



Projeto

Mestrado em Engenharia Mecânica – Produção Industrial

***Análise comparativa do uso de tecnologias de  
fabrico rápido no processo produtivo de elementos  
moldantes para moldes de injeção de plásticos***

**Liliana Cristina Ferreira Domingues**

Leiria, Março de 2015



Projeto

Mestrado em Engenharia Mecânica – Produção Industrial

***Análise comparativa do uso de tecnologias de  
fabrico rápido no processo produtivo de elementos  
moldantes para moldes de injeção de plásticos***

**Liliana Cristina Ferreira Domingues**

Dissertação de Mestrado realizada sob a orientação do Doutor Pedro Martinho, Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria e coorientação da Doutora Leopoldina Alves, Professora da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

Leiria, Março de 2015

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

# Agradecimentos

---

Ao orientador, Doutor Pedro Martinho, e à coorientadora, Doutora Leopoldina Alves, pela colaboração e orientação deste projeto, contribuindo para o seu melhoramento, com os conhecimentos e experiência.

Ao professor Joel Vasco pelas sugestões prestadas no decorrer do trabalho experimental.

À Escola Superior de Tecnologia e Gestão por proporcionar condições para a realização deste trabalho, nomeadamente na aquisição da chapa metálica, bem como do material necessário.

Ao Engenheiro Carlos Dias pela orientação na parte prática do projeto, quer no Laboratório de Tecnologia de Materiais, quer no Laboratório de Materiais; e pela realização da maquinação da chapa da bucha e dos blocos moldantes em resina.

Ao técnico Felisbelo Lisboa por ceder o projeto em 2D do molde convencional utilizado.

Ao Professor Carlos Capela pela autorização da utilização do molde convencional.

A todos os que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste projeto.

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

# Resumo

---

Com a evolução da indústria e da exigência do mercado, existe cada vez mais a necessidade de dar resposta a essas mesmas exigências, criando uma constante evolução e procura de processos/produtos novos. Uma dessas indústrias é a indústria de injeção de plástico. Inicialmente, as ferramentas utilizadas na injeção plástica eram exclusivamente fabricadas por processos convencionais, contudo, devido ao custo e tempo de entrega das mesmas, tornou-se necessário encontrar alternativas. Estas alternativas têm por base os princípios da prototipagem e fabrico rápido. O uso de moldes híbridos pressupõe a utilização de processos convencionais e de processos alternativos na mesma ferramenta. Este projeto aborda o uso dos processos alternativos para o fabrico de ferramentas para a moldação por injeção e a influência que esses processos alternativos têm nas peças injetadas. Foram projetados blocos moldantes em resina epóxi, carregadas com diferentes percentagens de alumínio, com o intuito de serem utilizadas num molde existente no Laboratório de Tecnologia Mecânica, da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria. Para tal, a chapa da bucha foi substituída por uma chapa projetada para alojar os blocos moldantes, tendo em conta as dimensões da chapa original. A injeção plástica foi realizada com dois polímeros diferentes, polipropileno e poliestireno. As amostras obtidas foram submetidas a três análises: dimensional, visual e mecânica. A análise dimensional teve como objetivo perceber se existe influência do material do bloco moldante na estabilidade dimensional da peça injetada; a análise visual permitiu identificar os problemas geométricos ocorridos nos provetes; e por fim, a análise mecânica permitiu identificar a influência nos parâmetros mecânicos dos provetes, que cada bloco moldante provocou. As conclusões obtidas neste projeto mostram que apesar dos processo alternativos serem uma alternativa, ainda continuam a ter algumas limitações, as quais foram identificadas neste projeto, tais como, permitir um sistema de refrigeração adequado e proporcionar boas características mecânicas nos componentes, quando comparados com processos convencionais.

*Palavras-chave: Molde híbrido, Resina epóxi, Blocos moldantes.*

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

# Abstract

---

With the evolution of industry and market require, creating a constant development and search of new processes / products. One of these industries is the plastic injection industry. Initially, the tools used for plastic injection were exclusively produced by conventional processes. However, due to the inherent costs and time-to-market it became necessary to find new alternative production processes. These alternatives base on the principles of prototyping and rapid manufacturing. The use of hybrid molds involves the use of conventional and alternative processes in the same tool. The present project focus on the use of alternative processes for the manufacture of tools for injection moulding and on the analysis of the influence that these alternative processes have in the final injected specimens. Moulding blocks were produced in epoxy resin, loaded with different percentages of aluminum particles, and were inserted in an existing mold structure of the Mechanical Technology Laboratory of the School of Technology and Management of Leiria. For this purpose, the punches plate has been replaced by a plate designed to support the moulding blocks, attending the dimensions of the original punches plate. The injection molding experiments were carried out with two different polymers, polypropylene and polystyrene. The samples were subjected to three types of experimental tests: dimensional analysis, visual inspection and mechanical analysis. The dimensional analysis aimed to understand the influence of the moulding block material in the dimensional stability of the final injected parts; visual inspection identified the geometric problems occurred in the final parts; and finally, the mechanical analysis identified the influence of the use of different moulding block on the mechanical parameters on the specimens. The main conclusions reached on the present project shown that the use of the hybrid moulds still have limitations such as to allow an adequate cooling system and provide good mechanical properties in the final components when compared with conventional processes.

*Keywords: Hybrid moulds, Epoxy resin, Moulding blocks.*

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

# Lista de figuras

---

Figura 1. Projeto desenvolvido pelo INEGI, moldes de silicone e terrina de porcelana [8].....	7
Figura 2. Etapas da modelação de uma peça, para a fabricação aditiva [11]. ....	8
Figura 3. Simulação de injeção de um copo de plástico [13].....	9
Figura 4. Influência da orientação da peça no efeito degrau [10]. ....	11
Figura 5. Comparação entre as tecnologias diretas e indiretas de RT. [8].....	16
Figura 6. Constituição de uma máquina de injeção [26].....	20
Figura 7. Ciclo de injeção plástica [28]. ....	21
Figura 8. Diferença entre um termoplástico com estrutura amorfa e estrutura semicristalina [28].....	22
Figura 9. Placas constituintes de um molde [21].....	25
Figura 10. Constituição de um molde híbrido [38].....	29
Figura 11. Processo de SLS [20].....	34
Figura 12. Processo de FDM [20]. ....	36
Figura 13. Esquema representativo dos filamentos cilíndricos e dos vazios, inerentes do processo de FDM [50].....	37
Figura 14. Processo de SL [20].....	39
Figura 15. Processo de LOM [20]. ....	41
Figura 16. Processo de Impressão 3D [49].....	43
Figura 17. Preparação da caixa para o vazamento do silicone. ....	44
Figura 18. Processo de RTV [11].....	45
Figura 19. Etapas do processo de <i>Keltool 3D</i> [3].....	48
Figura 20. Processo LENS [53]. ....	49
Figura 21. Chapa da bucha modelada.....	60
Figura 22. Chapa desenvolvida no projeto, após maquinação. ....	61
Figura 23. Sistema de refrigeração modelado.....	63
Figura 24. Sistema de refrigeração realizado no laboratório. ....	63
Figura 25. a - Chapa de aperto de extração com calços montados; b - chapa reforço da bucha; c - chapa da cavidade.....	63
Figura 26. a - Chapa de aperto dos extratores, chapa dos extratores, chapa de reforço da bucha, chapa da bucha; b - molde montado.....	64
Figura 27. Chapa metálica antes do vazamento. ....	66
Figura 28. Chapa após vazamento da resina epóxi carregada de Al. ....	67
Figura 29. Bloco modelado no SolidWorks.....	68
Figura 30. Bloco moldante após maquinação.....	68
Figura 31. Ensaio de injeção do bloco moldante de resina epóxi carregado de Al. ....	70

Figura 32. a – Equipamento de DMA utilizado; b – Posicionamento do provete de DMA no equipamento. ....	72
Figura 33. Relação entre tensão/deformação de um ensaio de tração [62]. ....	73
Figura 34. Ensaio mecânico de tração. ....	74
Figura 35. Ensaio mecânico de flexão em três pontos. ....	76
Figura 36. Dimensões do provete de tração. ....	77
Figura 37. Dimensões do provete de flexão. ....	78
Figura 38. Provetes de PP com e sem empeno. ....	80
Figura 39. Rebarba de um provete de PP. ....	81
Figura 40. Resultados do ensaio de DMA a 23°C do PP. ....	82
Figura 41. Resultados do ensaio de DMA a 70°C do PP. ....	82
Figura 42. Resultados obtidos do ensaio de DMA a 23°C do PS. ....	83
Figura 43. Resultados obtidos do ensaio de DMA a 70°C no PS. ....	84
Figura 44. Resultados obtidos do ensaio de flexão do PP. ....	85
Figura 45. Resultados obtidos do ensaio de flexão do PS. ....	86
Figura 46. Resultados obtidos para o ensaio de tração do PP. ....	87
Figura 47. Resultados obtidos para o ensaio de tração do PS. ....	88

# Lista de tabelas

---

Tabela 1. Classificação das tecnologias de fabrico rápido diretas [8].	17
Tabela 2. Classificação das tecnologias de fabrico rápido indiretas. [13]	17
Tabela 3. Influência dos elementos liga nas características dos aços [36,37].	28
Tabela 4. Comparação dos processos convencionais e processos de RT [35].	30
Tabela 5. Vantagens e limitações do processo de SLS.	35
Tabela 6. Vantagens e limitações do processo de FDM.	38
Tabela 7. Vantagens e limitações do processo de SL.	40
Tabela 8. Vantagens e limitações do processo de LOM.	42
Tabela 9. Vantagens e limitações do processo de impressão 3D.	44
Tabela 10. Vantagens e limitações do processo RTV.	45
Tabela 11. Vantagens e limitações do processo de vazamento de resinas epóxi.	47
Tabela 12. Vantagens e limitações do processo keltool.	48
Tabela 13. Vantagens e limitações do processo LENS.	50
Tabela 14. Vantagens e limitações do processo ProMetal.	51
Tabela 15. Vantagens e limitações do processo DMLS.	53
Tabela 16. Vantagens e limitações da projeção metálica.	54
Tabela 17. Tabela comparativa dos processos para obtenção de um <i>master</i> .	56
Tabela 18. Tabela comparativa dos processos para obtenção de um bloco moldante.	57
Tabela 19. Parâmetros da resina Biresin L74.	64
Tabela 20. Parâmetros de injeção.	69
Tabela 21. Análise dimensional do provete de tração injetado em PP.	78
Tabela 22. Análise dimensional do provete de flexão injetado em PP.	79
Tabela 23. Análise dimensional do provete de tração injetado em PS.	79
Tabela 24. Análise dimensional do provete de flexão injetado em PS.	80
Tabela 25. Módulo de elasticidade do PP, obtido através do ensaio de DMA.	83
Tabela 26. Módulo de elasticidade do PS, obtido através do ensaio de DMA.	84
Tabela 27. Valores obtidos através do ensaio de flexão em três pontos, para os provetes em PP, injetados nos diferentes blocos, no regime elástico.	85
Tabela 28. Valores obtidos através do ensaio de flexão em três pontos, para os provetes em PS, injetados nos diferentes blocos, no regime elástico.	86
Tabela 29. Resultados obtidos do ensaio de tração do PP.	87
Tabela 30. Resultados obtidos do ensaio de tração do PS.	88

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

# Lista de siglas

---

- 3D – Tridimensional
- $A_0$  – Área da seção transversal
- ABS – Acrilonitrila butadieno estireno
- AIM – *Aces injection moulding*
- Al – Alumínio
- b – Largura do provete
- CAD – Desenho assistido por computador
- CAE – Engenharia assistida por computador
- CAM – Fabricação assistida por computador
- CNC – Controlo numérico computadorizado
- DMLS – *Direct metal laser sintering*
- DSPC – *Direct Shell production casting*
- E – Módulo de elasticidade
- ESTG – Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria
- F – Força aplicada
- $F_{\text{máx}}$  – Força máxima
- FDM – Modelação por fusão de plástico
- I – Momento de inércia
- INEGI – Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial
- h – Altura do provete
- L – Distância entre apoios
- $L_0$  – Comprimento inicial do provete
- LENS – Fabricação de forma final a laser
- LOM – Fabricação de objetos por camada
- M – Momento flector
- MPa – Megapascal
- N - Newton
- NC – Comando numérico
- Pa – Pascal
- PC – Policarbonato
- PP – Polipropileno

PPSF – Polifenilsulfona  
PS- Poliestireno  
RNPR – Rede nacional de prototipagem rápida  
RP – Prototipagem rápida  
RT – Fabrico rápido  
RTV – Vulcanização à temperatura ambiente  
SGC – Cura sólida na base  
SL – Estereolitografia  
SLS – Sinterização seletiva a laser  
STL – *Structurec triangular language*  
UV – Ultravioleta  
 $y$  – Distância entre a linha neutra ao pont mais afastado  
 $\Delta L$  – Variação do comprimento do provete  
 $\varepsilon$  - Extensão  
 $\varepsilon_m$  – Extensão máxima à tração  
 $\sigma$  – Tensão nominal  
 $\sigma_c$  – Tensão de cedência  
 $\sigma_f$  – Resistência à flexão  
 $\sigma_{m\acute{a}x}$  – tensão máxima à tração  
 $\sigma_r$  – Tensão de rotura  
 $\delta$  – Ângulo de atraso

# Índice

---

<b>AGRADECIMENTOS</b>	<b>III</b>
<b>RESUMO</b>	<b>V</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>VII</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>IX</b>
<b>LISTA 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>
1.1. Enquadramento	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Estrutura Da Tese	3
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>5</b>
2.1. Prototipagem Rápida	5
2.1.1. Etapas da RP	7
2.1.2. Sistemas CAD/CAE/CAM	9
2.1.3. Parâmetros do Planeamento do Processo	10
2.1.4. Classificação dos Processos de RP	12
2.1.5. Características da RP	13
2.1.6. Aplicações da RP	13
2.2. Fabrico Rápido	14
2.2.1. Classificação do RT	15
2.2.2. Aplicação do RT	18
<b>3. MOLDAÇÃO POR INJEÇÃO</b>	<b>19</b>
3.1. Constituição de uma Máquina de Injeção	20
3.2. Ciclo de Injeção	20
3.3. Material Polimérico	22
3.4. Moldes para Moldação por Injeção	23
3.5. Constituição de um Molde	24
3.5.1. Moldes Convencionais	25

3.5.2.	Processos de Fabrico	26
3.5.3.	Aço para Moldes Convencionais	27
3.5.4.	Moldes Híbridos	28
<b>3.6.</b>	<b>Master e Blocos Moldantes</b>	<b>30</b>
3.6.1.	Master	30
3.6.2.	Blocos Moldantes	31
<b>3.7.</b>	<b>Processos de Fabrico para Obtenção de Master</b>	<b>32</b>
3.7.1.	Sinterização Seletiva a Laser	33
3.7.2.	Modelação por Fusão e Deposição	35
3.7.3.	Estereolitografia	38
3.7.4.	Fabricação de Objetos por Camadas	40
3.7.5.	Impressão 3D	42
3.6.6.	Vulcanização à Temperatura Ambiente	44
<b>3.8.</b>	<b>Processos de Fabrico para Obtenção de Blocos Moldantes</b>	<b>46</b>
3.8.1.	Vazamento de Resina Epóxi	46
3.8.2.	3D Keltool	47
3.8.3.	Fabricação de Forma Final a Laser	49
3.8.4.	Impressão 3D ProMetal	50
3.8.5.	Direct Tool (DMLS)	51
3.8.6.	Projeção Metálica	53
<b>3.9.</b>	<b>Comparação dos Processos de Obtenção de Master</b>	<b>54</b>
<b>3.10.</b>	<b>Comparação dos Processos de Obtenção de Blocos Moldantes</b>	<b>56</b>
<b>4.</b>	<b>TRABALHO EXPERIMENTAL</b>	<b>59</b>
<b>4.1.</b>	<b>Fabricação da Chapa Metálica</b>	<b>59</b>
<b>4.2.</b>	<b>Conceção do Sistema de Refrigeração</b>	<b>62</b>
<b>4.3.</b>	<b>Montagem/Desmontagem do Molde</b>	<b>63</b>
<b>4.4.</b>	<b>Construção dos Blocos Moldantes</b>	<b>64</b>
<b>4.5.</b>	<b>Produção dos Provetes</b>	<b>67</b>
<b>4.6.</b>	<b>Ensaio de Injeção</b>	<b>69</b>
<b>4.6.</b>	<b>Métodos de Caracterização das Amostras</b>	<b>70</b>
4.6.1.	Análise Mecânica Dinâmica	70
4.6.2.	Ensaio de Tração	72
4.6.3.	Ensaio de Flexão em Três Pontos	74

<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>77</b>
5.1. Análise Dimensional	77
5.2. Análise Visual	80
5.3. Análise Mecânica	81
5.3.1. Análise Mecânica Dinâmica	81
5.3.2. Flexão Em Três Pontos	84
5.3.3. Ensaio de tração	87
<b>6. CONCLUSÃO</b>	<b>89</b>
<b>7. TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>93</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>95</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>101</b>
Anexo I – Desenho do molde de aço	103
Anexo II – Desenho da chapa da bucha	105
Anexo III – Ficha técnica da resina	107
Anexo IV – Desenho do bloco moldante	109

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

# 1. Introdução

---

## 1.1. Enquadramento

---

Com o permanente desenvolvimento tecnológico e com a crescente exigência do mercado surgem cada vez mais alterações de produtos, com ciclos de vida cada vez mais curtos. Como forma de dar resposta a estas necessidades, é fundamental envolver as diversas etapas de desenvolvimento de cada produto, numa fase inicial do processo, nomeadamente, o *design*, a engenharia e a produção.

A prototipagem rápida é definida como sendo um conjunto de processos que permitem a obtenção de objetos sólidos, em formato tridimensional, e com tempos de produção baixos. A prototipagem rápida tem diversas aplicações, desde as de índole industrial, à produção de ferramentas e à produção de peças/componentes únicas ou de séries reduzidas.

Atualmente, a prototipagem rápida engloba dois tipos de tecnologias, os processos de remoção de material, mais conhecidos como métodos tradicionais, e os processos de adição de material, designados por tecnologias aditivas. Estas tecnologias comparativamente aos métodos tradicionais oferecem vantagens, nomeadamente, na redução do tempo de fabrico da peça/componente e diminuição do custo. Atualmente, é possível a fabricação de uma ferramenta por tecnologias aditivas em semanas ou até mesmo dias. A mesma ferramenta, produzida por tecnologias convencionais poderia demorar meses a fabricar. Contudo, é de salientar que também possuem algumas limitações, que variam consoante o processo de fabricação aditiva, sendo necessário efetuar uma análise detalhada de cada processo, de modo a minimizar as consequências das suas limitações.

Devido à crescente procura de produtos com séries de produção pequenas ou mesmo unitárias, as tecnologias mais convencionais deixam de dar resposta a estas necessidades, nomeadamente a produção de moldes de injeção plástica. Com isto, os moldes híbridos adquirem grande importância, nomeadamente em indústrias mais específicas e de baixas produções.

## 1.2. Objetivos

---

O objetivo deste projeto é propor uma alternativa aos moldes convencionais, através do fabrico de moldes híbridos, de modo a colmatar algumas limitações apresentadas pelas tecnologias de fabrico convencional.

De modo a atingir este objetivo foi realizado um levantamento bibliográfico das tecnologias mais relevantes utilizadas no fabrico de elementos moldantes para moldes híbridos, tendo em conta a descrição do processo, bem como os materiais utilizados, as vantagens e as limitações. Desta forma, procedeu-se a uma análise comparativa entre os diversos processos de fabrico rápida abordados.

Após o estudo comparativo e a seleção de uma tecnologia, tendo em conta os recursos existentes, iniciou-se o trabalho experimental. Este trabalho experimental teve como objetivo demonstrar que o processo escolhido para o fabrico do bloco moldante é uma alternativa ao fabrico dos moldes convencionais. Para tal, foram produzidos dois blocos moldantes no Laboratório de Tecnologia de Fabrico, da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria e utilizado um molde convencional já existente.

De modo a proceder a uma análise quantitativa e qualitativa dos blocos moldantes em comparação com o molde convencional, produziram-se provetes por moldação por injeção, com a mesma geometria e realizaram-se ensaios mecânicos de tração, flexão em três pontos e análise mecânica-dinâmica.

Os blocos moldantes fabricados não possibilitam a realização do mesmo número de ciclos de injeção de uma ferramenta convencional. Contudo, apresentam tempos de fabrico muito menores, podendo ser um vantajoso recurso para as empresas darem respostas mais rápidas às necessidades do mercado, em termos de protótipos e de produtos de séries reduzidas.

## 1.3. Estrutura Da Tese

---

A tese encontra-se dividida em 7 capítulos. No primeiro capítulo é realizado o enquadramento da tese, bem como são apresentados os objetivos da mesma. De seguida, no segundo capítulo é apresentada a revisão bibliográfica com foco nos processos de prototipagem rápida, realçando-se o aparecimento de alguns processos, as etapas generalistas dos processos de prototipagem rápida, bem como, os parâmetros para o seu planeamento. Ainda neste capítulo é realizada uma classificação das tecnologias de prototipagem rápida e um levantamento das suas características e aplicações. Por fim, é apresentado a revisão bibliográfica dos processos de fabrico rápido, a sua classificação e aplicações.

O terceiro capítulo inicia-se com uma pequena abordagem ao aparecimento da moldação por injeção, seguido da descrição da constituição de uma máquina de injeção e do ciclo de injeção. Neste capítulo são ainda apresentados os dois tipos de material polimérico utilizados na parte experimental desta tese e apresentados os moldes utilizados na moldação por injeção, nomeadamente moldes convencionais e moldes híbridos, bem como os processos de fabrico para cada um deles. É adicionalmente realizada uma análise comparativa entre os processos para a obtenção de blocos moldantes, bem como, os processos para a obtenção de um master, tendo em conta as características que cada um deles deve possuir.

No capítulo quarto descreve-se o trabalho experimental, nomeadamente, o fabrico da chapa da bucha, a conceção do sistema de refrigeração, as etapas do fabrico dos blocos moldantes, bem como o ensaio de injeção plástica, do molde híbrido e do molde convencional. Com os provetes obtidos na injeção foram realizados ensaio laboratórios, de modo a caracterizar as amostras, estando os mesmos descritos neste capítulo.

No capítulo quinto são apresentados os resultados dos ensaios laboratoriais e no capítulo sexto apresenta as principais conclusões do trabalho desenvolvido. Por último, no sétimo capítulo encontram-se os aspetos fundamentais para trabalhos futuros.

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

## 2. Revisão Bibliográfica

---

### 2.1. Prototipagem Rápida

---

O conceito de prototipagem rápida (RP) está relacionado com a obtenção/fabrico rápido de peças/ferramentas protótipo com base em tecnologias que produzem o modelo, com recurso a *software* de desenho assistido por computador (CAD). Este grupo de tecnologias apresentam diversas vantagens quando comparados com os processos de fabrico convencionais, como por exemplo, a maquinação de controlo numérico computadorizado (CNC), o torneamento, a fresagem, entre outros [1,2].

A RP surgiu por volta dos anos 60, quando *Herbert Voelcker* se interrogou sobre a possibilidade de através do controlo computacional das máquinas industriais, conseguir obter uma peça/componente em formato tridimensional (3D). Com isto, *Herbert* passou a dedicar-se ao estudo de ferramentas matemáticas, com o objetivo de descrever o formato 3D de uma peça/componente.

Apenas em 1987, por intermédio do investigador *Carl Deckrad*, foi possível a fabricação da primeira peça/componente através do sistema de produção camada a camada. Esta fabricação teve como princípio base a fusão de pó metálico, através de raio laser, camada a camada, tendo sido designado por *Carl*, sinterização seletiva a laser (SLS).

Apesar do grande impulso dos trabalhos desenvolvidos por *Herbert* e *Carl*, para o aparecimento da RP, *Charles Hull* é reconhecido como sendo o fundador desta tecnologia. *Charles* contribuiu para patentear o primeiro processo de RP, a estereolitografia (SL), utilizada apenas para matéria-prima polimérica [3].

A tecnologia SL começou a ser comercializada pela empresa *3D Systems*, que iniciou a comercialização de novas versões do equipamento da SL, nos anos de 1988 e 1989, por parte de empresas japonesas (*NTT Data* e *Sony/D-MEC*) [2].

Com a conceção e comercialização desta tecnologia, surgiram outros equipamentos e outras técnicas de RP, nomeadamente a modelação por fusão de polímeros (FDM), a cura

sólida na base (SGC) e a fabricação de objetos por camada (LOM), em 1991. Foi no ano de 1992 que a empresa *DTM* tornou disponível comercialmente o SLS.

Outro método de RP que utiliza material em pó, surgiu através da empresa americana *Soligen* em 1993, denominado *direct shell production casting* (DSPC), baseando-se na tecnologia de impressão 3D e desenvolvido pelo *Massachusetts Institute of Technology*.

A partir de 1994 diversas tecnologias e sistemas surgiram, tais como:

- *ModelMaker*, o qual utiliza um sistema de jato a cera para a concepção das peças/componentes, comercializado pela empresa *Sanders Prototype*;

- Sistema de SL, através da empresa japonesa *Oshio*;

- Sistema EOSINT baseado na sinterização, comercializado pela empresa alemã *EOS*.

Em 1996, a empresa *Aaroflex* iniciou a comercialização do sistema *SOMOS* de SL e a empresa *3D Systems* lançou para o mercado o sistema *Actua 2100*, tendo por base os princípios da impressão 3D [3,4,5].

Segundo *Choi e Samaveda*, a RP pode ser articulada com a prototipagem virtual. Esta última possibilita que os modelos sejam testados ainda na fase de conceptualização virtual. Com esta integração existe a possibilidade de estudar a influência dos parâmetros de construção, antes da fabricação do protótipo.

Ao longo dos anos, diversas tecnologias apareceram, mas não tiveram o impacto industrial necessário para se afirmarem no conjunto de tecnologias de RP atualmente utilizadas. Na década de 90 a SL foi a tecnologia mais utilizada.

Nos dias de hoje, os processos de RP são todos os que possibilitem a fabricação de uma peça em 3D, partindo de um ficheiro CAD, com recurso a um sistema de fabricação assistida por computador (CAM), num curto período de tempo. Atualmente existem mais de 30 tecnologias de RP, contudo nem todas estão disponíveis comercialmente. Com o

evoluir das tecnologias houve a alteração da designação de prototipagem rápida para fabricação sólida com forma livre ou tecnologias de fabricação aditiva [6,7].

Em Portugal, entre os anos de 1994 e 1997 surgiu o primeiro projeto industrial na área da fabricação aditiva, *PO-Prototyping*, seguido do primeiro projeto nacional, Rede Nacional de Prototipagem Rápida (RNPR). Este projeto nacional visou a criação de uma rede de RP, através da colaboração de instituições de investigação e parceiros industriais. Posteriormente, em 2002, iniciou-se um projeto de fabrico rápido (RT) de ferramentas, a nível nacional, dando ênfase à produção de ferramentas. Na figura 1 está representado um projeto desenvolvido pelo Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial (INEGI), utilizando tecnologias de RP [8].



Figura 1. Projeto desenvolvido pelo INEGI, moldes de silicone e terrina de porcelana [8].

### 2.1.1. Etapas da RP

---

Apesar de existirem diversas tecnologias de RP, todas elas têm por base 5 etapas necessárias à fabricação do protótipo.

A etapa inicial consiste na obtenção do modelo CAD 3D, através de um *software* próprio ou pela digitalização 3D da peça/componente. Como os *softwares* de CAD 3D utiliza algoritmos próprios, houve a necessidade de criar um padrão universal para utilizar nos equipamentos, o formato *Structurec triangular language* (STL). Com este formato universal é possível produzir uma peça/componente em RP, no qual o *software* de modelação utilizado é diferente.

Para que seja possível esta utilização, o ficheiro CAD é convertido no formato STL, no qual a peça é representada por uma malha triangular, sendo que o ficheiro armazena as coordenadas dos vértices e a direção da normal externa de cada triângulo. O número de

triângulos da peça está relacionado com a qualidade do protótipo construído e com o tempo de processamento: quando maior for o número de triângulos, maior será o tempo de construção e melhor será a precisão [9,10].

Posteriormente, o modelo é enviado para um sistema CAM, inerente ou não ao equipamento de RP, no qual a peça é “fatiada” em camadas com espessura de 0,01 mm a 0,7 mm (dependendo da técnica de construção), paralelas entre si e perpendiculares ao eixo de construção da peça. O sistema CAM gera igualmente estruturas de suporte à construção da peça, bem como ajusta a orientação do modelo e define a trajetória de construção para cada camada. Esta informação é armazenada num ficheiro de comando numérico (NC), o qual é enviado para a máquina de RP, dando-se início à construção da peça, camada após camada.

Após a construção da peça, em alguns processos, existe a necessidade de cura, contudo o pós-processamento da peça é uma etapa existente em todos os processos. O pós-processamento engloba a remoção das estruturas de apoio de construção, a limpeza das peças e o seu acabamento superficial. As operações de acabamento superficial podem incluir polimento, pintura ou marcação na peça. As várias etapas que ocorrem antes da fabricação aditiva de uma peça estão representadas na figura 2 [9,10,11].

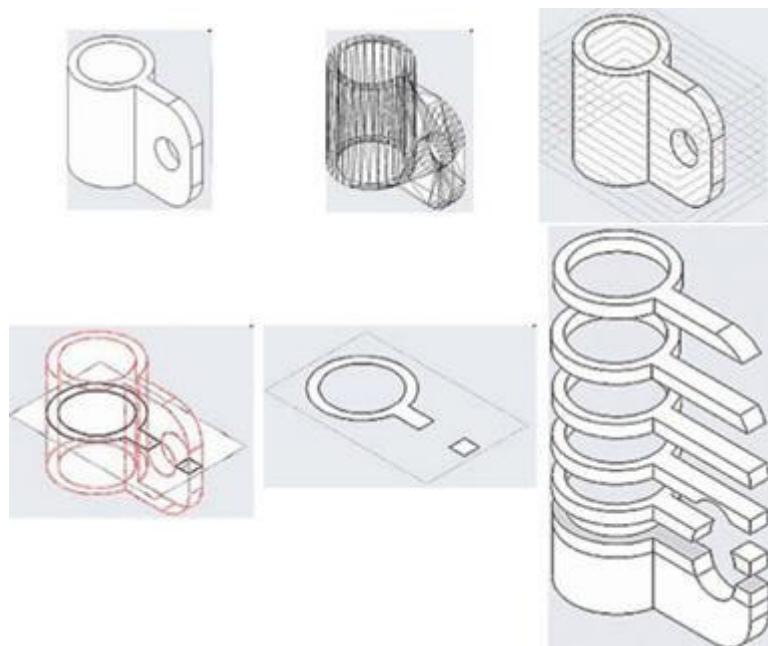


Figura 2. Etapas da modelação de uma peça, para a fabricação aditiva [11].

## 2.1.2. Sistemas CAD/CAE/CAM

---

O sistema de CAD é definido como sendo o sistema computacional de desenvolvimento, modificação e otimização de um projeto de engenharia. Já o sistema CAM consiste no sistema que faz a ligação entre um computador e uma máquina ou processo, tendo surgido por volta dos anos 50, no exército norte-americano. O CNC deriva de um sistema CAM, e atualmente é utilizado na maioria dos processos de fabricação. O sistema de engenharia assistida por computador (CAE) é um sistema baseado numa engenharia preditiva, ou seja, envolve uma análise dos modelos, antes da sua construção, do ponto de vista da simulação do seu funcionamento em serviço. Com isto, os custos e o tempo de projeto diminuem. Com este sistema é possível realizar simulações que auxiliam no projeto mecânico, mecânica dos fluídos, análise reológica, entre outros [10,12].

Os sistemas de CAD/CAE/CAM, até aos anos 80, eram maioritariamente utilizados pela indústria aeroespacial e automóvel. Contudo, com o evoluir da tecnologia dos sistemas e das técnicas de processos de fabrico, o uso destes sistemas, atualmente estende-se a qualquer indústria de fabricação ou de projeto.

Estes três sistemas, acima mencionados, permitem ao utilizador ter a capacidade de projetar, simular e fabricar o produto. Na figura 3 pode-se verificar a representação de uma peça analisada através de um sistema de CAE [10].

