <i>software</i> do equipamento o laser é direcionado para as partes a fundir, fundindo o pó metálico. A plataforma desce e é realizada a camada seguinte e assim consecutivamente. Camada com 0.006 in de espessura	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Liga Alumínio-Silício-Magnésio;</li> <li>• Superliga Cobalto-Cromo-Molibdénio.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Durabilidade elevada;</li> <li>• Processo mais rápido que os convencionais;</li> <li>• Peças com tolerâncias dimensionais inferiores a 0,05 mm;</li> <li>• Não necessita de pós-processamento;</li> <li>• Boa resistência mecânica.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Peças pequenas;</li> <li>• Precisa de polimento;</li> <li>• No caso da utilização da liga de cobre, a vida útil do molde é baixa, para baixas pressões de injeção;</li> <li>• Elevada rugosidade;</li> <li>• Elevado custo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Medicina;</li> <li>• Indústria aeroespacial;</li> <li>• Indústria automóvel;</li> <li>• Joalharia.</li> </ul>

## 2.5 Fluxo de Operações na Produção de Moldes Convencionais e Moldes Híbridos

Os moldes convencionais e os moldes híbridos têm tempos de fabricação diferentes. Como já referenciado anteriormente, os moldes convencionais são fabricados através de processos convencionais e os moldes híbridos são fabricados por processos convencionais (a estrutura do molde) e processo de fabricação aditiva (os blocos moldantes).

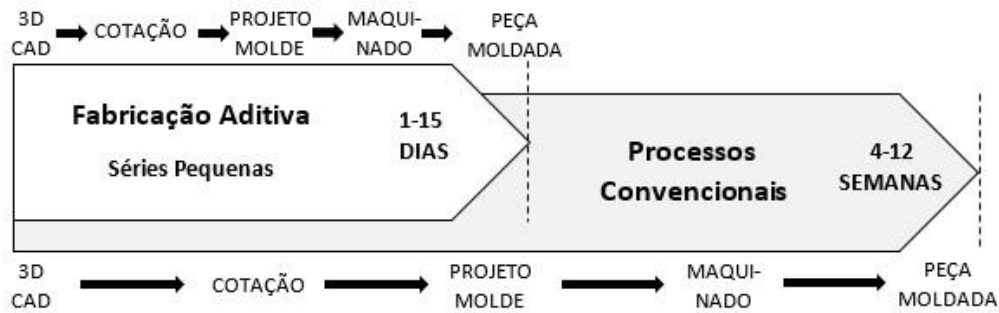


Figura 2. 10 - Fluxo de operações para Fabricação Aditiva e Processos Convencionais (Holtz 2015).

Na Figura 2. 10 é possível identificar e comparar os passos necessários para fabricação de moldes através de processos de fabricação aditiva, para séries pequenas, e os processos convencionais. Estes dois métodos necessitam dos mesmos processos, entre eles: o modelo 3D CAD do molde, a cotação do molde, o projeto do molde, a maquinação do molde e por fim a peça moldada. Os processos convencionais são muito mais morosos que os de fabricação aditiva como mostrado no fluxo acima, em que os moldes realizados através de fabricação aditiva demoram, normalmente, entre 1 a 15 dias, enquanto os moldes nos processos convencionais demoram em média entre 4 a 12 semanas.

Esta diferença de tempos para a produção dos moldes, quer moldes convencionais, quer moldes híbridos vai influenciar no seu custo total. Outros fatores que vão influenciar nesse custo final são os materiais utilizados, a complexidade do molde e os acabamentos correspondentes a cada molde.

## 2.6 Número de Peças obtidas e Custos de Processos.

AM permite a individualização do produto sem penalidades de custos. Ao adicionar o material, camada a camada, até concluir o processo, esta tecnologia utiliza menos processos e menos restrições de *design*. Além disto, o aumento de complexidade do projecto não leva a

que o custo de produção associado seja superior, ao contrário das tecnologias convencionais de produção em que os custos aumentam proporcionalmente à complexidade do desenho do produto (Gibson et al. 2010).

As características económicas de AM podem ser vantajosas ou ter determinadas limitações como se encontra descrito na Tabela 2. 9.

**Tabela 2. 9 - Características económicas de AM adaptado de Weller (Weller et al. 2014).**

<b>Características económicas de AM</b>	
<b>Vantagens</b>	<b>Limitações</b>
Simplificação da inovação do produto: iterações não são dispendiosas e os produtos finais são rapidamente disponíveis.	Custos elevados de produção (elevados custos de matérias-primas e intensidade de energia).
Preços <i>premium</i> podem ser implementados consoante a personalização e a melhoria funcional dos produtos.	Não se aplica a economia de escalas.
Cliente tem a facilidade de <i>co-design</i> os produtos sem penalidades no custo de fabricação.	Normas de qualidade em falta.
Resolução do dilema <i>scale-scope</i> <sup>1</sup> : sem penalidades de custo de fabricação para uma maior variabilidade de produtos.	Oferta de produtos limitada a viabilidade tecnológica (espaço de solução, reprodutibilidade, qualidade, velocidade).
Inventários podem tornar-se obsoletos quando se fabrica por encomenda.	Direitos de propriedade intelectual e limitações de garantia relacionados.
Redução da etapa de montagem com a produção de produtos funcionais numa só etapa.	Operadores com formação especializada.
Redução de barreiras á entrada no mercado.	Mão-de-obra especializada e com experiência
Produção localizada.	
.Vantagem de custo nos países com baixos salários pode diminuir a longo prazo.	

A diferença de tempo de fabrico entre os processos de fabrico aditivo e dos processos convencionais é elevada, mas também vai ser díspar quanto ao número de peças possíveis de

<sup>1</sup> Dilema *scale-scope*: a economia de *scale* traduz os fatores que conduzem à redução do custo médio de produção de um determinado bem à medida que a quantidade aumentam, já a economia *scope* refere-se a quando é mais económico realizar uma produção conjunta do que separadamente (Weller et al. 2014).

injetar nos moldes após o seu fabrico. Normalmente com um molde fabricado por fabricação aditiva podem ser obtidas de 1 a 50 peças em 1 a 7 dias de trabalho, já num molde de processos convencionais podemos obter 1 a 200 peças em apenas 1 a 3 dias de trabalho. (Holtz 2015)

Na Tabela 2. 10 verificam-se valores representativos de moldes de injeção de séries curtas. Estes valores são meramente representativos, uma vez que o número de peças varia consoante vários fatores como a geometria da peça, material, entre outros.

**Tabela 2. 10 - Tabela comparativa de produção de peças entre técnicas convencionais e de AM.**

<b>Técnica de Fabrico</b>	<b>SLS (polímero)</b>	<b>SLS (metal)</b>	<b>Vazamento de resinas</b>	<b>Fabricação convencional</b>
<b>Nº de peças</b>	200	100000	100 - 2000	1000000

Os moldes desenvolvidos através de AM podem ter uma enorme complexidade no projeto não correspondem a custos de produção mais elevados, ao contrário dos moldes convencionais. Casos de estudo demonstram ainda que as tecnologias AM necessitam de uma quantidade de matéria-prima substancialmente inferior e que tem uma redução significativa do desperdício de matéria-prima opostamente às tecnologias convencionais. (Lipson & Kurman 2013)

## ***2.7 Objetivo e Motivação deste Trabalho***

Este trabalho visa o estudo do custo de obtenção de moldes comparando os processos de fabricação convencional e métodos de fabricação aditiva. Para tal recorreu-se a uma estrutura intermutável onde podem ser substituídas os blocos moldantes (bucha e cavidade). Desta forma é possível comparar os custos de fabricação de diferentes processos.

Atualmente existem bastantes estudos sobre moldes convencionais, mas poucos que comparem as suas características e custos com os moldes híbridos. Deste modo este trabalho torna-se relevante para aumentar o conhecimento e estudo sobre este mesmo tema especialmente na relação de custos entre os diferentes processos de obtenção de cavidades moldantes.

## 3. Casos de Estudo

---

Para o desenvolvimento deste projeto recorreu-se ao projeto de Domingues (Domingues 2015) que consistia na produção de um bloco moldante para análise comparativa do uso de tecnologias de fabrico rápido no processo produtivo de blocos moldantes para moldes de injeção de plásticos. A estrutura do molde utilizada foi sempre a mesma, uma vez que os vários blocos moldantes, realizados por diversos processos, são intermutáveis nesta estrutura. Assim é possível comparar os custos dos diferentes processos de fabrico.

### 3.1 Bloco Moldante

Para a bucha do bloco moldante foi utilizada uma chapa adquirida através do catálogo da *Hasco*. Esta chapa apenas foi retificada e depois utilizada como bucha.

A cavidade tem as dimensões de 220\*160\*46 mm como se encontra ilustrado abaixo, na Figura 3. 1. O bloco moldante foi utilizado para injetar dois tipos diferentes de provetes.

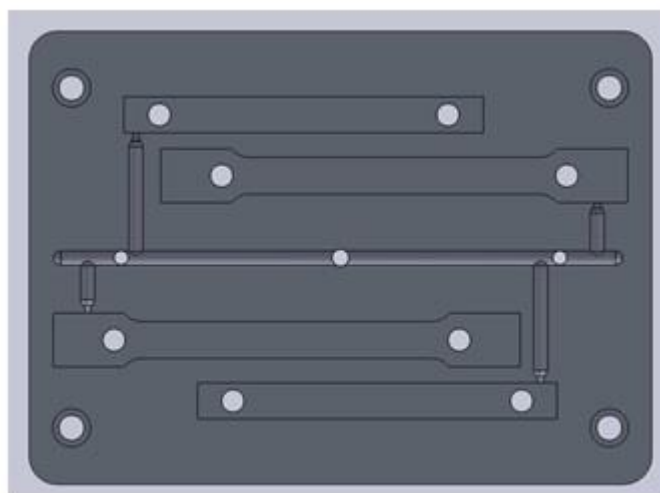


Figura 3. 1 - Cavidade do molde realizado por Domingues (Domingues 2015).

