



HUGO GAMEIRO
FERREIRA

**DESENVOLVIMENTO DE
FERRAMENTAS POR IMPRESSÃO
3D PARA ESTAMPAGEM DE PEÇAS
EM CHAPA DE ALUMÍNIO**

Relatório de projeto do Mestrado em Engenharia
de Produção

**Doutoramento, Ricardo António Lamberto
Duarte Cláudio**

Dezembro 2021

HUGO GAMEIRO
FERREIRA

**DESENVOLVIMENTO DE
FERRAMENTAS POR IMPRESSÃO
3D PARA ESTAMPAGEM DE PEÇAS
EM CHAPA DE ALUMÍNIO**

JÚRI

Presidente: Doutor, Pedro Filipe do Carmo Cunha,
Instituto Politécnico de Setúbal

Orientador: Doutor, Ricardo António Lamberto
Duarte Cláudio, Instituto Politécnico de Setúbal

Arguente: Doutor, José Filipe Castanheira Pereira
Antunes Simões, Instituto Politécnico de Setúbal

Dezembro 2021

Resumo

A impressão 3D é um método de produção promissor para a indústria que consiste no fabrico de produtos por adição de material, ao contrário das técnicas tradicionais que são em geral subtrativas. A impressão 3D tem como aplicação principal a prototipagem rápida e a produção de peças funcionais em geral, destacando para a indústria aeroespacial, aeronáutica, automóvel e aplicações médicas.

O presente trabalho inicia-se com uma revisão bibliográfica sobre o modo como o fabrico aditivo se relaciona com os métodos convencionais, os materiais aplicados e as tecnologias já existentes na indústria. É apresentada uma metodologia para a calibração de impressoras e são aferidas duas impressoras de forma a avaliar os limites operacionais destas. É produzida uma ferramenta de estampagem, por impressão 3D, usando-se materiais poliméricos para estampar chapa de alumínio pelo processo de *rubber pad forming*, tendo sido utilizada na produção de uma série de 20 peças. A ferramenta foi sendo sucessivamente avaliada de forma a detetar-se desgaste ou eventuais pontos de falha durante a produção. Por fim fez-se um estudo de viabilidade económica para a produção de ferramentas poliméricas, tendo em conta vários materiais com potencial de utilização e a dimensão global da ferramenta.

A calibração e o aumento da precisão das impressoras resultaram no ajuste do perfil de impressão associado a cada impressora, podendo reduzir consideravelmente as tolerâncias. Dos ensaios de estampagem realizados com uma ferramenta impressa a 3D, concluiu-se que pelo menos ao fim de 20 ciclos que a deformação era muito baixa, perfeitamente dentro dos limites aceitáveis para este tipo de aplicação.

O estudo da viabilidade económica permitiu concluir que a implementação da impressão 3D no processo produtivo das ferramentas é uma alternativa muito vantajosa, comparativamente com processos tradicionais, tanto na redução da complexidade do processo de fabrico como em termos de tempo de produção, não comprometendo a qualidade das peças produzidas. Em termos de custos, depende do material utilizado e da dimensão da ferramenta.

Palavras-chave: Impressão 3D, Precisão Dimensional, *Rubber Pad Forming*, Viabilidade Económica.

Abstract

3D printing is a promising production method for industry that consists of manufacturing products by adding material, as opposed to traditional techniques that are generally subtractive. 3D printing has as main application the rapid prototyping and the production of functional parts in general, highlighting for the aerospace industry, aeronautics, automotive and medical applications.

The present work begins with a literature review on how additive manufacturing relates to conventional methods, the materials applied, and the technologies already existing in the industry. A methodology for calibrating printers is presented and two printers are calibrated in order to evaluate their operational limits. A 3D printed stamping tool is produced using polymeric materials to stamp aluminum plates using the rubber pad forming process and was used in the production of a series of 20 parts. The tool was successively evaluated to detect wear or possible failure points during production. Finally, an economic feasibility study was done to produce polymeric tools, considering several potential materials and the overall size of the tool.

The calibration and the increase in precision of the printers resulted in the adjustment of the printing profile associated with each printer, being able to considerably reduced tolerances. From the stamping tests performed with a 3D printed tool, it was concluded that at least after 20 cycles the deformation was very low, perfectly within acceptable limits for this type of application.

The economic feasibility study concluded that the implementation of 3D printing in the tool production process is a very advantageous alternative, compared to traditional processes, both in reducing the complexity of the manufacturing process and in terms of production time, without compromising the quality of the parts produced. In terms of costs, it depends on the material used and the size of the tool.

Keywords: 3D Printing, Dimensional Accuracy, Rubber Pad Forming and Economic Viability.

Índice

Resumo.....	i
Abstract.....	ii
Lista de Figuras.....	v
Lista de Tabelas.....	viii
Lista de Siglas e Acrónimos.....	ix
Capítulo 1.....	1
Introdução.....	1
1.1. Introdução ao projeto.....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Estrutura do relatório.....	3
Capítulo 2.....	4
Revisão bibliográfica.....	4
2.1. Tecnologias de impressão 3D.....	4
2.2. Materiais aplicados à impressão 3D pelo método FFF.....	6
2.3. Processos de Rapid Tooling (RT) e Rapid Prototyping (RP).....	20
2.4. Materiais para impressão pelo método FFF adequados para tooling.....	22
2.5. Precisões dimensionais e geométricas.....	28
2.6. Comparação - Impressão 3D vs. Maquinação Convencional.....	34
2.7. Requisitos para Impressão 3D.....	41
Capítulo 3.....	43
Projeto de ferramentas por impressão 3D.....	43
3.1. Preparação da impressora DeltaIPS para impressão de ferramentas.....	43
3.1.1. Caso de estudo, impressora DeltaIPS.....	43
3.1.2. Calibração da impressora e aumento de precisão melhorando a montagem da impressora.....	45
3.1.3. Precisões dimensionais medidas.....	48
3.2. Produção de ferramentas para estampagem por prototipagem rápida.....	49

3.2.1. Processo de fabrico convencional vs. impressão 3D	49
3.2.2. Desenvolvimento e teste de uma ferramenta de estampagem por rubber pad forming	52
3.2.2.1. Processo de rubber pad forming em aeronáutica	52
3.2.2.2. Ferramenta desenvolvida	53
3.2.2.3. Procedimento para ensaios de estampagem e controlo dimensional	54
3.2.2.4. Resultados	56
3.2.2.5. Análise	56
3.2.2.6. Conclusões	59
3.2.3. Considerações sobre o projeto de ferramentas por impressão 3D	60
Capítulo 4.....	64
Estudo da viabilidade de produção de ferramentas por impressão 3D	64
4.1. Resistência à compressão e ao desgaste	64
4.2. Tolerâncias dimensionais e geométricas.....	64
4.3. Viabilidade económica do processo de impressão 3D vs. processo convencional ..	65
4.3.1. Recolha e tratamento de informação.....	65
4.3.2. Descrição dos benefícios e das limitações.....	65
4.3.3. Considerações do projeto.....	66
4.3.4. Análise de custos e tempos de produção.....	68
4.3.5. Discussão dos resultados	74
Capítulo 5.....	81
Conclusões	81
Bibliografia	84
Anexos	1
ANEXO 1 - Desvios das cotas medidas no gabarito de calibração da impressora DeltaIPS	1
ANEXO 2 – Desenho 2D cotado da ferramenta utilizada para ensaios de estampagem ...	7
ANEXO 3 - Localização dos pontos definidos para controlo dimensional.....	8
ANEXO 4 - Desvios entre os pontos medidos na ferramenta e os pontos do modelo CAD da ferramenta.....	9