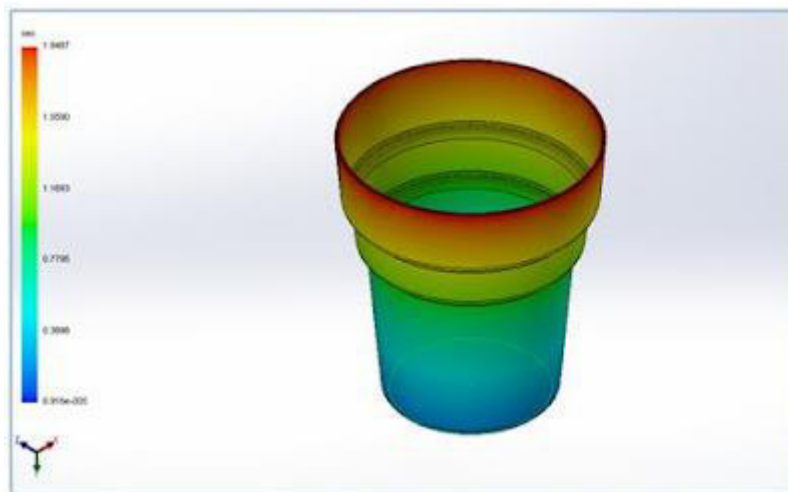


Figura 3. Simulação de injeção de um copo de plástico [13].

### 2.1.3. Parâmetros do Planeamento do Processo

---

Aquando da fabricação de uma peça é necessário ter em consideração alguns aspetos relativamente às características dos processos de RP. O planeamento do processo baseia-se na qualidade do ficheiro STL e nos parâmetros de configuração, diferentes de cada processo. Contudo existem etapas gerais que devem ser estudadas, tais como, a orientação da peça, a anisotropia, o efeito degrau, a construção de suportes e o pós-processamento [10,11].

#### Orientação da peça

Em todos os processos de técnicas aditivas é necessário definir a orientação da peça, para a sua construção. A definição da orientação é importante para diminuir alguns efeitos indesejados, na construção por adição de camadas, tais como, a anisotropia da peça, a utilização de suportes de construção e o efeito degrau.

#### Anisotropia

A anisotropia é definida como sendo a desigualdade de propriedades mecânicas, em cada eixo, no protótipo. Como a construção das peças é realizada habitualmente na direção Z, a peça apresenta fragilidade nos eixos XY, devido ao processo de agregação do material. Contrariamente, na maquinação convencional, a peça possui características isotrópicas nas três direções. Para diminuir a anisotropia, é necessário ajustar parâmetros do processo, tais como, a forma de preenchimento da camada, a potência do laser e ajustes de temperatura, de forma a promover uma melhor agregação entre camadas [12].

#### Efeito degrau

O efeito degrau consiste na falta de continuidade, causado pela espessura das camadas, afetando o protótipo na sua qualidade e resistência mecânica. Este efeito pode ser minimizado, diminuindo a espessura de cada camada, contudo até com a mínima espessura de fabricação, o efeito degrau é considerado grande. Porém, a diminuição da espessura de cada camada aumenta o tempo de produção. O efeito degrau também pode ser reduzido alterando a orientação da peça. Na figura 4 está representado a opção inicial da orientação da peça, que com a alteração da posição diminui o efeito degrau. Assim, evita-se a etapa de acabamento, de modo a eliminar esse mesmo efeito [10,11].

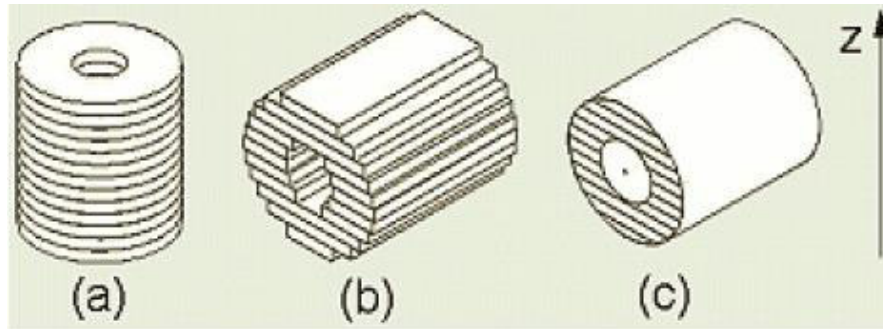


Figura 4. Influência da orientação da peça no efeito degrau [10].

### Construção de suportes

A maior parte dos processos de fabrico por camadas recorre à utilização de suportes à construção. Todavia, para garantir a estabilidade do protótipo, deve-se minimizar o número de estruturas de suporte. Para tal, a escolha da orientação e construção da peça é muito relevante.

A remoção destes suportes auxiliares pode ser feita de diversas formas:

- Mecanicamente, em situações onde a interface com o protótipo é mais frágil;
- Agentes corrosivos, onde a estrutura é dissolvida em contato com substâncias corrosivas;
- Por fusão, onde a estrutura é submetida a altas temperaturas o que provoca a sua fusão.

O tipo de remoção das estruturas auxiliares deve ter em consideração as características do material do protótipo, de modo a não danificar as regiões no qual a estrutura se encontra. Para regiões do protótipo de difícil acesso e blocos pequenas a remoção mecânica torna-se difícil ou mesmo impossível [10,11,12].

No que diz respeito a superfícies inclinadas, estas não necessitam de suporte, desde que a inclinação da camada seja suficiente para suportar a camada posterior. A inclinação máxima possível na construção da peça depende da tecnologia utilizada.

De forma a reduzir o número de suportes, reduzindo assim o tempo de processamento, é importante uma boa definição da orientação da peça, como já foi referido anteriormente.

Esta deve ser feita de forma mais estável possível, com um menor número de estruturas instáveis. Contudo, isto pode provocar dimensões de altura de construção grandes, acarretando mais tempo de processamento. Além disso, uma escolha incorreta da orientação da peça pode comprometer o uso do protótipo, devido à sua anisotropia.

#### Pós-processamento e acabamento

O pós-processamento consiste na finalização de um processo já iniciado na RP, nomeadamente, na cura de resinas em forno ultravioleta (UV), na limpeza dos protótipos, pela remoção de estruturas de apoio e material em excesso. Posteriormente, segue-se o acabamento que tem como objetivo dar características estéticas ao protótipo, dependendo da sua finalidade, que são impossíveis de obter durante o processo de RP. Nesta fase, o protótipo pode ser submetido a diversos processos, tais como, pintura, revestimento, texturalização, colagem, polimento, entre outros [10,11,12].

### **2.1.4. Classificação dos Processos de RP**

---

Existem diversas formas de classificar os processos de RP, tendo em contas diversas características, tais como, o estado do material, a técnica de criação de camadas e o material utilizado. Ao longo deste trabalho apenas será abordada a classificação pelo estado do material.

A classificação dos processos RP baseada no estado do material utilizado na construção do protótipo divide-se em três categorias:

- Processos de base líquida: nestes processos o material encontra-se no estado líquido, sendo convertido em estado sólido através de um laser ou luz UV.
- Processos de base sólida: o material a ser processado encontra-se no estado sólido, contudo podem estar em quatro formas: fio, rolo, laminado ou grânulos.
- Processos de base pó: nestes processos o material encontra-se no estado sólido, contudo em forma de pó [2,13].

### **2.1.5. Características da RP**

---

De entre os vários processos de fabrico convencional, destaca-se a maquinação CNC, devido à sua vasta utilização em todos os sectores, bem como, o tempo de processamento de uma peça/ferramenta através desta tecnologia. Com isto, é relevante realizar uma análise das vantagens e limitações que a RP apresenta em relação à maquinação CNC.

De entre o conjunto de vantagens dos processos RP em relação à maquinação CNC, destacam-se: a produção de peças/ferramentas com geometrias difíceis de serem fabricadas por maquinação CNC; a tecnologia RP permite a fabricação de suportes, para auxiliar a produção da peça, através de um único processo e equipamento. Com a utilização de um único processo também é possível a diminuição do tempo de construção da peça, bem como, do custo total da sua produção, sendo mais evidente em peças com geometrias complexas [10].

Contudo, os processos RP apresentam limitações quando comparados com a maquinação CNC, tais como, as características dos materiais utilizados nos processo RP não possuem as mesmas propriedades dos metais utilizados na maquinação convencional; devido à fabricação por camadas, a peça produzida em RP possui anisotropia e efeito degrau, provocando um desvio entre a peça produzida e a peça modelada. Com isto, a precisão e o acabamento superficial em peças produzidas em RP são de qualidade inferior em relação a peças produzidas por maquinação convencional [10].

### **2.1.6. Aplicações da RP**

---

Com o aparecimento da RP surgiu a possibilidade da construção de protótipos para visualização, não considerando as suas características dimensionais e precisão. Devido à fraca precisão e à restrição de materiais utilizados, limitava-se a sua utilização em etapas iniciais de desenvolvimento do produto [12].

Com o desenvolvimento dos equipamentos e de novos materiais, a RP, atualmente, é utilizada em diversas áreas, envolvendo protótipos funcionais. As aplicações de protótipos

destinam-se a áreas como aeroespacial, biomédica, automóvel, arquitetura, joalheria, eletrônica, entre outras.

Existem processos de RP que são designados por fabrico rápido (RT), uma vez que permitem o fabrico direto de peças de produção. Estes métodos concorrem com a maquinação convencional na medida em que permitem a fabricação de pequenas séries ou peças singulares. Um destes casos são as aplicações na engenharia biomédica, onde muitas vezes apenas é necessário produzir uma peça. É o caso da fabricação de implantes à medida do paciente, por exemplo, através da digitalização por tomografia computadorizada [14,15].

## 2.2. Fabrico Rápido

---

O conceito RT é utilizado para definir as ferramentas de produção que são fabricadas total ou parcialmente por tecnologias não convencionais, com o objetivo da produção de protótipos ou de séries reduzidas de produtos de forma mais rápida. Este conceito foi desenvolvido tendo por base as tecnologias de RP, tornando-se uma alternativa aos processos convencionais de produção de moldes, sendo atualmente muito utilizado na produção de ferramentas para a indústria de moldes [16,17].

De acordo com *Chua*, RT é definido como sendo um conjunto de tecnologias que utilizam a RP, de forma direta ou indireta, para a obtenção de matrizes ou moldes, surgindo devido às limitações das diferentes técnicas de RP. Entre o conjunto de limitações destacam-se o custo dos materiais utilizados e a necessidade da indústria [18].

De forma similar aos processos RP, o primeiro processo que contribuiu para o surgimento do RT foi o processo de SL, através de estudos realizados na época, 1994, entre a empresa fornecedora de resinas SL, na Suíça, e o Instituto Tecnológico Dinamarquês. A partir de 1994, surgiram vários estudos e novos processos de RT, nomeadamente, o processo *Direct Aces injection moulding* (AIM), tendo sido desenvolvido pela empresa *3D Systems*. Em 1998, no Laboratório Cinject da Universidade Federal de Santa Catarina, no Brasil, iniciou-se a pesquisa de moldes não metálicos, baseando-se em insertos de SL, SLS, FDM e resinas com cargas.

O conjunto de tecnologias de RT é essencialmente utilizado para o fabrico de insertos ou postigo, para os moldes de injeção, aproveitando assim o potencial dos processos convencionais e não convencionais. Atualmente, esta união de diferentes processos num único molde é designado por molde híbrido, como será visto mais à frente neste trabalho.

Segundo vários autores, o RT encontra-se ainda em desenvolvimento, prevendo-se que futuramente seja um método que irá competir com os processos convencionais, devido às suas vantagens, nas quais se destacam o tempo de fabricação da ferramenta mais curto e custo de fabricação da ferramenta menor, em caso de lotes de produção reduzidos ou unitários [16].

Contudo, existem limitações adjacentes ao RT quando comparado com a maquinaria convencional, destacando-se a condutividade térmica menor; não é adequado à produção de grandes lotes, devido à fraca resistência ao desgaste, tendo assim uma vida útil da ferramenta menor; e a menor precisão dimensional.

Assim, para o fabrico de uma ferramenta devem-se ter consideração diversos aspetos, de modo a seleccionar um processo convencional ou não convencional, tendo em conta as vantagens e limitações referidas anteriormente [15,19].

### **2.2.1. Classificação do RT**

---

Devido ao grande número de técnicas de RT houve a necessidade de classificá-las. Existem várias categorias para a classificação dos processos de RT, sendo variável de autor para autor. Alguns dos critérios utilizados para a classificação são o tipo de material, as etapas para a obtenção do molde, a finalidade e o número de peças produzidas. Ao longo deste trabalho apenas será abordada a classificação pelas etapas para a obtenção do molde, nomeadamente, RT direto e RT indireto [20].

O RT indireto necessita de um modelo físico para a obtenção da ferramenta, existindo a necessidade da obtenção de um molde. A qualidade do protótipo utilizado define a qualidade da peça obtida. Dentro das várias técnicas destacam-se os moldes de silicone, moldes de resina epóxi, moldes por deposição metálica e moldes por microfusão. O RT

direto tem como princípio a obtenção da ferramenta através de um ficheiro CAD. Desta forma, as etapas de produção diminuem, aumentando a qualidade e durabilidade das peças, devido à precisão dos processos utilizados. Alguns processos de RT direto são: fabricação direta de insertos de resina através de SL, insertos obtidos por sinterização de pó através de laser, fabricação de moldes de cerâmica para microfusão e fabricação de moldes de metal. Por norma, estes processos exigem equipamento de elevado investimento e matéria-prima de custo elevado. Assim, estas tecnologias estão associadas a áreas nas quais as opções de fabrico de uma peça/componente são reduzidas. Contudo, prevê-se que ao longo dos anos, estas tecnologias se desenvolvam mais, visto serem mais vantajosas em termos de tempo de produção. Na figura 5 está representada a diferença entre ferramentas obtidas por RT direto e RT indireto [18,20].

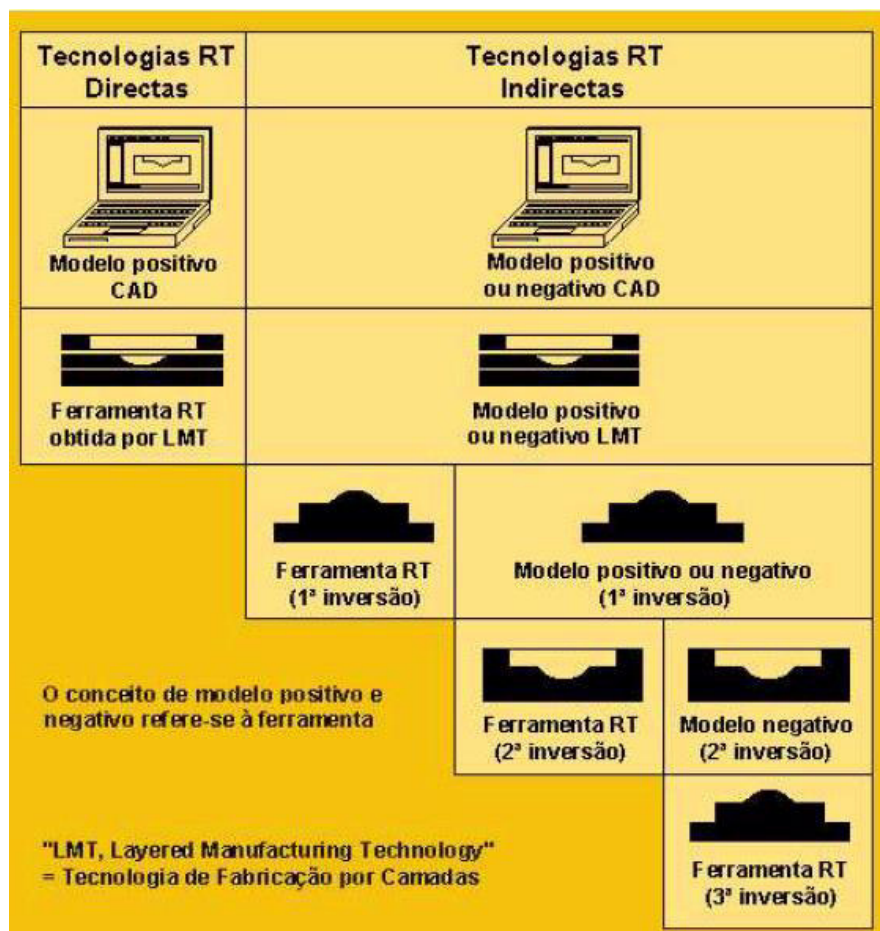


Figura 5. Comparação entre as tecnologias diretas e indiretas de RT. [8]

A partir da classificação de como a ferramenta é obtida, fabricação direta e indireta, estas podem ser divididas consoante o material base. Nas tabelas 1 e 2 encontra-se a classificação das tecnologias RT diretas e indiretas, respetivamente, de acordo com o material base.

Tabela 1. Classificação das tecnologias de fabrico rápido diretas [8].

<b>Tecnologias de Fabrico Rápido Diretas</b>		
<b>Ferramentas Metálicas</b>	Sinterização de pó metálico	Não revestido (DMLS)
		Revestido (SLS)
	Deposição metálica por laser (LENS)	
	Impressão de ligante sobre pó metálico (Prometal)	
	LOM de chapas de aço	
<b>Ferramentas em Polímero e Compósitos</b>	Cura de fotopolímero em pó (AIM/SL)	
	Sinterização de polímero em pó (SLS)	
	Fusão de polímero (FDM)	

Tabela 2. Classificação das tecnologias de fabrico rápido indiretas. [13]

<b>Tecnologias de Fabrico Rápido Indiretas</b>		
<b>Ferramentas Metálicas sem Vazamento</b>	Maciças	Sinterização de misturas com pó metálico ( <i>keltool, dynamic tooling</i> )
	Carapaças	Pulverização metálica ( <i>Sprayform</i> )
		Deposição electrolítica ( <i>Express tool</i> )
<b>Ferramentas Metálicas Vazadas em Moldes de Material Refractário</b>	Moldes perdidos	Conversão direta
		Conversão indireta
	Vazamento em moldação de gesso ou cerâmicos	
	Impressão 3D em pó cerâmico	
	Sinterização de areia <i>croning</i> por laser	
<b>Ferramentas de Polímero e Compósitos vazados</b>	Borracha RTV/Vazamento em vácuo	
	Resinas	
	Compósitos	

A seleção de uma técnica de RT para a produção de uma determinada ferramenta deve ter em consideração a análise do desempenho, dos custos, do tempo de processamento e da capacidade técnica do processo [6,8,11].

Quando se pretende realizar teste mecânicos aos protótipos é necessário que sejam do mesmo material que a peça final e fabricados pelo mesmo processo, de modo a obter resultados mais próximos da realidade. Assim, surgem as ferramentas produzidas em *hard tooling*, no qual se produzem em aço, ligas de alumínio ou cobre. Estas ferramentas podem ser consideradas uma boa alternativa aos processos convencionais, visto que suportam vários ciclos de utilização e proporcionarem bom acabamento superficial e um bom controlo dimensional.

Devido aos custos associados às ferramentas em *hard tooling* e ao seu tempo de fabricação, existem técnicas que permitem a fabricação de uma ferramenta usando um modelo obtido por RP denominado, *firm tooling*. Um exemplo de um processo *firm tooling* é a pulverização metálica. As ferramentas produzidas em borracha de silicone à temperatura ambiente são designadas como sendo *soft tooling* [11,20].

### **2.2.2. Aplicação do RT**

---

A aplicação do RT possui duas vertentes: no desenvolvimento do produto e na fabricação de pequenas séries. Relativamente ao desenvolvimento do produto, o recurso a tecnologias de RT é realizado quando é necessária a produção de pré-séries de qualificação ou quando não se tem a certeza que a maturidade do produto justifique o fabrico de ferramentas definitivas. Tendo por base estas condicionantes, na seleção da tecnologia de RT deve-se ter em consideração os custos e o tempo de produção da ferramenta. No que diz respeito à aplicação do RT na produção de pequenas séries, as condicionantes na seleção da tecnologia são os custos e a qualidade da peça final.

A maioria dos desenvolvimentos das tecnologias de RT tem como aplicação a indústria dos moldes de injeção de plástico e a indústria de fundição. De modo geral, as aplicações com melhores sucessos são os moldes para produção de peças com dimensões pequenas [15].

### 3. Moldação por Injeção

---

Quando o processo de moldação por injeção foi desenvolvido tinha como principal objetivo a transformação de resina termoendurecível. Contudo, com a segunda guerra mundial e com o surgimento de materiais termoplásticos, este processo tornou-se mais abrangente [21].

Em 1872, o processo de moldação por injeção foi patenteado pelos irmãos *Hyatt*, tendo evoluído com as invenções da máquina hidráulica, máquina de parafuso alternativo e máquina elétrica.

Atualmente, este processo é utilizado para a transformação de materiais poliméricos em produtos finais, tais como, embalagens, material eletrônico, componentes para a indústria aeroespacial e automóvel. Esta variedade de aplicações da moldação por injeção deve-se às inúmeras vantagens que oferece, tais como, possibilidade de elevada produção, precisão dimensional, flexibilidade de geometria e gama de dimensões de peça a injetar, que pode ir de 1 mg a 100 kg. Nos dias de hoje, podem ser injetados diversos materiais, desde, termoplásticos, elastômeros vulcanizados, cerâmicas ou metais (contudo com um material polimérico como base) [22,23].

As máquinas de injeção podem ser classificadas em dois tipos, sendo que a diferença está na forma como a plasticização é feita:

- Máquina de pistão: a plasticização do plástico é realizada num cilindro aquecido;
- Máquina de fuso: a plasticização é realizada num fuso, que é acionado por um motor hidráulico ou elétrico.

Normalmente, as máquinas de injeção de pistão têm baixa produtividade, não podendo ser obtidos produtos de elevada qualidade. Apesar da diferença na unidade de plasticização, o resto das unidades da máquina são semelhantes. Contrariamente, as máquinas de injeção de fuso são as mais usadas, porque proporcionam uma boa homogeneização do plástico e mais rapidez na injeção, pois o fuso passa a atuar no material fundido e não no material ainda no estado sólido [21,23].

### 3.1. Constituição de uma Máquina de Injeção

---

Existem inúmeras máquinas de injeção no mercado, com características diferentes, contudo, têm em comum as quatro principais unidades de funcionamento: a unidade de potência, a unidade de injeção, a unidade de fecho e a unidade de comando.

A unidade de potência é a responsável por fornecer energia ao cilindro e aos motores hidráulicos. A unidade de injeção é constituída pelo cilindro, no qual junto ao molde, se encontram as temperaturas mais elevadas. Esta unidade é sustentada pela unidade de potência, que possibilita o transporte, armazenamento, aquecimento e plasticização do plástico. A unidade de fecho é responsável pela fixação do molde ao equipamento, suportando as pressões geradas aquando da injeção. Por último, a unidade de comando permite efetuar o controlo das operações e dos parâmetros do processo, sendo a interface entre o operador e a máquina. Na figura 6 é possível verificar a constituição genérica de uma máquina de injeção [24,25].

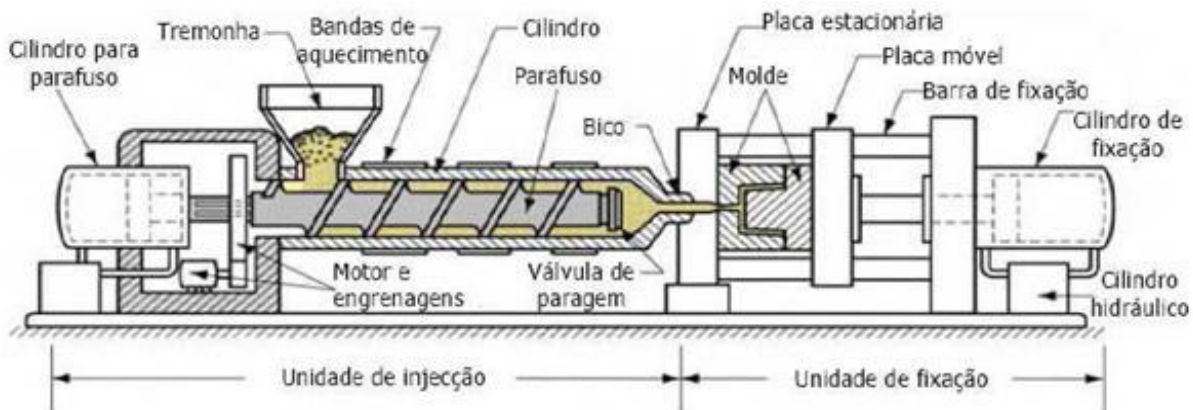


Figura 6. Constituição de uma máquina de injeção [26].

### 3.2. Ciclo de Injeção

---

O processo de injeção pode ser dividido em 4 etapas principais:

- Etapa A: O estado original do plástico antes do início da injeção encontra-se no estado sólido em forma de grãos. A matéria-prima é colocada na tremonha da máquina de injeção, procedendo-se à sua plastificação no interior do cilindro, tornando-se um material

fluido. Antes do início da injeção ocorre o fecho do molde, sendo necessário regular a velocidade de fecho e a pressão, de modo a evitar choques entre as placas do molde.

- Etapa B: A injeção inicia-se quando o fuso empurra o material plástico já fundido para dentro do molde, expelindo o ar, através do sistema de fuga de gases. O cilindro tem a capacidade de aquecer o material devido à existência de resistências elétricas nas suas paredes [21,22].

- Etapa C: Quando a zona moldante do molde estiverem preenchidas ocorre a pressurização. O fuso continua a pressionar o material de modo a compensar a sua contração. Quando os canais estão com material já solidificado, o fuso começa a rodar, de modo a introduzir plástico granulado na tremonha. Com o rodar do fuso, o material avança e funde-se. O arrefecimento do plástico fundido no interior do molde deve-se às trocas de calor com o exterior do molde.

- Etapa D: O ciclo de injeção finaliza-se com a extração da peça. O molde abre e a peça é extraída por extratores mecânicos, pneumáticos ou hidráulicos [23,27].

Na figura 7 podem-se verificar as etapas da transformação do plástico, durante um ciclo de injeção.

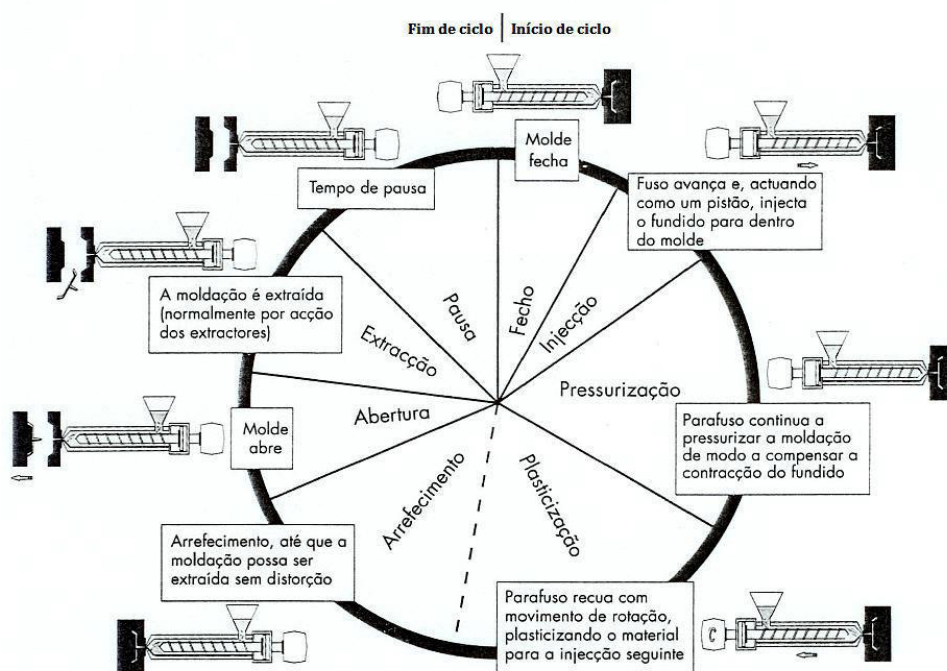


Figura 7. Ciclo de injeção plástica [28].

### 3.3. Material Polimérico

---

Os termoplásticos são materiais com capacidade de se fundirem e fluírem, quando submetidos à sua temperatura de fusão. Este tipo de material quando solidifica origina duas estruturas moleculares diferentes: estrutura amorfa ou estrutura semicristalina.

Os polímeros com estrutura amorfa não possuem organização nas suas cadeias moleculares, dependendo da consistência da interação mecânica entre as cadeias. Estas cadeias moleculares estão entrelaçadas de forma aleatória. São caracterizados por possuírem uma temperatura de utilização inferior à temperatura de transição vítrea.

Contrariamente, os polímeros com estrutura semicristalina apresentam cadeias moleculares ordenadas, formando cristalites. Estes polímeros são caracterizados por possuírem uma temperatura de utilização entre a temperatura de transição vítrea e a temperatura de fusão, tornando-os mais tenazes e com maior resistência química [28,29]. Na figura 8 pode-se verificar a diferença entre as cadeias moleculares de um termoplástico com estrutura cristalina e estrutura amorfa.

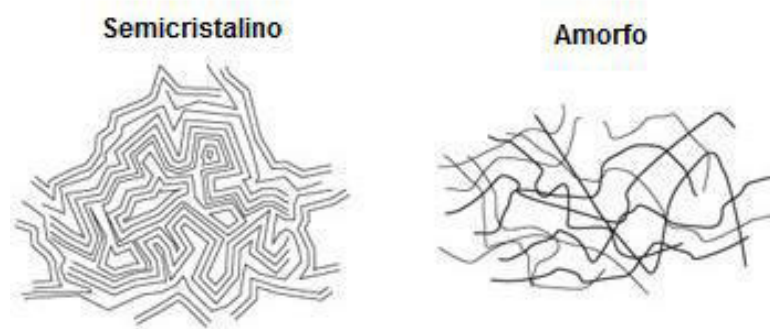


Figura 8. Diferença entre um termoplástico com estrutura amorfa e estrutura semicristalina [28].

Para a realização do trabalho experimental foram selecionados dois termoplásticos, com estruturas moleculares diferentes, o polipropileno (PP) e o poliestireno (PS).

O PP é classificado como sendo um termoplástico semicristalino. Tem como características a boa resistência mecânica à flexão e fadiga; resistência química e boas propriedades elétricas. O seu processo de obtenção é através da polimerização de vários monómeros de propileno, derivado de produtos petrolíferos. Aliando as suas características de baixa

densidade e baixo custo, este polímero é utilizado com várias finalidades, desde a utilidade doméstica à indústria automóvel [30].

O PS é um polímero obtido através da polimerização de vários monómeros de estireno, possuindo uma estrutura amorfa. Como características gerais possui boas propriedades de isolamento elétrico, boa estabilidade dimensional e baixa capacidade de absorção de humidade; contudo apresenta baixa resistência a radiações [52].

### **3.4. Moldes para Moldação por Injeção**

---

Um molde de injeção de termoplásticos é um molde que tem a capacidade de reproduzir a geometria e as dimensões da zona moldante, sendo um conjunto de placas de aço, com funções bem definidas. A zona moldante possuem a configuração da peça/componente que se pretende produzir, através do enchimento das mesmas com material polimérico fundido, que posteriormente é arrefecido [27].

Nos anos 40 surgiram, em Portugal, as primeiras fábricas para a produção de moldes de injeção de plástico. Os primeiros sectores de aplicação deste tipo de moldes foram maioritariamente a indústria dos brinquedos e dos eletrodomésticos, sendo que atualmente, a sua maior aplicabilidade é na indústria automóvel, embalagens, eletrónica e telecomunicações [32,33].

Com o desenvolvimento das tecnologias e dos sistemas computacionais de auxílio à fabricação, os moldes sofreram uma grande evolução na sua construção e nos tratamentos térmicos e químicos a que são sujeitos.

Existem vários materiais para a fabricação de moldes de injeção modernos, tais como, aço de alta liga, na injeção de séries longas; aço de baixo carbono para séries curtas; e ligas de alumínio ou zinco para séries muito curtas ou protótipos. Recentemente surgiu a combinação no mesmo molde de materiais metálicos e não metálicos, originando assim o conceito de molde híbrido [29].

Na escolha de um material para o fabrico de um molde de injeção deve-se ter em consideração diversas características, das quais se destacam: a resistência ao desgaste que o molde deve possuir para suportar o número de ciclos para o qual foi fabricado; tenacidade, o material do molde deve ter a capacidade de resistir à fadiga, quer através das forças de compressão, quer pela diferença de temperaturas do processo de injeção; e boa polibilidade, que está relacionada com o acabamento superficial, através do seu polimento [34].