### 3.2 Processos Produtivos (Bloco Moldante)

Os processos produtivos estudados neste projeto são: Maquinação Convencional; Vazamento de Resinas; FDM; SLS e Polyjet. A estrutura do molde é igual para todos os blocos moldantes, independente do processo de produção.

A DMG-DMU 125 P duoBLOCK®, representada na Figura 3. 2, é a CNC utilizada para a fresagem necessária para o desenvolvimento dos blocos moldantes em alumínio 7022 e também em aço P20.



Figura 3. 2 - CNC DMG-DMU 125 P duoBLOCK® (Mori 2014).

Na Tabela 3. 1 verificam-se algumas das características associadas à CNC DMG-DMU 125 P duoBLOCK®. Mais características deste mesmo equipamento encontram-se no Anexo I.

Tabela 3. 1 - Características da CNC DMG-DMU 125 P duoBLOCK® (Mori 2014).

<b>Área de trabalho</b>	Eixo Z X / Y /	1250x1250x1000 (mm)
<b>Superfície de trabalho</b>	Dimensão superfície de trabalho	Ø 1250 x 1100 (mm)
	Máxima carga	2500 (kg)

Para este equipamento foi solicitado cotação para a produção convencional de uma cavidade em Alumínio 7022 e em aço P20. Estes são dois materiais de excelência para a produção de moldes. Para estes materiais podemos identificar as características na Tabela 3. 2.

**Tabela 3. 2 - Características mecânicas e físicas do alumínio 7022 e do aço P20.**

	<b>Alumínio 7022</b>	<b>Aço P20</b>
<b>Condutibilidade térmica</b>	150 W/m °K	52 W/m °K
<b>Densidade</b>	2,71 Mg/m	7,80 Mg/m <sup>3</sup>
<b>Coefficiente de expansão térmica</b>	23,6x10 <sup>-6</sup> /°K	11,7 x10 <sup>-6</sup> /°K
<b>Calor específico</b>	870 J/Kg °C	12 J/Kg °C
<b>Peso específico</b>	2,76 gr/cm <sup>3</sup>	7,8 gr/cm <sup>3</sup>
<b>Módulo de Elasticidade</b>	72 GPa	200 GPa
<b>Dureza Brinell (500kg/10mm)</b>	165/180 HB	250 HB

Através da tabela podemos comparar as características mecânicas e física do Alumínio 7022 e do Aço P20. Verifica-se que o alumínio apresenta uma maior condutibilidade térmica, o que significa que o Alumínio P20 é considerado um dissipador de calor relativamente ao Aço P20, pois a sua capacidade de libertar calor é superior. A densidade, o peso específico e a dureza de Brinell do alumínio 7022 são inferiores às do aço P20; os valores do coeficiente de expansão térmica e do calor específico são mais elevados para o alumínio 7022. Relativamente ao Módulo de elasticidade o do aço P20 é bastante superior ao do alumínio 7022.

Para os blocos moldantes por vazamento de resinas, a resina definida foi a Biresin L74, sendo esta formada por resina e endurecedor. No estudo realizado por Domingues (Domingues 2015) foram produzidos dois blocos moldantes iguais, em que um foi reforçado com cargas metálicas de 40% de Al e o outro reforçado com cargas metálicas de 60% de Al.

O vazamento de resinas deve ser realizado através do vazamento da resina, previamente preparada, na chapa metálica com o sistema de refrigeração e os pernos de retorno. Os parâmetros para a utilização da resina são fornecidos pelo fornecedor da mesma. As características da Biresin L74 encontram-se descritas no Anexo II

Para o bloco moldante produzido por vazamento de resinas o sistema de refrigeração definido foi em forma de serpentina utilizando tubos de cobre. O tubo de cobre usado para definir o sistema de refrigeração detém um diâmetro exterior de 6 mm e 3 mm interior e deve ser colocado a cerca de 20 mm de profundidade. Para evitar dificuldades na extração da peça ou na fixação dos blocos moldantes à chapa, deve proceder-se a uma análise dimensional do sistema de refrigeração, prevenindo, deste modo, que a serpentina seja disposta por cima das furações da chapa e da resina. Depois da seleção da chapa da bucha, esta foi retificada tendo em consideração o dimensionamento do sistema de extração, de injeção, de guiamento e de fixação do molde (Domingues 2015).

A fabricação por FDM consiste na produção de objetos a partir da construção por camadas. O material utilizado neste processo de fabrico é o ABSplus. Este processo de AM é realizado numa impressora 3D Dimension SST 1200, como está representado na Figura 3. 3.



**Figura 3. 3 - Impressora 3D Dimension SST 1200 (Stratasys 2015b).**

As caraterísticas deste equipamento encontram-se descritas na tabela Tabela 3. 3

**Tabela 3. 3 - Caraterísticas da Impressora 3D Dimension SST 1200 (Stratasys 2015b).**

<b>Material</b>	ABSplus disponível em 9 cores
<b>Material de suporte</b>	SST 1200 es (Solúvel)
<b>Espaço de Construção</b>	254 x 254 x 305 (mm)
<b>Espessura da camada</b>	0,013 in

As características do ABSplus estão representadas na Tabela 3. 4, encontrando-se mais completas no Anexo III.

**Tabela 3. 4 - Características do ABSplus (Stratasys 2015a).**

<b>Resistência à tração</b>	22 MPa
<b>Módulo de elasticidade</b>	1 627 MPa
<b>Resistência à flexão</b>	41 MPa
<b>Módulo de flexão</b>	1 834 MPa

A etapa inicial no processo de FDM é a passagem do filamento do material termoplástico a ser extrudido através de uma microfieira, sendo depositado na plataforma de construção posteriormente. O filamento de material é alimentado sobre a forma de fio por uma bobine, sendo depositado através do cabeçote de extrusão. Utilizam-se duas microfieiras, sendo uma destinada ao material de construção da peça e a outra ao material de construção do suporte da peça. As microfieiras seguem orientações nos planos x e y. Após cada camada, a plataforma desloca-se verticalmente, segundo o plano do z, para que a guia deposite uma nova camada sobre o material da camada anterior. O filamento extrudido é aquecido até se tornar pastoso, estimulando melhor a adesão à camada anterior. Este procedimento realiza-se até que a peça se encontre totalmente construída. Todo este processo ocorre numa câmara que se encontra a uma temperatura ligeiramente inferior ao ponto de fusão do material a extrudir. O suporte estrutural é removido após a conclusão da peça. A remoção do material de suporte pode ser realizada de duas formas distintas, consoante o material. Se o material for mais frágil deverá ser removido manualmente. Se o material for menos frágil deve-se imergir numa solução líquida aquecida apropriada para a remoção destes suportes (Fischer 2014; Gibson et al. 2010; Lee et al. 2014).

Outro método estudado neste projeto é o SLS. O material utilizado é o DuraForm® PA plastic. O equipamento utilizado para este processo de fabrico aditivo é sPro™ 60 HD HS, como é ilustrada na Figura 3. 4.



**Figura 3. 4 - Equipamento sPro™ 60 HD (3DSystems 2015)**

As características deste equipamento encontram-se descritas na Tabela 3. 5

**Tabela 3. 5 - Características da sPro™ 60 HD (3DSystems 2015).**

<b>Espaço de Construção</b>	381 x 330 x 437 (mm)
<b>Espessura da camada</b>	0,003 in
<b>Velocidade de Construção</b>	6 m/s

As características associadas ao material utilizado pela sPro™ 60 HD, o DuraForm®PA plastic estão descritas na Tabela 3. 6, e mais detalhadamente no Anexo IV.

**Tabela 3. 6 - Características do DuraForm®PA plastic (3DSystems 2015).**

<b>Resistência à tração</b>	43 MPa
<b>Módulo de elasticidade</b>	11 586 MPa
<b>Alongamento à tração</b>	6%
<b>Resistência à flexão</b>	48 MPa
<b>Módulo de flexão</b>	1 387 MPa

Neste processo, o material de construção, em pó, encontra-se armazenado em reservatórios junto ao recipiente de construção. O processo começa com a deslocação de um rolo, na câmara de construção, que nivela o material a sinterizar. A câmara deve encontrar-se à temperatura necessária para aquecer o material em pó, mas não o fundindo. O laser incide num espelho incidindo no material em pó, de modo a sinterizar as interfaces das partículas de pó. Após a construção da camada, a plataforma desloca-se no sentido vertical à distância correspondente ao valor da espessura da camada seguinte, e o rolo percorre a câmara de construção para que o material seja nivelado. O material é sinterizado através do laser e este processo é repetido até à conclusão da peça. A peça final apresentará uma estrutura parcialmente porosa e com rugosidade, sendo necessário proceder ao acabamento superficial, de forma a garantir impermeabilidade e baixa rugosidade (Freitas et al. 2012; Gibson et al. 2010; 3DSystems 2015)

E por fim, polyjet é mais um processo de fabricação aditiva estudado neste projeto. A Objet Eden 330, representada na Figura 3. 5, é o equipamento utilizado neste método. O material utilizado é o FullCure® 720.



**Figura 3. 5 - Equipamento Objet Eden 330 utilizado em Polyjet (Stratasys 2015a).**

As características deste equipamento encontram-se descritas na seguinte Tabela 3. 7.

**Tabela 3. 7 - Características da Objet Eden 330(Stratasys 2015a).**

<b>Espaço de Construção</b>	340 x 330 x 200 (mm)
<b>Espessura da camada</b>	0,040 in
<b>Precisão</b>	0,1 mm

As características do FullCure® 720, utilizado pela Objet Eden 330 encontram-se descritas na Tabela 3. 8, bem como no AnexoV.