Lista de Figuras

Figura 1 – Variação da tensão à tração do provete com 0,2 mm de espessura da camada.	10
Figura 2 – Variação da tensão à tração do provete com 0,25 mm de espessura da camada.	10
Figura 3 – Variação da tensão à tração do provete com 0,3 mm de espessura da camada.	11
Figura 4 – Variação da tensão à flexão do provete com 0,2 mm de espessura da camada.	11
Figura 5 – Variação da tensão à flexão do provete com 0,25 mm de espessura da camada.	11
Figura 6 – Variação da tensão à flexão do provete com 0,3 mm de espessura da camada.	12
Figura 7 – Geometrias dos provetes para cada ensaio.	13
Figura 8 – Processo de produção por <i>inkjet printing</i>	21
Figura 9 – Resultados dos ensaios de compressão.	23
Figura 10 – (a) - Modelo de estrutura sólida da ferramenta; (b) – Estrutura do interior do segundo modelo CAD da ferramenta.	23
Figura 11 – Variação da temperatura ao longo do tempo do processo de cura da ferramenta a produzir em ULTEM 9085.	24
Figura 12 – Taxa de contração de acordo com os materiais das ferramentas e das peças produzidas por injeção plástica.	26
Figura 13 – Perfil da matriz da ferramenta.	27
Figura 14 – Perfis dos “ <i>inserts</i> ” produzidos nos diferentes materiais:	27
Figura 15 – Gráfico da comparação dos custos das ferramentas metálicas e das poliméricas (<i>rapid tooling</i>).	28
Figura 16 – Resultados da medição dos ângulos de quinagem.	28
Figura 17 – Desenhos 2D cotados e vista isométrica do modelo CAD. Dimensões em milímetros [32].	29
Figura 18 – Tolerância geométrica para cada conjunto de amostras. Função distribuição da frequência vs. valores do erro da tolerância.	30

Figura 19 – Peças padrão em condição de montagem.....	32
Figura 20 – Relação entre as variáveis de entrada e de saída.....	33
Figura 21 – Componente em estudo [37].	34
Figura 22 – Orientação e posição dos “ <i>inserts</i> ” dentro de compartimento de impressão [37].	35
Figura 23 – Comparação dos custos e tempos de produção.....	35
Figura 24 – Comparação dos processos de produção por impressão 3D (esquerda) e por maquinação CNC (direita).	37
Figura 25 – Comparação do material utilizado e do tempo de construção de cada modelo.	38
Figura 26 – Análise de custo da produção do modelo CAD nº 6 por fundição e impressão 3D.....	39
Figura 27 – Comparação do custo de produção da tampa de ventilação através de impressão 3D e maquinação CNC.	40
Figura 28 – Orientação dos provetes.	42
Figura 29 – Impressora DeltaIPS.....	44
Figura 30 – Alguns componentes da impressora DeltaIPS.	44
Figura 31 – Modelo utilizado para avaliar a planeza entre as rótulas e as distâncias entre os centros das mesmas.	45
Figura 32 – Representação esquemática do raio Delta (R).	47
Figura 33 – Exemplo de esquema gráfico com escala de cores representativo do mapeamento altura do prato de impressão.....	47
Figura 34 – Modelo produzido para calibração da impressora Blocks One MKII. .	48
Figura 35 – Fluxograma representativo do processo produtivo de uma ferramenta, integrando a impressão 3D.	51
Figura 36 – Esquema de máquina de <i>rubber pad forming</i>	52
Figura 37 – (a) - Esquema de montagem da ferramenta de teste para estampagem; (b) e (c) - Identificação dos elementos de construção.	53
Figura 38 – Modelo CAD da ferramenta com a localização de parte dos pontos a controlar.	55
Figura 39 – Esquema cíclico dos ensaios de estampagem.	55
Figura 40 – Variação da deformação da ferramenta nas superfícies das curvas positiva e negativa e boleados, em diversos pontos conforme	

ANEXO 3.	57
Figura 41 – Variação da deformação da ferramenta nas superfícies das curvas positiva e negativa e boleados, em diversos pontos conforme ANEXO 3.	58
Figura 42 – Variação da deformação da ferramenta na superfície do pescoço de cavalo, conforme ANEXO 3.....	59
Figura 43 – Representação do ângulo de preenchimento.	60
Figura 44 – Ferramenta com estrutura de suporte.	61
Figura 45 – Comparação da espessura da parede: (a) - 1 mm; (b) - 3 mm.....	61
Figura 46 – Exemplos de padrões de preenchimento.	62
Figura 47 – Comparação da densidade de preenchimento: (a) - 10%; (b) - 60%..	62
Figura 48 – Representação do custo de desperdício associado à produção das ferramentas.....	68
Figura 49 – Representação do custo do material das ferramentas.....	69
Figura 50 – Representação do custo das operações.	69
Figura 51 – Representação do custo da manutenção do equipamento por ano. ..	70
Figura 52 – Representação do custo de produção das ferramentas.	70
Figura 53 – Representação do tempo de produção das ferramentas.	71
Figura 54 – Comparação dos tempos e dos custos de produção utilizando as diferentes tecnologias.....	80

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Condições de preparação dos provetes.	10
Tabela 2 – Parâmetros de impressão do provete PEEK.	13
Tabela 3 – Resultados obtidos da primeira experiência.	14
Tabela 4 – Parâmetros do processo de impressão 3D e respetivos valores.	15
Tabela 5 – Resumo das características dos polímeros adequados para a impressão 3D apresentados no Capítulo 2 - - Revisão Bibliográfica.	18
Tabela 6 – Propriedades térmicas de materiais para ferramentas aplicadas na injeção plástica.	25
Tabela 7 – Fatores e níveis definidos pelos autores.	33
Tabela 8 – Configurações ótimas para impressão 3D com erros dimensionais e geométricos mínimos.	33
Tabela 9 – Parâmetros de impressão DMLS.	35
Tabela 10 - Excerto dos resultados relativos à maquinação CNC e à impressão 3D.	38
Tabela 11 – Modelo SIPOC do processo de fabrico convencional.	50
Tabela 12 – Modelo SIPOC do processo de impressão 3D.	50
Tabela 13 - Parâmetros de impressão da ferramenta de teste.	54
Tabela 14 - Registo da taxa horária relacionada com as etapas do processo de maquinação CNC.	66
Tabela 15 - Dimensões gerais ferramentas utilizadas na simulação de impressão.	67
Tabela 16 - Registo dos tempos associados à produção de ferramentas por maquinação CNC.	72
Tabela 17 - Registo dos tempos associados à produção de ferramentas por impressão 3D.	73

Lista de Siglas e Acrónimos

2D	Duas Dimensões
3D	Três Dimensões
3DP	Impressão a Três Dimensões
ABS	<i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i>
AM	<i>Additive Manufacturing</i>
AIM	<i>Accurate Injection Moulding</i>
ASA	<i>Acrylonitrile Styrene Acrylate</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i>
CMM	<i>Coordinate Measure Machine</i>
CPE	Copoliéster
DMTA	<i>Dynamical Mechanical Thermal Analysis</i>
DSC	<i>Differential Scanning Calorimetry</i>
FFF	<i>Fused Filament Fabrication</i>
FPC	<i>Flatness, Parallelism, and Concentricity</i>
HDPE	<i>High Density Polyethylene</i>
HIPS	<i>High Impact Polystyrene</i>
KOM	<i>Kick of Meeting</i>
LOM	<i>Laminated Object Manufacturing</i>
NIST	<i>National Institute of Standards and Technology</i>
PBF	<i>Power Bed Fusion</i>
PC	Policarbonato
PE	Polietileno