### **3.5. Constituição de um Molde**

---

Através da descrição da finalidade de um molde de injeção torna-se interessante compreender melhor os elementos que constituem um molde de injeção plástica, sendo constituído por um conjunto móvel e um conjunto fixo. É através do conjunto fixo que o molde fica fixo à máquina de injeção durante o processo de injeção plástica.

A estrutura de um molde é constituída por diversos componentes funcionais, tais como: zona moldante que determina a geometria da peça, estando localizada entre a cavidade e a bucha; sistema de centragem que tem como função a montagem do molde na máquina de injeção; sistema de extração que permite a extração das peças; sistema de alimentação que tem como finalidade permitir a passagem do polímero fundido da máquina até à zona moldante; sistema de controlo de temperatura que permite a refrigeração das peças; e por último, o sistema de fuga de gases que tem como função permitir a libertação do ar da zona moldante enquanto ocorre a injeção do polímero. Estes componentes funcionais encontram-se acoplados em placas, que unidas formam um molde. Na figura 9 encontram-se as diversas placas que constituem um molde [21,33].

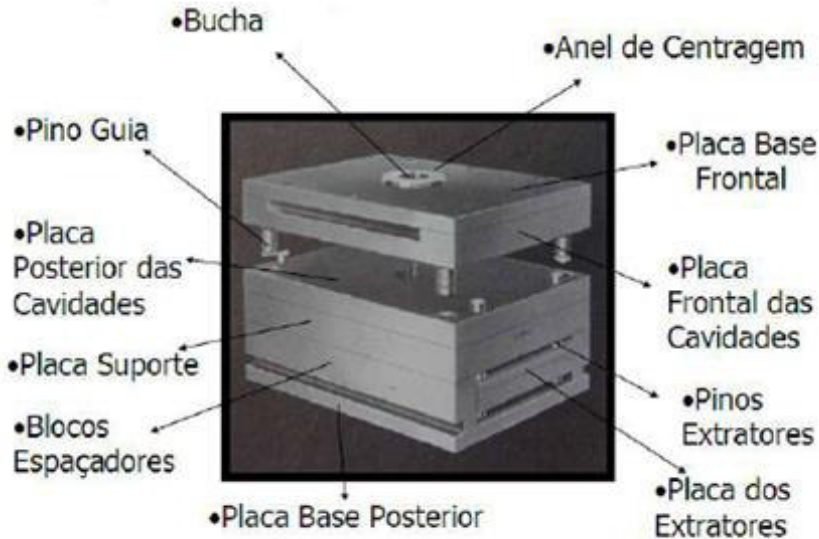


Figura 9. Placas constituintes de um molde [21].

### 3.5.1. Moldes Convencionais

Os moldes convencionais para a injeção plástica, possuem uma vida útil bastante elevada, sendo importante a seleção do material para o seu fabrico. A tipologia de aços, segundo a norma alemã Werk Nr, mais utilizados para o fabrico de moldes são o aço 1.2311, o aço 1.2738 e o aço 1.2344. É de salientar que para moldes no qual é necessário elevada condutividade térmica, o material utilizado são as ligas de cobre-berílio, de modo a diminuir o gradiente térmico entre as cavidades moldantes e os canais de arrefecimento [33,35].

Existem diversos processos convencionais utilizados na produção de moldes, tais como, fresagem, electroerosão, torneamento, furação e retificação. O torneamento é um processo destinado à obtenção de peças para o molde, através da remoção da apana, no qual, as peças obtidas por este processo são assimétricas. A furação tem como principal objetivo a obtenção de furos no molde, normalmente cilíndricos, com o auxílio de uma ferramenta multicortante, com o movimento de corte rotativo. A peça ou ferramenta deslocam-se numa trajetória retilínea e perpendicularmente à superfície de corte. A retificação tem como finalidade melhorar o acabamento superficial do molde, possuindo alta precisão dimensional. Este processo é conseguido através das partículas abrasivas existentes no equipamento [33,37].

### 3.5.2. Processos de Fabrico

---

Como foi referido anteriormente, existem diversos processos de fabrico de moldes convencionais, contudo apenas serão abordados os mais utilizados nesta indústria, a fresagem e a electroerosão.

#### Fresagem

A fresagem é um processo de maquinação convencional com mais aplicabilidade, pois o material é maquinado em múltiplas direções pela ferramenta. A ferramenta, fresa, possui gumes cortantes simetricamente distribuídos em torno do eixo. Esta ferramenta executa movimentos circulares e lineares sobre o material a maquinar. Este processo de fabrico possui grande taxa de remoção de material, bom acabamento superficial e precisão. As fresas normalmente são em aço e carboneto de tungsténio, sendo estas últimas mais caras e com maior tempo de vida, do que as fresas de aço [33,37].

#### Electroerosão

A eletroerosão caracteriza-se pela maquinação através de múltiplas descargas elétricas, em cada fração de segundos. A ferramenta utilizada é um eléctrodo, com a forma negativa da cavidade a maquinar, com uma distância pré-definida e intervalo de descarga. O efeito erosivo na peça é provocado por descargas contínuas, num curto período de tempo com tensões de 20 a 30 voltes, sendo que estas tensões são provocadas pela ligação da peça e do eléctrodo a um gerador. Cada descarga elétrica causa uma cratera através da fusão e vaporização do material, reproduzindo a geometria do eléctrodo, contudo na sua forma invertida.

A superfície da peça possui fracas propriedades mecânicas, com muitas tensões residuais e alta rugosidade, sendo que a erosão ocorre na peça e no eléctrodo. Através da regulação de parâmetros é possível reduzir a erosão do eléctrodo, de modo a obter-se 0,5% de erosão no eléctrodo e 95% na peça [33].

Este processo ocorre com o eléctrodo e a peça imersos num líquido dieléctrico e tem como etapas:

- Ionização do dieléctrico;

- Descarga elétrica;
- Fusão e vaporização dos materiais do eletrodo, da peça e do dielétrico;
- Implosão dos materiais fundidos.

Os materiais mais utilizados para a maquinação dos eletrodos são a grafite e o cobre, devido às suas características. O eletrodo de cobre tem como função o desbaste e o acabamento, devido à sua grande capacidade erosiva e baixo desgaste. Contrariamente, o eletrodo de grafite não tem capacidade de realizar bons acabamentos, mas possui maior resistência ao desgaste. A eficácia e a estabilidade deste processo dependem do estado do líquido dielétrico, ou seja, da ausência de partículas metálicas. Assim, existe um método de limpeza desse mesmo líquido, que se inicia com a remoção das partículas metálicas na zona onde se realiza a electroerosão, e posteriormente a filtragem do líquido. Os líquidos dielétricos mais utilizados são o petróleo, o óleo e a água desionizada.

Este processo tem grande aplicabilidade na maquinação de materiais mais duros, tais como, carbonetos, materiais com tratamento térmico, produção de peças frágeis e cavidades nas quais é difícil realizar com outros métodos convencionais. Contudo, pode ser aplicado a qualquer material que conduza eletricidade, independentemente da sua dureza [33,37].

### **3.5.3. Aço para Moldes Convencionais**

---

Os aços com maior aplicabilidade na fabricação de moldes devem possuir várias características, que dependem dos elementos ligas que os constituem, como se pode verificar na tabela 3.

Tabela 3. Influência dos elementos liga nas características dos aços [36,37].

<b>Características</b>	<b>Elementos liga</b>
Aumento de dureza	Carbono, Manganês, Fósforo, Silício
Aumento da resistência	Carbono, Manganês, Fósforo, Silício, Vanádio
Aumento de resistência ao impacto	Níquel
Redução da ductilidade	Carbono, Fósforo, Enxofre
Aumento de resistência a altas temperaturas	Molibdênio
Aumento da temperabilidade	Cromo, Molibdênio
Aumento da resistência à corrosão	Cromo
Aumento da resistência à abrasão	Cromo
Empeno mínimo	Manganês, Cromo, Molibdênio com Cromo

Os elementos de liga nos aços para moldes, têm como principais objetivos a produção de menos empeno durante a têmpera, pois aumentam a endurecibilidade do aço, permitindo arrefecimentos menos repentinos; e aumento da resistência à abrasão, devido à formação de carbonetos resistentes ao desgaste [37].

### **3.5.4. Moldes Híbridos**

---

Como já foi referido anteriormente, os moldes híbridos combinam diferentes tipos de materiais no seu fabrico. O aparecimento dos moldes híbridos surgiu no âmbito de um conjunto de evoluções, quer a nível de equipamentos quer a nível de novas tecnologias de RP. Assim, surgiu a possibilidade de produção de moldes mais económicos para pequenas séries.

A tecnologia de moldes híbridos combina as tecnologias convencionais com as novas tecnologias: a estrutura do molde é fabricada por processos convencionais, enquanto os blocos moldantes são produzidos por processos não convencionais, como se pode verificar na figura 10 [38].

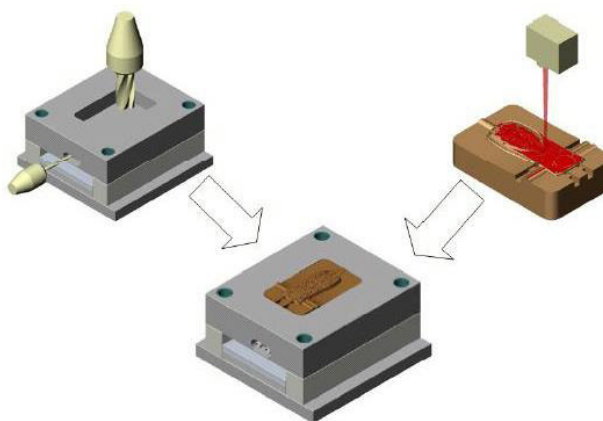


Figura 10. Constituição de um molde híbrido [38].

Este tipo de moldes possui diversas vantagens, tais como, baixo custo e tempo de produção menor (quando comparados a moldes convencionais) contudo apresenta limitações, das quais se destaca a falta de conhecimento do comportamento mecânico e térmico de alguns materiais utilizados. Existem diversas técnicas para o fabrico dos blocos moldantes, contudo nenhuma é capaz de responder a todas as solicitações.

Como um molde híbrido é produzido num material menos rígido do que o aço convencional, esse facto torna as suas características térmicas e mecânicas inferiores às de um molde convencional. Alguns autores defendem que a utilização dos moldes híbridos é vantajosa na medida em que diminui o prazo de entrega e o tempo de fabrico, quando comparados aos moldes fabricados por processos convencionais [38,39].

Atualmente, os materiais utilizados no fabrico de moldes híbridos podem ser resinas, metais e cerâmicos. Relativamente às resinas, os blocos moldantes são produzidos com resinas com cargas metálicas, na forma de pó ou limalha. Têm como principais características as suas boas propriedades mecânicas. Alguns estudos relatam que a condutividade térmica nos blocos moldantes em resinas é reduzida, tornando os ciclos de injeção muito longos, devido à taxa de arrefecimento ser baixa [29].

No que diz respeito aos materiais metálicos, os blocos moldantes podem ser produzidos em ligas de alumínio (Al), zinco ou cobre ou também em ligas de aço carbono e aço de baixa liga [38].

Recentemente, surgiu a utilização de materiais cerâmicos para a construção de blocos moldantes.

De acordo com a pesquisa realizada, comparando o custo e o prazo de entrega de um molde de injeção com duas cavidades, quatro pinos extratores e dois elementos móveis, fabricado através de tecnologia convencional e tecnologia RT, conclui-se que se torna mais económico o seu fabrico através das tecnologias mais recentes, como se pode verificar na tabela 4. Esta vantagem é devido ao processo convencional ser classificado como sendo uma tecnologia de subtração de material e o processo DMLS possuir características de uma tecnologia aditiva. Deste modo, na tecnologia DMLS existe menos desperdício de matéria-prima, afetando o custo final do molde. Relativamente ao prazo de entrega, um molde fabricado por processos convencionais é submetido a diversas tecnologias para alcançar a geometria pretendida, nomeadamente, torneamento, fresagem e electroerosão, enquanto que através das tecnologias de RT o mesmo molde pode ser obtido através de uma única tecnologia [34,35,36].

Tabela 4. Comparação dos processos convencionais e processos de RT [35].

Processo	Custo em euros	Prazo de entrega
Convencional	18500 €	3 Meses
Fabrico Rápido (DMLS)	9000€	1 Semana

## 3.6. *Master* e Blocos Moldantes

---

Neste subcapítulo são referidos os conceitos de *master* e os blocos moldantes, bem como as características que devem possuir de modo a proporcionar bons resultados práticos.

### 3.6.1. *Master*

---

Um *master* é definido como uma superfície de uma peça ou como a peça na sua totalidade, e que permite a reprodução de todos os seus detalhes. Existem diversos *softwares*, tais como, *Topsolid*, *SolidWorks* entre outros, para a modelação de peças/componentes 3D, que posteriormente podem ser reproduzidos por uma das técnicas de RP, dando origem a um *master*. Estes processos, que serão abordados mais à frente neste trabalho, têm a capacidade de construção de um *master* de forma rápida e com baixos custos. O tempo de

construção de um *master* depende da tecnologia utilizada, bem como da sua complexidade e qualidade superficial exigida [40,41].

Um *master* tem diversas funcionalidades, tais como, auxiliar no processo de fabrico em série de uma peça, para que possa ser testado visualmente e funcionalmente, e também servir como uma ferramenta de obtenção de um molde por RT. A utilização de um *master* possui limitações de volume, que dependem de cada equipamento, rondando os 0,125 m<sup>3</sup> [41,42].

Um modelo para ser utilizado como *master*, deve possuir diversas características, tais como [6]:

- Precisão dimensional e reprodução fiel dos detalhes do modelo;
- Não pode ser frágil;
- Bom acabamento superficial;
- Não deformável;
- Boa resistência mecânica.

### **3.6.2. Blocos Moldantes**

---

O desenvolvimento de um molde de injeção inicia-se no projeto do componente plástico até à sua injeção, sendo definidos diversos parâmetros. Contudo, o material que define os blocos moldantes de um molde de injeção é o principal fator que interfere na funcionalidade e produtividade do molde. Isto deve-se ao facto dos blocos, durante a injeção, estarem em contato com o material polimérico e próximos do sistema de refrigeração do molde.

Existem diversos parâmetros a analisar para a seleção de um material, no qual será utilizado para o fabrico de um bloco moldante. Entre esses parâmetros destacam-se as ponderações económicas, o tamanho do lote de peças/componentes a injetar, formato e aplicação da peça/componente a injetar, resistência mecânica, condutividade térmica e a ductilidade. Ainda se deve ter em consideração o material polimérico a ser injetado, devido à sua contração, às cargas a que está sujeito e a sua corrosividade [37,44].

O material ideal para a fabricação de um bloco moldante é um material que deve possuir resistência e durabilidade suficiente para o lote de peças/componentes que se pretende injetar e deve ser suficientemente dúctil, de modo a suportar as cargas de impacto, nomeadamente, durante do ciclo de injeção [45,46].

No bloco moldante de um molde ocorrem vários processos, os quais devem ser tidos em consideração. É no bloco moldante que o plástico fundido a altas temperaturas é injetado, fluindo por todo o bloco. No próprio bloco existem canais de refrigeração, nos quais flui um líquido refrigerante, de modo a arrefecer o bloco moldante, o qual se encontra a altas temperaturas devido à injeção. A extração da peça, que se encontra no bloco, provoca desgaste entre as superfícies [45].

Segundo *Menges e Cracknell* existem características indispensáveis para a aplicação de um metal no fabrico de um bloco moldante, nomeadamente a possibilidade do material ser tratado termicamente, ter rigidez e resistência suficiente, ter uma boa condutividade térmica, uma boa resistência à corrosão e por último, que permita obter uma boa estabilidade dimensional.

Relativamente às transferências de calor que ocorrem no bloco moldante devido à injeção e à refrigeração, é importante que o material tenha uma boa condutividade térmica. Assim, as trocas de calor tornam-se mais eficientes e rápidas. Isto é fundamental para peças com detalhes, nas quais há dificuldade de refrigeração do bloco, e onde se deve utilizar um material com maior condutividade térmica [44,45].

### **3.7. Processos de Fabrico para Obtenção de *Master***

---

Atualmente existe uma grande variedade de processos para a obtenção de um *master*, contudo neste subcapítulo apenas serão abordados os processos que se consideraram mais relevantes, tendo em consideração a sua utilização e aplicação.

### 3.7.1. Sinterização Seletiva a Laser

---

A sinterização seletiva a laser (SLS) é um dos métodos de RP de construção por camadas, no qual o material se encontra no estado em pó. A primeira máquina comercializada foi em 1989, através da empresa *DTM*, sendo que em 2001 a empresa *3D Systems* comprou esta tecnologia. Atualmente, é o terceiro processo mais utilizado na Europa devido à sua versatilidade [20,47].

#### Processo

O material, em estado pó, encontra-se armazenado num reservatório, ao lado da plataforma de construção, que tem a capacidade de deslocação na direção Z. O valor da deslocação depende da espessura de cada camada.

O processo inicia-se com a deslocação de um rolo, na câmara de construção, que nivela o material a sinterizar. Esta câmara encontra-se a uma temperatura que permita aquecer o material em pó, a cerca de 186°C, contudo não o fundindo, em atmosfera controlada. O laser, por exemplo de dióxido de carbono, incide num espelho, que é orientado através do sistema computacional, incidindo energia no material em pó, de forma a sinterizar as interfaces das partículas do pó.

Com a primeira camada construída, a plataforma desloca-se no sentido vertical descendente o valor da espessura da camada seguinte, e o rolo percorre a câmara de construção, de modo a nivelar o material a sinterizar. Para o material sinterizar, o laser é novamente direcionado para as coordenadas a sinterizar, agregando-se a camada à camada anterior. Estas etapas são repetidas até que todas as camadas estejam depositadas e a peça construída. Na figura 11 está representado o processo de SLS [20,48].

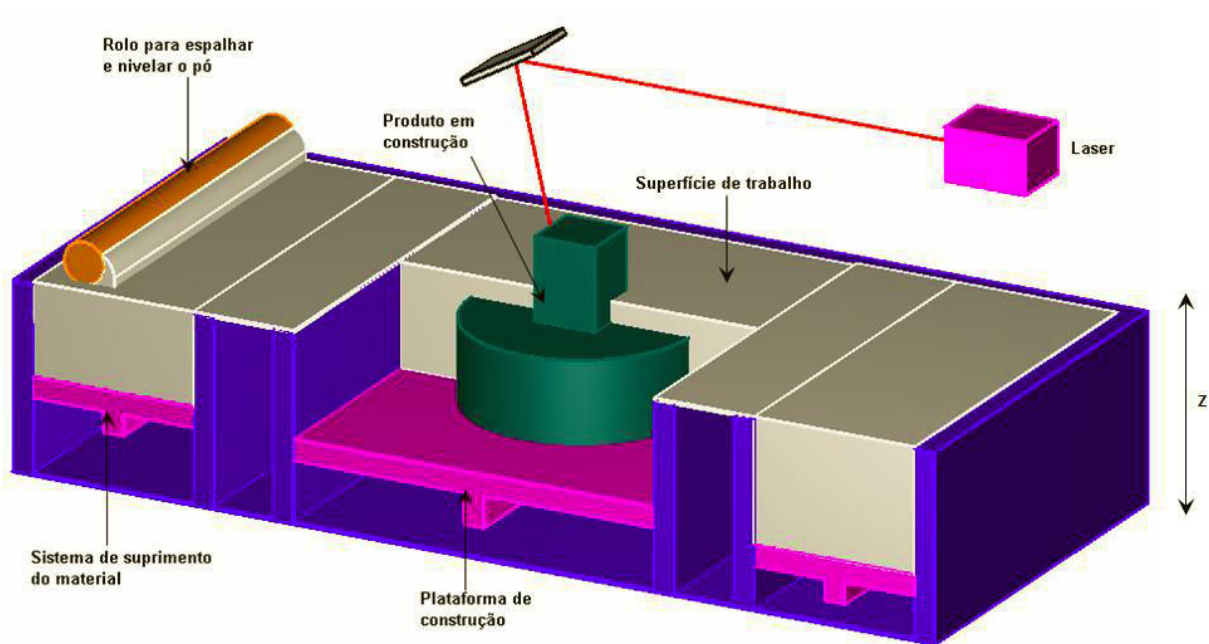


Figura 11. Processo de SLS [20].

Para o controlo dimensional deve-se ter em consideração a quantidade de energia transferida para o pó, pelo laser, para evitar a decomposição total do material ou até a sua excessiva fluidez, devido às características do pó. Com este processo obtém-se uma estrutura parcialmente porosa e com rugosidade, sendo necessário proceder ao seu acabamento superficial, de modo a garantir impermeabilidade e baixa rugosidade.

O material em pó não utilizado na construção da peça é reciclado, sendo que apenas 40% de pó novo é colocado no reservatório a cada nova produção, sendo a restante percentagem de pó reciclado.

### Materiais

De modo geral, os materiais disponíveis para esta tecnologia são todos os que são possíveis de transformar em pó, tais como, elastómeros, *nylon*, poliamida, cerâmica, compósitos de matriz polimérica e metal com polímero. Na construção de protótipos o material mais utilizado é o poliestireno com cera. Quando se utilizam materiais metálicos é necessário o pós-processamento da peça. Este é realizado num forno a alta temperatura com o intuito de finalizar a sinterização do metal [20].

Relativamente às vantagens e limitações deste processo as principais encontram-se listadas na tabela 5. [20,49]

Tabela 5. Vantagens e limitações do processo de SLS.

<b>Vantagens</b>	<b>Limitações</b>
Grande variedade de material a utilizar	Elevado custo do equipamento
Apenas com um único equipamento é possível processar vários tipos de material	Mau acabamento superficial, devido ao tamanho das partículas
Não necessita de suportes de construção	Elevado consumo energético do laser
Não necessita de pós-cura; exceto os materiais metálicos	

### **3.7.2. Modelação por Fusão e Deposição**

A modelação por fusão e deposição (FDM) é comercializada principalmente pela empresa *Stratasys*, nos Estados Unidos da América, sendo o segundo processo mais utilizado de fabricação por adição de camadas. Inicialmente, quando esta tecnologia surgiu, os protótipos não eram funcionais devido à baixa resistência que apresentavam e ao fraco acabamento superficial, tendo sido classificada como uma tecnologia modeladora conceptual. Contudo, com o desenvolvimento do equipamento inicial desta tecnologia, e por sua vez a utilização de novos materiais de construção das peças, atualmente é possível obter protótipos funcionais, fabricados por este processo [6,20].

#### Processo

O processo é realizado numa câmara que se encontra a uma temperatura ligeiramente inferior ao ponto de fusão do material a extrudir. A etapa inicial é a passagem do filamento de material termoplástico a ser extrudido por uma microfieira, sendo depositado na plataforma de construção. Este filamento de material é alimentado sob a forma de fio por uma bobine, que é depositado através do cabeçote de extrusão. Existem duas microfieiras, uma para o material de construção da peça e outra para o material de construção do suporte à peça. Estas microfieiras têm a capacidade de se deslocarem nas direcções X e Y [49].

Quando a camada estiver completa, a plataforma desloca-se na direção Z, para que a próxima camada seja construída. O filamento extrudido é aquecido até tornar-se pastoso, de forma a aderir à camada anterior. Este ciclo repete-se até que a peça esteja totalmente construída. O suporte estrutural, após a finalização da peça, é removido. Na figura 12 está representado o processo de FDM [6,20].

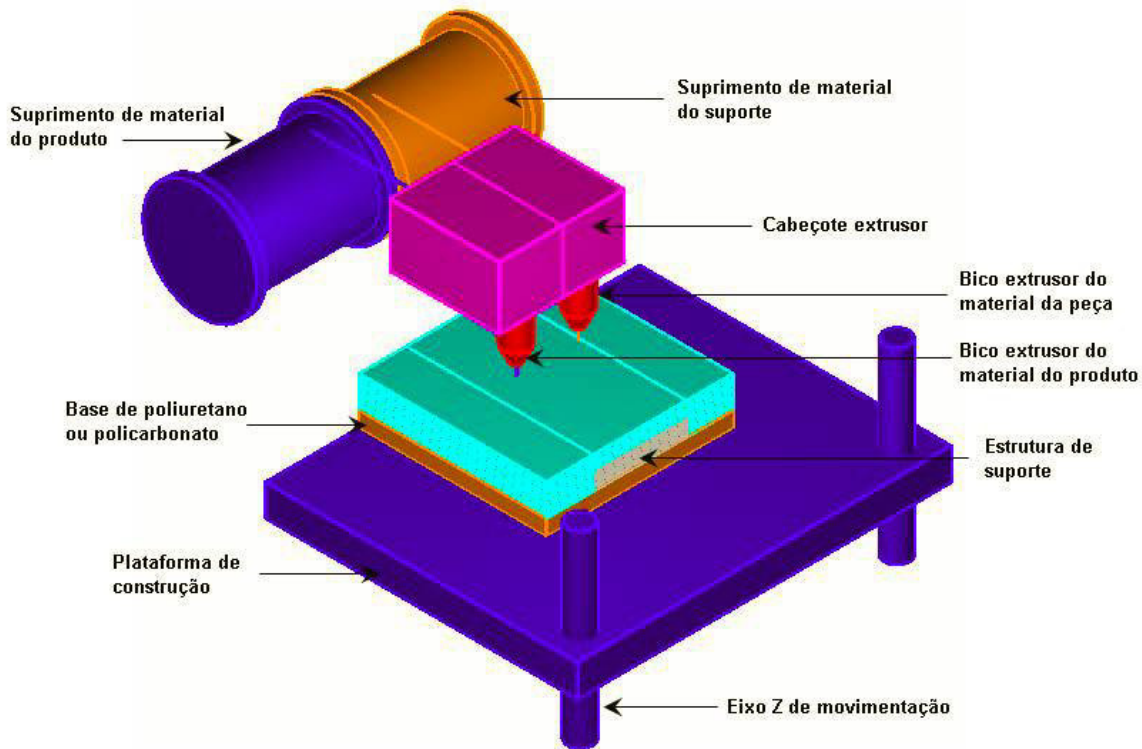


Figura 12. Processo de FDM [20].

Atualmente, existem dois tipos de materiais para a construção da estrutura de suportes, tendo sistemas de remoção diferentes. No primeiro, o material do suporte é mais frágil do que o material da peça. Então a remoção é feita de forma manual. No segundo, o material do suporte é removido por imersão numa solução líquida aquecida. De acordo com os estudos realizados por diversos investigadores, as peças produzidas por FDM possuem até 85% da resistência, quando comparadas com as mesmas peças, contudo obtidas por injeção [20,50].

Esta tecnologia utiliza filamentos de forma cilíndrica, com uma faixa de largura de 0,254 mm e 2,54 mm, numa velocidade média de desenrolamento de 19,6 mm/s a 36,75 mm/s. A altura de deposição de cada camada varia entre 0,12 a 0,36 mm. Devido à forma cilíndrica dos filamentos e à distância entre eles, geram-se vazios, como se pode verificar na figura

13. Atualmente, os cabeçotes de extrusão dos equipamentos de FDM, movimentam-se linearmente por ação magnética, aumentando assim a velocidade do processo. [20,49,50].

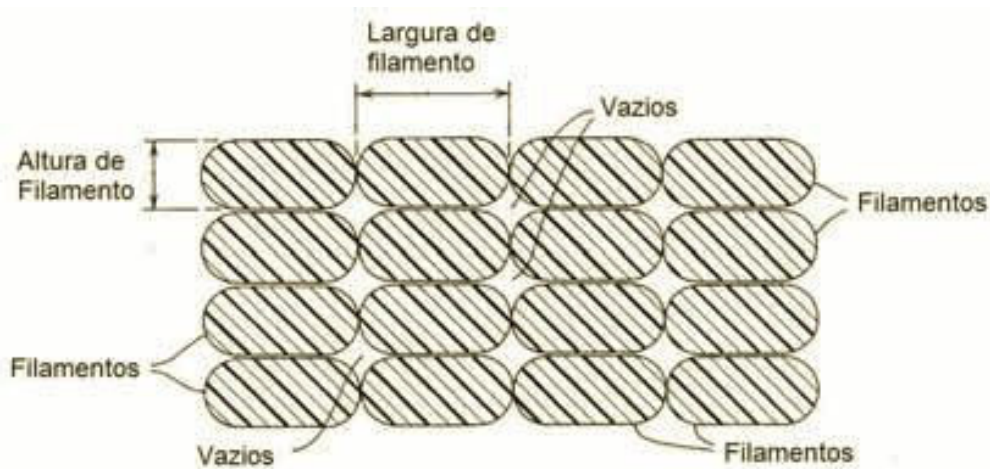


Figura 13. Esquema representativo dos filamentos cilíndricos e dos vazios, inerentes do processo de FDM [50].

### Materiais

Atualmente, os materiais disponíveis para esta tecnologia são o acrilonitrila butadieno estireno (ABS), o *nylon*, o policarbonato (PC), o polifenilsulfona (PPSF), o ULTEM 9085, PC-ISO, PC-ABS e ABS-M30i [20,51].

Cada material tem uma aplicação específica. Por exemplo, o ULTEM 9085 (nome comercial) é adequado para aplicações na indústria aeroespacial e militar, sendo um termoplástico de alto desempenho; PPSF é adequado para aplicações onde é necessário possuir resistência a altas temperaturas; o ABS-M30i é um termoplástico biocompatível, que permite a produção de protótipos funcionais ou de protótipos que auxiliam o planejamento cirúrgico [51].

Segundo o fabricante da tecnologia FDM, *Stratasys*, esta tecnologia oferece numerosas vantagens e limitações, como se pode verificar na tabela 6. [20,49]

Tabela 6. Vantagens e limitações do processo de FDM.

<b>Vantagens</b>	<b>Limitações</b>
Tecnologia simples	Pouca variedade de materiais de construção
Peças com capacidade de resistir ao calor, a produtos químicos e ambientes húmidos	Necessidade de suporte de construção e da sua remoção
Possibilidade de construção de peças com cavidades complexas	Peças com baixa resistência mecânica na direção Z
Possibilita a produção de peças biocompatíveis	Velocidade do processo lenta
Não necessita de pós-cura	Processo com pouca precisão
Não utiliza laser	

### **3.7.3. Estereolitografia**

A estereolitografia (SL) foi o primeiro processo de RP comercializado, da empresa *3D Sytems*, em 1988. Este processo, é designado como sendo uma tecnologia de fabricação aditiva de camadas, que utiliza como material base uma resina fotossensível [20].

#### Processo

O material base deste processo é uma resina líquida, epóxi ou acrilato, que na sua constituição possui monómeros fotossensíveis, que solidificam dando origem a cadeias poliméricas, quando estão sujeitos a radiação de laser, normalmente UV. Para que ocorra a solidificação da resina é necessário um comprimento de onda específico [49].

O processo inicia-se com a colocação da resina líquida num recipiente, no qual existe uma plataforma móvel, na direção Z, e uma lâmina para nivelar a resina, devido à sua viscosidade. O feixe laser é emitido por um espelho, que possui a capacidade de se movimentar, consoante as coordenadas dos pontos da peça, obtidas através do fatiamento. Após a finalização da primeira camada, a plataforma desloca-se na direção Z, correspondente à espessura da camada, colocando resina líquida sobre a camada anterior. O ciclo do processo repete-se até que a peça esteja totalmente construída.

A peça final é submetida a cura, num forno de UV, para fomentar mais densidade nas ligações cruzadas na resina. O tempo de cura da peça depende de diversos fatores, tais

como, natureza da resina, potência do laser e trajetória do laser. Na figura 14 pode-se verificar o esquema ilustrativo do processo de SL [20,49].