**Tabela 3. 8 - Características do FullCure® 720 (Stratasys 2015a).**

<b>Resistência à tração</b>	60,3 MPa
<b>Módulo de elasticidade</b>	2 870 MPa
<b>Resistência à flexão</b>	75,8 MPa
<b>Módulo de flexão</b>	1 718 MPa

Este processo permite construir rapidamente um modelo físico com elevado detalhe e rigor dimensional, a partir de um desenho 3D, construindo-o através de um processo aditivo de camadas de resina acrílica fotopolimerizável, sem a necessidade de qualquer tipo de pós-processamento. A cabeça de impressão, composta por centenas de micro-difusores, injeta uma camada de resina sobre a plataforma de construção, apenas nas áreas correspondentes ao perfil do corte transversal efetuado previamente, deixando a restante área da plataforma sem material. A resina é polimerizada através da radiação ultravioleta que acontece no processo de injeção de material, sendo cada camada retificada por passagem de um cilindro logo após a deposição desta. A repetição deste processo resulta na obtenção de uma peça sólida em acrílico. Durante este processo é também injetado, simultaneamente com a resina acrílica, uma resina de suporte solúvel em água para criar apoios para a peça. Aquando da conclusão da construção, é apenas necessário remover a resina de suporte através de uma simples lavagem, ficando a peça apta. A cura da resina é realizada inteiramente durante o processo de produção das peças, pelo que o processo não carece de pós-cura do material (Stratasys 2015a; Fischer 2014; Zonder & Sella 2014).

### ***3.3 Consideração para a Avaliação de Custos***

Neste projeto as dimensões consideradas foram o volume total da cavidade, pois foi considerado desprezável o volume que as furações (volume do canal de refrigeração e volume dos extratores) representavam, tornando a comparação de fabricação e de custos mais simples e acessível.

Relativamente aos custos associados aos moldes, estes podem ser custos diretos ou custos indiretos. Os custos indiretos dos moldes são os mesmos independentemente do seu método de fabrico, quer seja convencional ou de fabrico aditivo. Esta igualdade justifica-se por este custeio estar associado aos custos gerais de fabrico de qualquer indústria. Na Tabela 3. 9 encontram-se os custos indiretos da fabricação de moldes (Neves 2015).

**Tabela 3. 9 - Custos indiretos associados à fabricação de moldes (Neves 2015).**

<b>Custos Indiretos (Gastos Gerais de Fabrico)</b>		
<b>Externos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Consumíveis</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Óleos;</li> <li>• Lubrificante;</li> <li>• Lixas;</li> <li>• Pastas.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Formações;</li> <li>• Inspeções Médicas;</li> <li>• Ferramentas;</li> <li>• Licenças de Software;</li> <li>• Serviços Informáticos;</li> <li>• Apoio Jurídico;</li> <li>• Energia Elétrica;</li> <li>• Água;</li> <li>• Empréstimos á Banca.</li> </ul>	
<b>Internos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Administrativos;</li> <li>• Orçamentos/Comercial;</li> <li>• Transportes/Despesas de viagens;</li> <li>• Seguros.</li> </ul>	

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requisições</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Compras;</li> <li>• Escritório;</li> <li>• Armazém.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Comunicações</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Internet;</li> <li>• Telefones.</li> </ul>

No que diz respeito aos moldes convencionais os custos diretos estão relacionados com custos internos e externos, representados na Tabela 3. 10 (Neves 2015).

**Tabela 3. 10 - Custos diretos associados à fabricação de moldes convencionais (Neves 2015).**

<b>Custos Diretos dos Moldes Convencionais</b>		
<b>Internos</b>	Projeto	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CAD;</li> <li>• CAM.</li> </ul>
	Fabricação/Maquinação	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Galgamento;</li> <li>• Fresagem;</li> <li>• Furações;</li> <li>• Retificação;</li> <li>• Montagem;</li> <li>• CNC;</li> <li>• EDM;</li> <li>• WEDM.</li> </ul>
<b>Externos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aços</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estruturas;</li> <li>• Guiamentos;</li> <li>• Acessórios;</li> <li>• Grafites.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Torneamento;</li> <li>• Tratamentos Térmicos;</li> <li>• Ensaio dos Moldes.</li> </ul>	

Já nos moldes híbridos os custos diretos internos e externos são os referidos na Tabela 3.

11.

**Tabela 3. 11 - Custos diretos associados à fabricação de moldes híbridos.**

<b>Custos Diretos dos Moldes Híbridos</b>		
<b>Internos</b>	Projeto	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CAD;</li> <li>• CAM.</li> </ul>
	Fabricação/Maquinação	<ul style="list-style-type: none"> <li>• SL;           • 3DP;</li> <li>• FDM;       • Polyjet;</li> <li>• SLS;        • LOM;</li> <li>• SLM;       • DMLS.</li> </ul>
<b>Externos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Materiais</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bloco moldantes;</li> <li>• Suportes quando utilizados.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Acabamentos superficiais;</li> <li>• Limpeza de blocos moldantes.</li> </ul>	

Para a avaliação de custos ao fabricar o molde foi tido em consideração o custo da estrutura do molde e dos blocos moldantes.

Relativamente à estrutura do molde definiu-se uma estrutura que pode ser utilizada para os blocos moldantes produzidos pelos diferentes processos.

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

## 4. Custos de Processos

---

### 4.1 Estrutura do molde

A estrutura do molde tem como finalidade o suporte de todos os sistemas, diretos ou indiretos, associados à produção das peças nos blocos moldantes. Nestes sistemas estão incluídos a fixação, guiamento, refrigeração e extração.

Como as dimensões do bloco moldante estudado neste projeto são inalteráveis, a estrutura do molde definida vai ser sempre a mesma para os blocos moldantes fabricados de diferentes processos. O custo da estrutura do molde utilizada foi conseguido através do catálogo da *Hasco*. A estrutura definida foi uma estrutura quadrada, como ilustrado na Figura 4. 1, na qual os números da figura representam a numeração das chapas.

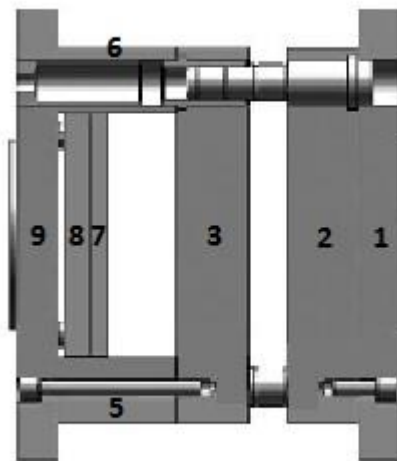


Figura 4. 1 - Estrutura do molde da *Hasco*.

Desta forma, a estrutura do molde definida para este projeto apresenta os componentes representados na Tabela 4. 1, onde estão descritos os custos e características associadas para

cada componente e o valor total para estrutura. Estes valores foram obtidos através do catálogo da Hasco.

**Tabela 4. 1 - Características e Custos dos constituintes da estrutura do molde retirados da Hasco.**

<b>Designação</b>	<b>Ref/Dimensões (mm)</b>	<b>Material</b>	<b>Qtd</b>	<b>Preço unit (€)</b>	<b>Preço Total (€)</b>
Chapa 1	K10/246*296*27	1.1730	1	163,35	163,35
Chapa 2	K20/246*296*56	1.1730	1	220,21	220,21
Chapa 3	K20/246*296*56	1.1730	1	220,21	220,21
Chapa 5+6	K40/246*296*56	1.1730	1	64,49	64,49
Chapa 7+8	K60/70*246*296	1.1730	1	156,09	156,09
Chapa 9	K10/246*296*27	1.1730	1	163,35	163,35
Parafusos M8	Z31/8*200		8	5,81	46,48
Guias Principais	Z03/56/9*35		4	8,28	33,12
Casquilhos Principais	Z10/56/9		4	15,27	61,08
Extratores	Z41/8*100		11	4,03	44,33
Botões de encosto	Z551/25*3		10	5,97	59,7
Parafusos CH9+CH5	Z31/12*105		4	1,5	6
Parafusos CH1	Z31/15*50		4	0,56	2,24
Anel de Centragem	K100/90*16,5		1	26,97	26,97
Parafusos Anel Centragem	Z33/6*60		3	0,19	0,57
Injetor	Z50/24*96		1	33,26	33,26
Interlocks	Z060/40*40		4	143,5	574
Parafusos M8 Interlocks	Z33/8*25		4	0,23	0,92
Parafusos M10 Interlocks	Z31/10*40		4	0,38	1,52
Casquilho CH9+CH5	Z00/56*/22*55		4	19,84	79,36

KO	Z701/16/27*50		1	14,03	14,03
Guias de Extração	Z011/14*60		4	6,09	24,36
Casquilhos de Extração	Z10/15/14		4	7,85	31,4
Parafusos CH8+CH7	Z31/8*35		6	0,26	1,56
Records	Z81/19/R3/4		4	4,54	18,16
SOMATÓRIO					<b>2046,76€</b>

## **4.2 Fabrico de zonas moldantes**

Os custos da fabricação dos blocos moldantes, por diferentes processos, foram solicitados na indústria da região. Apenas o custo de fabricação de blocos moldantes por vazamento de resinas com cargas metálicas é que não foi solicitado a uma indústria. Foi realizada a cotação do bloco moldante do estudo desenvolvido por Domingues (Domingues 2015). O custo total representa o custo do material mais o custo de obtenção da geometria.

### **4.2.1 Alumínio**

A cotação obtida para o bloco moldante fabricado por processos convencionais, em alumínio 7022 encontra-se descrita na Tabela 4. 2.

**Tabela 4. 2 - Custo associado à obtenção de blocos moldantes por processos convencionais usando o alumínio 7022.**

<b>Material</b>	<b>Custo Total</b>
Alumínio 7022	350 €

### **4.2.2 Aço**

O custo dos blocos moldantes fabricados por processos convencionais foi calculado para o aço P20, como se encontra descrito na Tabela 4. 3.