PEEK	<i>Polyether Ether Ketone</i>
PEI	<i>Polyetherimide</i>
PET	Polietileno de Tereftalato
PH	<i>Precipitation Hardening</i>
PLA	<i>Polylactic Acid</i>
PP	Polipropileno
PPSF	<i>Polyphenylsulfone</i>
PS	Poliestireno
PVA	<i>Polyvinyl Alcohol</i>
RP	<i>Rapid Prototyping</i>
RT	<i>Rapid Tooling</i>
RTV	<i>Room Temperature Vulcanizing</i>
SGC	<i>Solid Ground Curing</i>
SLA	<i>Stereolithography</i>
SLM	<i>Selective Laser Melting</i>
SLS	<i>Selective Laser Sintering</i>
SIPOC	<i>Supply, Input, Product, Output, Customer</i>
STL	<i>Surface Tessellation Language</i>
TPE	<i>Thermoplastic Elastomer</i>
TPU	<i>Thermoplastic Polyurethane</i>
UV	Ultra Violeta
VARTM	<i>Vacuum Assisted Resin Transfer Molding</i>

Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo é apresentada uma breve introdução ao projeto, objetivos do presente trabalho e estrutura do relatório.

1.1. Introdução ao projeto

A indústria aeronáutica caracteriza-se por ter volumes de produção relativamente baixos e incrementando os custos da produção das ferramentas e consequentemente no custo final da peça a produzir. Segundo dados da *Airbus*, no ano 2019 (antes da pandemia), foram produzidos 551 aviões da família A320neo, 168 aviões do modelo A321neo e 112 aviões da família A350 [1]. Mesmo sendo os aviões da Airbus com maior sucesso comercial, estes valores caracterizam uma baixa produção, tirando-se pouco potencial das ferramentas que são atualmente utilizadas para estampar peças. Após a produção destes, as ferramentas são inutilizadas com muito pouco desgaste. Face ao volume de produção, o custo de desenvolvimento e produção da ferramenta tem um impacto consideravelmente alto no custo final da peça. Este aspeto é particularmente relevante na produção de pequenas séries.

O projeto realiza-se com o apoio da empresa Lauak Aerostructures Setúbal e consiste numa análise comparativa do processo de produção de ferramentas para estampagem de peças em chapa de alumínio pelo método convencional atual da empresa e por impressão 3D utilizando a impressora de gama baixa (Ultimaker 3 Extend) com o material PLA e uma impressora de gama alta (Stratasys Fortus 450mc). com os materiais Policarbonato e ULTEM 1010 e tendo por base diferentes dimensões de ferramentas.

O processo de produção das ferramentas pelo método convencional atual da empresa divide-se, genericamente, pelas etapas: planeamento, desenvolvimento do conceito, elaboração da ficha gama e da ficha controlo dimensional, aquisição de matéria, fabricação e montagem da ferramenta, controlo dimensional, fabricação das primeiras peças e certificação da ferramenta. Enquanto que as etapas do processo de produção das ferramentas por impressão 3D são mais simplificadas. Visto que a tecnologia impressão 3D possui menos etapas comparativamente ao método convencional, o processo de produção das ferramentas torna-se mais rápido e potencialmente mais económico.

1.2. Objetivos

Com este projeto pretende-se avaliar a possibilidade de produção de ferramentas impressas pelo processo de *Fused Filament Fusion* (FFF), usando-se materiais poliméricos para estampagem de peças em chapa de alumínio, pelo processo de *rubber pad forming*, amplamente utilizado na indústria aeronáutica.

Este trabalho tem os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolvimento de uma revisão da literatura sobre a aplicação da impressão 3D no desenvolvimento de *rapid tooling* e os materiais com maior utilização para a impressão 3D e as suas propriedades mecânicas;
- Planeamento e a execução de uma metodologia para a calibração e o aumento da precisão de duas impressoras (Blocks One MKII e DeltaIPS);
- Produção de uma ferramenta, através da impressora Blocks One MKII, para realizar a estampagem de peças em chapa de alumínio e, posteriormente, analisar a sua deformação e verificar se a ferramenta produz peças conforme a norma de toleranciamento de peças utilizada pela Lauak
- Realização de um estudo de viabilidade económica, comparando o processo produtivo de impressão 3D com o processo produtivo de maquinaria CNC implementado na Lauak.

A análise dos dois processos de produção de ferramentas consiste na comparação do planeamento de cada processo de produção (documentação necessária e validações por parte do cliente); na medição de tempos de produção das ferramentas e na avaliação dos custos dos dois tipos processos de produção, incluindo os custos de matéria-prima, de mão de obra e de produção.

Após a análise comparativa, vai ser realizado um estudo de viabilidade económica do processo de prototipagem rápida face aos processos convencionais. O estudo de viabilidade económica consiste num método de avaliação do processo de produção/prestação de um produto/serviço para aferir a rentabilidade desse produto/serviço ao nível do investimento a realizar, valor de retorno esperado e a taxa de consumo.

1.3. Estrutura do relatório

O presente relatório de projeto está dividido em vários capítulos, nomeadamente: a Introdução, Revisão bibliográfica, Projeto de ferramentas por impressão 3D, Viabilidade do projeto de ferramentas por impressão 3D e Conclusões.

Capítulo 1 - Introdução

Neste capítulo encontra-se uma breve introdução ao tema, o objetivo do projeto a desenvolver e a estrutura do relatório.

Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica

Neste capítulo é apresentado o estado de arte, com base na análise de várias referências bibliográficas, na sua maioria constituídas por artigos científicos. Este capítulo divide-se em subcapítulos de forma a desenvolver de forma detalhada vários temas.

Capítulo 3 - Produção de ferramentas por impressão 3D

Este capítulo iniciou-se com a calibração da impressora DeltaIPS, para impressão de ferramentas, através de ajustes e medição da estrutura e calibração através do *software* do controlador.

A seguir é apresentado o estudo que consiste numa comparação do processo de produção de ferramentas para estampagem pelo método convencional atual da Lauak e por impressão 3D.

O subcapítulo seguinte descreve a preparação e a realização de ensaios de estampagem e controlo dimensional.

A última parte do capítulo corresponde ao desenvolvimento de um manual para projeto de ferramentas por impressão 3D.

Capítulo 4 - Viabilidade do projeto de ferramentas por impressão 3D

Este capítulo consiste no estudo de viabilidade económica do processo de *rapid tooling* face aos processos convencionais, analisando sobretudo os custos e os tempos de produção.

Capítulo 5 - Conclusões

Neste capítulo são apresentadas as considerações finais do projeto, tendo em conta os objetivos inicialmente delineados.

Capítulo 2

Revisão bibliográfica

Neste capítulo apresenta-se uma análise detalhada de referências científicas sobre a impressão 3D e de ferramentas aplicadas nas diferentes indústrias.