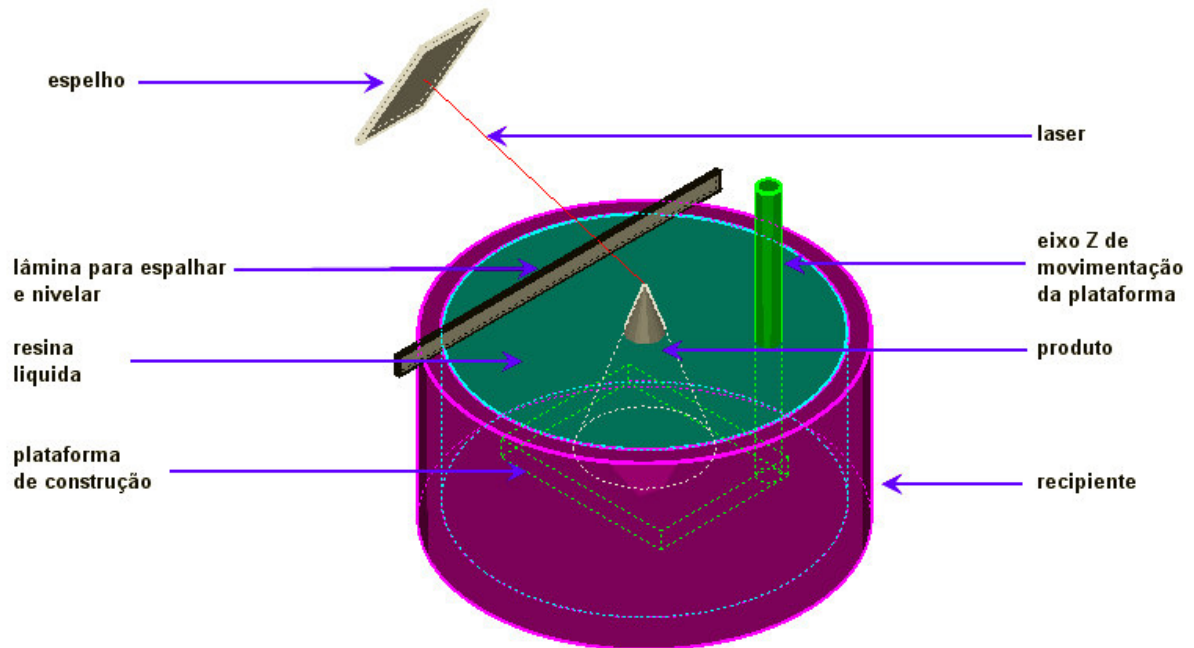


Figura 14. Processo de SL [20].

Neste processo, geralmente, o laser utilizado é do tipo Hélio-Cádmio, sendo a sua potência variável entre 6 mW e 12 mW e o comprimento de onda de 325 nm. Contudo, existem equipamentos de SL que utilizam um laser de Nd:YVO<sub>4</sub>, com potência entre 100 mW e 800 mW, sendo o comprimento de onda de 354,7 nm. Normalmente, a espessura da camada é mantida ao longo das camadas, podendo variar entre 0,025 mm a 0,5 mm.

Esta tecnologia necessita de suportes de construção à peça, que são removidos posteriormente à finalização da mesma [20].

### Materiais

Os materiais utilizados nesta tecnologia são materiais fotocuráveis. Atualmente, as resinas disponíveis são à base de acrilatos ou epóxi. As resinas de epóxi, comparativamente às resinas de acrilatos, oferecem menor contração e melhores propriedades mecânicas e térmicas. Contudo, esta resina necessita de maior energia de polimerização, aumentando assim o tempo de construção da peça [20].

A SL oferece diversas vantagens quando comparados com outros processos de tecnologia de fabricação aditiva, sendo por isso, o processo mais utilizado, contudo também apresenta algumas limitações, como se pode observar na tabela 7 [20,49].

Tabela 7. Vantagens e limitações do processo de SL.

<b>Vantagens</b>	<b>Limitações</b>
Bom acabamento superficial da peça	Custo do material
Boa precisão	Necessidade de construção de suportes, sendo utilizada a própria resina
Alta velocidade de construção	Deformação das peças
Possibilidade de construção de geometrias complexas	Necessidade da proteção contra a luz de modo a evitar a polimerização precoce
Grande vida útil do laser utilizado	Necessidade de pós-processamento
	Necessidade de pós-cura
	Restrição ao uso de resinas poliméricas

### **3.7.4. Fabricação de Objetos por Camadas**

---

A fabricação de objetos por camadas, do inglês *Laminated Object Manufacturing* (LOM), é a tecnologia mais económica de fabricação aditiva, sendo baseada na construção em camadas, com material em forma de folha [20].

#### Processo

O princípio base deste processo é a deposição sucessiva de folhas de materiais possíveis de processar por esta tecnologia, possuindo um adesivo entre elas, que formam camadas, que posteriormente dão origem a uma peça, sendo ligadas entre si por um adesivo.

O processo inicia-se com a deposição de uma folha de material, sendo que após a deposição da segunda folha ocorre a passagem de um rolo que tem a capacidade de ativar o adesivo das folhas de material, unindo-as. Isto é possível devido ao aquecimento a que o rolo está sujeito, no entanto caso a passagem do rolo seja muito rápida, não ocorre a ligação entre as camadas; caso seja muito lenta, haverá sobreaquecimento do material, podendo danificá-lo. Posteriormente, através de um laser de dióxido de carbono controlado por espelhos, define-se a geometria da peça por corte, fragilizando as zonas não pertencentes à peça, de modo a que possam ser removidas mais facilmente. Para se

proceder à próxima camada, a plataforma de construção movimenta-se em direção Z, repetindo-se o processo até que a peça esteja totalmente construída. Na figura 15 encontra-se ilustrado o processo de LOM [20,49].

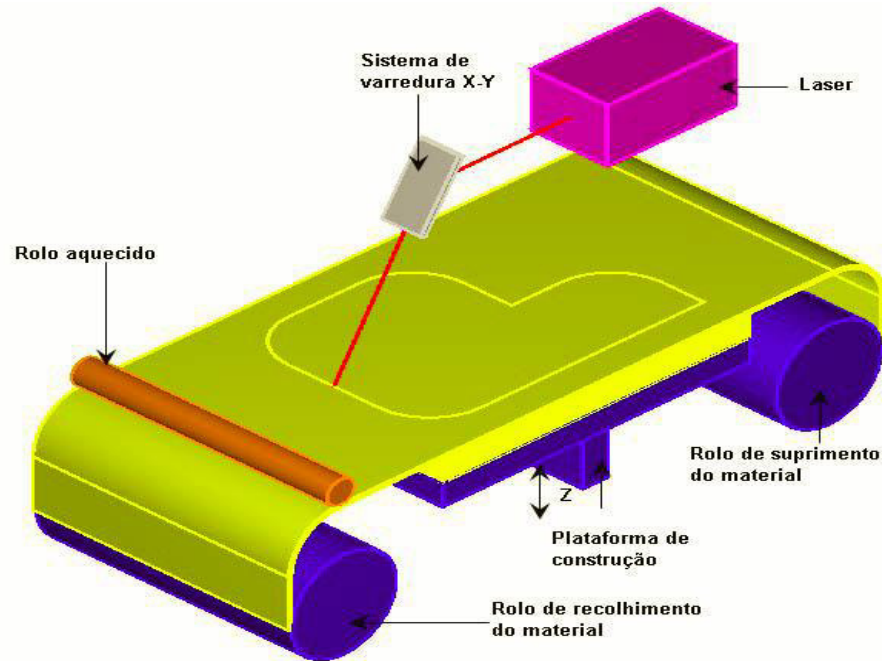


Figura 15. Processo de LOM [20].

### Materiais

De acordo com vários autores, este processo tem a capacidade de processar diversos materiais, tais como, plástico, papel, cerâmica, tecido e folhas metálicas. Contudo, após o pós-processamento, é necessário a aplicação de uma substância que evite degradação da peça, através da humidade. Essas substâncias podem ser uretano, silicone ou resina epóxi [20,49].

Como todos os processos até agora vistos, o LOM também apresenta vantagens e limitações que estão apresentadas na tabela 8 [20,49].

Tabela 8. Vantagens e limitações do processo de LOM.

<b>Vantagens</b>	<b>Limitações</b>
Não necessita de pós-cura	Dificuldade da adesão das várias camadas
Não necessita de construção de suportes	Pouca variedade de materiais
Processo rápido, devido ao laser apenas percorrer o perímetro da peça e não a área	Não adequado a peça com detalhe
Possibilidade de realizar perfurações na peça	Limitações na aplicabilidade das peças obtidas, devido à não flexibilidade do material
Possibilidade de obter peças com grandes dimensões	As peças necessitam de tratamento da superfície, devido à instabilidade perante ambientes húmidos
	Mau acabamento superficial

### **3.7.5. Impressão 3D**

---

A impressão 3D, em 1994, foi incorporada na indústria pela *Z Corporation*. Esta tecnologia consiste em fazer passar um jacto com um líquido, que ao deixar cair algumas gotas sobre um recipiente com a matéria-prima, o pó, aglutinará esse mesmo, formando um material sólido [20].

#### Processo

A obtenção de uma peça através da impressão 3D inicia-se pela distribuição de uma camada de pó aglutinante, através da passagem dos rolos, sobre a plataforma de construção. A solidificação deste pó ocorre através da passagem de um jato que deposita o líquido ligante sobre o pó. O percurso que o jato realiza neste processo é obtido computacionalmente através das coordenadas da peça. No fim desta camada estar completa, a plataforma desloca-se na direção Z, procedendo-se à passagem novamente do rolo [20,49]

A deslocação da plataforma, à semelhança de outros processos de RP, é equivalente à espessura de cada camada. Quando a peça estiver finalizada é retirada do recipiente e limpa, de forma a retirar o pó não aglutinado da sua superfície. O pó que não é utilizado em cada camada, tem como função servir de suporte à construção da peça, contudo em peças ocas essa remoção torna-se mais difícil.

Apesar do ligante conferir alguma resistência ao modelo, não é a suficiente, sendo necessário submetê-lo a temperaturas elevadas num forno, de modo a aumentar a sua resistência. No final de todo o processo, o pó não aglutinado poderá ser reutilizado. A precisão das peças fabricadas por esta técnica depende do tamanho de cada gotícula depositada no pó, do próprio pó e da precisão do jacto. Na figura 16 encontra-se ilustrado o processo de impressão 3D [20,49].

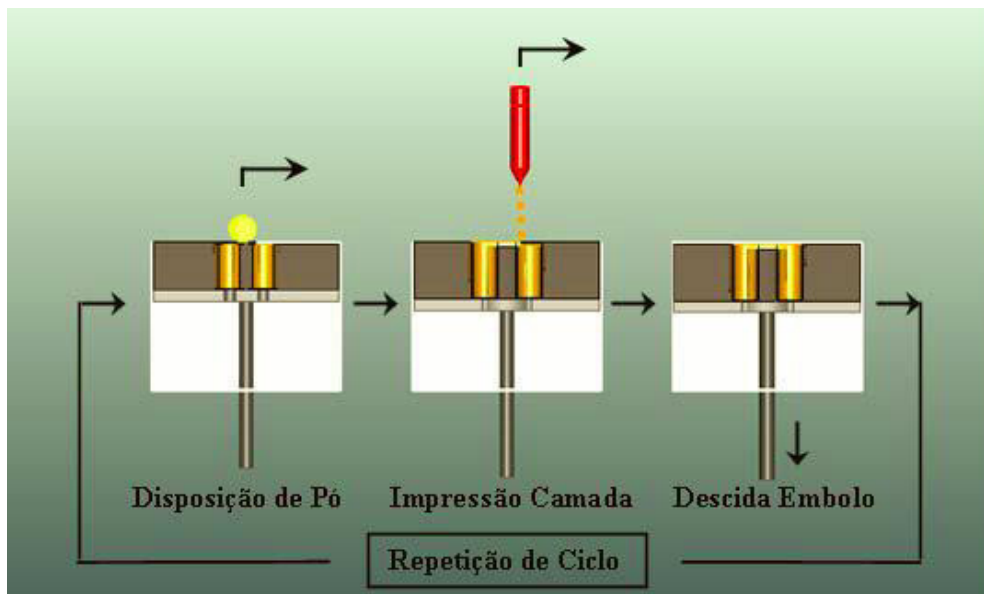


Figura 16. Processo de Impressão 3D [49].

### Materiais

Os materiais utilizados para este processo de tecnologia aditiva são os materiais compósitos, materiais para fundição e elastómeros. Os materiais compósitos reforçados com fibras de carbono, apesar de contribuírem no auxílio da medicina, ainda não podem ser utilizados na impressão 3D [20].

Outro grande grupo de materiais utilizados são as ceras fundidas. Estas ceras consistem numa mistura de celulose, fibras e outros aditivos (que ajudam a garantir o rigor dimensional da peça a produzir).

Um material, cuja utilização ainda se encontra em fase de estudo, é um polímero baseado em amido. Este polímero tem como característica ser bio degradável, contudo verificou-se a variação do seu comportamento mecânico com a humidade e com o tempo, apresentando baixa resistência à água [49].

Na tabela 9 podem-se encontrar as principais vantagens e limitações que o processo impressão 3D oferece na construção de protótipos [20,49].

Tabela 9. Vantagens e limitações do processo de impressão 3D.

Vantagens	Limitações
Possibilidade de construção de peças mais complexas com boa precisão	Dificuldade da remoção o pó não ligante em peças ocas
Versatilidade de aplicações	Dimensão reduzida dos protótipos
Possibilidade de obtenção de peças de cor	Rugosidade da superfície, devido aos grãos aglutinados
Utiliza suportes para a construção da peça	Necessita de pós-processamento
Não gera desperdício	
Elevada velocidade	

### 3.6.6. Vulcanização à Temperatura Ambiente

A vulcanização à temperatura ambiente (RTV) envolve o fabrico de moldes em borracha de silicone, através do seu vazamento. Este processo é classificado como sendo um processo de RT indireto, contudo apenas permite fabricar séries de 10 a 50 peças [3].

#### Processo

Para iniciar o método de RTV, é necessário preparar quer a peça que se deseja moldar (produzir, acabar, limpar), quer a caixa para o vazamento do silicone. A preparação da caixa exige a colocação do modelo com a linha de partição previamente definida, a localização do canal de injeção e os pontos de fuga de gases. Para que não ocorram deslocamentos da peça durante o processo de vazamento do silicone, é necessário que a peça esteja bem fixa. Na figura 17, está representada a preparação de uma caixa para o vazamento do silicone [3,11].

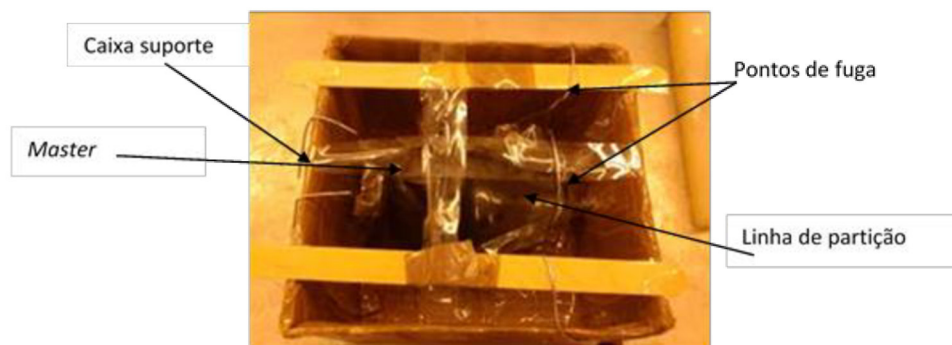


Figura 17. Preparação da caixa para o vazamento do silicone.

Antes do vazamento do silicone, é necessário preparar a mistura do silicone que, conforme as especificações do fornecedor, tem proporções de mistura definidas entre componentes, originando um tempo de manuseamento próprio. É neste tempo de manuseamento que o silicone deve ser colocado num sistema de vácuo para retirar bolhas de ar e, posteriormente, vazado para a caixa suporte [3,11].

Após a cura do silicone, o molde é aberto, fazendo-se um padrão de rasgos que definem a linha de partição do molde, de modo a promover um correto encaixe das partes do molde. Posteriormente, retira-se o protótipo e pode-se iniciar a produção das peças finais, através de vários métodos, como a injeção a baixa pressão, vazamento ou com recurso a vácuo. Para efetuar a pós-cura do silicone, utiliza-se um forno. Na figura 18 estão representadas as etapas principais do processo de RTV [3,11,20].

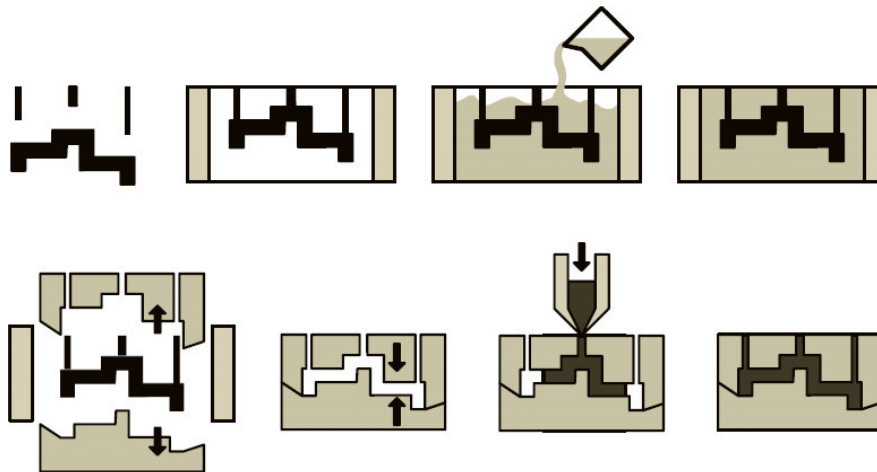


Figura 18. Processo de RTV [11].

Na tabela 10 estão enumeradas as diversas vantagens e limitações do processo RTV [3,20].

Tabela 10. Vantagens e limitações do processo RTV.

<b>Vantagens</b>	<b>Limitações</b>
Baixo custo do molde	A vida curta do molde
Facilidade de obtenção do molde	A possibilidade de existência de bolhas de ar no molde
Precisão do processo	Para a produção de peças com elevada dimensão, são necessárias estruturas íntegras e resistentes de suporte para as peças
	As propriedades das peças variam, entre o protótipo e as peças finais
	Este processo é utilizado para a produção de pequenos lotes de peças plásticas

## **3.8. Processos de Fabrico para Obtenção de Blocos Moldantes**

---

De forma similar ao subcapítulo anterior, neste serão apresentados os processos que se consideraram mais relevantes, para o fabrico dos blocos moldantes de um molde para injeção plástica.

### **3.8.1. Vazamento de Resina Epóxi**

---

Esta técnica de RT permite a obtenção de ferramentas, num curto período de tempo, semelhante ao processo de RTV, contudo é o processo de RT mais utilizado para a produção de séries intermédias de peças/componentes, devido à relação custo/qualidade [11].

#### Processo

Para se iniciar um molde de epóxi é necessário a obtenção do modelo físico da peça, anteriormente, fabricado por uma técnica de RP. De forma similar ao processo de RTV é necessário preparar uma caixa para o vazamento da resina. O modelo é colocado na caixa, sendo colocado desmoldante quer no modelo, que nas superfícies da caixa. O vazamento é realizado após o desmoldante secar [11,16,38].

A resina é obtida através da mistura de dois componentes, o endurecedor e a resina, que são misturados nas proporções definidas pelo fornecedor, e misturadas até a resina ficar homogénea. De modo a melhorar as propriedades da mistura da resina, esta é colocada numa câmara de vácuo, com o objetivo de retirar as bolhas de ar existentes.

Em seguida, o modelo é então coberto com a mistura, de forma lenta, para evitar a formação de bolhas de ar. Quando a cura do molde estiver realizada, procede-se à sua desmoldação e pós-cura, definida pelo fornecedor [11,38].

De modo a melhorar as propriedades da resina, são adicionadas cargas na mistura da resina com o endurecedor, alterando as propriedades da mesma. Atualmente, existem três tipos de cargas que desempenham diferentes funções. As primeiras têm como objetivo o reforço da

resina e melhorar o seu comportamento mecânico; de seguida, existem cargas que têm como finalidade o enchimento, sendo utilizadas para ocupar espaço; por último, existe o grupo de cargas que tem como objetivo minimizar as deficiências da própria resina, como por exemplo, a baixa condutividade térmica [16].

Para minimizar a baixa condutividade térmica da resina epóxi são utilizadas as cargas metálicas, normalmente de Al, aumentando também a resistência mecânica do bloco de resina.

Na tabela 11 encontram-se as vantagens e limitações que os moldes epóxi apresentam. É de acrescentar que as resinas de epóxi com cargas metálicas têm alta dureza e alta temperatura de transição [20].

Tabela 11. Vantagens e limitações do processo de vazamento de resinas epóxi.

<b>Vantagens</b>	<b>Limitações</b>
Baixa contração de cura, permitindo boa precisão dimensional	Resinas com cargas de alumínio apresentam baixa dureza e baixa resistência à compressão
Possibilidade de obtenção de peças de grandes dimensões	Como a mistura promove uma reação exotérmica, torna-se difícil de modelar a resina ao modelo
Boa resistência química	
Baixo custo	

### 3.8.2. 3D Keltool

Atualmente, o processo *Keltool* é comercializado, maioritariamente, pela empresa *3D Systems*, que tem vindo a melhorar o processo, tendo sido desenvolvido em 1976. Inicialmente, as empresas *Tartan Tooling* e *3M* eram as detentoras desta tecnologia. Este processo é considerado como sendo um processo avançado, quando comparado com processos de RT, devido ao número de ciclo que uma ferramenta permite, quando produzida por este processo [3,20].

#### Processo

O processo de *Keltool* destina-se fundamentalmente à fabricação de insertos metálicos, através de pós metálicos, com recurso à tecnologia SLS. Existem duas alternativas neste

processo, baseando-se ou na produção do modelo negativo ou no modelo positivo, sendo as restantes etapas do processo iguais.

O processo inicia-se com a produção do modelo que se deseja obter, através de SLS. Posteriormente à limpeza e polimento da superfície do modelo, é produzido o molde em silicone, a partir do modelo obtido pelo processo de SLS. Quando a cura do molde de silicone estiver realizada, este é colocado num recipiente e coberto com uma mistura de aço ferramenta com carboneto de tungsténio e aglutinante. Após a cura, o inserto é separado do modelo em silicone e colocado num forno de aquecimento, de modo a eliminar o aglutinante e infiltrar cobre nos espaços vazios deixados pelo aglutinante. Na figura 19 estão representadas as etapas gerais deste processo [3,18,20].

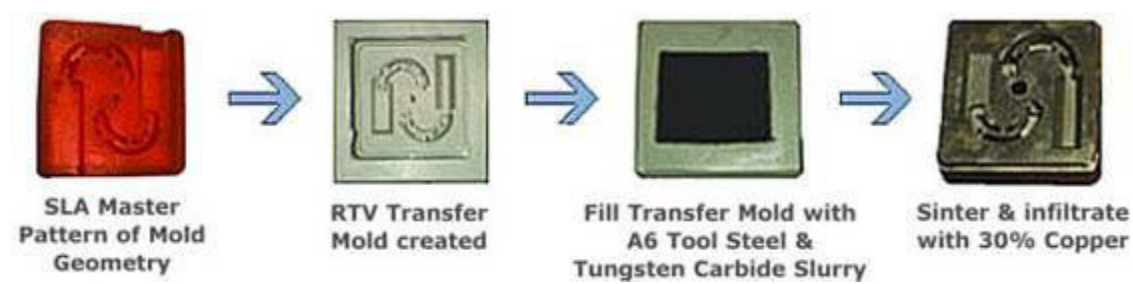


Figura 19. Etapas do processo de *Keltool 3D* [3].

### Materiais

Através da pesquisa realizada relativamente a este processo constatou-se que os materiais utilizados são o aço ferramenta com carboneto de tungsténio [52].

O processo *Keltool* apresenta algumas vantagens e limitações, como de pode verificar na tabela 12 [3,20].

Tabela 12. Vantagens e limitações do processo *keltool*.

<b>Vantagens</b>	<b>Limitações</b>
Elevada precisão	Apenas um fornecedor da tecnologia
A durabilidade das ferramentas (suporta 1 milhão de injeções, em materiais plásticos)	Fabricação de moldes e insertos em pequenas dimensões
	Poucos materiais utilizados
	Necessidade de pós-cura

### 3.8.3. Fabricação de Forma Final a Laser

---

O processo de fabricação de forma final a laser (LENS) é comercializado maioritariamente pela empresa *Optomec*, sendo um processo de processamento de metais recente. Esta tecnologia utiliza um laser de alta potência (500 W a 4 kW) para a fundição de metais, tendo a capacidade de formar estruturas densas. O laser pode ser utilizado através da movimentação de espelhos ou então através de fibra óptica [14,53].

#### Processo

O processo LENS é realizado numa câmara com argon e a baixa pressão, de modo a diminuir os níveis de humidade e oxigénio, reduzindo a possibilidade de oxidação do metal.

O metal em pó é colocado no cabeçote do equipamento, tendo este a capacidade de regular o fluxo do pó metálico. Através do sistema de alimentação do equipamento, o pó é conduzido até ao ponto focal do laser de forma contínua, dando-se assim a fundição do pó metálico. Quando a camada inicial estiver concluída, o sistema de alimentação do equipamento move-se para a camada seguinte. O sistema de alimentação tem a capacidade de se deslocar em todas as direções e a plataforma de construção permite uma inclinação de 90° e de rotação 180°. O pó metálico é distribuído no cabeçote através de gravidade ou da pressurização de um gás inerte [4,14,53]. Com esta versatilidade de movimentos, esta tecnologia permite a fabricação de peças com detalhes, que fabricadas noutras tecnologias exigiriam suportes de construção. Na figura 20 está representada a tecnologia de LENS.

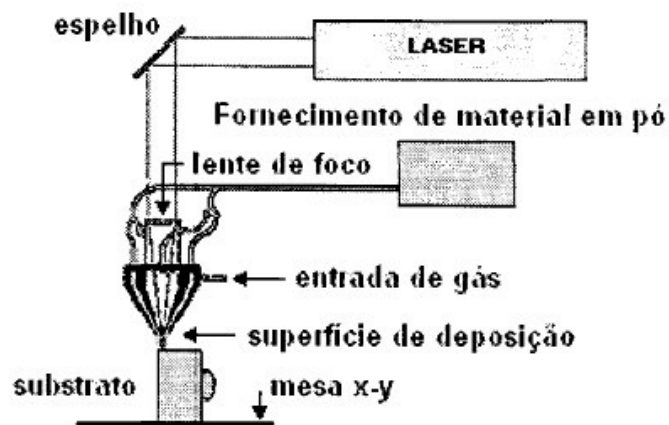


Figura 20. Processo LENS [53].

### Materiais

Segundo o fabricante do equipamento, *Optomec*, os metais que podem ser processados por esta tecnologia são: titânio, aço ferramenta, aço inoxidável, cobre e superligas à base de níquel [54].

Na tabela 13 estão enumeradas as principais vantagens e limitações que o processo LENS oferece [14,53].

Tabela 13. Vantagens e limitações do processo LENS.

<b>Vantagens</b>	<b>Limitações</b>
Durabilidade elevada	Alto custo de energia
Não requer pós-processamento em forno	Obtenção de peças apenas em metal
Possibilidade da utilização para reparação de peças danificadas	Acabamento superficial não muito bom, quando comparado com outros processos
Permite fabricar peças densas e com boa qualidade mecânica	
Velocidade de construção razoável	

### **3.8.4. Impressão 3D ProMetal**

---

A tecnologia ProMetal é um método de sinterização de pós metálicos a partir de ficheiros CAD, patenteada em 1989 e industrializada pela empresa americana *Extrude Hone*. Com este processo é possível obter peças/componentes com 60% de aço e 40% de bronze [38].

#### Processo

Este processo utiliza a matéria-prima no estado sólido, na forma de pó metálico. O processo inicia-se com o nivelamento do pó na plataforma de construção. O cabeçote adiciona o aglutinante fotopolimérico sobre o pó nivelado, segundo as coordenadas da camada em 2D, enviadas para o equipamento. Após a camada estar construída, uma luz UV posiciona-se de modo a proceder à sua cura.

Quando a cura estiver concluída, a plataforma desce e rolo nivela o material para a construção da próxima camada. Este ciclo repete-se até que a peça esteja totalmente construída. O pó metálico não sintetizado funciona como suporte de construção, podendo ser reutilizado [14].

As peças/componentes fabricados através da tecnologia ProMetal necessitam de pós-processamento, devido à fraca resistência que o método proporciona. Este pós-processamento é dividido em duas fases. A primeira consiste em retirar o aglutinante, aquecendo a peça, e assim, sinterizar as partículas metálicas. Com a eliminação do aglutinante a peça fica com 40% de porosidade. Então, na segunda etapa, a peça é levada a um forno, no qual é infiltrada uma liga de bronze, de modo a obter uma peça densa, eliminando a porosidade deixada pelo aglutinante [14,20].

As peças produzidas por esta tecnologia necessitam de acabamento superficial, como por exemplo, lixamento ou polimento.

### Materiais

Segundo o fabricante, *Ex One*, esta tecnologia possibilita a fabricação de peças em: areia de sílica, aço inoxidável, bronze e tungstênio. Como aglutinante é utilizado o látex coloidal. [14,55,56].

Na tabela 14 estão apresentadas as principais vantagens e limitações da tecnologia ProMetal [14,56].

Tabela 14. Vantagens e limitações do processo ProMetal.

<b>Vantagens</b>	<b>Limitações</b>
Não utiliza laser	Apenas fabricação de peças metálicas
Não necessita da construção de suportes de auxílio	Necessidade de pós-processamento em duas etapas
Rapidez do processo	
Produtos finais duráveis	
Vários métodos de acabamento superficial disponíveis	

### **3.8.5. Direct Tool (DMLS)**

---

O processo *Direct Metal Laser Sintering* (DMLS), mais conhecido por *DirectTool*, é uma tecnologia desenvolvida pela empresa alemã *EOS-GmbH*, muito similar ao processo SLS. Um dos equipamentos comercializado pela empresa alemã é o EOSINT M 280, que utiliza um laser de fibra de 200 W ou 400 W, possuindo um *software* avançado que permite monitorizar os parâmetros de produção [14, 57].

### Processo

Este processo tem por base a construção de peças, camada a camada, através da sinterização de pós 100% metálicos. Os pós metálicos utilizados possuem baixa granulometria, menor que 50  $\mu\text{m}$ , e as espessuras de camada são cerca de 0,05 mm. A potência do laser é maior que 200 W, permitindo assim a obtenção de uma peça com grandes níveis de densificação e com boa qualidade superficial [20,14].

Um equipamento de DMLS possui uma câmara que contém um sistema de distribuição do pó metálico e a plataforma de construção. Através do *software* do equipamento o laser é direcionado para as partes a fundir, fundindo o pó metálico. De forma similar aos outros processos aditivos descritos, após a construção da camada, a plataforma desce e o pó é distribuído pela plataforma de construção. Como a união dos pós metálicos é feita pela fusão dos mesmos, não é necessário pós-processamento.

Esta tecnologia surgiu com o intuito da obtenção de ferramentas com melhores propriedades, nomeadamente, os insertos, as cavidades moldantes e as buchas para os moldes de injeção plástica. Estes pós metálicos podem ser obtidos a partir de ligas de bronze ou aço [14,58].

### Materiais

Segundo os fornecedores desta tecnologia, existem diversas ligas que podem ser utilizadas neste tipo de equipamentos, contudo destacam-se a liga de alumínio-silício-magnésio ideal para fabrico de protótipos funcionais e a superliga cobalto-cromo-molibdénio pela sua resistência a altas temperaturas e à corrosão, tendo como aplicação turbinas e implantes médicos [59].

Na tabela 15 são apresentadas as principais vantagens e limitações do processo DMLS [14,20,58].

Tabela 15. Vantagens e limitações do processo DMLS.

<b>Vantagens</b>	<b>Limitações</b>
Durabilidade elevada	Fabricação de peças pequenas
Processo mais rápido, quando comparado a processos convencionais	Necessidade de polimento
Possibilidade de obtenção de peças com tolerâncias dimensionais inferiores a 0,05 mm	No caso da utilização de liga de cobre, a vida útil do molde baixa, para baixas pressões de injeção
Não necessita de pós-processamento	Elevada rugosidade
Peças com boa resistência mecânica	Elevado custo

### 3.8.6. Projeção Metálica

A projeção metálica ou *spray tooling*, tem sido utilizada na última década principalmente para a fabricação de revestimentos. Esta técnica tem sofrido algumas alterações devido ao seu desenvolvimento tecnológico, nomeadamente, de novas técnicas de projeção, do controlo do processo e dos materiais utilizados. [9]

#### Processo

A projeção metálica consiste na fundição do material, que se encontra em forma de pó, arame ou fio, que posteriormente será projetado contra a peça que se deseja revestir. Este processo é realizado através de uma fonte de aquecimento e de um sistema de aceleração do material. A fonte de aquecimento pode ser através de combustão, quimicamente; ou por arco elétrico, eletricamente. Para o sistema de aceleração do material recorre-se a um equipamento de ar comprimido, que tem como função fornecer velocidade de projeção às partículas fundidas, contra a peça a revestir. Na superfície da peça, as partículas são projetadas sucessivamente e solidificadas [9,60].