Tabela 4. 3 - Custo associado à obtenção de blocos moldantes por processos convencionais usando o aço P20.

Material	Custo Total
Aço P20	550€

### 4.2.3 Resinas

A cotação dos blocos moldantes fabricados por vazamento de resinas foi realizada incidindo nos blocos moldantes do estudo de Domingues (Domingues 2015). Como foram realizados blocos moldantes com resina de diferentes cargas de alumínio estão apresentadas as cotações para os dois blocos moldantes nas Tabela 4. 4 e Tabela 4. 5.

Tabela 4. 4 - Cotação de blocos moldantes fabricados por vazamento de resinas com 40% de cargas de Al.

	Quantidade	Preço Unitário (€)	Preço final (€)
<b>Tubo de cobre (mm)</b>	500	1,55	0,78
<b>Resina A (kg)</b>	0,774	19,41	15,02
<b>Endurecedor B (kg)</b>	0,306	19,41	5,94
<b>40% Pó de Al (kg)</b>	0,72	8	5,76
<b>Pós-cura (€/h)</b>	6	12	72,00
<b>Câmara de vácuo (€/h)</b>	0,25	12	3,00
<b>Desmoldante</b>	2		
<b>Montagem (custo hora/operador)</b>	16	25	400,00
<b>Produção Zona moldante (custo hora/operador)</b>	15	25	375,00
<b>Projeto</b>	0	0	0,00
<b>Testes</b>	Protótipo		0,00
<b>Somatório</b>			877,50€

**Tabela 4. 5 - Cotação de blocos moldantes fabricados por vazamento de resinas com 60% de cargas de Al.**

	<b>Quantidade</b>	<b>Preço Unitário (€)</b>	<b>Preço final (€)</b>
<b>Tubo de cobre (mm)</b>	500	1,55	0,78
<b>Resina A (kg)</b>	0,414	19,41	8,04
<b>Endurecedor B (kg)</b>	0,306	19,41	5,94
<b>60% Pó de Al (kg)</b>	1,08	8	8,64
<b>Pós-cura (€/h)</b>	6	12	72,00
<b>Câmara de vácuo (€/h)</b>	0,25	12	3,00
<b>Desmoldante</b>	2	--	--
<b>Montagem (custo hora/operador)</b>	16	25	400,00
<b>Produção Zona moldante (custo hora/operador)</b>	15	25	375,00
<b>Projeto</b>	0	0	0,00
<b>Testes</b>	Protótipo		0,00
<b>Somatório</b>			873,39€

#### **4.2.4 FDM**

No processo de FDM, utilizando o material ABSplus tem a cotação indicada na Tabela 4. 6 para as características do bloco moldante referidas anteriormente.

**Tabela 4. 6 - Custo associado aos blocos moldantes por processos AM usando o FDM.**

<b>Material</b>	<b>Custo Total</b>
ABSplus	900€

#### **4.2.5 SLS**

A cotação adquirida para a fabricação de blocos moldantes por SLS, em DuraForm® PA plastic encontra-se descrita na Tabela 4. 7.

Tabela 4. 7 - Custo associado aos blocos moldantes por processos AM usando o SLS.

Material	Custo Total
DuraForm® PA plastic	820€

### 4.2.6 Polyjet

E finalmente na Tabela 4. 8 apresenta a cotação para os blocos moldantes fabricados por Polyjet em FullCure® 720.

Tabela 4. 8 - Custo associado aos blocos moldantes por processos AM usando o Polyjet.

Material	Custo Total
FullCure® 720	785€

### 4.3 Custo total

Na Figura 4. 2 podem ser verificados os custos totais dos moldes analisados. Com este gráfico verifica-se, também a diferença de custos que se encontra na utilização dos diferentes métodos de fabricação de moldes estudados.

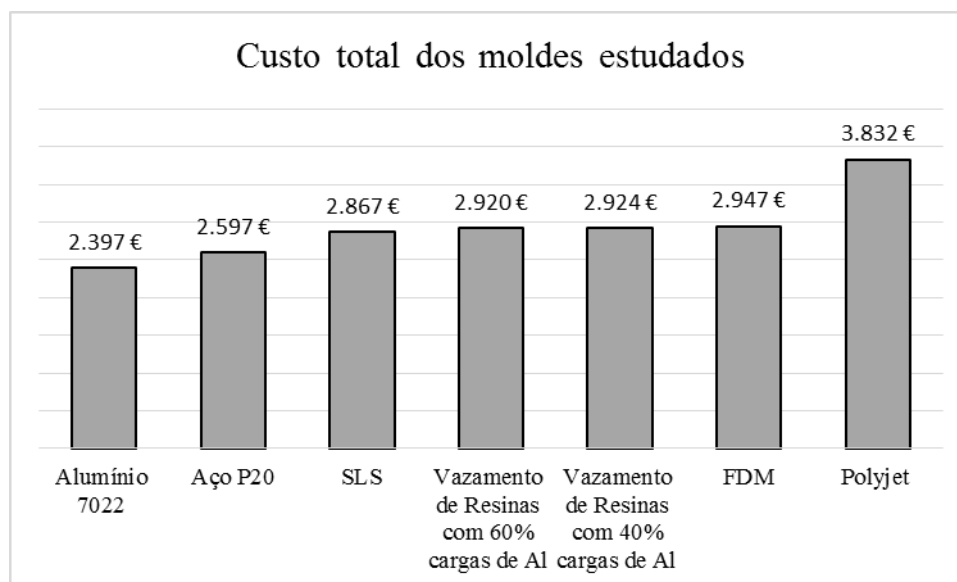


Figura 4. 2 - Gráfico de custo total de moldes

#### 4.4 Custos nos Países

Ao conhecer os países para os quais Portugal exporta pode ser realizada uma análise que relaciona o custo dos moldes fabricados pelos diferentes métodos estudados e o custo de mão-de-obra nesses mesmos países. Para realizar esta análise recorreu-se ao salário base dos respetivos países uma vez que apenas o custo da mão-de-obra difere consoante o país. Nesta análise considerou-se que o custo do equipamento e do material não é uma variável de país para país. Na Figura 4. 3 está representado o valor do salário base para os países que são os maiores importadores de moldes portugueses e Portugal.

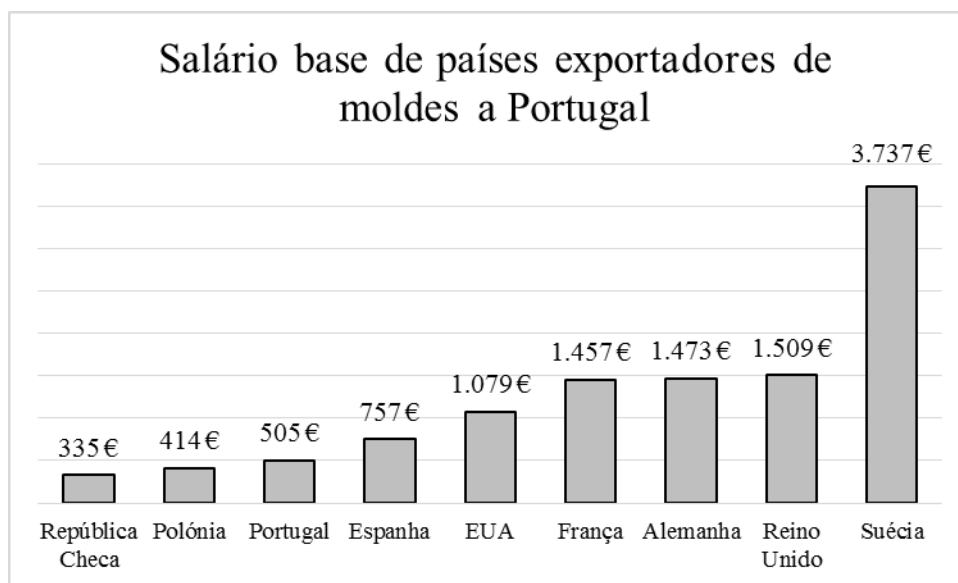
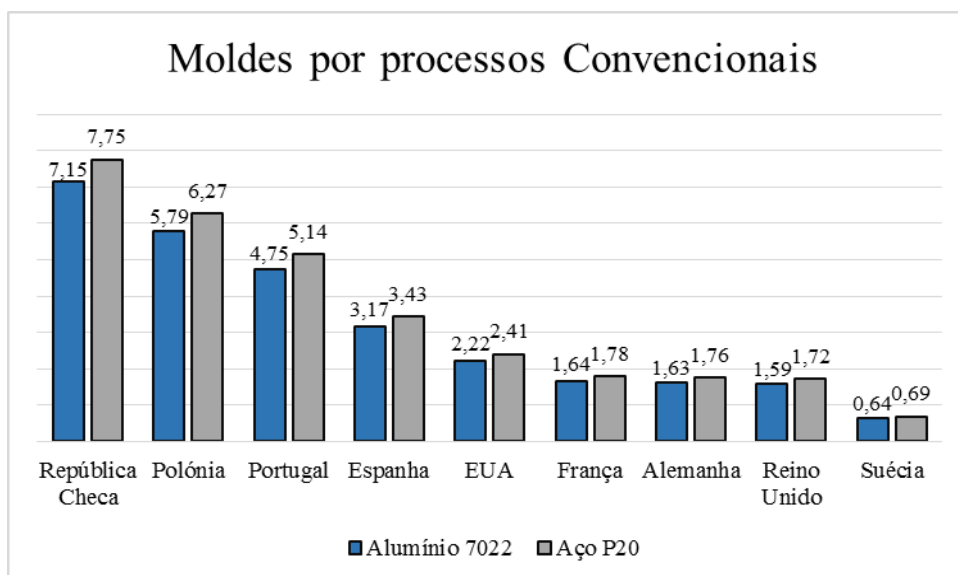


Figura 4. 3 - Gráfico representativo do salário base de cada país importador de moldes portugueses.