2.1. Tecnologias de impressão 3D

Segundo T. D. Ngo et al. [2], o fabrico aditivo tem vindo a ser desenvolvido de forma a conseguirem-se produzir estruturas complexas e com bons acabamentos. Assim, o desenvolvimento levou à capacidade de imprimir componentes de grandes dimensões, reduzir defeitos de impressão e melhorar as propriedades mecânicas [2] [3]. As matérias-primas aplicadas nas tecnologias mais comuns relacionadas com o fabrico aditivo são os polímeros, metais em pó, cerâmicos ou resina. O procedimento da impressão 3D com recurso a metais em pó consiste na formação e compactação de finas camadas de pó numa plataforma. Cada camada de pó é fundida através de um raio *laser* ou um aglomerante por cima da subjacente, repetindo o processo até que o produto esteja acabado [1]. As vantagens relativas à impressão 3D com recurso a metais em pó são a elevada resolução e qualidade de impressão, enquanto que as desvantagens são a velocidade reduzida do processo, os custos elevados e a elevada porosidade dos produtos quando o pó é fundido com aglomerante [2] [4]. Estas tecnologias distinguem-se pela sua utilização e pelas suas características [2], [4], [5]:

- *Fused Deposition Fabrication* (FFF): Filamentos de diferentes polímeros termoplásticos são utilizados para a impressão 3D de objetos. O filamento é aquecido no bico de impressão até chegar ao estado de semilíquido e depois é extrudido para o prato de impressão formando o objeto camada a camada. A termoplasticidade do filamento polimérico é de elevada importância, visto que permite a fusão dos filamentos durante a impressão e posteriormente a solidificação à temperatura ambiente. Os parâmetros do processo que influenciam as propriedades mecânicas baseiam-se na espessura de cada camada, na largura do filamento e nos espaços vazios na camada ou entre camadas. As vantagens da impressão 3D FFF são o baixo custo de materiais e de produção, a elevada velocidade e a simplicidade do processo de produção dos componentes. As desvantagens são as propriedades mecânicas fracas, a baixa qualidade de superfície e baixa quantidade de materiais termoplásticos;
- Impressão 3D com líquido aglomerante (3DP): Relacionado com este processo, os parâmetros como a química e a reologia do produto aglomerante, o tamanho e a forma das partículas do pó, a velocidade de deposição, a interação entre o pó e o aglomerante e as técnicas de pós-processamento são fundamentais na impressão 3DP;

- *Inkjet Printing*: O processo consiste em depositar em forma de gotículas uma suspensão cerâmica através de um bico de injeção num substrato, assim é formado um padrão a cada camada. Existem dois tipos de matérias-primas, uma à base de cera que é derretida e depositada num substrato a uma temperatura mais baixa de forma a solidificar, a outra é do tipo suspensão líquida que solidifica pela evaporação do líquido. A qualidade deste tipo de impressão varia com a distribuição do tamanho das partículas cerâmicas, a viscosidade, a taxa de extrusão, o tamanho do bico de injeção e a velocidade da impressão;
- Estereolitografia (SLA): Na impressão por SLA utiliza-se radiação UV (Ultravioleta) de forma a solidificar cada camada de resina ou de uma solução monomérica. O procedimento repete-se camada a camada até produzir o objeto. A espessura de cada camada é influenciada pelos parâmetros, a energia da radiação UV e a exposição. De forma a melhorar as propriedades mecânicas, realizam-se tratamentos de pós-processamento como o aquecimento ou a aplicação de radiação UV. Os componentes produzidos por impressão SLA apresentam elevada qualidade, mas como desvantagem, é um processo demorado, caro e a variedade de materiais para impressão é baixa;
- *Selective Laser Melting* (SLM): A cada passagem do *laser*, este funde completamente os pós, resultando na melhoria das propriedades mecânicas. A SLM é utilizada exclusivamente para produzir componentes em alguns tipos de metais como o alumínio e aço;
- *Selective Laser Sintering* (SLS): A cada passagem do *laser*, este não funde completamente os pós e a temperatura localizada elevada na superfície dos grãos resulta num processo de sinterização. A SLS é utilizada para produzir componentes poliméricos ou metálicos.

Segundo os autores, o fabrico aditivo com metais representa cada vez mais relevância visto que tem demonstrado perspectivas de crescimento elevadas. T. D. Ngo et al. [2] apresentam dados estatísticos relativos a sistemas *Additive Manufacturing* (AM), como por exemplo, o aumento de empresas na área de venda de sistemas AM de 49 para 97 em 2 anos [2]. Certos metais, como os aços inoxidáveis, algumas ligas de alumínio, as ligas de titânio e as ligas de níquel têm sido usados para o processo de fabrico aditivo *Powder Bed Fusion* (PBF). Devido ao alto desempenho das ligas de titânio estas são utilizadas em várias indústrias, mas possuem elevados custos de produção e demoram muito tempo pelos métodos convencionais. O fabrico aditivo é apontado como solução dado que produz objetos com *design* complexo a baixo custo e baixo desperdício de material. As ligas Ti, como por exemplo a Ti6Al4V foram estudadas para a comercialização nas áreas aeroespacial e biomédica. Relativamente aos aços inoxidáveis austeníticos, aços inoxidáveis de PH (*Precipitation Hardening*), aços *maraging* e aços ferramenta, os autores afirmam que são utilizados para condições de elevado esforço mecânico e dureza como ferramentas e moldes.

Acerca das ligas de alumínio, os autores explicam que uma pequena parte destas ligas são utilizadas devido às suas características, dificuldade em soldar, elevada refletividade para o comprimento de onda dos raios *laser* e baixa viscosidade do alumínio derretido. Por outro lado, o alumínio tem uma elevada condutividade térmica, o que permite reduzir as tensões térmicas internas e rapidez no processo [2].

2.2. Materiais aplicados à impressão 3D pelo método FFF

Segundo H. Wu et al. [6], a tecnologia AM, ou também conhecida como impressão 3D, tem-se tornado revelante na produção de componentes auxiliares para a indústria, como ferramentas, gabaritos e acessórios. Esta tecnologia tem como vantagem, o fabrico de peças com *design* complexo facilitado pela produção do *output* físico a partir do *input* digital. Os autores citam a norma ISO/ASTM 52900-15 que define a tecnologia AM como um processo de ligação de materiais para produzir peças camada sobre camada a partir de um modelo 3D, contrariando a produção por metodologias convencionais. H. Wu et al. [6] realizaram um trabalho de pesquisa sobre as técnicas de fabrico aditivo, a análise de polímeros comerciais utilizados em AM, o desenvolvimento dos polímeros nanocompósitos para o fabrico aditivo e as perspetivas futuras relacionadas com os desafios e as oportunidades do fabrico aditivo. Os polímeros apresentados pelos autores são descritos a seguir [6]:

- ABS - É caracterizado por ter boa qualidade de impressão e bastante utilizado na construção de modelos funcionais. A Stratasys®, uma das marcas líderes no mercado, disponibiliza nos vários tipos de ABS, como por exemplo:
 - ABS-ESD7, polímero adequado para produtos eletrónicos, gabaritos e equipamento industrial, construção de protótipos funcionais de armazenamento de combustível e produtos de embalagem e devido às suas propriedades dissipativas também pode ser utilizado na produção de elementos constituintes de peças que normalmente são danificadas por eletricidade estática;
 - ABS-M30, polímero adequado para a produção de modelos funcionais devido às suas propriedades mecânicas e forte ligação entre camadas;
 - ABSplus, tipo de ABS com melhores propriedades mecânicas e menor absorção de água. Este polímero pode ser utilizado na impressão de peças resistentes para protótipos funcionais e ferramentas;
 - ABS-M30i, polímero biocompatível com melhores propriedades mecânicas que o ABS.
- ASA (*Acrylonitrile Styrene Acrylate*), polímero sintetizado com estireno, acrilato de n-butilo e acrilonitrila. As características deste polímero são a resistência à radiação UV, a elevada adesão entre as camadas, a elevada resistência ao impacto e elevada durabilidade [7]. O polímero ASA combinado com o polímero PC (Policarbonato) é bastante utilizado na produção de peças para automóveis;