Existem três tipos de projeção metálica classificados de acordo com a fonte de calor utilizada para a fundição do material. No processo no qual a fonte de calor utilizada é a combustão de oxigênio, existe na câmara de combustão a mistura do oxigênio com o hidrogénio, que gera um fluxo de gás. Este fluxo de gás tem a capacidade de aquecer e acelerar as partículas metálicas. No outro processo a fonte de calor é o arco elétrico que se gera entre os dois elétrodos metálicos (arames), que são compostos pelo mesmo material

que ficará a revestir a ferramenta. Este arco elétrico provoca a fundição do material, que com o auxílio do ar comprimido é projetado contra a peça. Por último, temos o processo de projeção metálica por plasma, que também utiliza como fonte de calor o arco elétrico, contudo é constituído por um cátodo de tungstênio e um ânodo de cobre, numa câmara com gás inerte. Este conjunto forma o plasma, que funde as partículas de pó injetadas, que posteriormente são projetadas contra a ferramenta a revestir [9].

### Materiais

No âmbito desta tecnologia, os materiais mais utilizados são as ligas de zinco e de alumínio [60].

Na tabela 16 encontram-se as vantagens e limitações da projeção metálica [9,60].

Tabela 16. Vantagens e limitações da projeção metálica.

<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Possibilidade de utilização de metais com elevado ponto de fusão, através do processo de projeção metálica por plasma	O revestimento deve ser restrito a superfícies com grandes dimensões e curvadas
Revestimento metálico não danifica as características da peça base	O processo apresenta porosidade e comparado com aços convencionais possui baixas propriedades mecânicas e térmicas
Rápida disponibilidade do revestimento	

## **3.9. Comparação dos Processos de Obtenção de *Master***

---

Como já foi referido anteriormente, existem características que um *master* deve possuir e que se devem ter em consideração na seleção do processo de fabrico deste. Assim sendo, neste capítulo é realizada uma comparação entre os processos de prototipagem rápida descritos anteriormente mais adequados à produção do *master* e as características do mesmo.

Um *master* deve possuir precisão dimensional de modo a reproduzir detalhadamente as especificações dimensionais do modelo. Do grupo dos processos de RP, o LOM é o que apresenta pior precisão, devido à presença das folhas de materiais. O processo que se

destaca é o SL, com excelente precisão devido à matéria-prima se encontrar no estado líquido e ser sinterizada por um laser. Apesar do SLS também utilizar um laser para a sinterização do material, como este se encontra na forma de grãos, a precisão irá depender do tamanho do grão. Como já foi referido, na descrição de cada processo, uma peça produzida por FDM possui espaços vazios interiores em cada deposição, devido à forma circular dos fios depositados. Este facto promove que a precisão seja satisfatória, similarmemente à impressão 3D.

Relativamente ao custo será realizada uma análise comparativa dos custos dos processos, englobando o do equipamento e do material, em termos médios. No custo do material considerou-se o custo por cada quilograma. No que diz respeito ao custo do equipamento, as tecnologias de sinterização a laser são as mais dispendiosas, sendo que a impressão 3D apresenta o equipamento mais acessível. Quando se comparam os processos em termos de custo de material, a ordem decrescente de custos é ligeiramente diferente. Neste caso, o processo FDM apresenta o maior custo de material, devido à especificidade do plástico utilizado e o LOM possui o custo mais económico. Em relação ao processo RTV é considerado o processo mais económico, quer nível de equipamento, quer a nível de matéria-prima.

O acabamento superficial está relacionado com a forma da matéria-prima, ou seja, o estado na qual a matéria-prima se encontra: líquida, sólida ou pó. O processo com melhor acabamento superficial é o SL, o que também sucede em relação à precisão. Os processos que utilizam a matéria-prima em forma de pó apresentam um acabamento superficial satisfatório. Este acabamento deve-se à rugosidade causada pelo tamanho dos grãos. O LOM é o processo que apresenta pior acabamento superficial devido à fabricação da peça ser realizada com o material em estado sólido, sendo definido o contorno da peça pela passagem de um laser.

Na tabela 17 pode-se encontrar a comparação dos parâmetros analisados neste subcapítulo, no que diz respeito aos processos para a obtenção de um *master*, sendo que a classificação encontra-se por ordem crescente: baixo, razoável, médio, elevado.

Tabela 17. Tabela comparativa dos processos para obtenção de um *master*.

<b>Processo/ Características</b>	<b>SL</b>	<b>SLS</b>	<b>FDM</b>	<b>LOM</b>	<b>Impressão 3D</b>	<b>RTV</b>
<b>Precisão</b>	Elevado	Médio	Razoável	Baixo	Médio	Baixo
<b>Custo do equipamento</b>	Elevado	Elevado	Médio	Médio	Razoável	Baixo
<b>Custo da matéria-prima</b>	Médio	Médio	Elevado	Razoável	Médio	Baixo
<b>Acabamento superficial</b>	Elevado	Médio	Médio	Baixo	Médio	Razoável

### 3.10. Comparação dos Processos de Obtenção de Blocos Moldantes

Como foi referido anteriormente, existem vários processos para o fabrico de um bloco moldante, no qual cada processo possui características vantajosas. Deve ter-se em consideração alguns parâmetros comparativos entre os processos, de modo a que se possa seleccionar o mais apropriado. Assim sendo, neste subcapítulo é realizada uma comparação entre os processos de fabrico já descritos, face às propriedades relevantes num bloco moldante.

O principal critério para a utilização de um molde híbrido em vez de um molde convencional, são os custos. Sendo assim, o processo de fabrico do bloco deve ser o mais económico, para o lote a produzir. Do grupo de processos descritos, a produção de moldes em resina epóxi é o processo mais económico, devido ao pouco equipamento necessário para a sua realização, seguido dos moldes obtidos por projecção metálica. Contrariamente, os processos LENS e DMLS são muito dispendiosos devido à energia necessária para o laser sinterizar o pó metálico. Já o processo *Keltool* torna-se mais económico para lotes de milhares de peças e dispendioso para lotes mais reduzidos. O processo ProMetal é uma tecnologia económica devido à facilidade de processamento.

Outro parâmetro relevante é a durabilidade que os processos oferecem ao bloco moldante. Os moldes epóxi oferecem uma durabilidade média e os restantes processos possuem uma durabilidade elevada, sendo esta vantajosa na produção de grande lotes.

Relativamente ao acabamento superficial, os processos no qual a matéria-prima se encontrar na forma de pó necessitam de pós-processamento. Estes processos são o LENS, o ProMetal e o DMLS. A má qualidade do acabamento superficial implica baixa precisão dimensional e necessidade, em alguns casos, de pós-processamento, de modo a melhorar o acabamento superficial. Os moldes com projeção metálica oferecem propriedades de acabamento superficial medianas, devido à matéria-prima se encontrar na forma fundida. Contrariamente, os moldes epóxi oferecem boa precisão e um bom acabamento superficial, caso a resina tenha uma boa adesão a todos os detalhes do master.

Uma das características fundamentais de um material para o bloco moldante é a sua condutividade térmica. Atendendo aos processos considerados e aos materiais disponíveis para estes mesmo, metais e resinas, concluiu-se que os materiais metálicos oferecem melhores propriedades de condução térmica. Como referido anteriormente, as resinas, devido à sua fraca condutividade térmica, tornam o tempo de ciclo de injeção maior, tendo uma taxa de arrefecimento do molde mais baixa. De modo a melhorar as propriedades térmicas do bloco é possível a colocação de cargas metálicas na resina, durante o seu vazamento. Contudo, um molde de resina com cargas metálicas e com projeção metálica, possui ainda melhores propriedades de condução térmica.

Na tabela 18 está a análise comparativa realizada para os processos de obtenção de um bloco moldante, relativamente aos parâmetros referidos anteriormente, de acordo com a ordem crescente: baixo, razoável, médio, elevado.

Tabela 18. Tabela comparativa dos processos para obtenção de um bloco moldante.

<b>Processo/ Características</b>	<b>Moldes epóxi</b>	<b>3D Keltool</b>	<b>LENS</b>	<b>Prometal</b>	<b>DMLS</b>	<b>Spray tooling</b>
<b>Custo</b>	Baixo	Médio	Elevado	Razoável	Elevado	Razoável
<b>Durabilidade</b>	Razoável	Elevado	Elevado	Elevado	Elevado	Elevado
<b>Acabamento superficial</b>	Médio	Razoável	Baixo	Baixo	Baixo	Médio
<b>Pós-processamento</b>	Baixo	Razoável	Médio	Médio	Médio	Baixo
<b>Condutividade Térmica</b>	Razoável	Elevado	Elevado	Elevado	Elevado	Médio

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

## 4. Trabalho Experimental

---

Através da análise comparativa entre os métodos de fabrico rápido para a obtenção de blocos moldantes, e dos meios disponíveis na Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria (ESTG), decidiu-se a fabricação de dois blocos moldantes em resina epóxi, com cargas metálicas de Al de percentagens variáveis. As resinas epóxi destacam-se do ponto de vista económico, precisão dimensional e rapidez de fabrico. Foram realizados ensaios de injeção de provetes, em cada bloco, de modo a proceder-se a ensaios mecânicos de flexão, tração e análise dinâmica-mecânica (DMA), sobre as peças obtidas. Através dos resultados dos ensaios mecânicos foi realizada uma análise comparativa, tendo como referência, peças da mesma geometria injetadas num molde convencional.

O molde utilizado para a colocação dos blocos moldantes produzidos foi um molde de aço existente no Laboratório de Tecnologia Mecânica da ESTG, local onde foi desenvolvida a parte experimental do presente trabalho. No molde utilizado foi substituída a chapa da bucha, por uma desenvolvida à medida das necessidades deste trabalho. A chapa foi adquirida apenas retificada, através do catálogo da *Hasco*.

O *software* utilizado na modelação do desenvolvimento da chapa, do bloco moldante bem como do sistema de refrigeração foi o *SolidWorks 2010*.

### 4.1. Fabricação da Chapa Metálica

---

O desenvolvimento experimental inicia-se com a conceção da chapa da bucha utilizada para fixar os blocos moldantes, durante o processo de injeção.

Como foi referido anteriormente, a estrutura de molde utilizada foi uma já existente no Laboratório de Tecnologia Mecânica, sendo apenas substituída a chapa da bucha, onde foram fixados os blocos moldantes. Assim, na conceção da nova chapa teve-se em consideração o dimensionamento do sistema de extração, de injeção, de guiamento e de fixação ao molde, da chapa original. Isto foi possível com o auxílio do projeto final do molde utilizado.

Contudo, houve itens relativamente ao dimensionamento da antiga chapa que foram alterados, nomeadamente, o diâmetro dos casquilhos e do sistema de extração. Relativamente ao sistema de extração e de injeção foi realizada uma folga de 1 mm de diâmetro; no que diz respeito ao casquilho este foi alterado pois não se encontrava disponível no catálogo do fornecedor, porém o diâmetro interior manteve-se. As medidas do novo casquilho são 30 mm e 24 mm de diâmetro, exterior e interior, respetivamente.

No que diz respeito à fixação do bloco moldante à chapa realizou-se uma caixa com as dimensões de 220 mm por 160 mm, com uma inclinação de 5° nas paredes. Estas dimensões foram definidas tendo em consideração todas as furações realizadas na chapa, tendo por base a chapa original, e que não podiam ser alteradas. Para a fixação do bloco moldante foram realizados quatro furos, nas extremidades da caixa, para a colocação de parafusos M8.

Devido à substituição do sistema de refrigeração original, para a opção escolhida foi necessário criar dois rasgos na chapa da bucha. Estes rasgos foram modelados após a realização do sistema de refrigeração, tendo uma profundidade de 20 mm; relativamente à largura, um rasgo possui 20 mm e o outro 30 mm. Na figura 21 está representada a chapa metálica, modelada em 3D.

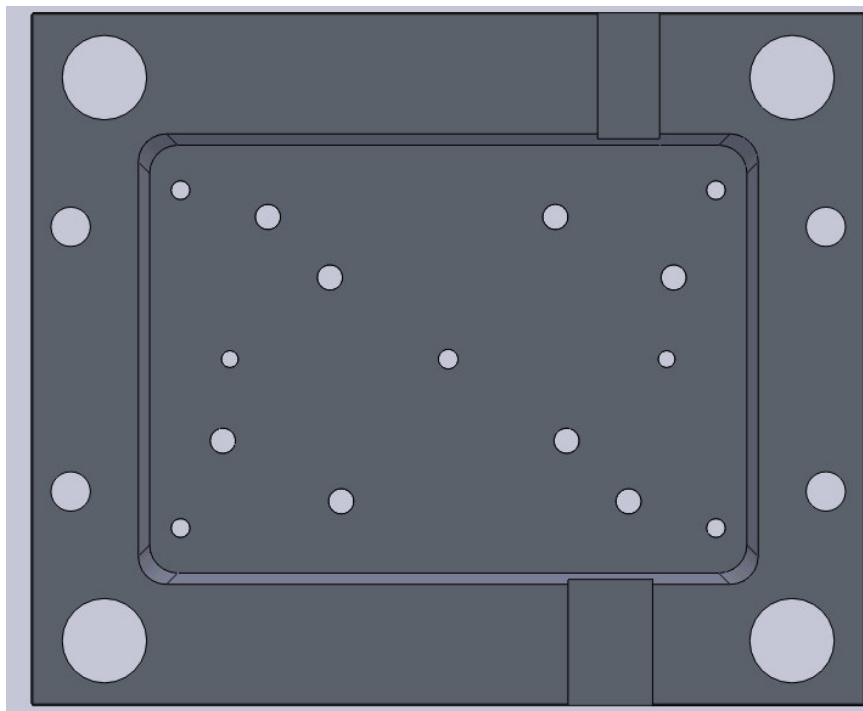


Figura 21. Chapa da bucha modelada.

A maquinação da chapa metálica foi realizada no Laboratório de Tecnologia Mecânica, num centro de maquinação *Cincinnati Milacron*, sendo o programa utilizado para a programação da maquinação o *SolidCam*. Na figura 22 pode-se verificar a chapa metálica após maquinação.

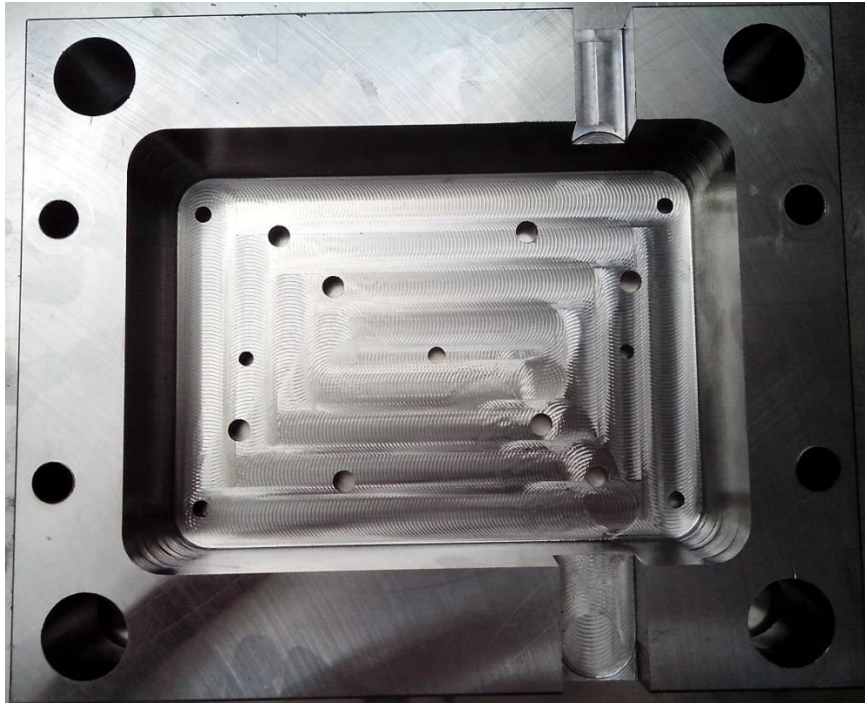


Figura 22. Chapa desenvolvida no projeto, após maquinação.

Atendendo ao projeto do molde utilizado para a modelação da chapa da bucha não corresponder exatamente ao molde utilizado, houve necessidade de realizar alguns ajustes. Devido ao facto do posicionamento das furações dos casquilhos, na direção X, terem um desfasamento de 3 mm (entre o projeto e o molde), para cada lado, a solução mais viável encontrada foi a realização das furações com o posicionamento existente no molde. Para colmatar a falta de material decidiu-se a utilização dos casquilhos originais do molde, com 32 mm e 24 mm de diâmetro, exterior e interior, respetivamente.

Para a finalização da chapa, foi necessário mandrilar as furações: dos pernos de retorno e do sistema de extração; e roscar as furações dos parafusos de fixação do bloco e dos parafusos de fixação da chapa à estrutura do molde.

## 4.2. Conceção do Sistema de Refrigeração

---

No que diz respeito ao sistema de refrigeração do bloco moldante, equacionaram-se diversas hipóteses, nomeadamente proceder à realização de furações no próprio bloco de resina, de forma a proporcionar a passagem do líquido refrigerante. Esta solução possuía inconvenientes, nomeadamente na interface entre a chapa metálica e o bloco de resina, havendo fugas na refrigeração. Assim, a solução selecionada consistiu num sistema de refrigeração em forma de serpentina, com tubos de cobre.

O tubo de cobre utilizado para formar o sistema de refrigeração possui diâmetro exterior de 6 mm e 3 mm interior. Para que não houvesse problemas durante a extração dos provetes ou a fixação dos blocos moldantes à chapa, realizou-se uma análise dimensional do sistema de refrigeração. Esta análise preveniu que a serpentina fosse posicionada por cima de furações, quer da chapa quer da resina.

O sistema foi curvado manualmente com aproximadamente as dimensões definidas, sendo posicionado a 20 mm de profundidade. A ligação da serpentina entre o interior da resina e o exterior do molde é efetuada através de um rasgo existente na chapa metálica, como referido anteriormente.

Para cada bloco foi desenvolvida uma serpentina. Nas figuras 23 e 24, estão representadas a modelação da serpentina, bem como a serpentina realizada no laboratório, respetivamente.

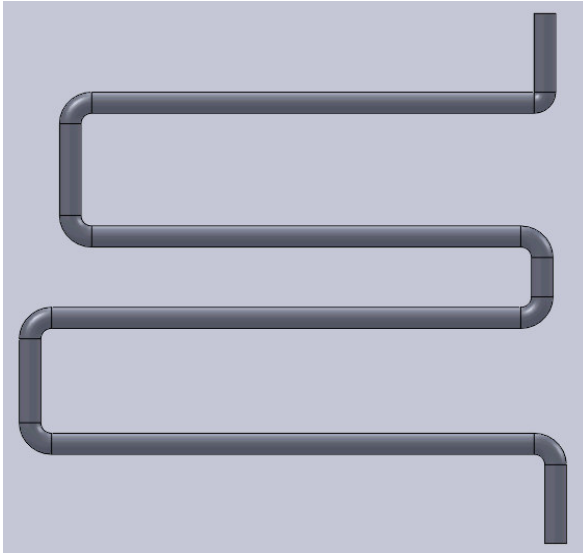


Figura 23. Sistema de refrigeração modelado.



Figura 24. Sistema de refrigeração realizado no laboratório.

### 4.3. Montagem/Desmontagem do Molde

Para a realização deste trabalho experimental foi necessário proceder-se à desmontagem/montagem do molde utilizado, quer para trocar-se a chapa da bucha do molde original, pela chapa da bucha desenvolvida neste projeto, quer para utilizar o sistema de extração durante o vazamento da resina. Esta desmontagem incluiu a separação das diversas chapas, bem como de todo o sistema de extração e de guiamento do molde. Para cada bloco moldante produzido houve necessidade de proceder à desmontagem /montagem do molde. Nas figuras 25 e 26, podem visualizar-se alguns elementos da constituição do molde.

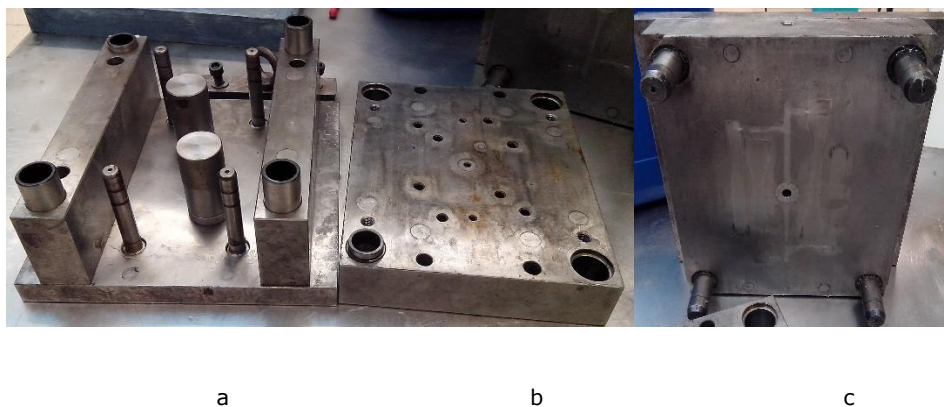


Figura 25. a - Chapa de aperto de extração com calços montados; b - chapa reforço da bucha; c - chapa da cavidade

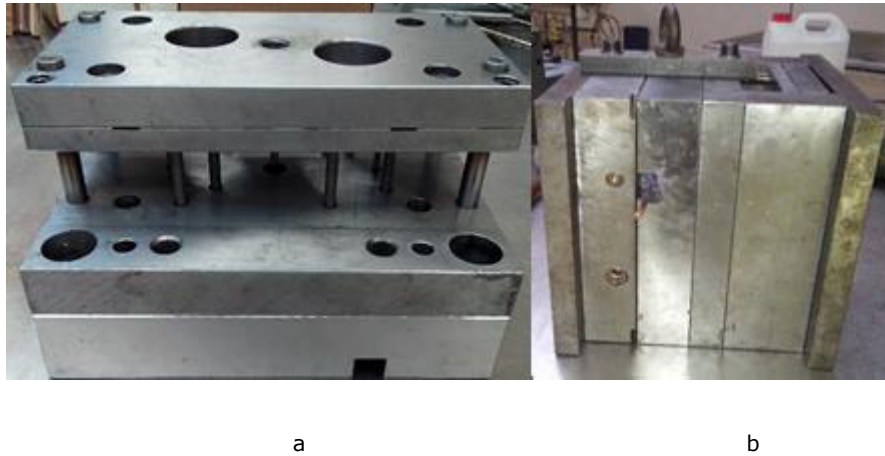


Figura 26. a – Chapa de aperto dos extratores, chapa dos extratores, chapa de reforço da bucha, chapa da bucha; b – molde montado

## 4.4. Construção dos Blocos Moldantes

A decisão da fabricação de dois blocos moldantes em resina epóxi com diferentes percentagens de cargas metálicas deveu-se à análise comparativa entre os processos de obtenção de blocos moldantes, bem como aos recursos disponíveis. Um dos blocos foi reforçado com cargas metálicas a 60% de Al e outro reforçado com cargas metálicas de 40% de Al. Foram ainda injetados provetes no molde convencional, 100% metálico. Deste modo torna-se possível estudar os efeitos da utilização dos blocos moldantes em resina, em cada ensaio, tendo como referência o molde convencional.

A resina utilizada foi a Biresin L74 e as cargas metálicas foram as de Al. Relativamente à resina, esta é constituída pelo endurecedor e pela resina. O fornecedor especifica na ficha técnica da resina alguns parâmetros importantes, tais como, tempo de cura, razão de mistura entre resina e endurecedor, tempo de manuseamento e tempo de desmoldação. Estas características são possíveis de verificar na tabela 19.

Tabela 19. Parâmetros da resina Biresin L74.

Parâmetros	Valor
Razão de mistura (g)	100/17
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1.1
Tempo de manuseamento, 500g (minutos)	120-150
Tempo de desmoldação (horas)	24
Tempo de cura (horas)	3h/60°C + 3h/140°C

Na construção dos blocos moldantes equacionaram-se duas opções: o vazamento numa caixa pré-feita ou o vazamento na chapa metálica. O vazamento na caixa pré-feita trazia alguns problemas, nomeadamente, no posicionamento correto do sistema de refrigeração. Com o vazamento na chapa metálica era solucionado esse problema através da montagem do sistema de extração. Assim, no posicionamento do sistema de refrigeração não existia o problema deste coincidir com o sistema de extração, visto os extratores estarem montados na própria chapa, para o vazamento.

O vazamento da resina foi realizado no Laboratório de Fabrico Rápido, da ESTG. Esta fase do trabalho experimental iniciou-se com a montagem do sistema de extração, de modo a posicionar o sistema de refrigeração, bem como dos pernos de retorno, casquilhos e chapa de fixação, para assegurar um correto posicionamento de todos os elementos do molde. Para a fixação do bloco moldante à chapa também foram utilizados quatro parafusos M8. Após este procedimento, foi necessário proceder à preparação da chapa para o vazamento.

Como foi referido anteriormente, todo o sistema de extração possuía 1 mm de diâmetro de folga, que era necessário preencher, de modo a não existir fugas de resina durante o seu vazamento. Para tal, à volta de todo o sistema de extração foi colocada plasticina, bem como à volta dos parafusos de fixação.

Para precaver possíveis fugas e contrações da própria resina, decidiu-se fazer uma limitação à volta de toda a abertura da chapa com uma altura de 10 mm, em relação à superfície da chapa.

Após a preparação da caixa, o desmoldante foi aplicado, por duas vezes, nos extratores, parafusos e paredes da chapa metálica. Depois da sua secagem colocou-se o sistema de refrigeração do bloco moldante. Com isto, iniciou-se o processo de vazamento da resina. Na figura 27 pode-se visualizar a chapa metálica após a preparação para a realização do vazamento da resina.

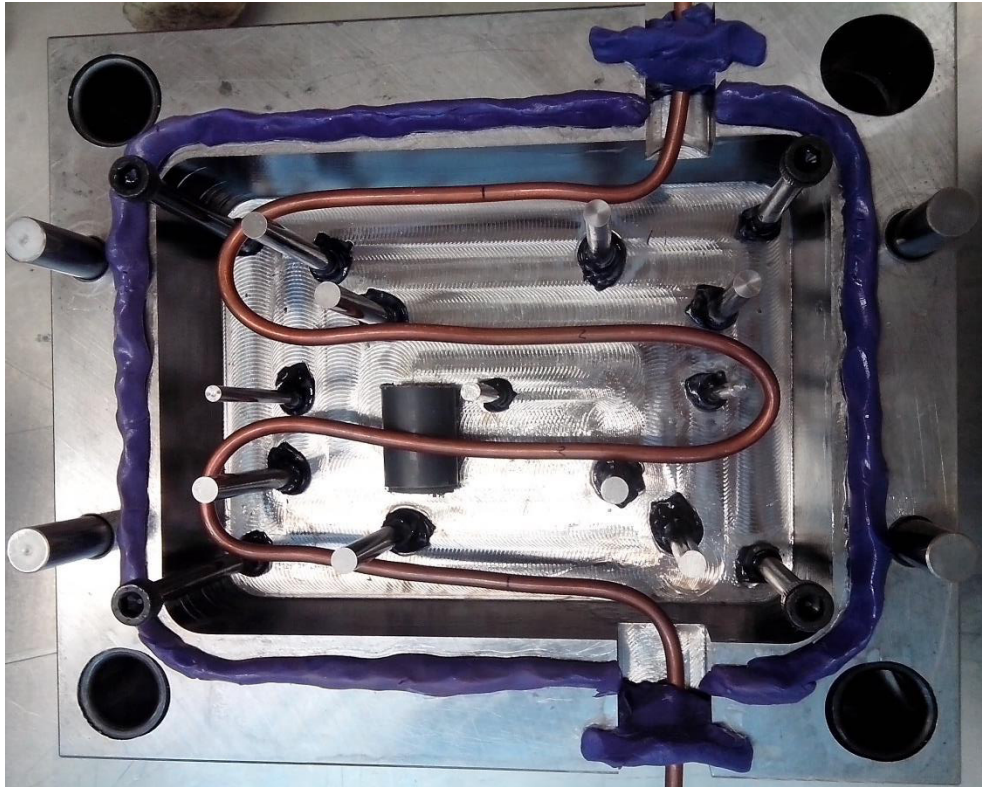


Figura 27. Chapa metálica antes do vazamento.

Como já foi referido previamente, foram produzidas dois blocos moldantes com diferentes percentagens de cargas de Al, 40% e 60%, tendo sido preparada a mesma quantidade de resina, aproximadamente o volume da caixa. No primeiro bloco moldante, reforçado com 40% de cargas de Al, a resina preparada foi de 1800 g, 306 g de endurecedor e 720 g de pó de Al. Para o bloco de resina reforçado com 60% de cargas de Al, a resina preparada foi de 1800 g, 306 g de endurecedor e 1080 g de cargas de Al.

A mistura final foi levada a uma câmara de vácuo até à pressão de 0.1 MPa durante aproximadamente 15 minutos e, posteriormente, vazada cuidadosamente para a caixa, tendo sido desmoldada após 24h do vazamento. A pós-cura foi realizada no forno, segundo os parâmetros já descritos na tabela 19. Na figura 28 está representada a chapa metálica após o vazamento da resina epóxi carregada de Al.



Figura 28. Chapa após vazamento da resina epóxi carregada de Al.

## 4.5. Produção dos Provetes

---

Para o desenvolvimento deste projeto, definiram-se dois tipos de provetes a injetar, com finalidades diferentes, tendo em conta os ensaios mecânicos pretendidos realizar, nomeadamente flexão e tração. De modo a aproveitar o espaço útil do bloco moldante em resina, foram concebidos dois provetes para cada ensaio. Considerou-se também pertinente a realização de ensaios de DMA, contudo, devido às dimensões mais pequenas dos provetes necessários comparativamente com as dimensões dos que seriam injetados, optou-se por utilizar um provete de flexão, que posteriormente seria cortado, com as dimensões específicas para o equipamento de DMA.

Em todos os ensaios foram tidas em consideração as dimensões referentes em cada norma internacional: ASTM D4065 para o ensaio de DMA, ASTM D638 para o ensaio de tração e ASTM D790 para o ensaio de flexão em três pontos.

No *software* de modelação, *SolidWorks*, foi desenvolvido o bloco moldante que se pretendia obter para a injeção plástica, a partir do bloco fabricado em resina epóxi. Durante este desenvolvimento foi tido em consideração o dimensionamento dos extratores, ponto

de injeção e canal de injeção do molde original. Para a fixação do bloco moldante em resina à chapa metálica foram realizadas quatro furações nas extremidades, correspondentes às furações também realizadas na chapa metálica. Na figura 29 está representado o bloco modelado, no qual se podem visualizar os provetes, as furações para extratores e de fixação e os canais de injeção.

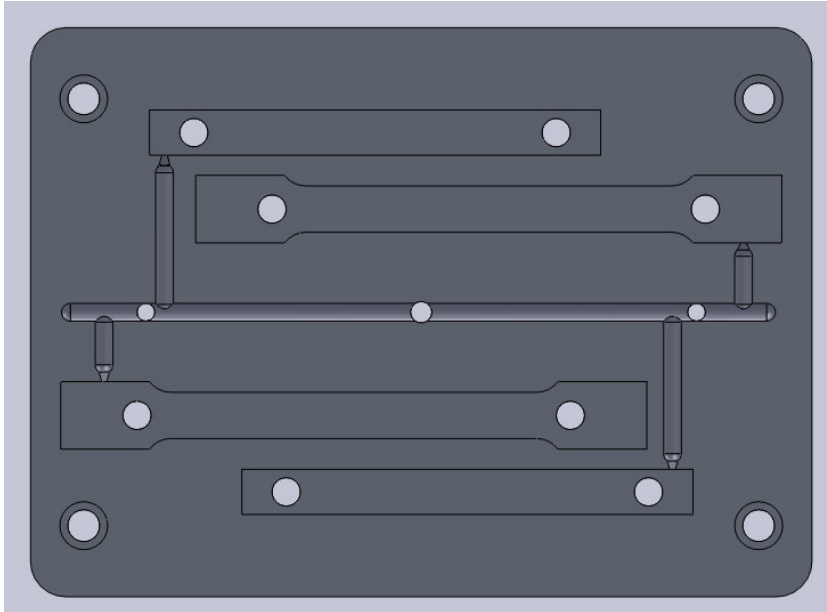


Figura 29. Bloco modelado no SolidWorks.

A maquinação do bloco moldante foi realizada no Laboratório de Tecnologia Mecânica, num centro de maquinação *Cincinnati Milacron*, sendo o programa utilizado para a programação da maquinação o *SolidCam*. Na figura 30 pode-se visualizar o bloco moldante após maquinação.