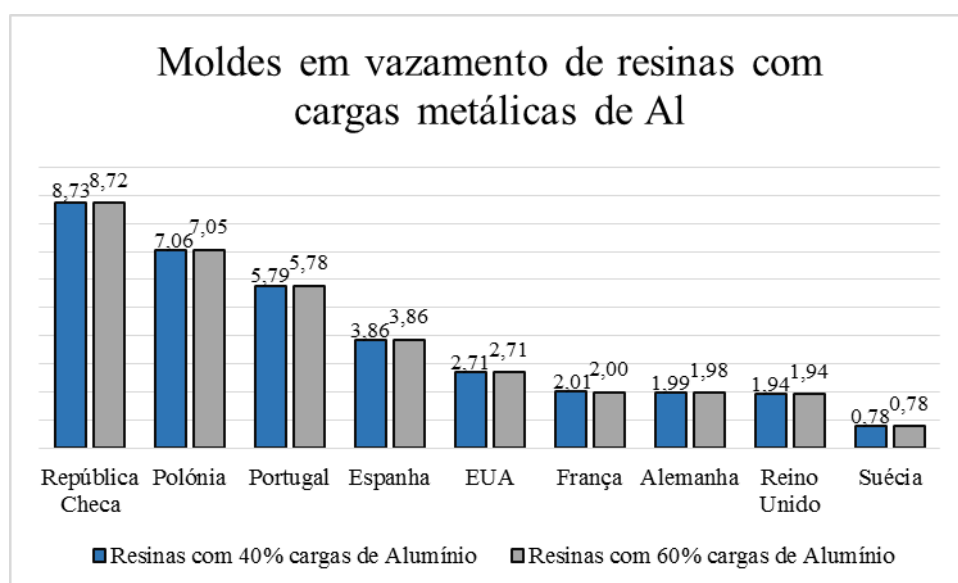
Com estes dados pode-se verificar a discrepância relativa ao valor salarial para país que importa moldes portugueses comparativamente com Portugal. Esta diferença reflete uma diferença, também na mão-de-obra destes países. Para demonstrar esta diferenciação elaboraram-se gráficos que relacionam o custo do molde produzido com o valor salarial de cada país, deste modo obtivemos o rácio custo por salário base referente a cada molde.

No caso dos moldes fabricados por processos convencionais, com o alumínio 7022 e o aço P20, verifica-se uma enorme discrepância com a República Checa que apresenta um rácio entre 7,15 e 7,75, como é possível verificar na Figura 4. 4.



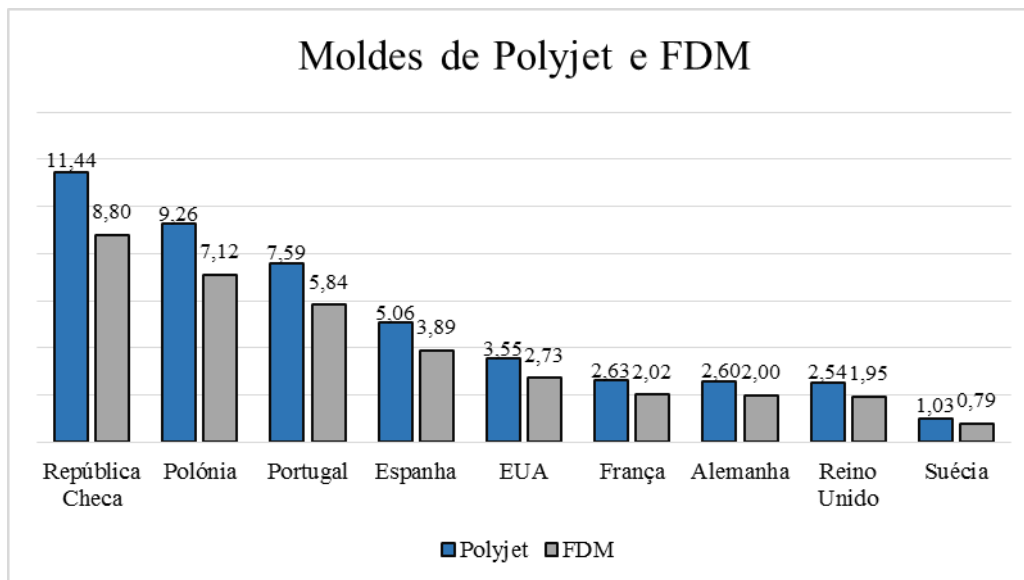
**Figura 4. 4 - Gráfico representativo de rácio dos moldes produzidos por processos convencionais.**

Relativamente ao gráfico representativo do rácio dos moldes produzidos por vazamento de resinas com cargas de 40% e 60% de alumínio, na Figura 4. 5, verifica-se que a diferenciação destes valores é insignificante uma vez que o custo total dos moldes também apresentava uma diferenciação muito reduzida.



**Figura 4. 5 - Gráfico representativo de rácio dos moldes produzidos por vazamento de resinas com cargas de alumínio.**

Na Figura 4. 6 estão representados os rácios entre os moldes produzidos em Polyjet e FDM. Neste gráfico é possível, também verificar a diferença de custos entre estes dois processos. O método de SLS não se encontra representado graficamente uma vez que o seu custo final de produção é muito semelhante ao molde produzido por FDM.



**Figura 4. 6 - Gráfico representativo de rácio dos moldes produzidos por Polyjet e FDM.**

Com este estudo verifica-se que a República Checa e a Polónia apresentam um custo de mão-de-obra mais reduzido comparativamente com Portugal, uma vez que em todos os processos de produção de moldes estudados apresentam rácios superiores a Portugal. Esta constatação e o facto de estes países terem uma importação de moldes portugueses de 7% e 3%, respetivamente, levará a que estes se tornem possivelmente, no futuro, exportadores de moldes e por consequência ameaçar o mercado de exportação de moldes de Portugal. No entanto isso não se verifica com os restantes países analisados.

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

## **5. Discussão**

---

Após a descrição dos custos associados a cada processo de fabrico, para blocos moldantes de um molde simples para séries curtas verifica-se que o molde com o custo associado menor é o molde convencional em Alumínio 7022. Esta situação deve-se à simplicidade relativa do molde estudado. A diferenciação de custo entre os moldes produzidos em alumínio 7022 e em aço P20 é bastante reduzida, desta forma deve ser escolhido o material consoante as características que se pretenda na peça final. As características térmicas dos moldes em alumínio são superiores aos moldes em aço, contudo como o alumínio apresenta uma fadiga térmica superior é necessário analisar se essa característica comprometerá o molde e posteriormente as peças moldadas. É de salientar que com moldes em aço podem ser obtidas um maior número de peças que o mesmo molde em alumínio.

No vazamento de resinas reforçado com cargas metálicas de Al a diferença de percentagem de cargas de alumínio, 40% ou 60% não influenciará no custo final de cada bloco moldante. Este método além de apresentar boa resistência química e um custo baixo também apresenta limitações ao nível das características que o molde apresentará. Uma vez que este tipo de moldes caracteriza-se por baixa condutibilidade térmica, baixa dureza e baixa resistência mecânica à compressão.

Verifica-se também, após análise das características de quatro dos processos de fabrico aditivo o método de Polyjet será o mais aconselhado para o caso de estudo, uma vez que as suas características são as que melhor se adequam ao solicitado. Este método é rápido e apresenta um acabamento superficial bom, não requer pós-cura e ainda produz peças com elevada flexibilidade comparativamente com os métodos de vazamento de resinas com cargas metálicas de alumínio, FDM e SLS.

No entanto, através deste estudo, verifica-se que o método de Polyjet é o método mais

dispendioso para a fabricação de blocos moldantes por processos de AM. Para estes processos o método mais barato é o método de SLS, se bem que os processos de vazamento de resinas com cargas de alumínio e o FDM não apresentam diferenças de custos muito elevados comparativamente com o SLS. Contudo o método de Polyjet pode ser melhorado a nível de custos e posteriormente ser mais rentável a sua utilização.

## **Conclusões**

---

Neste estudo foi explorada a questão do custo de diferentes processos de obtenção de blocos moldantes. Para tal foi avaliado o custo de uma estrutura intermutável de apoio ao processo de injeção dos diferentes materiais utilizados para o fabrico dos blocos moldantes, recorrendo ao conceito de molde híbrido.

Foram obtidas cotações para o fabrico de diversos blocos moldantes em materiais convencionais como o alumínio e o aço. Também foram calculados os custos dos materiais utilizados no fabricado de moldes em resina com cargas de alumínio. Finalmente foram solicitadas cotações para a produção dos blocos moldantes em FDM, SLS e Polyjet. O custo mais elevado foram os blocos do processo de Polyjet e os blocos mais baratos foram os produzidos em alumínio.

Foi comparado o salário base de Portugal com os países para os quais as empresas portuguesas exportam moldes. Foram comparados os custos de produção nos países em função do salário base. Foi possível identificar que os países como a República Checa e a Polónia apresentam um rácio muito elevado comparativamente com os outros países. Esta questão é bastante pertinente porque estes países podem evoluir rapidamente no conhecimento e tornar-se concorrentes diretos da indústria nacional dos moldes.

Um molde convencional tem a durabilidade muito superior a um molde híbrido, deste modo será mais vantajoso para moldes simples de pequenas séries utilizar moldes convencionais. No entanto, se a peça a injetar for mais complexa, o molde por consequência também será. Nessa situação o molde utilizado deve ser o molde híbrido, uma vez que neste processo o aumento da complexidade não é proporcional ao aumento do custo. Sendo que através da utilização deste tipo de moldes também variedade de materiais a injetar é diversificada.