- HDPE (*High Density Polyethylene*), polímero inerte quimicamente com elevada resistência ao impacto, à fadiga e ao desgaste, boa relação entre a dureza, a deformação e a maquinabilidade. O HDPE pode ser aplicado na área da biomédica devido à sua biocompatibilidade;
- HIPS (*High Impact Polystyrene*), polímero com elevada resistência ao impacto, elevada estabilidade dimensional e baixo custo, assim devido às propriedades é bastante empregue em componentes elétricos e eletrónicos [8];
- Nylon, existem diferentes tipos de nylon no mercado da impressão 3D:
 - Nylon 6, polímero semicristalino é aplicado em componentes de automóveis e nos sectores da construção e da indústria. As características do nylon 6 são as seguintes, elevada resistência mecânica, térmica, ao desgaste e à fadiga e baixo custo. O polímero nylon 6 pode ser produzido pelas técnicas polimerização in situ, fusão ou fundição de solvente [9];
 - Nylon 12, polímero semicristalino caracteriza-se por ter elevada resistência química, à fadiga e ao impacto, elevada flexibilidade e baixa densidade e absorção de água;
 - Nylon 12 CF, polímero definido pela aglutinação de nylon e fibra de carbono, assim o polímero apresenta um aumento da resistência à deformação e da rigidez.
- PC, polímero amorfo e transparente utilizado em variadas aplicações quando combinado com outros polímeros, como a indústria automóvel e empacotamento de alimentos. As propriedades de PC, quando combinado com ABS, são elevada resistência à fratura, ao impacto e baixa deformação quando exposto a temperaturas elevadas;
- PEI (*Polyetherimide*), os tipos de polímeros mais comercializados para a impressão 3D são os seguintes:
 - ULTEM 1010, denominado por resina termoplástica de estrutura amorfa. Este polímero tem como propriedades, elevada resistência mecânica e química, elevada estabilidade térmica, baixo coeficiente de expansão térmica, elevada biocompatibilidade e elevada resistência ao processo de cura em autoclave. Estas características tornam a resina ULTEM 1010 adequada para a produção de ferramentas industriais, por exemplo, para a indústria alimentar; aeroespacial e automóvel e para a produção de dispositivos médicos [10];
 - ULTEM 9085 tem como características, elevada resistência mecânica, baixa deformação a temperaturas elevadas e elevada resistência ao fogo. Estas propriedades tornam o ULTEM 9085 adequada para a indústria aeronáutica e aeroespacial [11].

- PEEK (*Polyether Ether Ketone*), polímero termoplástico semicristalino caracteriza-se por ser quimicamente e biologicamente inerte e tem as seguintes propriedades, elevada resistência ao desgaste, à fadiga e altas temperaturas. Assim, o polímero PEEK é apropriado para a indústria biomédica, aeroespacial, automóvel e química [5], [12];
- PLA (*Polylactic Acid*), polímero termoplástico composto cadeias de carbono, hidrogénio e oxigénio e produzido a partir de materiais biodegradáveis reutilizados. O PLA tem as seguintes características, boas propriedades mecânicas e elevada maquinabilidade;
- PPSF (*Polyphenylsulfone*), polímero com elevada resistência química, a altas temperaturas e à deformação. Este polímero resiste a vários processos de esterilização (aplicação de óxido de etileno, autoclavagem e aplicação de radiação), assim o PPSF adequado para a produção de dispositivos médicos e também para protótipos de peças para automóveis e ferramentaria para diversas indústrias [13];
- TPE (*Thermoplastic Elastomer*), polímero bastante flexível composto por cadeias poliméricas que permitem a recuperação da forma após a aplicação de tensão elevada. A recuperação pode ser efetuada através da aplicação de uma temperatura acima da temperatura de transição do polímero [3]. Os TPE's podem ser utilizados na indústria automóvel e do calçado e na produção de dispositivos médicos e de produtos desportivos [14];
- TPU (*Thermoplastic polyurethane*), polímero pertencente ao grupo dos elastómeros termoplásticos. Uma das aplicações do TPU é o revestimento dos materiais dos dispositivos biomédicos, como por exemplo, cateteres e válvulas protéticas cardíacas. Assim conclui-se que este polímero tem elevada biocompatibilidade.

Segundo M. Murariu et al. [15], o mercado dos biopolímeros está em crescimento e é esperado cada vez mais procura por aplicações que ofereçam benefícios aos clientes e ao meio-ambiente. Os autores apresentam um relatório publicado por *BCC Research* que estima que a procura global de bioplástico é maior que 1400 kT (kilotoneladas). O relatório prevê que a capacidade global de produção vai aumentar mais do que 7,8 milhões de toneladas em 2019 [15]. Este trabalho realizado por M. Murariu et al. [15] consiste na apresentação dos avanços nas propriedades dos principais de PLA e análise em relação à preparação e caracterização de diferentes tipos de PLA. Os autores caracterizam o PLA como um material com boas propriedades mecânicas e até apresenta valores mais elevados que os polímeros PS (Poliestireno), PP (Polipropileno) ou PE (Polietileno), tendo estes elevada resistência à tração e à flexão e o módulo de Young elevado [15], [16]. M. Murariu et al. [15] comparam a resistência à tração entre o polímeros PLA e o PET (Polietileno de Tereftalato) e verificaram que o PLA é frágil o que limita as aplicações que precisam de deformação plástica sob tensão elevada [15], [17]. Os autores apresentam novos produtos que estão a ser desenvolvidos por empresas, estes produtos são produzidos com PLA e fibras naturais. A utilização de fibras naturais, para a produção de biocompósitos, deve-se ao seu baixo custo, à sua baixa densidade, à sua elevada relação entre

a resistência à tração e a densidade e à sua dureza [12]. M. Murariu et al verificaram que o PLA possui uma elevada sensibilidade à temperatura, à tensão de corte e à hidrólise, mas por outro lado, devido à degradação das fibras naturais, a temperatura a aplicar no processo de produção do compósitos com as fibras naturais não deve exceder os 200 °C [15]. Os exemplos dos novos biocompósitos desenvolvidos são [15]:

- PLA-flax – Os autores consideram que este biocompósito (compósito constituído por PLA e linho) possui melhores propriedades mecânicas, como a resistência à tração e o módulo de Young, que os compósitos constituídos por polipropileno e linho. O biocompósito PLA-linho pode ser usado na indústria automóvel;
- PLA-FV – A utilização de fibras de vidro como reforço de PLA leva a um aumento da resistência à tração e à flexão. Assim, as fibras de vidro são utilizadas na indústria de produção dos materiais compósitos.

M. Murariu et al. apresentam outro tipo de compósito que consiste em PLA e materiais de preenchimento. Alguns exemplos deste tipo de compósito são os seguintes:

- PLA - talco – O talco quando adicionado ao PLA aumenta a velocidade de cristalização, a dureza e resistência a elevadas temperaturas, melhora a estabilidade dimensional e reduz os custos de produção. Os autores verificaram que a adição de 30 wt % de talco provoca um aumento do módulo de Young de 4,1 GPa para 9,8 GPa;
- PLA - sulfato de bário – A adição de 15 wt % de sulfato de bário conduz a um aumento da tenacidade e da deformação até à cedência comparando com o PLA puro;
- PLA - carbonato de cálcio - O carbonato de cálcio quando adicionado ao PLA aumenta a resistência à tração e o módulo de Young, mas este material de preenchimento diminui a estabilidade térmica.

Os autores concluem que o PLA apresenta algumas desvantagens, como baixa tenacidade e ductilidade, elevada sensibilidade à humidade e a rápida degradação, assim requer pós-tratamentos para poder ser utilizado em diversas aplicações. O desenvolvimento de novos métodos de produção de compósitos de PLA, como a utilização de fibras ou de materiais de preenchimento, torna-se uma forma promissora de alcançar a melhoria significativa da performance do PLA.