Figura 30. Bloco moldante após maquinação.

## 4.6. Ensaio de Injeção

---

Os ensaios de injeção foram realizados no Laboratório de Tecnologia Mecânica, na ESTG, na máquina de injeção *Euroinj D80*, com uma força de fecho de 80 toneladas.

Em cada bloco moldante foi injetado um polímero amorfo, PS, e um polímero semicristalino, PP. O ensaio de injeção de cada bloco consistiu na injeção de cerca de 30 ciclos, de modo a ajustar o correto enchimento do bloco, bem como, o aquecimento do molde. Após o molde encontrar-se em pleno funcionamento, foram recolhidas, aleatoriamente, 5 amostras do provete de tração e 10 amostras do provete de flexão, para cada polímero injetado. Para o ensaio de DMA foram utilizados 5 das 10 amostras recolhidas do provete de flexão, para cada polímero injetado.

Na tabela 20 encontram-se os parâmetros utilizados durante o ensaio de injeção, quer do molde de aço quer dos blocos moldantes em resina, para cada plástico injetado.

Tabela 20. Parâmetros de injeção.

Parâmetros	Aço		Blocos moldantes em resina		Unidades
	PP	PS	PP	PS	
Temperatura de injeção	185	210	190	190	°C
Pressão de injeção	90	60	35	35	bar
Tempo de ciclo	21,8	24,8	58	58	s
Pressão de compactação	40		30	30	bar
Tempo de arrefecimento	2	5	38,5	38,5	s

Na figura 31 encontra-se uma imagem referente ao ensaio de injeção do bloco moldante de resina epóxi carregado de Al.



Figura 31. Ensaio de injeção do bloco moldante de resina epóxi carregado de Al.

## **4.6. Métodos de Caracterização das Amostras**

---

Neste subcapítulo pretende-se realizar uma introdução teórica aos métodos utilizados para a caracterização das amostras, nomeadamente através de ensaio de DMA, tração e flexão em três pontos. Na realização dos ensaios teve-se em consideração as normas internacionais para cada ensaio, mais adequadas ao trabalho. Em todas as normas é saliente as condições ideais para a realização de cada ensaio, tais como, temperatura ambiente de 23°C, com tolerância de 2°C, e humidade relativa de 50%, com tolerância de 5%.

### **4.6.1. Análise Mecânica Dinâmica**

---

Os materiais poliméricos por apresentarem grandes moléculas e várias conformações, são distinto dos materiais metálicos. Assim, a resposta a solicitações mecânicas dos polímeros têm como características o comportamento viscoso e elástico.

A técnica DMA tem como princípio base a resposta de um material, quando submetido a uma tensão sinusoidal, que depende da sua viscoelasticidade. Isto é possível através de um analisador mecânico dinâmico, existente no equipamento, que permite realizar este tipo de análises. Esta técnica permite identificar diversas características viscoelásticas relacionada com a temperatura, humidade, amplitude de deformação plástica e dinâmica. Também é possível identificar a temperatura de transição vítrea, o módulo de elasticidade e a temperatura de fusão. A técnica DMA é realizada aplicando uma deformação ou tensão de intensidade de carga oscilatória ou variando o tipo de carga, entre tração, fadiga, flexão e compressão [8,26].

Um material tem um comportamento mecânico e dinâmico característico da sua elasticidade, que advém do tipo de ensaio e solicitação utilizada. Para uma determinada resposta do material, este apresenta um comportamento específico, podendo ser classificado em viscoso, elástico ou viscoelástico. Para cada aplicação de carga existe sempre uma resposta do material solicitado, essa resposta pode ser instantânea (aproximadamente) ou possuir um atraso, que se representa como ângulo de atraso ( $\delta$ ) [8,26,61].

Durante o trabalho experimental foram realizados ensaios de DMA à temperatura ambiente de 23°C e à temperatura de 70°C, aplicando forças de flexão em três pontos, tendo sido comparados posteriormente, de modo a conhecer-se a influência do aumento da temperatura.

Os ensaios de DMA foram realizado no Laboratório de Materiais de ESTG, no equipamento *Tritec 2000* e as dimensões dos provetes utilizados neste ensaio foram as definidas pelo fornecedor do equipamento, 45 mm de comprimento, 5 mm de largura e 4 mm de espessura. Na figura 32 encontra-se representado o equipamento utilizado no ensaio de DMA.



a

b

Figura 32. a – Equipamento de DMA utilizado; b – Posicionamento do provete de DMA no equipamento.

## 4.6.2. Ensaio de Tração

---

O ensaio de tração tem como objetivo a determinação da força necessária para romper o material em estudo, bem como o nível de extensão antes da sua rotura. Esta rotura deve-se à passagem do regime elástico para o regime plástico, do material, sendo caracterizada pela formação de fendas no provete [62].

Num ensaio de tração o provete possui dimensões e geometria definidas por normas internacionais, e encontra-se fixo ao equipamento pelas suas extremidades. A carga a que o provete está sujeito vai aumentando progressivamente, numa única direção. Existem dois tipos de roturas que caracterizam um material, rotura frágil e rotura dúctil. A primeira possui como características a baixa deformação que o material possui, contrariamente, a rotura dúctil possui uma deformação permanente significativa [62,63].

Nos ensaios de tração, através dos dados obtidos laboratorialmente da variação da força aplicada com o deslocamento, é possível a obtenção do gráfico que relaciona a tensão com a extensão do material. Através da análise do gráfico obtido é possível determinar a tensão de cedência, a tensão de rotura e o módulo de elasticidade, entre outros. Na figura 33 estão representados algumas dessas variáveis [64].

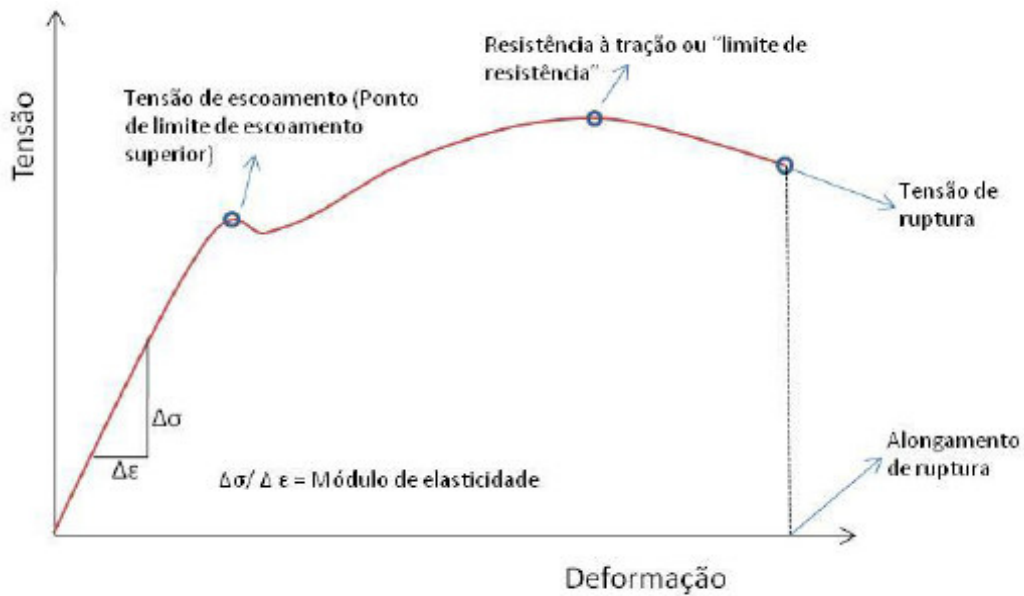


Figura 33. Relação entre tensão/deformação de um ensaio de tração [62].

A tensão nominal  $\sigma$  é obtida através da força aplicada  $F$  e da área da seção transversal inicial  $A_0$  do provete, como se pode verificar na equação 1:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (1)$$

Para a determinação da extensão nominal  $\varepsilon$  durante a deformação do provete, é considerado o comprimento inicial do provete  $L_0$  e a variação do seu comprimento  $\Delta L$ , como se pode verificar na equação 2 [65]:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2)$$

Através da norma internacional D638, foi possível definir aspetos importantes para a realização do ensaio de tração. Relativamente às dimensões do provete, teve-se em consideração a composição do material, estando definidos 5 tipos de provetes. No caso em estudo, o provete foi considerado um material plástico rígido e semi-rígido, tendo como dimensões as referidas na norma. Esta norma faz referência a 5 ensaios, para cada amostra em estudo, em materiais isotrópicos. Outro aspeto importante é a velocidade do ensaio, que depende da especificação do material, sendo que, para a amostra em causa, está definido como sendo 50 mm/min [66].

Na figura 34 está representado o equipamento do ensaio mecânico de tração utilizado na parte experimental deste trabalho.

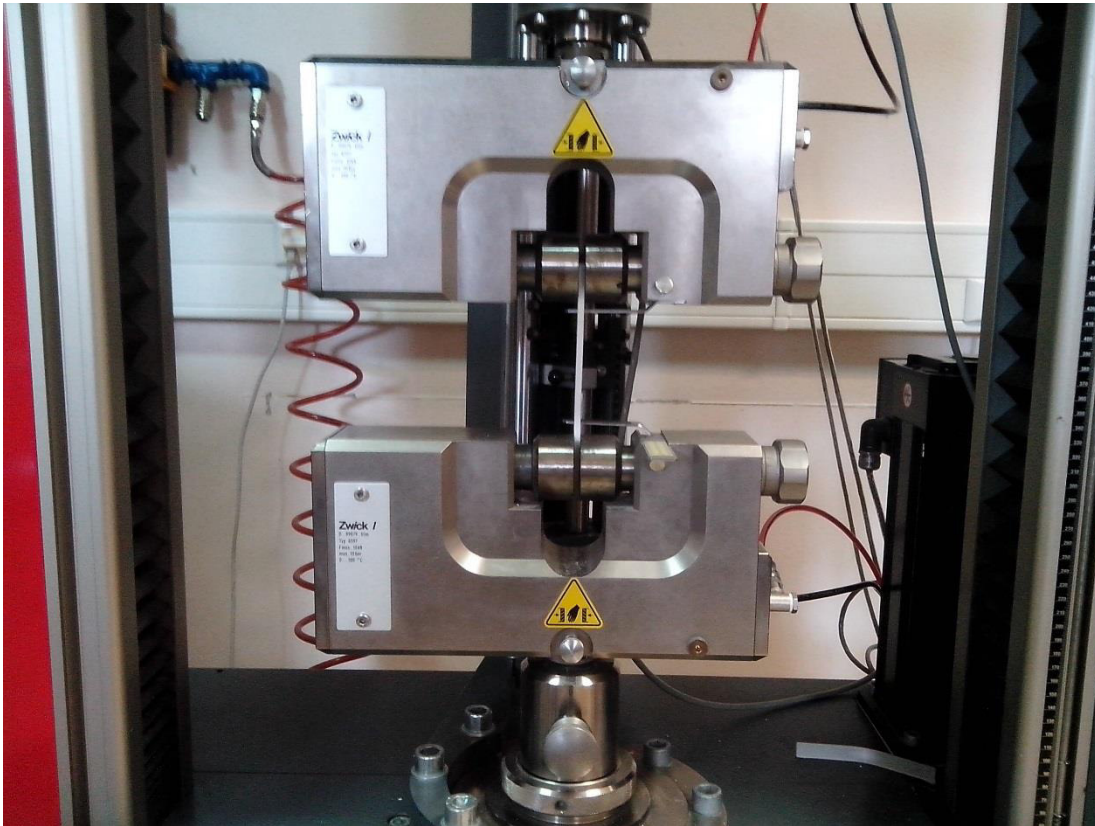


Figura 34. Ensaio mecânico de tração.

### 4.6.3. Ensaio de Flexão em Três Pontos

---

Existem vários tipos de ensaios à flexão, contudo ao longo do projeto apenas será abordado o ensaio à flexão em três pontos.

Para o ensaio de flexão, os provetes possuem a forma de barras, que se encontram apoiadas nas extremidades, sendo aplicada uma força no centro, provocando a flexão do provete. Este tipo de ensaios mecânicos são relevantes quando é necessário conhecer as propriedades de rigidez de um material. Com a realização de um ensaio à flexão é possível determinar o módulo de elasticidade e a resistência à flexão do material [64].

Para a determinação da resistência à flexão do material do provete é considerado o momento fletor máximo  $M$ , o momento de inércia  $I$  da secção transversal e a distância da linha neutra ao ponto mais afastado  $Y$ , dado pela equação 3:

$$\sigma = \frac{My}{I} \quad (3)$$

O momento fletor máximo é determinado pela equação 4:

$$M = \frac{FL}{4} \quad (4)$$

Na equação 4, a força máxima aplicada é representada por  $F$  e  $L$  é a distância do provete entre os apoios. O momento de inércia é dado pela largura do provete  $b$  e altura  $h$ , considerando as dimensões da secção transversal do provete retangular, como se pode verificar na equação 5:

$$I_z = \frac{bh^3}{12} \quad (5)$$

No que diz respeito à determinação do módulo de elasticidade  $E$ , obtém-se substituindo a tensão  $\sigma$  pela equação 3:

$$\sigma = \varepsilon E \quad (6)$$

Sendo  $\varepsilon$  o deslocamento máximo que o provete sofre durante o ensaio, obtém-se a equação 7 [67]:

$$E = \frac{FL^3}{\frac{48\varepsilon bh^3}{12}} \quad (7)$$

Através da norma, D790, foi possível estabelecer os itens essenciais para o ensaio de flexão. Segundo a norma aplicável a materiais termoplásticos, o provete tem a geometria retangular, com dimensões de 127 mm de comprimento, 12.7 mm de largura e 3.2 mm de espessura.

Os ensaios à flexão em três pontos foram realizados no Laboratório de Materiais de ESTG, no equipamento *Zwick Z100*, no qual os provetes foram submetidos a uma pré carga de 5 N e a uma velocidade de carga de 2 mm/min. A distância entre os apoios do equipamento foi de 63 mm. Na figura 35 encontra-se representado o ensaio mecânico de flexão em três pontos [68].

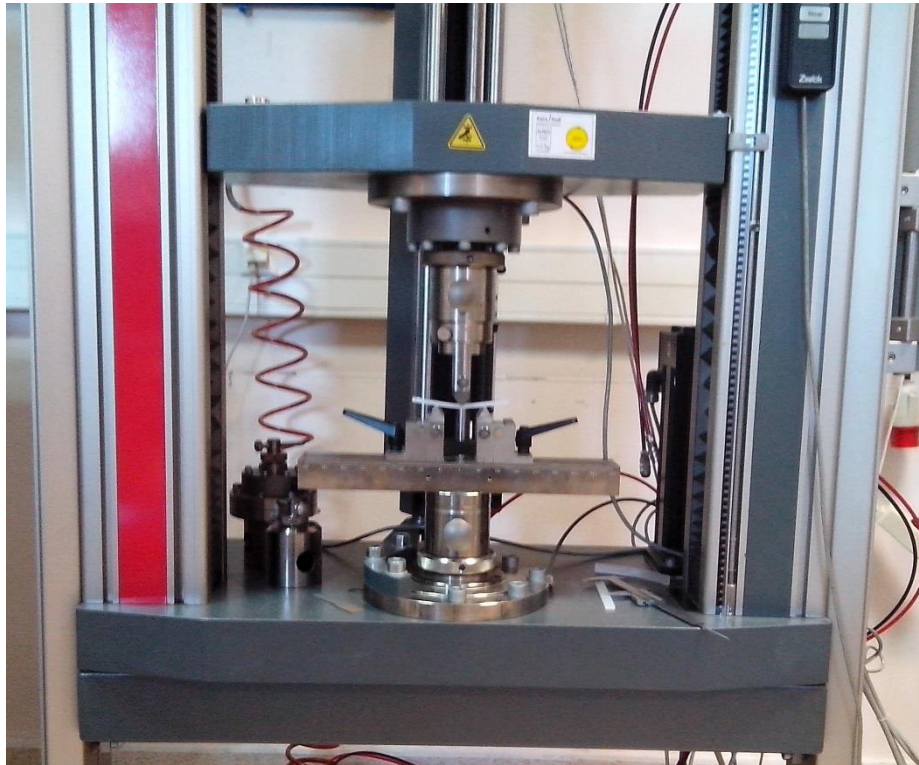


Figura 35. Ensaio mecânico de flexão em três pontos.

## 5. Resultados e Discussão

---

Este capítulo tem como objetivo a apresentação dos resultados obtidos nos diferentes ensaios realizados e da sua análise. Ao longo deste trabalho foram descritos diversos processos para o fabrico de blocos moldantes e, após uma análise, foi selecionado o procedimento experimental a adotar. O procedimento experimental consistiu na injeção plástica de provetes em PP e PS nos blocos moldantes produzidos, de modo a permitir a realização de ensaios de tração, flexão e DMA. Os valores apresentados são referentes à média de 5 ensaios, no qual não houve discrepância de valores significativos entre eles. Também se considerou relevante a realização de uma análise dimensional dos provetes obtidos, através da utilização de um paquímetro digital com precisão 0,01 mm.

### 5.1. Análise Dimensional

---

A estabilidade dimensional está relacionada com o valor médio de contração volumétrica e das características que cada polímero possui, com a temperatura do molde durante a injeção e a pressão de compactação a que o material é sujeito. São de considerar quatro pontos essenciais que foram tidos em consideração na análise dimensional: quanto maior a temperatura do molde maior será a contração volumétrica sofrida pelo polímero; o PS possui menor contração volumétrica quando comparado ao PP; PS possui boa estabilidade dimensional e PP necessita de pressões de injeção elevadas.

Para a análise dimensional das peças injetadas teve-se em consideração o dimensionamento das mesmas no seu projeto e as dimensões obtidas através das medições dos provetes injetados nos dois blocos em resina epóxi e no molde convencional. Nesta análise foi utilizada a média das dimensões das 5 amostras de provetes de tração e flexão, injetados em PP e PS. Nas figuras 36 e 37, podem-se verificar as dimensões dos provetes de tração e flexão, respetivamente.

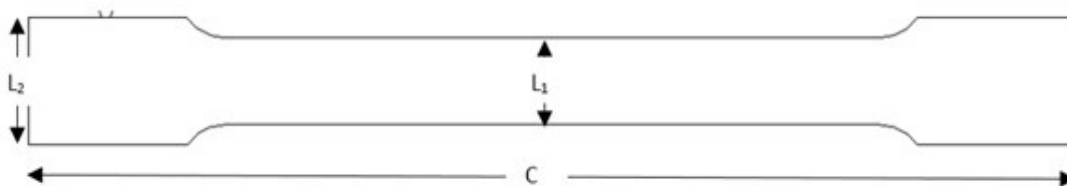


Figura 36. Dimensões do provete de tração.



Figura 37. Dimensões do provete de flexão.

Através da análise dimensional, presente nas tabelas 21 e 22, dos provetes injetados em PP, pode-se verificar que não existe conformidade em todas as cotas dos provetes, sendo mais notório o desvio ocorrido no provete de flexão. Contudo, os provetes obtidos no bloco de resina carregada com 40% de Al apresentam a menor variação da espessura e os provetes obtidos no molde de aço a maior variação. Este facto pode-se dever a algum desgaste que o molde de aço possa possuir e a um menor tempo de arrefecimento do molde, durante o processo de injeção. No que diz respeito ao comprimento de ambos os provetes, as maiores variações foram observadas nos provetes obtidos nos blocos em resina. Este efeito está relacionado com a reduzida condutividade térmica da resina, fazendo com que durante a extração das peças haja grande variação entre a temperatura do provete e a temperatura do laboratório, apesar do tempo de arrefecimento ter sido mais elevado do que na injeção no molde de aço. Com isto, os provetes ganham empeno, sendo que no bloco de resina carregada com 60% de Al notou-se uma redução deste efeito, estando relacionado com o aumento das cargas de Al que fazem aumentar a condutividade térmica do bloco.

Nas tabelas 21, 22, 23 e 24, os valores a verde representam a menor variação encontrada entre a média dos provetes injetados no molde e nos blocos de resina; e a vermelho está representado a maior variação.

Tabela 21. Análise dimensional do provete de tração injetado em PP.

Proвете de tração injetado em PP								
Variáveis	Aço			Blocos de Resina				
	Teórico	Exp.	Variação	Teórico	Bloco 40% Al		Bloco 60% Al	
					Exp.	Variação	Exp.	Variação
C	150	151,97	1,97	165	161,04	3,96	161,56	3,44
L <sub>1</sub>	10	9,84	0,16	13	12,59	0,41	12,63	0,37
L <sub>2</sub>	19	19,68	0,68	19	18,44	0,56	18,41	0,59
ES	4	4,42	0,42	4	4,25	0,25	4,32	0,32

Tabela 22. Análise dimensional do provete de flexão injetado em PP.

Provete de flexão injetado em PP								
Variáveis	Aço			Blocos de Resina				
	Teórico	Exp.	Variação	Teórico	Bloco 40% Al		Bloco 60% Al	
					Exp.	Variação	Exp.	Variação
C	125	125,53	0,53	127	123,87	3,13	124,49	2,51
L	13	12,41	0,59	12,7	12,41	0,29	12,44	0,26
ES	4	4,45	0,45	4	4,17	0,17	4,33	0,33

Relativamente à análise dimensional dos provetes injetados em PS, estes apresentam mais consistência do que os provetes injetados em PP. Os provetes injetados no molde de aço possuem a maior variação em todas as cotas, quer os provetes de tração, quer os provetes de flexão. O PS necessita de temperaturas mais elevadas durante a injeção que no PP. Sendo assim, no molde de aço apesar de ter-se aumentando a temperatura do molde, o sistema de refrigeração é mais consistente do que o sistema utilizado nos blocos de resina. Com isto, os blocos atingiram uma temperatura mais elevada proporcionando uma maior estabilidade dimensional, podendo ser verificado nas tabelas 23 e 24 que a maior variação das dimensões foi notada nos provetes injetado no molde de aço.

Tabela 23. Análise dimensional do provete de tração injetado em PS.

Provete de tração injetado em PS								
Variáveis	Aço			Blocos de Resina				
	Teórico	Exp.	Variação	Teórico	Bloco 40% Al		Bloco 60% Al	
					Exp.	Variação	Exp.	Variação
C	150	153,9	3,9	165	163,83	1,17	163,78	1,22
L <sub>1</sub>	10	9,89	0,11	13	12,96	0,04	12,92	0,08
L <sub>2</sub>	19	19,93	0,93	19	18,84	0,16	18,77	0,23
ES	4	4,55	0,55	4	4,08	0,08	4,4	0,4

Tabela 24. Análise dimensional do provete de flexão injetado em PS.

Provete de flexão injetado em PS								
Variáveis	Aço			Blocos de Resina				
	Teórico	Exp.	Variação	Teórico	Bloco 40% Al		Bloco 60% Al	
					Exp.	Variação	Exp.	Variação
C	125	127,32	2,32	127	125,96	1,04	126,15	0,85
L	13	12,55	0,45	12,7	12,51	0,19	12,53	0,17
ES	4	4,58	0,58	4	4,28	0,28	4,14	0,14

## 5.2. Análise Visual

De forma geral, foi detetada visualmente a existência de rebarba nos provetes e empeno, ambos nos provetes de PP injetados nos blocos de resina epóxi.

Relativamente ao empeno, este problema foi mais notório na injeção dos provetes no bloco de resina carregado com 40% de Al, estando relacionado com a diferença de temperatura do molde com a temperatura do laboratório. Na injeção no bloco de resina carregado com 60% de Al este problema foi minimizado devido à existência de mais cargas de Al que aumentou a condutividade térmica da resina. Os provetes em PS injetados não apresentaram problemas de empeno. Na figura 38 estão representados dois provetes de PP, no qual se pode verificar a diferença entre a) um provete injetado no molde de aço e b) um provete injetado num bloco moldante de resina.

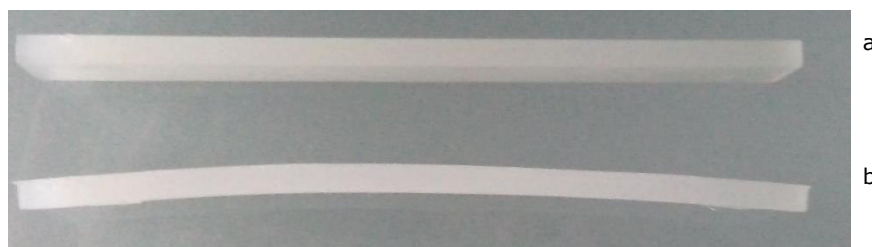


Figura 38. Provetes de PP com e sem empeno.

No que diz respeito à existência de rebarba, a mesma foi notória, de igual forma, nos provetes injetados de PP e PS nos blocos de resina carregados com 40% de Al e 60% de Al, devendo-se à baixa pressão de injeção que é necessário utilizar para garantir a integridade dos blocos durante a injeção. Na figura 39 pode-se verificar a rebarba encontrada durante a injeção nos blocos de resina dos provetes.



Figura 39. Rebarba de um provete de PP.

## 5.3. Análise Mecânica

---

A análise mecânica consistiu em três tipos de ensaios mecânicos, tração, flexão em três pontos e DMA. Neste subcapítulo serão apresentados os resultados obtidos e uma análise aos mesmos, da média dos 5 ensaios realizados para cada provete injetado. Os provetes injetados no bloco de resina carregado com 40% de Al são designados por PP\_40 ou PS\_40; os provetes injetados no bloco de resina carregado com 60% de Al são designados por PP\_60 ou PS\_60, e por último os provetes injetados no molde de aço são designados por PP\_A ou PS\_A.

### 5.3.1. Análise Mecânica Dinâmica

---

Relativamente aos ensaios de DMA foram realizados 5 ensaios a diferentes temperaturas para cada provete injetado, 23°C e 70°C, tendo sido submetidos a cargas de flexão em três pontos. Esta diferença de temperaturas serviu para conhecer o comportamento do material com o aumento da temperatura, bem como a influência nas propriedades mecânicas.

Através da análise da figura 40, relacionada com o ensaio a 23°C dos provetes de PP, pode-se verificar que os provetes injetados nos diferentes blocos possuem um comportamento similar, contudo os provetes PP\_A destacam-se por suportar a maior força aplicada, apresentando o menor deslocamento, 0,24 mm. Relativamente aos provetes PP\_40 e PP\_60, ambos apresentam igual força aplicada, contudo os provetes PP\_60 possuem maior deslocamento, 0,32 mm.

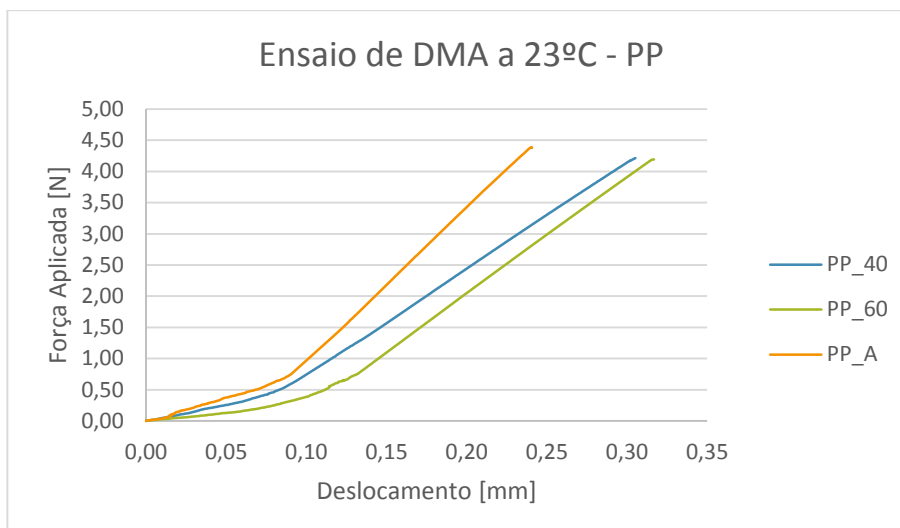


Figura 40. Resultados do ensaio de DMA a 23°C do PP.

Comparando a figura 40 com a figura 41, ensaio de DMA a 70°C dos provetes de PP, pode-se verificar de forma geral que os provetes apresentam um deslocamento maior, com uma força menor, quando aumentada a temperatura. De forma análoga ao ensaio a 23°C, os provetes PP\_A apresentam claramente um comportamento distante em relação aos provetes PP\_40 e PP\_60, suportando forças maiores, contudo com deslocamentos menores. Nos provetes PP\_40 e PP\_60 verifica-se claramente uma tendência dos valores de resistência mecânica, que não é significativa devido à sua proximidade, em ambas as temperaturas.

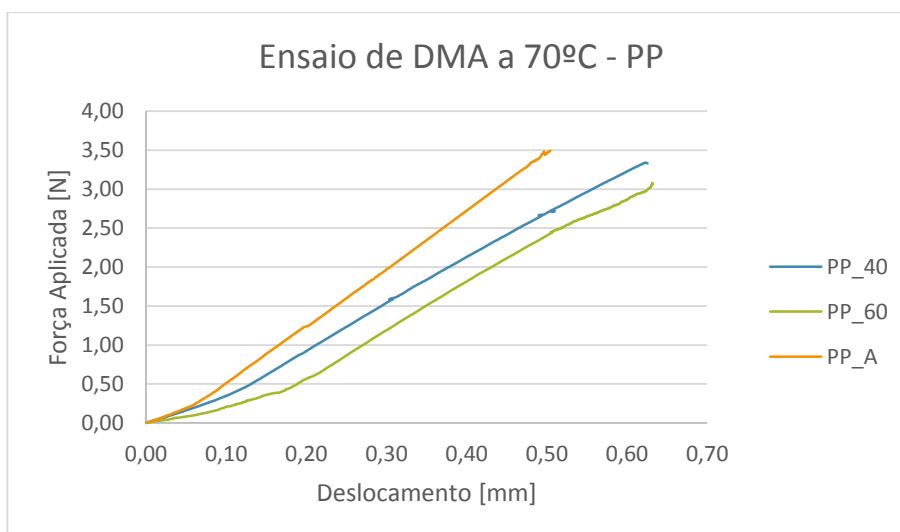


Figura 41. Resultados do ensaio de DMA a 70°C do PP.

No que diz respeito ao módulo de elasticidade, como era expetável, os provetes PP\_A possuem o maior módulo, sendo que a variação do valor do módulo entre os provetes dos blocos em resina é reduzido. Através da tabela 25 pode-se concluir que com o aumento da

temperatura o módulo de elasticidade diminui, não havendo muita discrepância entre os valores obtidos para os diversos provetes.

Tabela 25. Módulo de elasticidade do PP, obtido através do ensaio de DMA.

Provetes	E (23°C - PP) [MPa]	E (70°C - PP) [MPa]
PP_A	1400	600
PP_40	1320	580
PP_60	1301	580

Relativamente aos ensaios dos provetes de PS, a 23°C obteve-se um comportamento diferente quando comparando com os provetes PP à mesma temperatura. Neste caso, os provetes PS\_40 distanciaram-se dos restantes, com um deslocamento máximo de 0,24 mm, para uma força de 4,47 N. Na figura 42 pode-se verificar o comportamento dos provetes nos ensaios de DMA a 23°C, do PS.

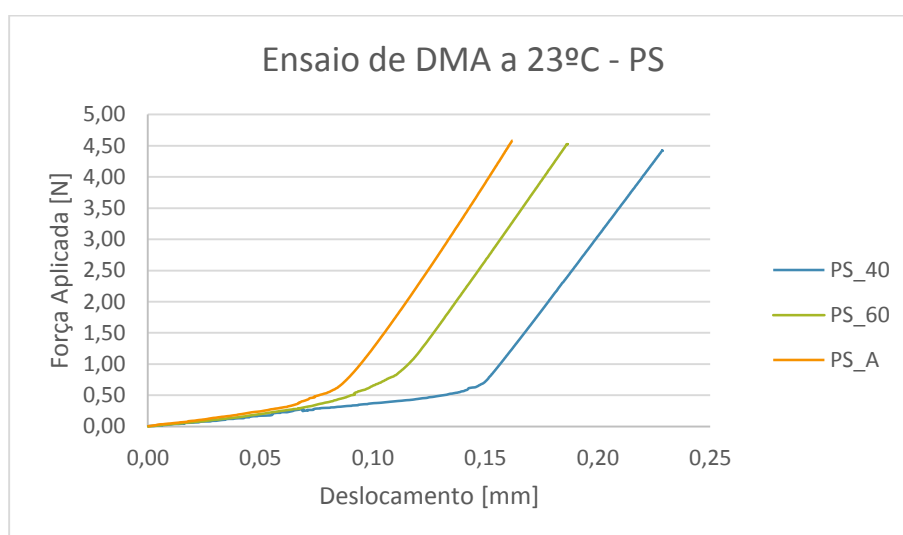


Figura 42. Resultados obtidos do ensaio de DMA a 23°C do PS.