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

## ***Trabalhos Futuros***

---

Algumas limitações e oportunidades surgiram durante o desenvolvimento deste projeto que poderão ser estudadas em projetos futuros. Sendo elas:

- Para uma peça mais complexa verificar a diferença nos custos totais dos processos, em especial dos convencionais. Neste âmbito verificar também o tempo para obtenção dos blocos moldantes.
- Para os diferentes processos verificar e analisar a vida dos moldes no processo de injeção em termos de números de peças injetadas conformes.
- Verificar as vantagens de obtenção de moldes complexos por processos aditivos em relação com os moldes metálicos convencionais.

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

## Bibliografia

---

- 3DSsystems, 2015. Prototyping / Pre-Production. *Prototyping / Pre-Production*. Available at: <http://www.3dsystems.com/quickparts/prototyping-pre-production> [Accessed August 11, 2015].
- Bareta, D. et al., 2006. Application of alternative materials in hybrid moulds cores. In *Building the future by innovation RPD 2006*. Marinha Grande.
- Bertol, L.S., 2008. *Contribuição ao estudo da prototipagem rápida, digitalização tridimensional e seleção de materiais no design de implantes personalizados*.
- Bocking, C., Jacobson, D.M. & Rennie, A.E.W., 2002. *Rapid prototyping, tooling and manufacturing.*, Available at: <http://eprints.lancs.ac.uk/20213/>.
- Cefamol, 2015. A Indústria Portuguesa de Moldes. *CEFAMOL - Associação Nacional da Indústria de Moldes*.
- Chua, C.K., Chou, S.M. & Wong, T.S., 1998. A study of the state of the art rapid prototyping technologies. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 14, pp.146–152.
- Chua, C.K., Hong, K.H. & Ho, S.L., 1999. Rapid tooling technology. Part I: A comparative study. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 15, pp.604–605.
- Chua, C.K., Leong, K.F. & An, J., 2014. Rapid Prototyping of Biomaterials . 1 Introduction to rapid prototyping of biomaterials. In *Rapid Prototyping of Biomaterials*. Elsevier, pp. 1–15. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780857095992500015> [Accessed June 24, 2014].
- Chua, C. K., Hong, K.H. & Ho, S.L., 1999. Rapid tooling technology. Part II: a case of study using arc spray metal tooling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 15, pp.609–614.
- Correia, M.S., Martinho, P.G. & Pouzada, A.S., 2014. The ejection force effect on the life of hybrid mould inserts produced by additive manufacturing. *International Conference on Polymers & Moulds innovations 2014*.
- Cruz, N., 2013. *Implementação de ferramentas Lean Manufacturing no processo de injeção de plásticos*. Universidade do Minho.

- Cunha, A.M., 1991. *A study on the mechanical behaviour of injection moulded polypropylene parts*. Universidade do Minho.
- Domingues, L., 2015. *Análise comparativa do uso de tecnologias de fabrico rápido no processo produtivo de elementos moldantes para moldes de injeção de plásticos*. Instituto Politécnico de Leiria.
- Du, Z.H. et al., 2002. Rapid sheet metal manufacturing. Part I: Indirect rapid tooling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 19, pp.411–417.
- El-Hofy, H.A.-G., 2013. *Fundamentals of Machining Processes: Conventional and Nonconventional Processes* 2nd ed., Taylor & Francis Group.
- Fischer, F., 2014. FDM AND POLYJET 3D PRINTING. *Stratasys for a 3D World*, p.7.
- Freitas, a. et al., 2012. Rapid prototyping and tooling in the manufacture of mould elements for large parts. Available at: <http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/20838>.
- Gibson, I., Rosen, D. & Stucker, B., 2010. *Additive Manufacturing Technologies. Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing* 1st ed. Springer, ed.,
- Glanvill, A.B. & Denton, E.N., 1994. *Princípios Básicos e Projectos - Moldes de Injecção*, Blucher, Edgard.
- Granja, D., 2003. Materiais para moldes. In *Manual do projectista para moldes de injeção de plástico*. Marinha Grande: CENTIMFE.
- Hernández, P., Ares, E. & Pouzada, A.S., 2005. New trends on the design and manufacture of injection moulds – Reusability and Recycling. In *International Conference on Polymers & Moulds innovations 2005*. p. 4.
- Holtz, T., 2015. How to effectively move from 3D printing to injection molding. In *ProtoLabs*.
- Hotza, D., 2009. Rapid prototyping of solid oxide fuel cells. *Matéria Rio de Janeiro*, nº4.
- Jesus, M.S., 2005. *Desenvolvimento de um compósito polímero-metal à base de resina epóxi para aplicações em moldes rápidos*. Universidade Federal de Santa Catarina.
- Kamal, M., Isayev, A. & Liu, S., 2009. *Injection Molding. Technology and Fundamentals*, Hanser.
- Kietzmann, J., Pitt, L. & Berthon, P., 2015. Disruptions, decisions, and destinations: Enter the age of 3-D printing and additive manufacturing. *Business Horizons*, 58(2), pp.209–215. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007681314001608>.
- King, D. & Tansey, T., 2002. Alternative materials for rapid tooling. *Journal of Materials Processing Technology*, 121(2-3), pp.313–317. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013601011451> [Accessed June 2, 2014].

- Lee, W.C., Wei, C.C. & Chung, S.C., 2014. Development of a hybrid rapid prototyping system using low-cost fused deposition modeling and five-axis machining. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(11), pp.2366–2374. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.05.004>.
- Lima, P., Ramos, J. & Pouzada, A.S., 2003. Thermal performance of hybrid injection molds with epoxy inserts. In *Proceedings ANTEC 2003*. Nashville, EUA.
- Lipson, H. & Kurman, M., 2013. *Fabricated: The New World of 3D Printing*, Indianapolis: John Wiley & Sons, Inc.
- Malloy, R. a., 2010. *Plastic Part Design for Injection Molding* 2nd ed., Hanser. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9783446404687500038>.
- Martinho, P., Bártolo, P. & Pouzada, A., 2008. Hybrid moulds: effect of the moulding blocks on the morphology and dimensional properties. *Rapid Prototyping Journal*, 15(September 2008), pp.71–82.
- Menges, G., Michaeli, W. & Mohren, P., 2001. *How to Make Injection Molds* 3rd ed., Munich: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG.
- Mori, D.M.G., 2014. Tradição, precisão e inovação. *Journal DMG MORI*, (2), p.52.
- Neves, C., 2015. *Análise de desvio de custos de fabrico de moldes*,
- Pham, D.T., Dimov, S. & Lacan, F., 1998. Firm tooling: bridging the gap between hard and soft tooling. *Prototyping Processing Technology*, pp.196–203.
- Pham, D.T. & Dimov, S.S., 2003. Rapid prototyping and rapid tooling - the key enablers for rapid manufacturing. *Journal of Mechanical Engineering Science* 2003, pp.1 – 23. Available at: <http://orca.cf.ac.uk/8337/>.
- Pontes, A.J., Queirós, M.P., et al., 2005. A study on design and performance of hybrids moulds for injection moulding. In *5th International Conference of Industrial Tools - 2005*. Bled.
- Pontes, A.J., Gago, P., et al., 2005. Hibridmolde - A Project towards the new mould generation. *O Molde*, pp.16–20.
- Pontes, A.J. & Ferreira, E.C., 2004. Tribological aspects during ejection in injection moulds. In *Rapid Product Development*. Marinha Grande.
- Pouzada, A.S., 2009. Hybrid moulds: A case of integration of alternative materials and rapid prototyping for tooling. *Virtual and Physical Prototyping*, 4(March 2015), pp.195–202.
- Pouzada, A.S., Moldes para produção de peças poliméricas - Moldes na indústria de transformação. In *Manual do Projectista*. p. 38.
- Pouzada, A.S., Ferreira, E.C. & Pontes, A.J., 2006. Friction properties of moulding thermoplastics. *Polymer Testing*, 25, pp.1017–1023.

- Pye, R.G.W., 1989. *Injection Mould Design* 2nd ed., Londres: George Godwin.
- Queirós, L., 2005. *Projecto de Moldes Híbridos Com Auxílio de Técnicas Assistidas por Computador*. Universidade do Minho.
- Ragaert, K., Cardon, L. & Vancampenhout, J., 2006. Hybrid injection molds: a practical approach for implementation. In *Rapid Produced Development*. Marinha Grande.
- Rajitha, A., Keefe, M. & Advani, S., 1996. Simulation of injection molding into rapid - prototyped molds. *Rapid Prototype Journal*, 7, pp.42–51.
- Ramos, A.M., Relvas, C. & Simões, J.A., 2003. Vacuum casting with room temperature vulcanising rubber and aluminium moulds for rapid manufacturing of quality parts: a comparative study. *Rapid Prototyping Journal*, 9(2), pp.111–115.
- Rosochowski, A. & Matuszak, A., 2000. Rapid tooling: the state of the art. *Journal of Materials Processing Technology*, 106(1-3), pp.191–198. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013600006130> [Accessed May 26, 2014].
- Sabino-Neto, A.C. et al., 2008. On the effect of the cure process on the mechanical properties of steel fibre reinforced epoxy composites. In *Polymer Processing Society 24th Annual Meeting*. Salerno.
- Saraiva, V.M., Lima, M. & Pouzada, A.S., 1999. Towards a new conceptual design of injection moulds. In *44th International Scientific Colloquium*. Ilmenau, Germany.
- Segal, J.I. & Campbell, R.I., 2001. A review of research into the effects of rapid tooling on part properties. *Rapid Prototyping Journal*, 7(2), pp.90–99.
- Sinotech, 2014. Sinotech. *INJECTION MOLDING*. Available at: <http://www.sinotech.com/injectionMolded.html>.
- Stratasys, 2015a. 3D Printing Technologies. *3D Printing Technologies*. Available at: <http://www.stratasys.com/3d-printers/production-series> [Accessed June 10, 2015].
- Stratasys, 2015b. Dimension 1200es. *Stratasys*. Available at: <http://www.stratasys.com/3d-printers/design-series/dimension-1200es#content-slider-1> [Accessed September 2, 2015].
- Throne, J.L., 1987. *Technology of thermoforming* 2 nd. Hanser, ed., Munich.
- Tsouknidas, A., 2011. Friction induced wear of rapid prototyping generated materials: A review. *Advances in Tribology*, 2011.
- Vasconcelos, P. V. et al., 2006. Tribological behaviour of epoxy based composites for rapid tooling. *Wear*, 260, pp.30–40.
- Vasconcelos, P. V., Lino, F.J. & Neto, R.J., 2004. Importance of the vacuum in rapid tooling of polymeric-based moulds. In *Rapid Product Development*. Marinha Grande, Portugal.