Segundo K. G. J. Christiyan, et al. [18], definem a tecnologia FFF como um processo produtivo inserido no fabrico aditivo e tem como princípio de funcionamento a extrusão de um filamento derretido por um bico de impressão e a deposição deste numa plataforma ou camada sobre camada [18]. Os autores realizaram um estudo em que é analisada a resistência à tração do compósito ABS (*Acrylonitrile Butadiene Styrene*) + silicato de magnésio hidratado utilizado numa impressora 3D tendo em atenção os seguintes parâmetros: a espessura da camada, a velocidade de impressão e a orientação do filamento depositado. Os provetes foram submetidos a ensaios de tração e de flexão respeitando as normas ASTM D638 (Tipo 1) e ASTM D790, respetivamente (Tabela 1).

Tabela 1 – Condições de preparação dos provetes.
Adaptada de K. G. J. Christiyan et al. [18]

Parâmetro do Proвете	Proвете 1	Proвете 2	Proвете 3
Espessura da camada, mm	L1 = 0.2	L2= 0.25	L3 = 0.3
Velocidade de impressão, mm/s	S1 =30	S2 = 40	S3=50
Diâmetro do bico de impressão, mm	N1=0.6	N1=0.6	N1=0.6

Os autores obtiveram os resultados derivados dos ensaios à tração apresentados nas figuras 2, 3 e 4, a tensão de tração diminuiu conforme o aumento da espessura da camada e da velocidade de impressão; para valores de tensão semelhantes, a rutura dos provetes acontece para os valores de velocidade de impressão analisados e para o valor de velocidade de impressão mais baixo (30 mm/s), corresponde ao valor mais elevado da tensão [18].

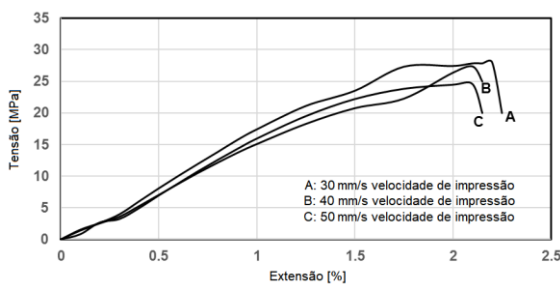


Figura 1 – Variação da tensão à tração do provete com 0,2 mm de espessura da camada.

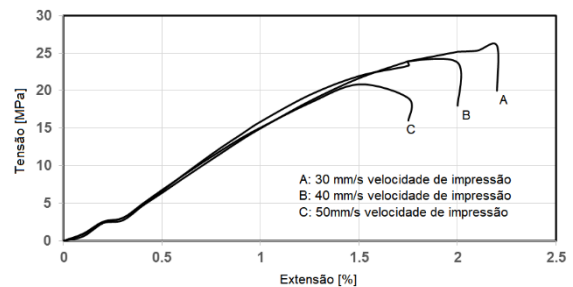


Figura 2 – Variação da tensão à tração do provete com 0,25 mm de espessura da camada.

Adaptadas de K. G. J. Christiyan et al. [18]

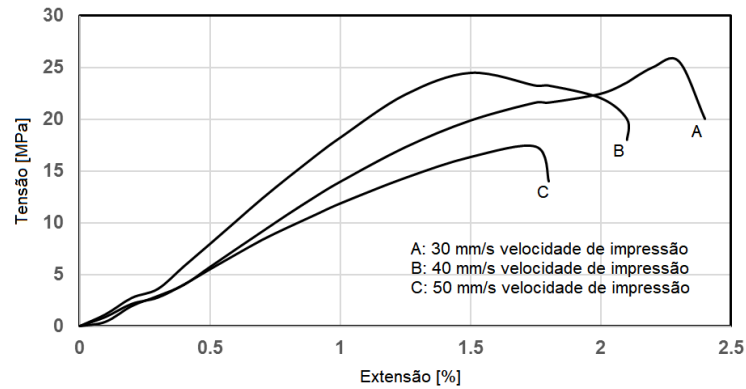


Figura 3 – Variação da tensão à tração do provete com 0,3 mm de espessura da camada.
Adaptada de K. G. J. Christiyani et al. [18].

Os autores obtiveram os seguintes resultados derivados dos ensaios à flexão apresentados nas figuras 5, 6 e 7, para a espessura da camada de 0,2 mm (Figura 4), os valores da carga e do deslocamento diminuiram conforme o aumento da velocidade de impressão (curvas A e B); na curva C, os autores notaram que para o mesmo aumento da velocidade de impressão, carga aplicada diminui e o deslocamento aumentou, ambos ligeiramente em comparação com as curvas A e B. Na Figura 5, os autores observaram que houve uma redução de cerca de 10% da carga aplicada quando a velocidade de impressão aumenta; em relação à curva C, os autores verificam que o comportamento do provete é semelhante ao da curva B [18].

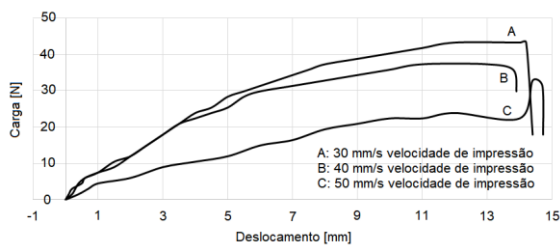


Figura 4 – Variação da tensão à flexão do provete com 0,2 mm de espessura da camada.
Adaptada de K. G. J. Christiyani et al. [18].

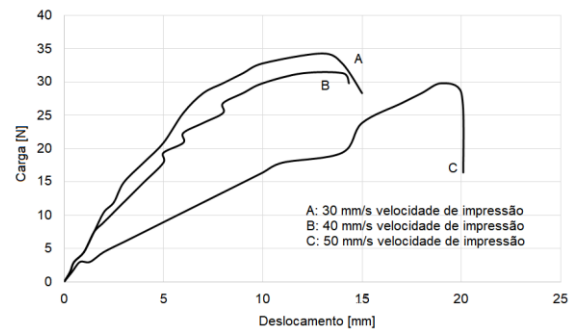


Figura 5 – Variação da tensão à flexão do provete com 0,25 mm de espessura da camada.
Adaptada de K. G. J. Christiyani et al. [18].

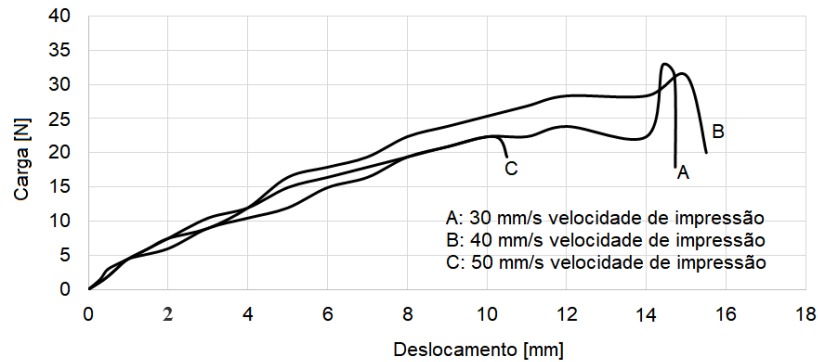


Figura 6 – Variação da tensão à flexão do provete com 0,3 mm de espessura da camada.
Adaptada de K. G. J. Christiyen et al. [18].