No caso do ensaio de DMA a 70°C pode-se constatar na figura 43 um comportamento diferente, quando comparado com a figura 42. A 70°C verifica-se que os provetes PS\_A atingem maior força aplicada, para o deslocamento de 0,27 mm. Os provetes PS\_40 apresentam um ligeiro decréscimo de força aplicada, cerca de 0,47 N, contudo possuem um deslocamento de 0,38 mm. É de salientar que o comportamento destes provetes aproximou-se do comportamento dos outros dois provetes.

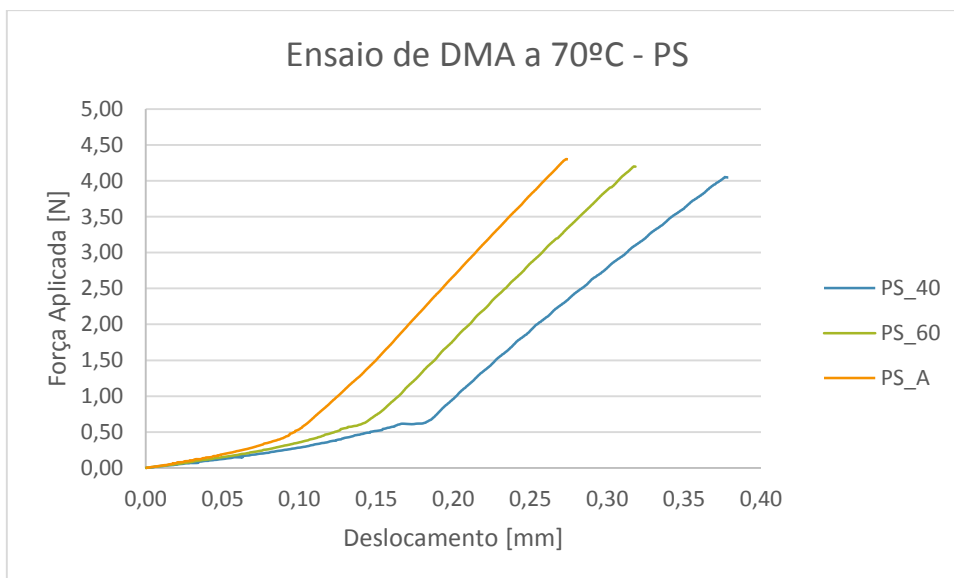


Figura 43. Resultados obtidos do ensaio de DMA a 70°C no PS.

De forma genérica o PP apresenta maiores deslocamentos em ambas as temperaturas, quando comparado com o PS. Contudo, o PS permite um carregamento de força aplicada superior. Este facto deve-se às características da organização da estrutura molecular de cada material, permitindo um comportamento dúctil ou frágil. No caso dos provetes de PS nota-se claramente a influência das cargas de Al nos resultados obtidos, estando relacionada com a capacidade de arrefecimento dos blocos moldantes.

Na tabela 26 pode-se verificar o módulo de elasticidade para o PS injetados nos blocos, obtidos através do ensaio de DMA a 23°C e 70°C.

Tabela 26. Módulo de elasticidade do PS, obtido através do ensaio de DMA.

Provetes	E (23°C - PS) [MPa]	E (70°C - PS) [MPa]
PS_A	2300	2020
PS_40	2380	2290
PS_60	2340	2121

### 5.3.2. Flexão Em Três Pontos

Com os ensaios de flexão em três pontos realizados nos provetes injetados nos diferentes blocos foi possível identificar um comportamento semelhante entre eles, contudo o provete PP\_A e o PS\_A destacam-se em termos de força aplicada suportada.

Através da análise da figura 44 referente ao ensaio de PP, pode-se verificar que os provetes PP\_A obtiveram um deslocamento maior, bem como uma força aplicada superior, 111 N em 10 mm de deslocamento. Contrariamente os provetes PP\_40 e PP\_60, que não foram além de 70 N de força aplicada para um deslocamento máximo de 7,8 mm.

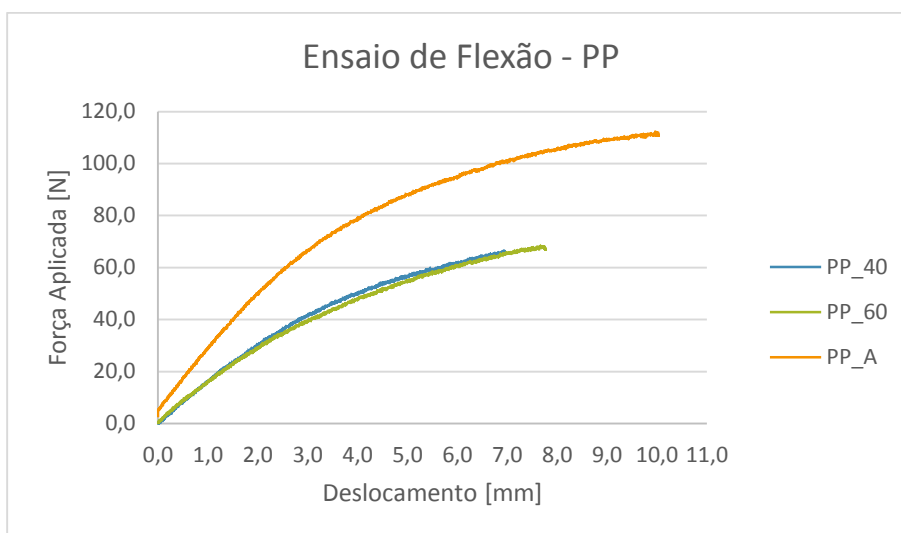


Figura 44. Resultados obtidos do ensaio de flexão do PP.

Na tabela 27 pode-se verificar as propriedades mecânicas para cada provete, em relação ao regime elástico, concluindo-se que os provetes PP\_A apresentam valores superiores aos restantes provetes, contudo o deslocamento em todos eles é igual, 0,41 mm. Comparando os valores de módulo de elasticidade obtidos com o valor que consta na ficha técnica do fornecedor do plástico, conclui-se que o PP\_A no ensaio de DMA a 23°C é o que se aproxima mais do valor teórico, 1550 MPa.

Tabela 27. Valores obtidos através do ensaio de flexão em três pontos, para os provetes em PP, injetados nos diferentes blocos, no regime elástico.

Provetes	$F_{\text{máx}}$ [N]	Deslocamento [mm]	$\sigma_{\text{máx}}$ [MPa]	E [MPa]
<b>PP_A</b>	14,92	0,41	6,78	1855,0
<b>PP_40</b>	7,14	0,41	3,32	1296,2
<b>PP_60</b>	7,48	0,41	3,48	1335,2

O comportamento dos provetes injetado em PS foi similar ao registado pelos provetes injetado em PP. Contudo, nos ensaios dos provetes de PS verificou-se a rotura destes, bem como um deslocamento inferior. No caso dos provetes PS\_A atingiram forças aplicadas semelhantes que o PP\_A, porém o deslocamento foi apenas de 3,2 mm, até à rotura. No caso dos provetes PS\_40 e PS\_60 a força aplicada foi menor do que no provete PS\_A,

cerca de 90 N, contudo o deslocamento foi maior, principalmente nos provetes PS\_40, 4,78 mm, como se pode verificar na figura 45.

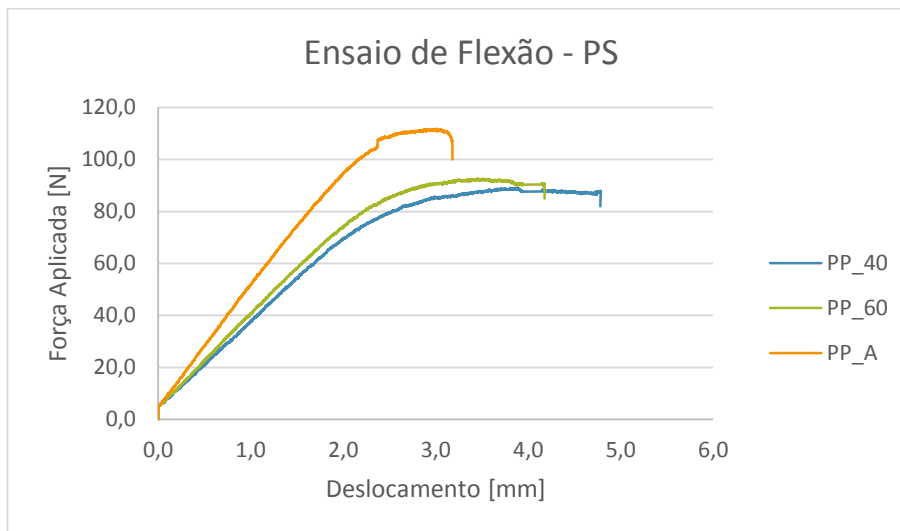


Figura 45. Resultados obtidos do ensaio de flexão do PS.

Na tabela 28 estão apresentadas as características mecânicas dos diferentes provetes, no ensaio de flexão em três pontos do PS, para o regime elástico.

Tabela 28. Valores obtidos através do ensaio de flexão em três pontos, para os provetes em PS, injetados nos diferentes blocos, no regime elástico.

Provetes	$F_{\text{máx}}$ [N]	Deslocamento [mm]	$\sigma_{\text{máx}}$ [MPa]	E [MPa]
PS_A	24,27	0,41	11,02	3576,6
PS_40	18,18	0,41	8,46	2487,5
PS_60	19,38	0,41	8,9	2702,4

Comparado o resultados obtido pelo ensaio de DMA e o ensaio de flexão, nomeadamente o módulo de elasticidade, verifica-se que existem grandes diferenças, nomeadamente, os valores obtidos no ensaio de DMA são inferiores aos valores obtidos no ensaio de flexão em três pontos. Além disso, os provetes PP\_60 obtiveram menos módulo de elasticidade no ensaio de DMA em relação ao ensaio de flexão em três pontos. Esta diferença pode ser justificada pela baixa resolução da célula de carga para valores muito baixos de carga, atendendo a que apenas permite um reduzido número de pontos registados e partir dos quais se caracteriza o regime elástico. Contudo, foi no ensaio de flexão em três pontos, nos provetes PS\_A, que se verificou maior proximidade do valor do módulo de elasticidade obtido com o valor teórico do fornecedor, 3100 MPa.

### 5.3.3. Ensaio de tração

Através da análise dos resultados obtidos do ensaio de tração dos provetes de PP, figura 46, verifica-se que os provetes PP\_A apresentam uma tensão de cedência superior aos provetes PP\_40 e PP\_60. O comportamento dos provetes PP\_40 e PP\_60 é semelhante, destacando-se os provetes PP\_60 pela sua tensão de rotura. Relativamente ao módulo de elasticidade, os provetes PP\_60 destacam-se, enquanto os provetes PP\_A e PP\_40 possuem pouca diferença.

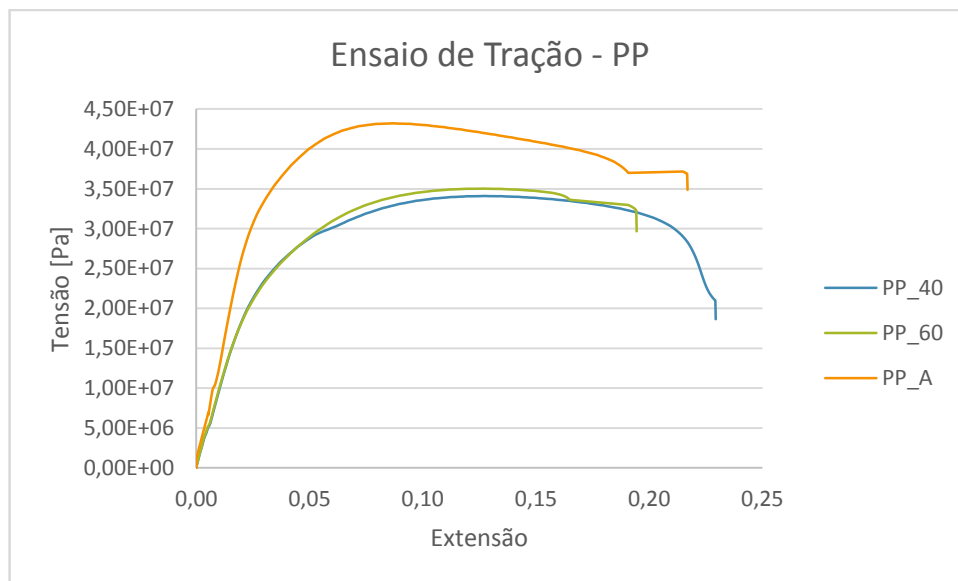


Figura 46. Resultados obtidos para o ensaio de tração do PP.

Na tabela 29 encontram-se representados os principais resultados obtidos no ensaio de tração.

Tabela 29. Resultados obtidos do ensaio de tração do PP.

Provetes	$\sigma_c$ [MPa]	$\sigma_{m\acute{a}x}$ [MPa]	$\epsilon_m$	E [MPa]	$\sigma_r$ [MPa]
PP_A	1,24	43,2	0,22	1779,7	36,9
PP_40	2,61	34,1	0,23	1618,0	21
PP_60	2,76	35	0,19	2489,1	32,3

No ensaio dos provetes de PS obteve-se um comportamento característico de materiais frágeis. Através da análise da figura 47, relacionada com o ensaio de tração do PS, verifica-se que os provetes PS\_60 atingem tensões de rotura superiores, enquanto os provetes PS\_A e PS\_40 têm um comportamento semelhante.

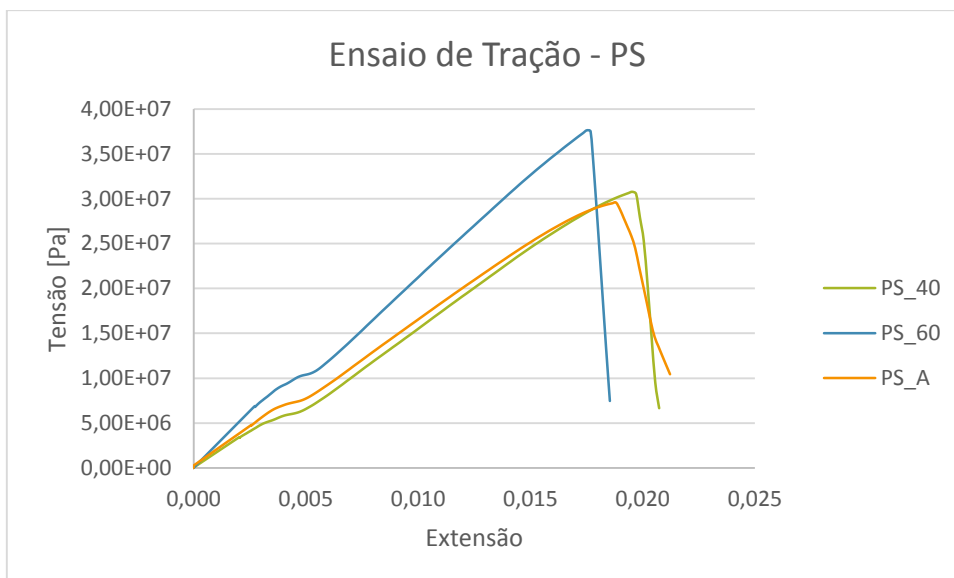


Figura 47. Resultados obtidos para o ensaio de tração do PS.

Na tabela 30 encontram-se os valores obtidos nos ensaios de tração do PS, para cada provete. Apesar dos provetes PS\_40 possuir uma tensão de rotura superior ao provete PS\_A, o seu módulo de elasticidade é ligeiramente inferior.

Tabela 30. Resultados obtidos do ensaio de tração do PS.

	$\sigma_c$ [MPa]	$\sigma_{m\acute{a}x}$ [MPa]	$\epsilon_m$	E [MPa]
<b>PS_A</b>	5,47	29,6	0,0228	1779,7
<b>PS_40</b>	4,32	30,8	0,0314	1618,0
<b>PS_60</b>	7,37	37,6	0,026	2489,1

## 6. Conclusão

---

Neste trabalho foram projetados dois blocos moldantes em resina epóxi carregada com diferentes percentagens de Al, com o intuito de perceber a influência que provocam nos provetes injetados e comparar os resultados obtidos com os mesmos parâmetros dos provetes injetados num molde convencional de aço. Para tal, foi utilizado um molde de aço já existente no laboratório, quer para injetar provetes, quer para servir de estrutura à injeção nos blocos moldantes. Para o fabrico dos blocos moldantes recorreu-se aos processos de fabrico rápido. De modo a realizar-se uma análise comparativa entre os provetes obtidos através dos blocos de resina e do molde de aço, foram realizados diversos ensaios mecânicos.

A utilização de materiais alternativos aos convencionas como ferramenta durante o ciclo de injeção é uma prática cada vez mais comum. Contudo, é um processo complexo, devendo ser feita uma análise profunda. No decorrer deste trabalho foram identificados aspetos fundamentais na escolha de um material e/ou processo para o fabrico de um bloco moldante, já que este influencia a qualidade das peças obtidas por injeção plástica, bem como, o processo produtivo do próprio bloco. Através da comparação dos processos de fabrico de blocos moldantes e dos recursos existentes, o processo selecionado foi a fabricação de blocos moldantes em resina epóxi carregada com diferentes percentagens de Al.

Antes da construção dos blocos foi necessário projetar a chapa metálica que iria alojar os blocos. Para tal, recorreu-se à utilização do desenho 2D do molde existente e ao *software* para a modelação da chapa metálica. Foi iniciado o processo de fabrico dos blocos moldantes, através do vazamento da mistura da resina com as cargas de Al na caixa projetada na chapa metálica e, posteriormente foi maquinada. Com o bloco moldante produzido iniciou-se o processo de injeção plástica, no qual se verificou a influência dos parâmetros de injeção nas peças obtidas.

A caracterização dos provetes foi dividida em três partes: inicialmente foi realizada uma análise dimensional, em seguida uma análise visual e por último uma análise mecânica. Com a análise dimensional concluiu-se que o PS proporciona maior estabilidade

dimensional injetado nos blocos em resina do que no molde de aço; já relativamente aos provetes em PP as conclusões não foram esclarecedoras. Na injeção do PP foram necessárias pressões de compactação maiores, que no caso da injeção nos blocos de resina não seria possível, devido à pouca resistência que o bloco de resina possui. A boa estabilidade obtida no PS deve-se ao facto deste polímero necessitar de elevadas temperaturas durante a injeção. Como os blocos possuíam um sistema de refrigeração menos eficaz do que o sistema de refrigeração do molde de aço, foi possível ter as temperaturas dos blocos de resina mais elevadas do que as do aço, o que levou a que nos provetes obtidos nos blocos de resina possuíssem maior estabilidade dimensional.

Através da análise visual, verificou-se a existência de rebarba nos dois polímeros, apenas quando injetados nos blocos, devendo-se a uma menor pressão de injeção utilizada. Observou-se o efeito de empeno nos provetes de PP injetados nos blocos de resina. O empeno deveu-se às características do próprio polímero, bem como, à diferença de temperaturas entre o laboratório e os blocos moldantes.

Por último, a análise mecânica consistiu na realização de três tipos de ensaios laboratoriais: tração, flexão e DMA. Com os resultados obtidos no ensaio de tração dos provetes de PP verificou-se que os provetes injetados no molde de aço apresentaram um comportamento semelhante aos provetes injetados nos blocos, contudo distanciou-se para cargas superiores. Já nos ensaios realizados no PS, foram os provetes injetados no bloco moldante carregado com 60% de Al que suportaram um carregamento maior.

No que diz respeito ao ensaio de flexão concluiu-se que nos ensaio dos provetes injetados no molde de aço, ambos os polímeros tiveram carregamentos superiores aos provetes injetados nos blocos em resina, e no caso dos provetes em PP apresentaram um maior deslocamento.

Em relação aos ensaios de DMA, estes foram realizados a diferentes temperaturas, 23°C e 70°C, identificando-se o mesmo comportamento dos ensaios anteriores: os provetes injetados no molde de aço suportam cargas superiores. Nos ensaios de DMA a 23°C e 70°C, no caso do PS observou-se um distanciamento dos provetes injetados no bloco de resina carregado com 40% de Al, obtendo maior deslocamento. É de salientar, que nos ensaios de DMA, nas duas temperaturas, os provetes de PP injetados nos blocos de resina

têm comportamentos próximos, enquanto, que no caso do PS, se verifica um distanciamento entre ambos.

De forma geral, com este projeto conclui-se que o processo de fabrico alternativo abordado, vazamento de resina epóxi carregada com Al, é uma alternativa aos processos convencionais, para pequenas séries de protótipos. Devido à falta de propriedades transmitidas para as peças injetadas não é um processo adequado para uma indústria que prima pela exigência e rigor. Desta forma, a utilização dos processos alternativos tem de ser analisada de maneira a responder aos critérios pretendidos na peça final.

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

## 7. Trabalhos futuros

---

Durante a elaboração deste projeto encontraram-se e identificaram-se algumas limitações e oportunidades que poderão ser estudadas em trabalhos futuros, tais como:

- Devido às características mecânicas encontradas nos provetes injetadas no molde híbrido, serem inferiores aos valores obtidos nos provetes injetados no molde convencional, torna-se interessante o estudo de outras tecnologias de fabrico de blocos moldantes, de modo a perceber se existe alguma tecnologia que proporcione maior proximidade com o molde convencional, em termos de valores obtidos nos ensaios.
- Como cada polímero possui características próprias, a injeção de outras matérias plásticas poderia ser abordada, de modo a perceber se o comportamento obtido dos provetes injetado no molde híbrido se mantinha.
- Com a realização de mais ensaios laboratoriais diferentes, por exemplo, densidade, dureza, compressão, entre outros, permitiria uma análise mais minuciosa dos provetes injetados, quer no molde híbrido, quer no molde convencional.
- A utilização de outro tipo de cargas de reforço na resina possibilita estudar a influência do tipo de carga na injeção plástica.

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

# Bibliografia

---

- 1 Casagrande, M. *Projeto de um cabeçote de extrusão de uma máquina de prototipagem rápida FDM*, Projeto de graduação para a obtenção do título de Engenheiro. Brasil, 2013.
- 2 Pereira, A. *Desenvolvimento de novos produtos em vidro utilizando tecnologias de prototipagem rápida*, Dissertação para a obtenção de grau Mestre. Porto, 2006.
- 3 Domingues, L, Correia, D. *Moldes de silicone*. Portugal, 2012.
- 4 Gorni, A. *Introdução à prototipagem rápida e seus processos*, Revista Plástico Industrial. Brasil, 2001.
- 5 Leite, W., Cruz, I., Resende, K., Rubio, J., *Prototipagem rápida por deposição de material fundido - uma aplicação acadêmica*. Brasil, 2011.
- 6 Foggiatto, J., *Utilização do processo de modelagem por fusão e deposição (FDM) na fabricação rápida de insertos para a injeção de termoplásticos*, Tese para obtenção de grau de Doutor. Florianópolis, 2005.
- 7 Levy, G., Schindel, R., *Rapid manufacturing and rapid tooling with layer manufacturing (LM) technologies, state of art and future perspectives*. Bélgica.
- 8 Vasconcelos, P., *Fabrico rápido indireto de ferramentas compósitas a partir de modelos de prototipagem rápida*, Dissertação para obtenção do grau de Doutor. Porto, 2004.
- 9 Badotti, A., *Avaliação do processo de metalização superficial aplicado a peças obtidas por estereolitografia*, Dissertação para obtenção de grau de Mestre. Florianópolis, 2003.
- 10 Hotza, D., *Prototipagem rápida de pilhas a combustível de óxido sólido*, Artigo da revista Matéria v. 14, n. 4, pp. 1101 – 1113. Florianópolis, 2009.
- 11 Jesus, M., *Desenvolvimento de um compósito à polímero-metal à base de resina épxi para aplicações em moldes rápidos*, Dissertação para a obtenção do grau de Mestre. Florianópolis, 2005.
- 12 Bertol, L., *Contribuição ao estudo da prototipagem rápida, digitalização tridimensional e seleção de materiais no design de implantes personalizados*, Dissertação para a obtenção do grau de Mestre. Porto Alegre, 2008.
- 13 <http://blogs.solidworks.com/solidworksbrasil/2012/10/usando-solidworks-plasticos-para-planejar-o-seu-molde.html>

Acedido a 15 de Março de 2014

- 14** Aliakbari, M., *Additive Manufacturing: State-of-the-art, capabilities, and sample applications with cost analysis*, Master of science thesis, production engineering and management, department of industrial production. 2012.
- 15** Gonçalves, A., *Bloco moldante em SLS-Metal*, Projeto de Licenciatura em Engenharia. Porto, 2002.
- 16** Netto, A., *Desenvolvimento de compósito de resina epóxi e fibras curtas de aço para fabricação rápida de moldes para injeção de termoplástico*, Tese para obtenção de grau de Doutor. Florianópolis, 2008.
- 17** Uzunović, N. *Applications of rapid tooling techniques for injection moulding*, University of Sarajevo, Bosnia and Herzegovina.
- 18** Chuan, C., Hong, K., *Rapid tooling technology. Part 1. A comparative study*, Artigo de jornal Adv. Manuf. Technol. (1999) 15:604–608. London, 1999.
- 19** [https://www.efunda.com/processes/rapid\\_prototyping/rt.cfm](https://www.efunda.com/processes/rapid_prototyping/rt.cfm)  
Acedido a 20 de Fevereiro de 2014
- 20** Silva, G., *Prototipagem rápida e ferramental rápido aplicados às peças utilizadas em ensaios estáticos de embalagens para acondicionamento e transporte de peças automotivas*, Projeto para a obtenção do grau de Mestre. São Paulo, 2008.
- 21** Cruz, N. M. P., *Implementação de ferramentas lean manufacturing no processo de injeção de plástico*, Tese para a obtenção do grau de Mestre. Universidade do Minho, 2013.
- 22** [www.sandretto.com.br](http://www.sandretto.com.br)  
Acedido a 24 de Março de 2014
- 23** Silva, F. M. P., *Adaptação das ferramentas moldantes a sistemas de microinjeção*, Dissertação para a obtenção do grau de Mestre. Universidade de Aveiro, 2009.
- 24** Francisco, A. S., *Optimização do ciclo pelo processo de moldação por injeção convencional*, Monografia para a obtenção do título de tecnólogo em produção, Faculdade de Tecnologia da Zona Leste. São Paulo, 2009.
- 25** Corazza, E., *Influência do tratamento de nitretação em bloco de aço P20 de moldes de injeção de termoplásticos*, Dissertação para a obtenção do título de Mestre. Joinville. 2012.
- 26** Paulo, V. J. P. S., *Determinação das forças de extração em moldes de injeção de termoplásticos*, Dissertação para obtenção do grau de Mestre, Universidade de Aveiro, 2010.

- 27 Francisco, A. S. *Otimização do ciclo pelo processo de moldagem por injeção convencional*, Monografia para a obtenção do título de Tecnólogo em produção com ênfase em plásticos, Faculdade de Tecnologia da Zona Leste. São Paulo, 2009.
- 28 Gonçalves, N. V. P., *Ferramentas moldantes para a obtenção de sistemas bi-material*, Tese para a obtenção do grau de Mestre. Universidade de Aveiro, 2012.
- 29 Baretta, D. R., *Estudo comparativo e experimental de materiais aplicados a insertos machos de moldes de injeção dentro do conceito de molde híbrido*, Dissertação para obtenção do grau de Mestre. Caxias do Sul, 2007.
- 30 Domingues, R. U., *Especificação técnica para orçamento, projeto e construção de moldes de injeção de termoplásticos*, Projeto para a obtenção do título de tecnólogo de polímeros. Sorocaba, 2012.
- 31 Amorim, J. R., *Sistemática para fresamento e montagem de posições em insertos poliméricos para moldes-protótipo*, Dissertação para a obtenção do grau de Mestre. Curitiba, 2006.
- 32 Gomes, N. M. D., *A indústria portuguesa de moldes para plásticos: história, património e sua musealização*, Dissertação. Coimbra, 2005.
- 33 Pousa, C. A. P., *Desenvolvimento de modelos simplificados de análise do ciclo de vida de moldes de injeção de plástico*, Dissertação para obtenção do grau de Mestre. Universidade Técnica de Lisboa, 2008.
- 34 Júnior, C. A. T., *Avaliação comparativa das propriedades mecânicas morfológicas e de empenamento de peças injetadas em inseto de aço AISI P-20 e poliuretano ren shape 5166 para fabricação de moldes*, Dissertação para obtenção do grau de Mestre. Joinville, 2011.
- 35 <http://www.ramada.pt/index.php?cat=42&eb=13>  
Acedido a 4 de Abril de 2014
- 36 Soares, J., Bruno, J., *Efeito dos elementos de liga*. Apresentação em PowerPoint, Universidade de Pernambuco – Escola Politécnica de Pernambuco.
- 37 Queirós, L. M. P., *Projeto de moldes híbridos com auxílio de técnicas assistidas por computador*, Tese para a obtenção do grau de Meste. Universidade do Minho, 2005.
- 38 Martinho, P. M. G., *Mechanical design of hybrid moulds - mechanical and thermal performance implications*, Tese para obtenção do grau de Doutor. Universidade do Minho, 2010.
- 39 Baretta, D., Zattera, A., Pouzada, A., *Influência de materiais alternativos nas propriedades de peças tubulares no contexto de moldes protótipos de injeção*, Revista Tecnologia em Metalurgia e Materiais, v.4, n.3, p. 37-42, jan.-mar. São Paulo, 2008.

**40** Aviz, A., Guerra, C., Guerra, T., *Construção de protótipos por adição e remoção de material comparativo entre deposição*, Revista 4E-Tech: Tecnologias para Competitividade Industrial, n. esp. Metalmecânica, p. 14-36. Florianópolis, 2012.

**41** <http://www.gorni.eng.br/protrap.html>

Acedido a 3 de Março de 2014

**42** Alves, B. M. M., *Desenvolvimento do processo de fabrico de ferramentas de fundição elastoméricas para o processo de moldação em gesso*, Dissertação para a obtenção do grau de Mestre. Universidade do Porto.

**43** Iwakami, M. C. B., *Design cerâmico e prototipagem rápida: novas possibilidades para o arranjo produtivo local de louças de Campo Largo – PR*, Dissertação para a obtenção do grau de Mestre. Curitiba, 2012.

**44** Guimarães, D. J. B. A., *Blocos Moldantes Produzidas por Estereolitografia*, Tese para a obtenção do grau de Mestre. Universidade do Minho, 2006.

**45** <http://www.moldesinjecaoplasticos.com.br/selecaoacos.asp>

Acedido a 3 de Março de 2014

**46** Baretta, D., Costa, C., Zatera, A., Pouzada, A., *A influência de diferentes materiais aplicados em blocos de ferramental rápido: efeito nas propriedades mecânicas de peças tubulares injetadas*, 8º congresso iberoamericano de engenharia mecânica. Cusco, 2007.

**47** Lino, J. F., Neto, R. J., *Prototipagem rápida na indústria nacional*.

**48** Junior, A. S., *Análise comparativa entre os processos de prototipagem rápida na concepção de novos produtos: um estudo de caso para determinação do processo mais indicado*, Dissertação para obtenção do grau de Mestre. Curitiba, 2008.

**49** *Estudo da cura e do comportamento reológico de sistemas poliméricos altamente reforçados em estereolitografia*

**50** Cunico, M. W. M., *Estudo de viabilidade de tecnologia de prototipagem rápida baseada em materiais fotopoliméricos extrudados*, Dissertação para a obtenção do grau de Mestre. Curitiba, 2008.

**51** <http://www.stratasys.com/br>

Acedido a 4 de Abril de 2014

**52** <http://www.3dsystems.ru/index.htm>

Acedido a 28 de Abril de 2014

**53** Noritomi, P., Maiat, I., Silva, J., Oliveira, M., Pereira, L., *Considerações sobre o uso da prototipagem rápida metálica na fabricação direta de implantes femorais personalizados*, 4º Congresso Latino-americano de órgãos artificiais e Bimateriais. Brasil, 2006.

**54** <http://www.optomec.com/>

Acedido a 15 de Fevereiro de 2014

**55** <http://www.exone.com/>

Acedido a 15 de Fevereiro de 2014

**56** Nascimento, A. A., *Tendências tecnológicas em prototipagem rápida e manufatura aditiva*, Projeto para a obtenção do grau de Engenheiro. Rio de Janeiro, 2013.