- Voet, A. et al., 2007. Optimization of conformal cooling by using new materials and production techniques. In *International Conference on Polymers & Moulds innovations 2007*. Ghent, Belgium.
- Weller, C., Kleer, R. & Piller, F.T., 2014. Economic Implications of 3D Printing: Market Structure Models in Light of Additive Manufacturing Revisited. *International Journal of Production Economics*, 164, pp.1–43. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.02.020>.
- Xu, X., Sachs, E. & Allen, S., 2001. The design of conformal cooling channels in injection molding tooling. *Polymer Engineering and Science*, 41, pp.1265–1279.
- Zollner, O., 1997. *Optimised mould temperature control*,
- Zonder, L. & Sella, N., 2014. Prototipagem de Precisão. O papel dos moldes de Impressão 3D na indústria dos moldes de injeção. *Stratasys for a 3D World*, p.8.

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

## Anexo I

<b>Tipo de máquina</b>	<b>DMU 125 P duoBLOCK®</b>	
<b>Área de trabalho</b>		
Eixo Z X / Y /	mm	1250 × 1250 × 1000
<b>Mesa / superfície de aperto / Ferramentas</b>		
NC mesa rotativa	rpm	30
Fresagem / mesa girando (fresamento / torneamento)	rpm	-
Tabela superfície de trabalho	mm	∅ 1250 × 1100
Max. carga tabela	kg	2500
<b>Cabeça de fresagem giro controlados por NC (B-eixo)</b>		
Cabeça de fresagem giro controlados por NC (B-eixo)		Padrão
Amplitude de rotação (0 = vert. / 180 = horiz.)	graus	-30 / 180
Transversal e alimentação rápida	rpm	30
<b>Opções 5 eixos</b>		
Cabeça de fresagem giro controlados por NC (A-eixo)		*
Amplitude de rotação (0 = vert. / Horiz = -90.)	graus	-120 / 10
Transversal e alimentação rápida	rpm	25
5X torqueMASTER® - B-eixo controlado por NC com um fuso engrenagem		*
Amplitude de rotação (0 = vert. / 180 = horiz.)	graus	-10 / 180
Transversal e alimentação rápida	rpm	23
<b>Unidade principal</b>		
SK40 eixo do motor integrada	rpm	12.000
Eixo do motor integrada HSK-A63	rpm	-
Eixo do motor integrada HSK-A100	rpm	-
Potência (40/100% DC)	kW	28/19
Torque (40/100% DC)	Nm	121/82
<b>Trocador de ferramentas</b>		
Recepção ferramenta		SK40
Magazine de ferramentas	Bolsos	40 / cadeia
<b>Eixos lineares (X / Y / Z)</b>		
Feed / velocidade de avanço rápido	m / min	60
Aceleração	m / s <sup>2</sup>	6/5/6
Força de avanço	kN	12/16/16
<b>Dados de máquina</b>		
Necessidade de espaço da máquina incl básica, um transportador de cavacos sem refrigeração interna	aprox. m <sup>2</sup>	24,5
Altura Machine (máquina padrão)	mm	3415
Peso da máquina	kg	18.800
* opção		
- não disponível		

Technical Data Sheet  
Issued 04/2006

## Biresin® L74

### Laminating and Multi-purpose resin

#### Application

- ❑ Manufacture of laminates for injection moulds and other temperature resistant moulds
- ❑ Manufacture of adhesive appliances
- ❑ For laminates with glass or carbon fibres

#### Properties

- ❑ Good soaking and wetting properties
- ❑ Good thermomechanical properties and high heat resistance after post curing (24 h / RT) + 3 h / 60°C + 3 h / 140°C
- ❑ Application especially in combination with surface resin **Biresin® S19**

#### Description

- ❑ Basis Two-component-epoxy-system
- ❑ Resin **Biresin® L74**, epoxy resin, yellowish-transparent, unfilled, low viscous
- ❑ Hardener **Biresin® L74**, amine, colourless-transparent, unfilled, low viscous

#### Processing Data

Mixing ratio resin to hardener	in parts by weight	100 : 17
Mixing viscosity, 25°C	mPas	780
Polife, 500 g / RT	min	120 - 150
Demoulding time, RT	h	24 + post curing

#### Physical Data (approx.-values)

Biresin® L74 resin	with hardener		Biresin® L74
Density	ISO 1183	g/cm³	1.1
Shore hardness	ISO 868	-	D 85*
E-Modulus	ISO 178	MPa	23,000* (glass fibre reinforced)
Flexural strength	ISO 178	MPa	120*
Impact resistance	ISO 179	kJ/m²	17*
Heat distortion temperature	ISO 75B	°C	160*

\* values after post curing: 3h / 60°C + 3h / 140°C

#### Delivery

Individual components	<b>Biresin® L74</b> resin	25 kg net
	<b>Biresin® L74</b> hardener	4.25 kg; 0.3 kg neto



## Processing

- ❑ The material temperature must be 18 - 25°C.
- ❑ After mixing of resin and hardener component it is easily possible to incorporate additives if necessary.
- ❑ Biresin® L74 is applied quickly and easily due to its low viscosity. It will easily wet out fibres and incorporate high levels of fillers and powders with high binding force.
- ❑ The ratio between resin and selected fibre must be determined and reliably controlled.
- ❑ For laminates glass fibres with binding twill are better than binding cloth because of its better suppleness.
- ❑ It is advised to lay up a balanced laminate to avoid distortion when de-moulding.
- ❑ Void-free glass and carbon fibre laminates are possible by processing under vacuum bag conditions to remove excess air and resin.
- ❑ To clean brushes or tools immediately Sika® Reinigungsmittel 5 is recommended.

## Storage

- ❑ Minimum shelf life is 12 month under room condition (18 - 25°C), when stored in original un-opened containers.
- ❑ After prolonged storage at low temperature, crystallisation of components may occur. This is easily removed by warming sufficient time to a maximum of 80°C. Allow to cool to room temperature before use.
- ❑ Containers must be closed water tight immediately after use and prevented from moisture. The residual material has to be used up as soon as possible.

## Precautions

For information and advice on the safe handling and storage of products, users should refer to the current Safety Data Sheet containing physical, ecological, toxicological and other safety related data.

## Disposal considerations

### Product

Recommendations: Must be disposed of in a special waste disposal unit in accordance with the corresponding regulations.

### Packaging

Recommendations: Completely emptied packagings can be given for recycling. Packaging that cannot be cleaned should be disposed of as product waste.

The information, and, in particular, the recommendations relating to the application and end-use of Sika-products, are given in good faith based on Sika's current knowledge and experience of the products when properly stored, handled and applied under normal conditions. In practice, the differences in materials, substrates and actual site conditions are such that no warranty in respect of merchantability or of fitness for a particular purpose, nor any liability arising out of any legal relationship whatsoever, can be inferred either from this information, or from any written recommendations, or from any other advice offered. The proprietary rights of third parties must be observed. All orders are accepted subject to our current terms of sale and delivery. Users should always refer to the most recent issue of the Technical Data Sheet for the product concerned, copies of which will be supplied upon request.

Sika Deutschland GmbH  
Stuttgarter Str. 139  
D - 72574 Bad Urach  
Germany

tel.: +49 (0) 7125 940 492  
Fax: +49 (0) 7125 940 401  
e-Mail: [tooling@de.sika.com](mailto:tooling@de.sika.com)  
Internet: [www.sika.de](http://www.sika.de)



**Sika**®



# ABS



ABS is a strong, durable production-grade thermoplastic used across many industries. ABS is an ideal material for conceptual prototyping through design verification through direct digital manufacturing. The marriage of ABS with FDM technology gives you the ability to create Real Parts™ direct from digital files, in a variety of standard and custom colors. Refer to the FDM System Material Availability spec sheet for system availability and color options.