Após a análise dos resultados e considerando as condições dos ensaios realizados, os autores concluíram que os valores máximos da resistência à tração e à flexão correspondem aos provetes com menor espessura de camada e produzidos com menor velocidade de impressão; os provetes com a espessura de camada 0,25 mm e 0,3 mm e produzidos com velocidade de impressão máxima demonstram uma ligeira diminuição dos valores de resistência [18].

Segundo W. Wu, et al. [19], a tecnologia FFF é uma das mais comuns entre as estão relacionadas com o fabrico aditivo. Sendo as vantagens, facilidade da mudança de material, baixo custos de manutenção, sem necessidade de supervisão das operações e baixa temperatura de trabalho. Por outro lado, há pouca variedade de materiais disponíveis [19]. Os autores caracterizam o PEEK como um material termoplástico semicristalino, resistente a altas temperaturas, elevada estabilidade química e resistência mecânica. Assim, torna-se adequado para a utilização em diferentes áreas como aeroespacial, automóvel, eletrónica e medicina [19]. W. Wu, et al. [19] realizaram um estudo dividido em duas experiências, a primeira consistiu em avaliar a influência da variação dos parâmetros de impressão sobre as propriedades mecânicas de provetes produzidos em PEEK e a segunda consistiu em comparar as propriedades mecânicas de componentes produzidos em PEEK e ABS pelo processo FFF [19].

Definiram os parâmetros de impressão, espessura da camada e o ângulo de preenchimento (Tabela 2), produziram provetes nos materiais PEEK e ABS para os ensaios mecânicos de tração, de flexão e de compressão de acordo com as normas GB/T 16421-1996, GB/T 9341-2008 e GB/T 1041-2008, respetivamente. As geometrias dos provetes para cada ensaio apresentam na Figura 7 [19].

Tabela 2 – Parâmetros de impressão do provete PEEK.
Adaptada de W. Wu, et al. [19].

Fatores de Controle			Fatores Fixos		
Fator	Valor	Unidade	Fator	Valor	Unidade
Espessura da camada	200	μm	Orientação da Construção	Direção Y (Plano)	-
	300	μm	Padrão do interior	Linha	-
	400	μm	<i>Air Gap</i>	0	mm
Ângulo de preenchimento	0	$^{\circ}$	Número de contornos	2	-
	30	$^{\circ}$	Diâmetro interno do bico de impressão	0,4	mm
	45	$^{\circ}$			

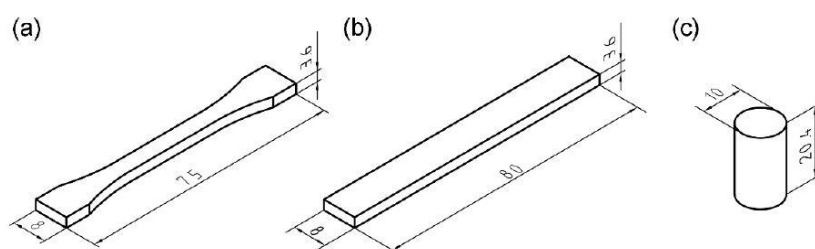


Figura 7 – Geometrias dos provetes para cada ensaio.
(a) – Tração; (b) – Flexão; (c) – Compressão [19].

Os autores obtiveram os resultados da primeira experiência, apresentados na Tabela 3. Foi observado que os provetes produzidos com a espessura da camada 300 μm apresentaram as maiores de tensão em todos os ensaios, no entanto, os provetes produzidos com a espessura da camada 400 μm diminuíram consideravelmente. Os provetes produzidos com ângulos de preenchimento 0°/ 90° apresentaram as maiores de resistência mecânica em todos os ensaios. Os autores constaram que a espessura de camada influenciou bastante a resistência à tração, enquanto que as tensões à flexão e à compressão influenciaram pouco [19].

Tabela 3 – Resultados obtidos da primeira experiência
Adaptada de W. Wu, et al. [19].

Fatores		Tensão à tração [MPa]	Tensão à flexão [MPa]	Tensão à compressão [MPa]
Espessura da camada [μm]	200	40,1	52,1	53,6
	300	56,6	56,1	60,9
	400	32,4	48,7	54,1
Ângulo de preenchimento	0°/ 90°	56,6	56,1	-
	30°/ -60°	41,8	48,5	-
	45°/ -45°	43,3	43,2	-

Os autores obtiveram os resultados dos ensaios à tração da segunda experiência e verificaram que no início da curva para o material ABS que variação da tensão foi não linear e a tensão foi praticamente constante depois do provete em ABS atingir o ponto de cedência. Sobre a curva relativa ao comportamento do provete em PEEK, os autores verificaram que conforme a carga aplicada aumenta, o provete só começa a ceder ao atingir a tensão máxima [19]. Pelos resultados dos ensaios à compressão da segunda experiência, os autores verificam que a curva PEEK é linear no início e a tensão aumenta conforme o desenvolvimento da deformação [19].

Após a análise dos resultados e considerando as condições dos ensaios realizados, os autores concluíram que o ângulo de preenchimento e a espessura da camada influenciam a tensão à tração, à compressão e à flexão. As propriedades mecânicas ideais do PEEK foram verificadas nos provetes produzidos com 300 μm de espessura da camada e com 0°/ 90° de ângulo de preenchimento. Pelos resultados obtidos na segunda experiência, os autores concluíram que as propriedades mecânicas diminuíram quando os materiais (PEEK e ABS) passam pelo processo impressão 3D comparando as propriedades mecânicas dos materiais antes da produção dos provetes. Comparando as propriedades mecânicas dos provetes PEEK e ABS produzidos por impressão 3D, conclui-se que estas foram mais elevadas nos provetes PEEK [19].

Por fim, os autores preveem que as propriedades mecânicas dos provetes PEEK produzidos por impressão 3D podem ser melhoradas, se o controlo da precisão do sistema de impressão 3D for melhorado [19].

Segundo A. W. Gebisa, et al. [20], a impressão 3D é uma técnica de fabrico digital que produz componentes camada a camada e as vantagens desta tecnologia são as seguintes: capacidade de produção de geometrias complexas sem ferramentas auxiliares, produção de componentes funcionais e capacidade de impressão de um componente com diferentes materiais. Os autores caracterizam o processo FFF como um processo em que o filamento termoplástico é derretido, extrudido e depositado [20]. Realizaram um estudo com o objetivo de compreender a relação entre os parâmetros de impressão 3D e as propriedades mecânicas de provetes produzidos em ULTEM 9085 por impressão 3D FFF. Os autores utilizaram a técnica, planeamento de experiências fatorial, tendo definido cinco parâmetros, o *air gap*, a largura do filamento interior, o ângulo de preenchimento, número de contornos e a largura do contorno. Para cada parâmetro definiram dois níveis (baixo e elevado). Os parâmetros do processo de impressão 3D e respetivos valores apresentam-se na Tabela 4. Os ensaios foram conduzidos segundo a norma ASTM D3039 [20].

Tabela 4 – Parâmetros do processo de impressão 3D e respetivos valores.
Adaptada de A. W. Gebisa, et al. [20].

Parâmetros			Níveis	
Nome	Unidades	Símbolo	Baixo	Elevado
<i>Air Gap</i>	mm	A	-0,0254	0,0
Largura do filamento interior	mm	B	0,4064	0,7814
Ângulo de preenchimento	grau (°)	C	0,0	90,0
Número de contornos	-	D	1,0	5,0
Largura do contorno	mm	E	0,4064	0,7814

Após a realização dos ensaios, os autores obtiveram os resultados: o parâmetro *air gap* teve menor influência do que o ângulo de preenchimento; o efeito da largura do filamento interior é pouco relevante para a variação das tensões; os provetes produzidos com 0° de ângulo de preenchimento provocaram maior tensão do que os provetes produzidos com 90° de ângulo de preenchimento, pelo fato dos filamentos terem ficado orientados paralelamente à direção da carga aplicada; o valor mais elevado da tensão à tração verificou-se nos provetes produzidos conforme os parâmetros seguintes, menor nível de *air gap*, menor nível de largura do filamento interior, menor ângulo de preenchimento, maior nível de número de contornos e maior nível de largura do contorno; em relação aos parâmetros largura do contorno não se registou influência significativa nas tensões [20]. Após a análise dos resultados e considerando as condições dos ensaios realizados, os autores concluíram que o parâmetro ângulo de preenchimento teve mais influência.