**57** <http://www.eos.info/en>

Acedido a 20 de Maio de 2014

**58** Esperto, L., Osório, A., *Rapid tooling: sinterização direta por laser de metais*, Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões, Vol 15, Pg 117-11. Lisboa, 2008.

**59** <http://dmlstechnology.com/>

Acedido a 20 de Maio de 2014

**60** <http://www.dem.estg.ipleiria.pt/hibridmolde/html/desenvolvimentos.html>

Acedido a 15 de Fevereiro de 2014

**61** Galvão, L., *A influência do processo de cura nas propriedades do compósito estrutural carbono/epóxi fabricado via vartm: processamento e caracterização*, Dissertação para obtenção do grau de Mestre, Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá, 2012.

**62** Engenharia e Ciência dos Materiais II - SMM 0194 - *Ensaio Mecânicos em Materiais Poliméricos*, Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos departamento de engenharia de materiais, 2º semestre, 2012.

**63** Projecto No: LIFE08 ENV/UK/000205, *Melhores Técnicas e Métodos de Ensaio Disponíveis*, Reach for polymers.

**64** Baúto, M. J. C., *Estudo comparativo do comportamento mecânico de materiais compósitos à base de polímeros líquido-cristalinos*, Tese para a obtenção do grau de Mestre. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2010.

**65** *Caderno Laboratorial da Unidade Curricular de Biomateriais*, Licenciatura de Biomecânica, 2009-2010.

**66** ASTM Standards D638.

**67** Ramos, A. S., *Ensaio de flexão*, Apresentação em PowerPoint, Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Departamento de Materiais e Tecnologia. Maio, 2010.

**68** ASTM Standards D790.

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

# Anexos

---

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

## Anexo I – Desenho do molde de aço

---

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

## Anexo II – Desenho da chapa da bucha

---

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

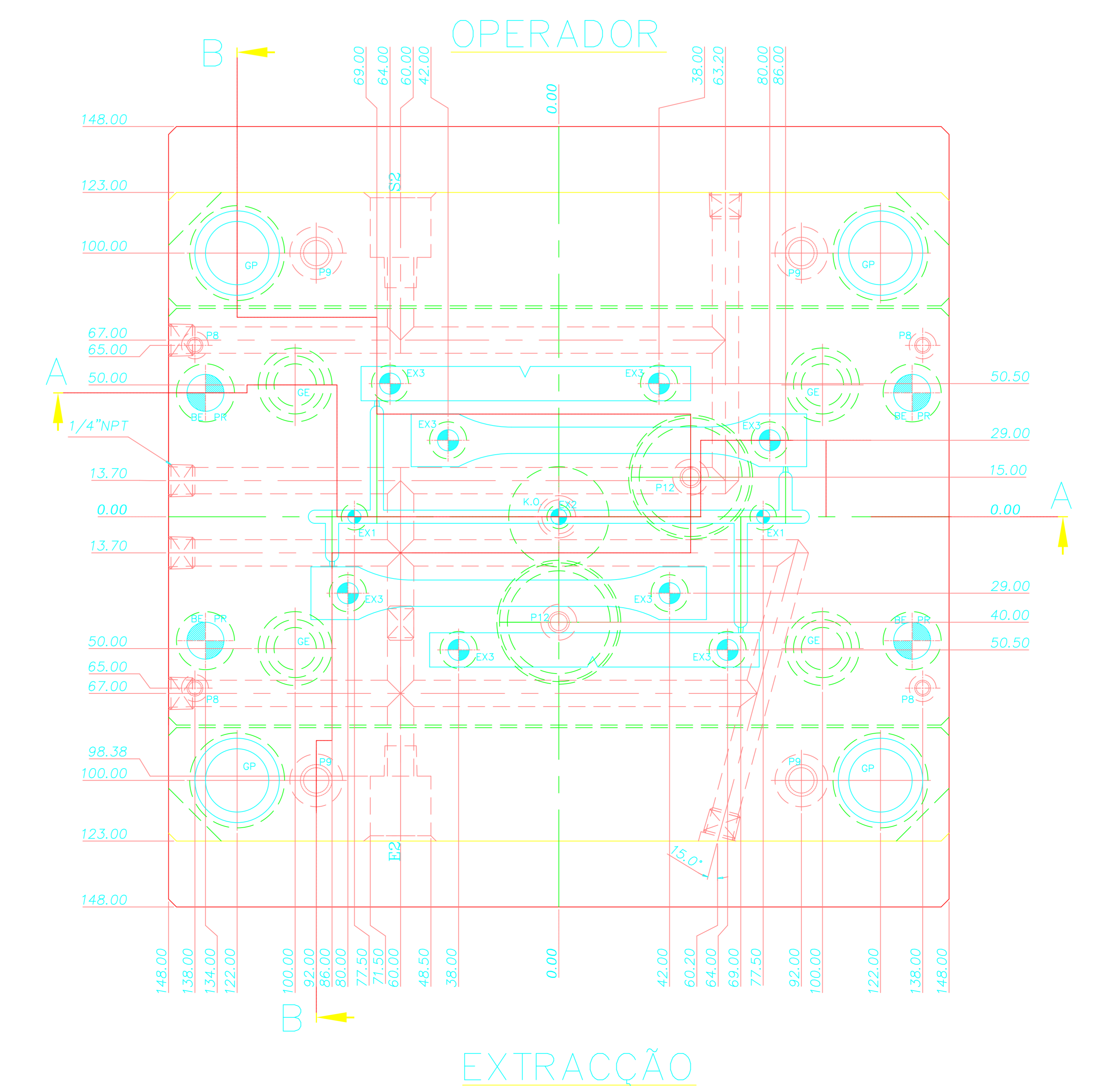
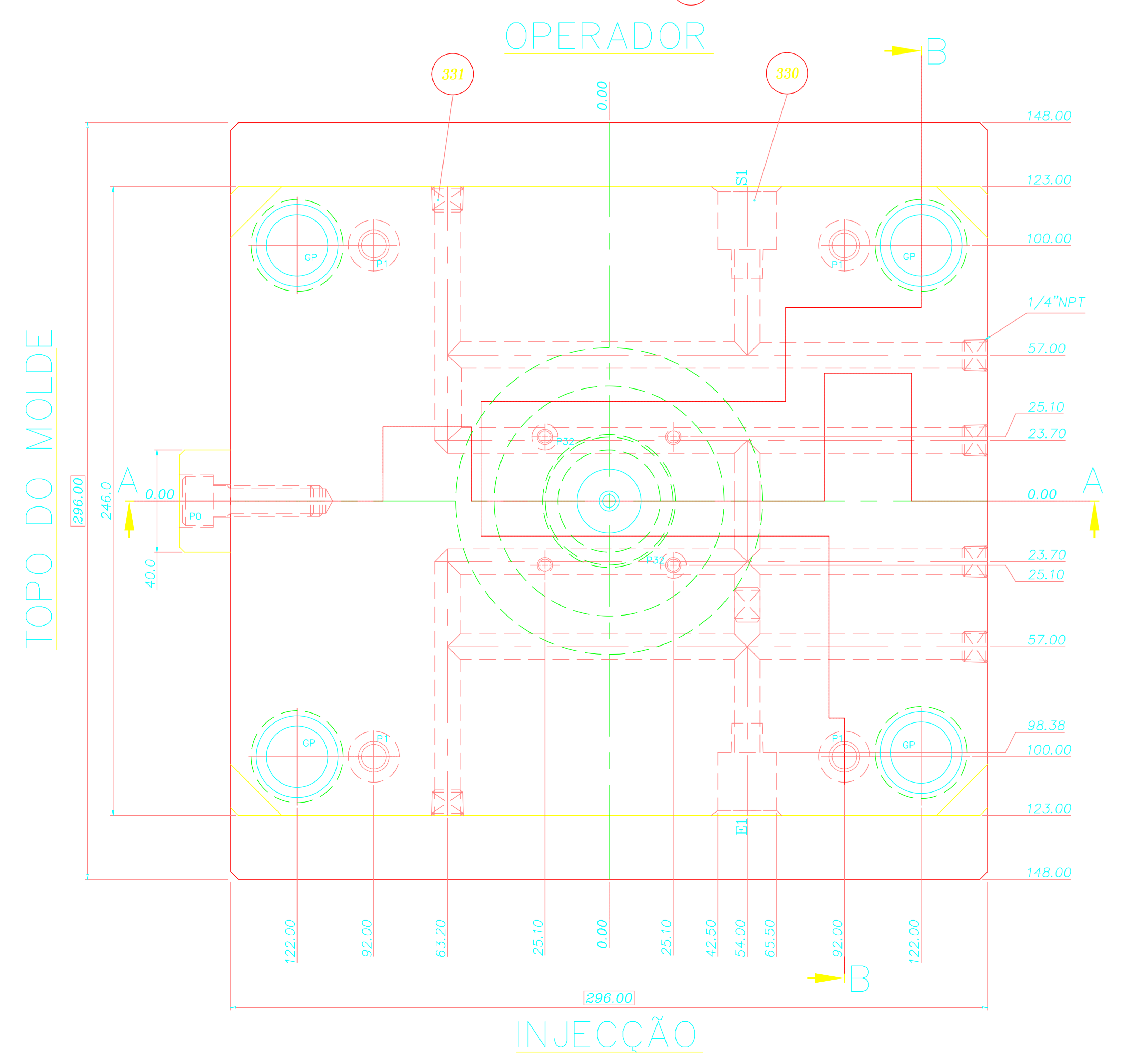
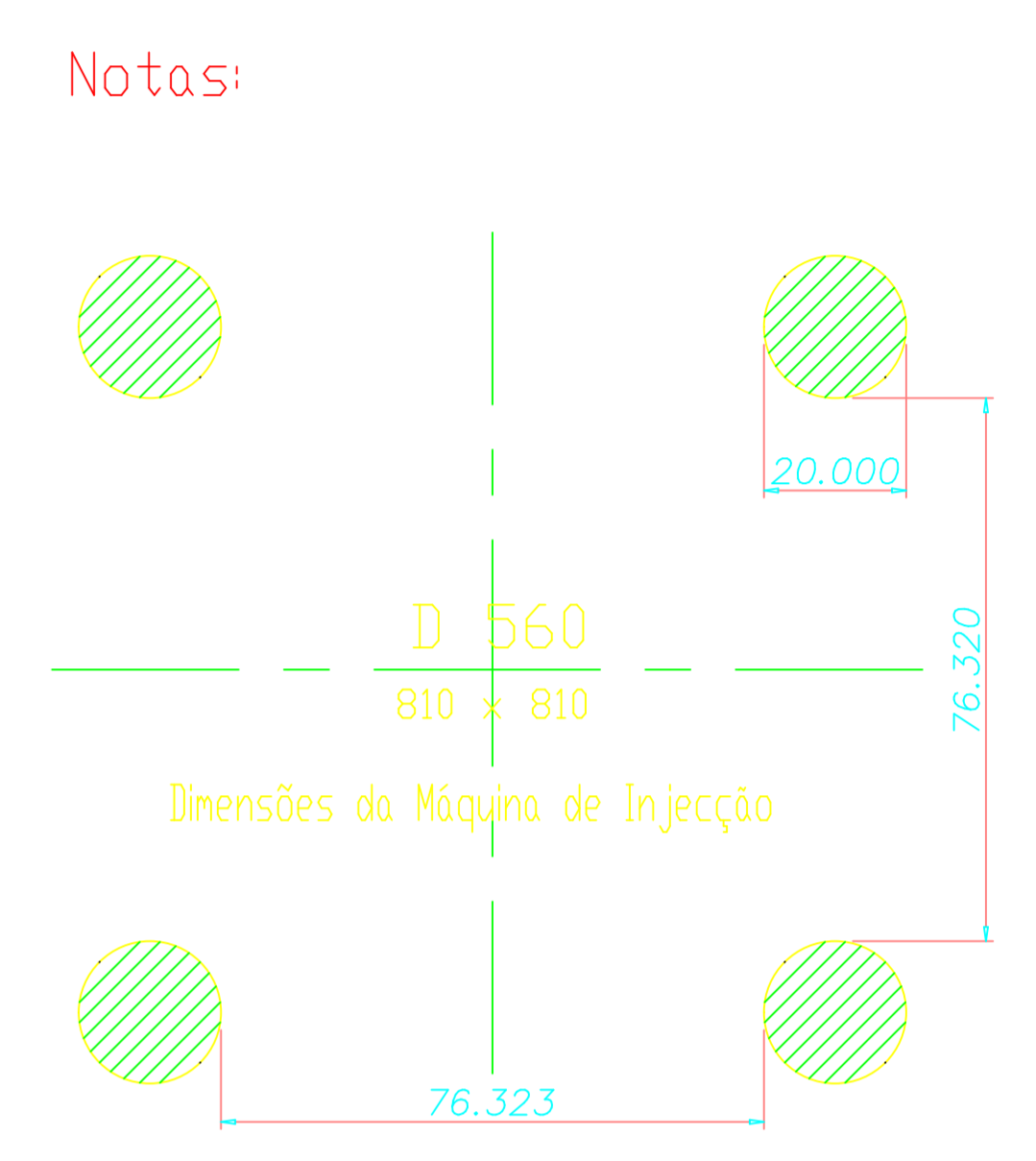
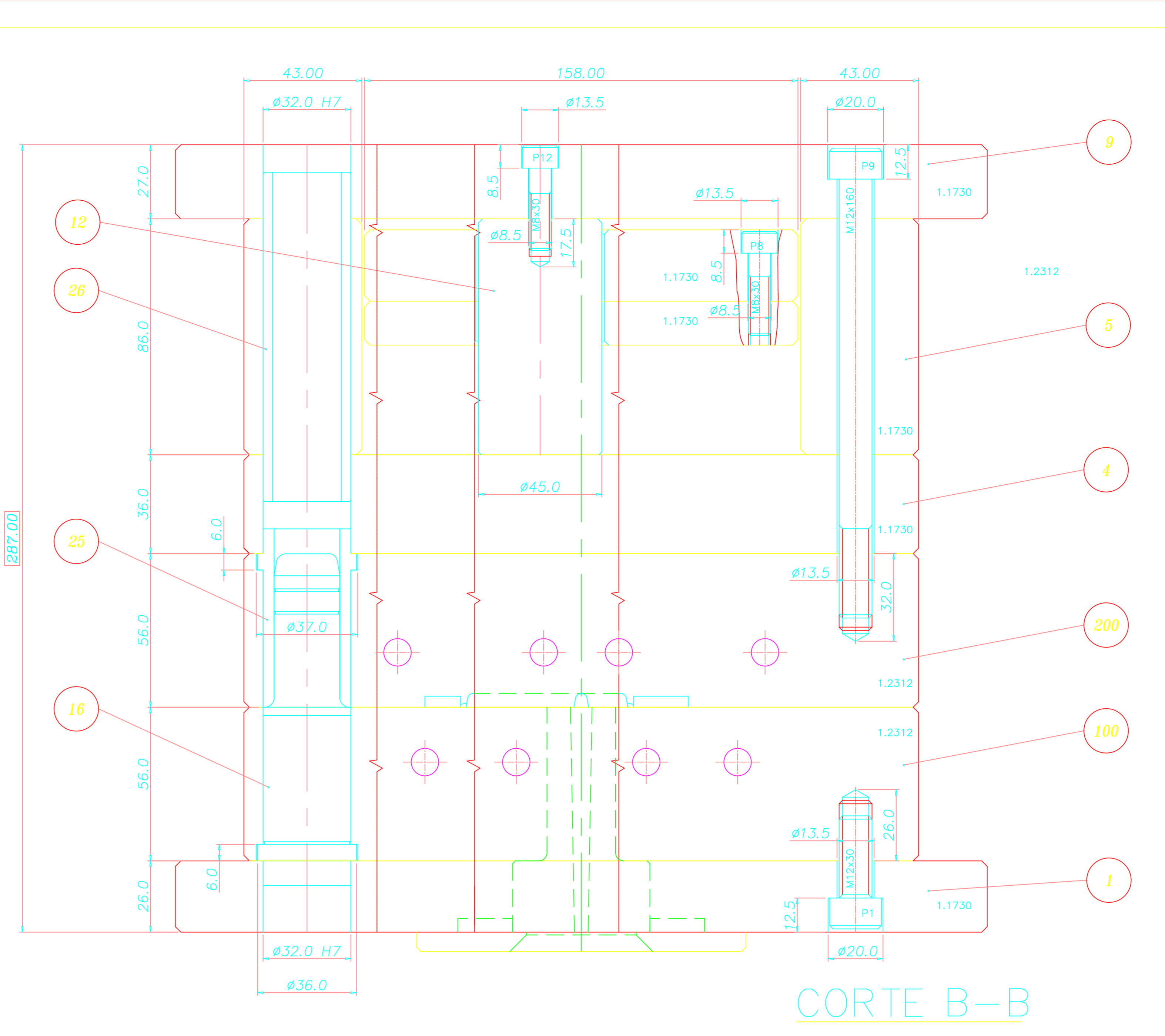
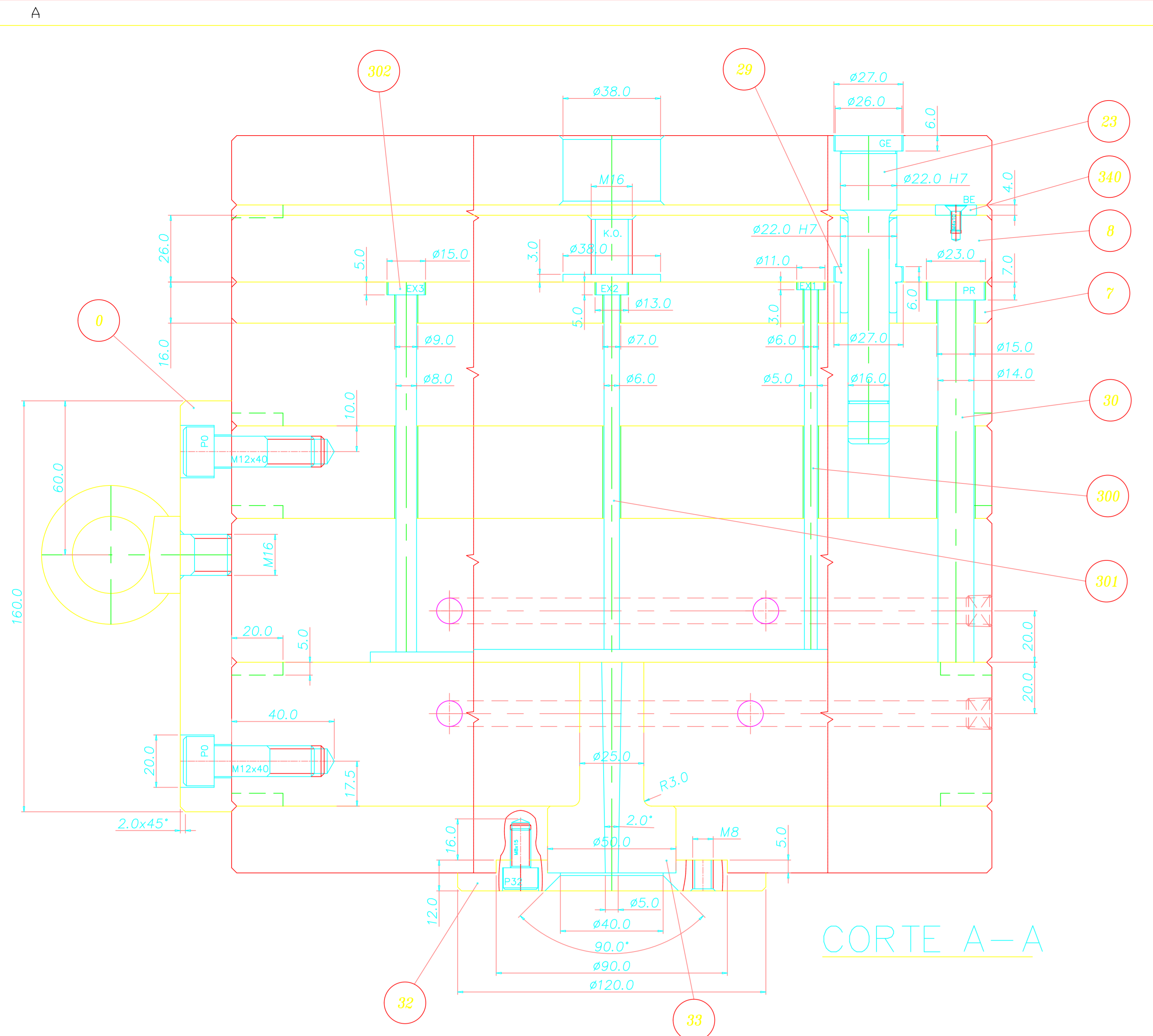
## Anexo III – Ficha técnica da resina

---

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

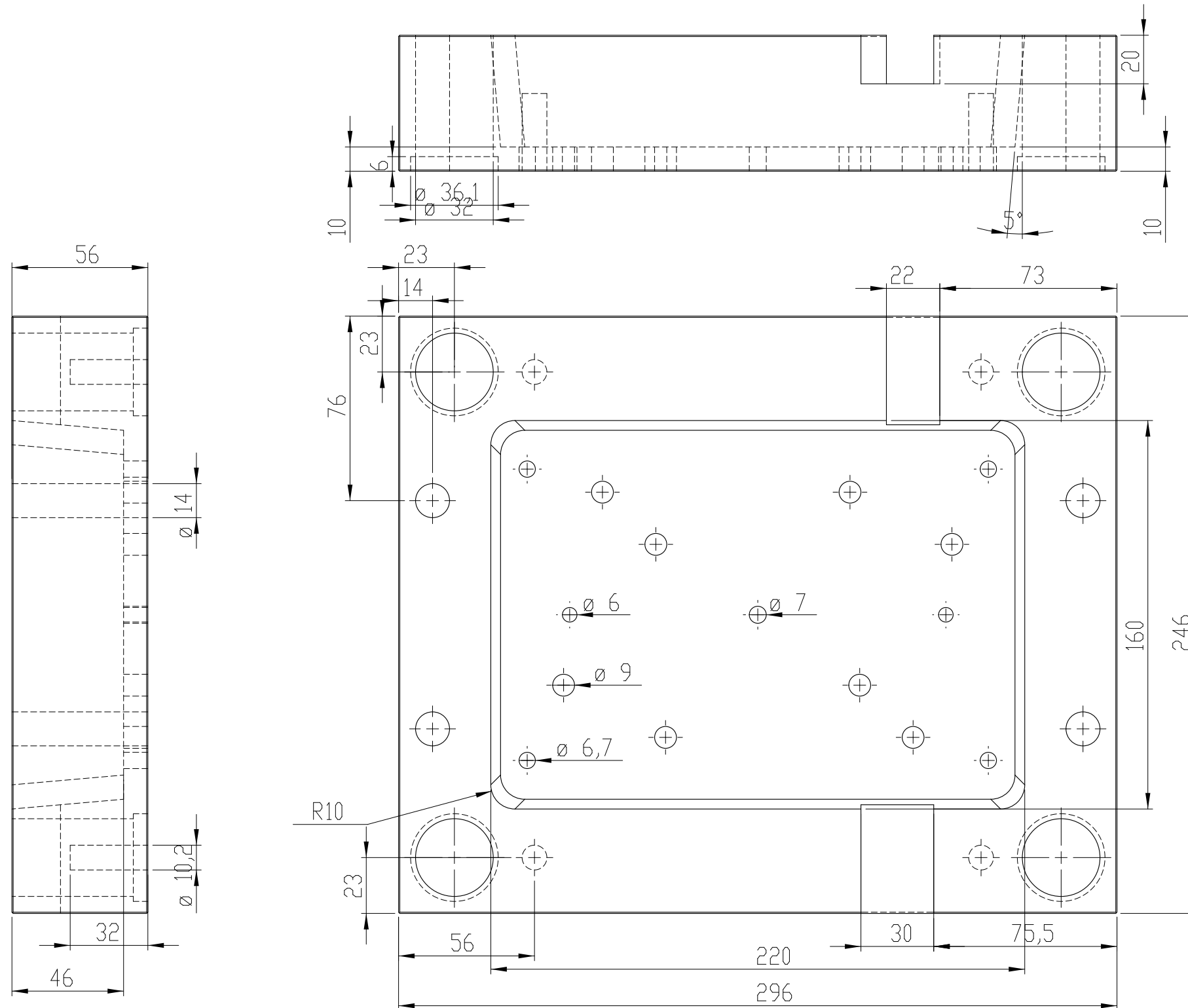
## Anexo IV – Desenho do bloco moldante

---



Qtd	Designação	Quant	Dimensões / Referência	Material	Traçat	Dureza	Obs/Tr
4	PARAF. CAB. CILINDRICA	4	M4x10				
2	PARAF. CAB. CILINDRICA	2	M8x15				
2	PARAF. CAB. CILINDRICA	2	M8x30				
4	PARAF. CAB. CILINDRICA	4	M12x160				
4	PARAF. CAB. CILINDRICA	4	M8x30				
4	PARAF. CAB. CILINDRICA	4	M8x15				
2	PARAF. CAB. CILINDRICA	2	M12x40				
4	BOTO DE ENGOSTO	4	SB 2	DME			
12	FRANCO	12	1/4"NPT	BABOURIN			
4	RECORDOS	4	SP-352	STAUBLI			
8	EXTRACT. CAB. CILINDRICA	8	604-8x160	BABOURIN			
1	EXTRACT. CAB. CILINDRICA	1	604-6x160	BABOURIN			
2	EXTRACT. CAB. CILINDRICA	2	604-5x160	BABOURIN			
1	INJECTOR	1	AG-26-5-0	DME			
1	ANEL DE CENTRAGEM	1	R 121	DME			
4	PERNO RETORNO	4	604-14x160	BABOURIN			
4	CASO. CIL. EXTRACTORAS	4	1081-16x12x20	BABOURIN			
4	CASQUILHO	4	10-32-120	DME			
4	CASQUILHO PRINCIPAL	4	FBC-24-56	DME			
4	SUA CHAPAS EXTRACTORAS	4	651-16x10x32	BABOURIN			
4	SUA PRINCIPAL	4	F5C-24-56-56	DME			
2	SUPORTES	2	845.0x86.0				1.1730
1	CHAPA APERTO EXTRACT.	1	296.0x296.0x27.0				1.1730
1	CHAPA APERTO EXTRACT.	1	296.0x158.0x16.0				1.1730
1	CHAPA APERTO EXTRACT.	1	296.0x158.0x16.0				1.1730
2	CHAPA REFORCO BUCHA	2	296.0x80.0x43.0				1.1730
1	CHAPA REFORCO BUCHA	1	296.0x246.0x36.0				1.1730
1	CHAPA DA BUCHA	1	296.0x246.0x56.0				1.2312
1	CHAPA DA CAVIDADE	1	296.0x246.0x56.0				1.2312
1	CHAPA APERTO INJECCAO	1	296.0x296.0x26.0				1.1730
1	CHAPA DE TRANSCORTE	1	160.0x40.0x20.0				1.1730

No. DESIGNAÇÃO QUANT. DIMENSÕES / REFERÊNCIA MATERIAL TRAÇAT DUREZA OBSERV.  
 FOLHA DE REVISÕES  
 ESCOLA SUPERIOR TECNOLOGIA GESTÃO Molde No. 01/001  
 Fabricante P.T.P. Cliente I.P. LEIRIA No Molde Cliente No Desenho Cliente  
 Material PP Contracção 0,6% Máquina Injecção LIEN YU Força 80 TON.  
 Tolerância Dec. # 21 Descrição PROJETES  
 Escala 1:1  
 Folha 1 de 1



ESCOLA SUPERIOR TECNOLOGIA GESTÃO DE LEIRIA

Projeto de Mestrado

Análise comparativa do uso de tecnologias de fabrico rápido no processo produtivo de elementos moldantes para moldes de injeção de plásticos

Liliana Cristina Ferreira Domingues

Tolerancia  
Dec.  $\pm .01$   
Ang.  $\pm 2^\circ$   
Unidades  
mm

Descricao

Chapa da Bucha

Escala: 1:2

Folha 1 de 1

# 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

	in parts by weight	
Mixing ratio resin to hardener		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.

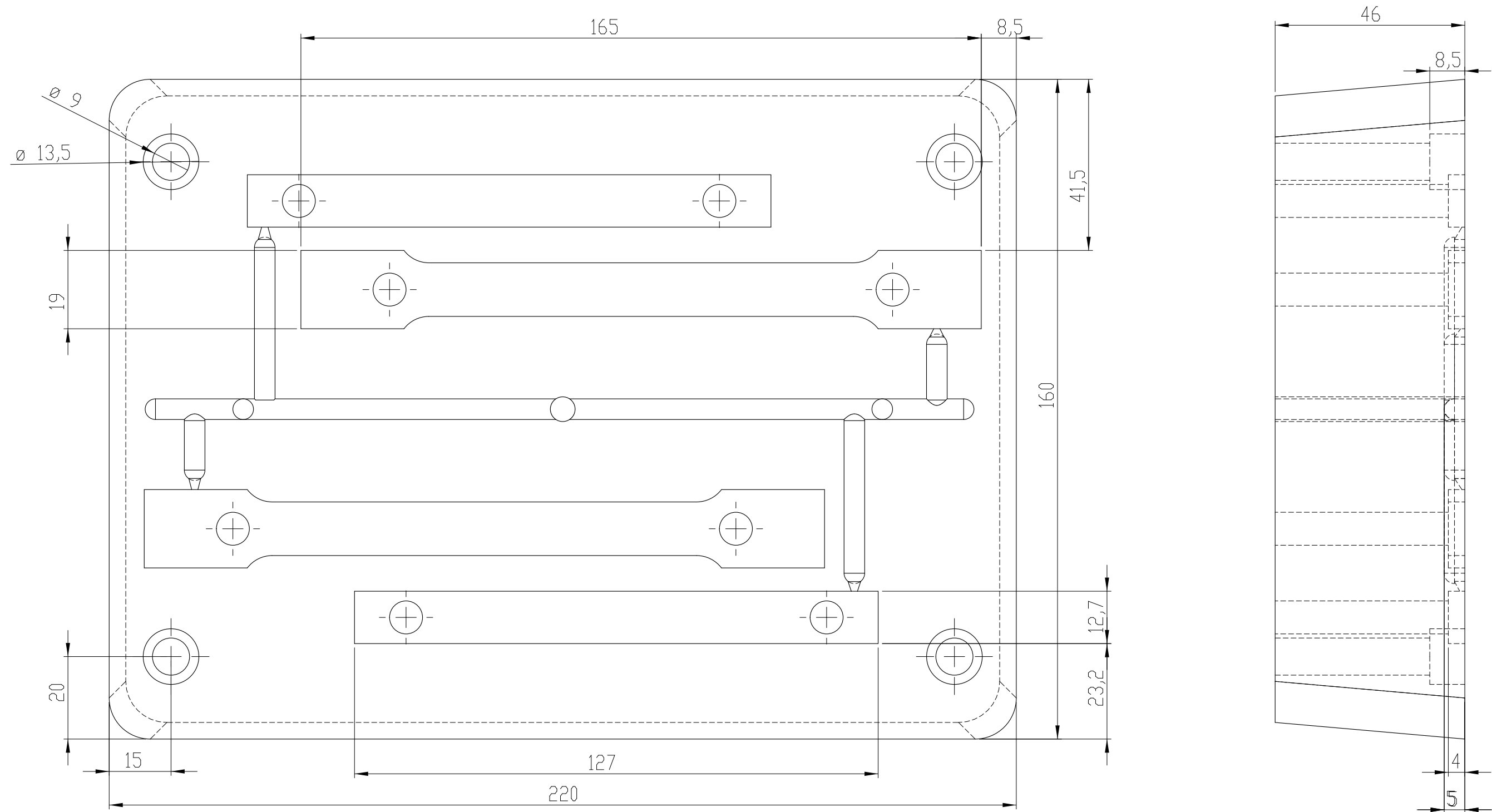
### Packaging

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)





ESCOLA SUPERIOR TECNOLOGIA GESTÃO DE LEIRIA

Projeto de Mestrado

Análise comparativa do uso de tecnologias de fabrico rápido no processo produtivo de elementos moldantes para moldes de injeção de plásticos

Liliana Cristina Ferreira Domingues

Tolerancia Dec. $\pm .01$ Ang. $\pm 2^\circ$ Unidades mm	Descricao	Escala: 1:1
	Provetes da Cavidade em Resina	Folha 1 de 1