Mechanical Properties <sup>1</sup>	Test Method	Imperial	Metric
Tensile Strength, Type 1, 0.125	ASTM D638	3,200 psi	22 MPa
Tensile Modulus, Type 1, 0.125	ASTM D638	236,000 psi	1,627 MPa
Tensile Elongation, Type 1, 0.125	ASTM D638	6 %	6 %
Flexural Strength	ASTM D790	6,000 psi	41 MPa
Flexural Modulus	ASTM D790	266,000 psi	1,834 MPa
IZOD Impact, notched	ASTM D256	2 ft-lb/in	106.78 J/a
IZOD Impact, un-notched	ASTM D256	4 ft-lb/in	213.56 J/a

Thermal Properties	Test Method	Imperial	Metric
Heat Deflection Temperature @ 66 psi	ASTM D648	195° F	90° C
Heat Deflection Temperature @ 264 psi	ASTM D648	169° F	76° C
Glass Transition Temperature (Tg)	DMA (SSYS)	219° F	104° C
Coefficient of Thermal Expansion	ASTM D696	5.60E-05 in/in/F	-----
Melt Point	-----	Not Applicable <sup>2</sup>	Not Applicable <sup>2</sup>

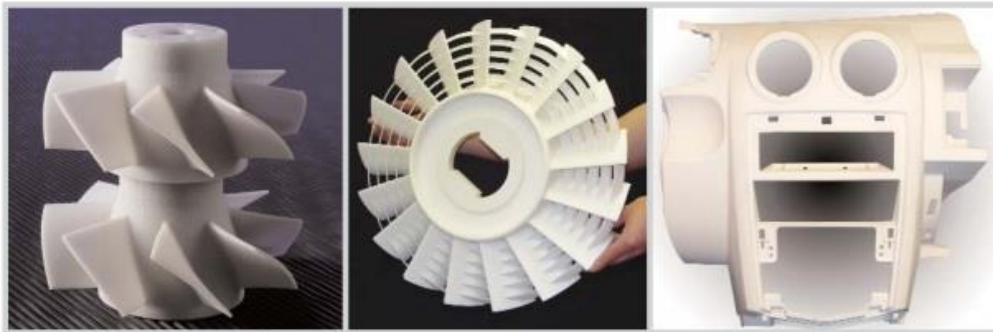
Other	Test Method	Value
Specific Gravity	ASTM D792	1.05
Rockwell Hardness	ASTM D785	R105
Flame Classification	UL 94	HB
Dielectric Strength kV/mm	IEC 60112	32
Dielectric Constant @60Mhz	IEC 60250	2.4



## DuraForm® PA plastic

for use with all selective laser sintering (SLS®) systems

**Durable polyamide (nylon) material for real-world physical testing and functional use.**



### APPLICATIONS

- Complex, thin-wall ductwork
  - Motorsports
  - Aerospace
- Housings and enclosures
- Impellers and connectors
- Consumer sporting goods
- Vehicle dashboards and grilles
- Snap-fit designs
- Functional prototypes that approach end-use performance properties
- Appropriate for low- to mid-volume rapid manufacturing
- Medical applications requiring USP Class VI compliance, or biocompatibility
- Parts requiring machining or joining with adhesives
- Complex production and prototype plastic parts
- Form, fit, or functional prototypes

### FEATURES

- Excellent surface resolution and feature detail
- Easy-to-process
- Compliant with USP Class VI testing
- Compatible with autoclave sterilisation
- Good chemical resistance and low moisture absorption

### BENEFITS

- Balanced mechanical properties and processability
- Build prototypes that withstand functional testing
- Produce durable end-use parts without tooling
- Create accurate and repeatable parts as demanded by manufacturers
- Machinable and paintable for demonstration parts

**3D SYSTEMS**

**TRANSFORM YOUR PRODUCTS**

## DuraForm® PA plastic

For use with all selective laser sintering (SLS®) systems

### TECHNICAL DATA

#### General Properties

MEASUREMENT	METHOD/CONDITION	VALUE
Specific Gravity	ASTM D792	1.00 g/cm <sup>3</sup>
Moisture Absorption - 24 hours	ASTM D570	0.07 %

#### Mechanical Properties

MEASUREMENT	METHOD/CONDITION	VALUE
Tensile Strength, Yield	ASTM D638	N/A*
Tensile Strength, Ultimate	ASTM D638	43 MPa (6237 psi)
Tensile Modulus	ASTM D638	1586 MPa (230 ksi)
Elongation at Yield	ASTM D638	N/A*
Elongation at Break	ASTM D638	14 %
Flexural Strength, Yield	ASTM D790	N/A*
Flexural Strength, Ultimate	ASTM D790	48 MPa (6962 psi)
Flexural Modulus	ASTM D790	1387 MPa (201 ksi)
Hardness, Shore D	ASTM D2240	73
Impact Strength (notched Izod, 23°C)	ASTM D256	32 J/m (0.6 ft-lb/in)
Impact Strength (unnotched Izod, 23°C)	ASTM D256	336 J/m (6.3 ft-lb/in)
Gardner Impact	ASTM D5420	2.7 J (2.0 ft-lb)

#### Thermal Properties

MEASUREMENT	METHOD/CONDITION	VALUE
Heat Deflection Temperature (HDT)	ASTM D648 @ 0.45 MPa	180 °C (356 °F)
	@ 1.82 MPa	95 °C (203 °F)
Coefficient of Thermal Expansion	ASTM E831 @ 0 - 50 °C	62.3 µm/m-°C (34.6 µin/in-°F)
	@ 85 - 145 °C	124.6 µm/m-°C (69.2 µin/in-°F)
Specific Heat Capacity	ASTM E1269	1.64 J/g-°C (0.392 BTU/lb-°F)
Thermal Conductivity	ASTM E1225	0.70 W/m-K (4.86 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F)
Flammability	UL 94	HB

#### Electrical Properties

MEASUREMENT	METHOD/CONDITION	VALUE
Volume Resistivity	ASTM D257	5.9 x 10 <sup>14</sup> ohm-cm
Surface Resistivity	ASTM D257	7.0 x 10 <sup>14</sup> ohm
Dissipation Factor, 1 KHz	ASTM D150	0.044
Dielectric Constant, 1 KHz	ASTM D150	2.73
Dielectric Strength	ASTM D149	17.3 kV/mm (439 kV/in)

\* N/A = Data not applicable for this test condition

Data was generated by building parts under typical default parameters. DuraForm PA plastic was processed on a base-level Sinterstation HIQ SLS system at 13 watts laser power, 200 inches/sec [5 m/sec] scan speed, and a powder layer thickness of 0.004 inches [0.1 mm].



**3D Systems Europe Ltd.**  
Mark House, Mark Road  
Hemel Hempstead  
Herts HP2 7UA - UK  
www.3dsystems.com

Tel: (+44) 1442 282 600  
Fax: (+44) 1442 282 601  
marketing.uk@3dsystems.com  
Nasdaq: TDSC

**3D Systems GmbH**  
Postfach 12 02 07  
D-64239 Darmstadt  
Germany

Tel: (+49) 6151 357 0  
Fax: (+49) 6151 357 333  
info@3dsystems-europe.com

Warranty/Disclaimer: The performance characteristics of these products may vary according to product application, operating conditions, material combined with, or with end use. 3D Systems makes no warranties of any type, express or implied, including, but not limited to, the warranties of merchantability or fitness for a particular use.

© 2006 by 3D Systems, Inc. All rights reserved. Specifications subject to change without notice. The 3D logo, DuraForm, Sinterstation and SLS are registered trademarks and HIQ is a trademark of 3D Systems, Inc.

PN 70715 Issue Date - 21 Nov 2006

# FULLCURE® FullCure® Materials Datasheet



Properties	Standard Procedure	FullCure® 720	VeroWhite	VeroBlue	VeroBlack	TangoBlack	TangoGray
<b>Tensile Strength MPa</b>	D-638	60.3	49.8	55.1	50.7	-	-
<b>Elongation at break, %</b>	D-638	15%-25%	15%-25%	15%-25%	17.7%	-	-
<b>Modulus of Elasticity, MPa</b>	D-638	2,870.0	2,495.0	2,740.0	2,192.0	-	-
<b>Flexural Strength, MPa</b>	D790	75.8	74.6	83.6	79.6	-	-
<b>Flexural Modulus, MPa</b>	D790	1,718.0	2,137.0	1,983.0	2,276.0	-	-
<b>Izod Notched Impact, J/m</b>	D256	39.6	37.5	42.5	-	-	-
<b>Compression Strength, MPa</b>	D695	84.3	-	79.3	-	-	-
<b>SHORE</b>	Scale D	83.0	83.0	83.0	83.0	-	-
<b>Rockwell</b>	Scale M	81.0	81.0	81.0	-	-	-
<b>Heat Distortion Temperature, °C</b>	D648 @ 0.45Mpa	48.4	47.6	48.8	47	-	-
	@ 1.82Mpa	44.4	43.6	44.8	42.9	-	-
<b>Tg, °C</b>	DMA, E"	48.7	58.0	48.7	62.7	-	-
<b>Ash Content</b>		<0.01%	<0.40%	<0.30%	-	-	-
<b>Tensile Strength MPa</b>	ASTM D-412	-	-	-	-	2.0	4.36
<b>Elongation at break, %</b>	ASTM D-412	-	-	-	-	47.7	47.0
<b>Compression set, %</b>	ASTM D-395	-	-	-	-	0.8	1.0
<b>SHORE A Hardness, Deg</b>	ASTM D-2240	-	-	-	-	61.0	75.0
<b>Tensile Tear Resistance, Kg/cm</b>	ASTM D-624	-	-	-	-	3.8	9.5
<b>Tg, °C</b>	DSC (-80 °C +100 °C)	-	-	-	-	-10.7	+2.6

**Objet Geometries Ltd. Headquarters**  
 2 Holtzman St.,  
 Science Park,  
 P.O. Box 2496,  
 Rehovot 76124, Israel  
 Tel: +972 8 931 4314  
 Fax: +972 8 931 4315

**Objet Geometries Inc. North America**  
 5 Fortune Drive  
 Billerica,  
 MA 01821  
 USA  
 Tel: 1-877-489-9449  
 Fax: 1-866-676-1533

**Objet Geometries AP Ltd. Asia Pacific**  
 Unit 52/A 13/F HITEC,  
 1 Trademart Drive,  
 Kowloon Bay,  
 Hong Kong  
 Tel: +852-217-40111  
 Fax: +852-217-40555

**Objet Geometries Ltd. Europe**  
 Leuvensesteenweg 388  
 1932 Sint-Stevens-  
 Woluwe  
 Belgium  
 Tel: +32 2 717 6502  
 Fax: +32 2 717 6500

©2007 Objet Geometries, Ltd. Objet™, Objet Geometries™, PolyJet™, Eden250™, Eden260™, Eden330™, Eden350™, Eden350V™, Eden500V™, Eden™, SHR™, PolyLog™, Quadra Tempo™, Objet Quadra™, FullCure® and Objet Studio™ are trademarks of Objet Geometries Ltd. and may be registered in certain jurisdictions. All other trademarks belong to their respective owners.

[www.2objet.com](http://www.2objet.com)

[info@2objet.com](mailto:info@2objet.com)