Os autores comentaram que o estudo realizado foi limitado, dado que foi definido apenas dois níveis para cada parâmetro na fase de planeamento de experiências. Considerando um maior número de níveis para cada parâmetro, os autores julgam que os resultados obtidos seriam mais precisos [20].

T. J. Hoskins, et al. [21] apresentam um conjunto de aspetos como vantagens do fabrico aditivo sendo estes, melhoramento considerável flexibilidade de *design*, componentes com estrutura complexa podem ser produzidos de forma mais económica, enquanto que especificamente, a tecnologia SLS tem como vantagens sobre os processos AM de produção com polímeros, não existe a necessidade de formar suportes em componentes com zonas com saliências ou com secções de parede fina [21]. Os autores realizaram um estudo sobre o desempenho e as aplicações promissoras do material termoplástico EOS PEEK HP3. O objetivo do estudo foi caracterizar as propriedades mecânicas, tração, flexão, compressão, fratura e propriedades térmicas. T. J. Hoskins, et al. [21] realçam que os ensaios mecânicos foram realizados seguindo normas de injeção plástica, dado ainda não existirem normas específicas para ensaios mecânicos de provetes produzidos por HT-SLS (*High Temperature Selective Laser Sintering*) [21].

Os provetes foram produzidos segundo a norma EN ISO 527-2:2012 e submetidos ao ensaio de tensão à tração cinco vezes, seguindo a norma ISO 527-2/1A/1. Os provetes foram submetidos ao ensaio de tensão à flexão cinco vezes, seguindo a norma BS EN ISO 178:2010. Os provetes foram submetidos ao ensaio de fratura seguindo a norma BS ISO 13586:2000. Os provetes foram submetidos ao ensaio de tensão à compressão, seguindo a norma BS EN ISO 604 (2003). Os provetes foram submetidos ao ensaio de propriedades térmicas, seguindo dois métodos: *Differential Scanning Calorimetry* (DSC) e *Dynamical Mechanical Thermal Analysis* (DMTA). O método DSC consistiu em medir a variação relativa do fluxo de calor do material. O método DMTA consistiu em caracterizar o comportamento viscoelástico do provete [21].

Após a realização dos ensaios, obtiveram os seguintes resultados: a partir dos ensaios de tensão, os provetes apresentaram uma resistência à tração de $88,7 \pm 1,5$ MPa; os provetes apresentaram um módulo de flexão e uma resistência à flexão, respetivamente, $3,26 \pm 0,7$ GPa e $123 \pm 2,5$ MPa. Os provetes apresentaram um módulo de compressão e uma resistência à compressão, respetivamente, 610 ± 15 MPa e 184 ± 15 MPa. Pelos resultados apresentados, os autores verificaram que resposta do material EOS PEEK HP3 aos ensaios caracterizou-se por ser frágil, dado que as superfícies de fratura dos provetes apresentando laminação e planos finos de fratura [21]. Após a análise dos resultados e considerando as condições dos ensaios realizados, os autores concluíram que o desempenho de EOS PEEK HP3 foi mais elevado comparando com o elevado desempenho dos materiais de moldes para injeção. A superfície de fratura dos provetes, sujeitos aos ensaios de resistência à compressão, apresentou material parcialmente sinterizado, assim deve ser avaliado de formar a melhorar as propriedades do material e aprimorar os parâmetros do processo de produção. Os autores não recomendam a utilização de EOS PEEK HP3 para componentes sujeitos a cargas de impacto, por ser um material frágil e que

pode levar a uma fratura imprevisível.

N. G. Tanikella, et al. [22] realizaram um estudo sobre as propriedades mecânicas de componentes produzidos por impressão 3D utilizando vasta gama de materiais poliméricos. Os provetes foram sujeitos a ensaios de resistência à tração seguindo a norma ASTM D638. Os materiais poliméricos utilizados no estudo foram ninjaflex, semiflex, HIPS, T-Glase, policarbonato, nylon e ABS [22]. Os autores definiram as seguintes condições dos ensaios: produção de dez provetes de cada material seguindo a norma ASTM D638; a temperatura do ambiente foi controlada aquando a impressão dos provetes e todos os provetes foram impressos com o preenchimento a 100% [22].

Após a realização dos ensaios, os autores obtiveram os seguintes resultados: o material mais resistente foi o policarbonato com uma resistência à tração de 49,08 MPa; o material mais flexível foi o ninjaflex, o qual obteve uma extensão de 800% o que correspondeu a uma resistência à tração de 12,69 MPa; o nylon foi mais resistente que o ninjaflex e o semiflex, e mais flexível que o ABS, HIPS, T-Glase e o policarbonato. Os autores verificaram que a cor do material pode ter um impacto considerável na tensão máxima de um material produzido por impressão 3D [22]. N. G. Tanikella, et al. [22] realizaram algumas considerações sobre o estudo, a densidade dos provetes foi medida por grupos de materiais e não por cores do mesmo material, o material dos provetes pode ser impresso com o comprimento na vertical e a resistência à tração testada novamente. Os autores concluíram que a resistência à tração dos provetes depende da sua massa e cor [22].

Na Tabela 5 apresenta-se uma síntese de vários materiais utilizados no processo de FFF e respetivas referências onde constam propriedades mecânicas e aplicações.

Tabela 5 – Resumo das características dos polímeros adequados para a impressão 3D apresentados no Capítulo 2 - - Revisão Bibliográfica.

Material Polimérico	Características		Referência Bibliográfica
ABS	ABS-ESD7	<ul style="list-style-type: none"> • Elevada durabilidade • Elevada dissipação de eletricidade estática 	[6]
	ABS-M30	<ul style="list-style-type: none"> • Elevada resistência à tração, à flexão e ao impacto • Elevada durabilidade • Baixo custo 	[6], [10], [23]
	ABSplus	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa absorção de água • Elevada versatilidade • Elevada dureza 	[10]
	ABS-M30i	<ul style="list-style-type: none"> • Elevada biocompatibilidade • Elevada resistência à tração • Capacidade de aplicação de esterilização 	[10]
ASA	<ul style="list-style-type: none"> • Elevada resistência à tração e ao impacto • Elevada durabilidade • Elevada resistência à radiação UV • Baixo custo 	[7], [10], [13], [23]	
HDPE	<ul style="list-style-type: none"> • Elevada resistência ao impacto, à fadiga e ao desgaste • Boa relação entre a dureza, a deformação e a maquinabilidade 	[6]	
HIPS	<ul style="list-style-type: none"> • Elevada resistência ao impacto • Elevada estabilidade dimensional • Baixo custo 	[8]	
Nylon 6	<ul style="list-style-type: none"> • Elevada resistência mecânica, térmica, ao desgaste e à fadiga • Baixo custo 	[9], [10]	
Nylon 12	<ul style="list-style-type: none"> • Elevada resistência química • Elevada à fadiga e ao impacto • Elevada flexibilidade • Baixa densidade • Baixa absorção de água 	[6]	
Nylon 12 CF	<ul style="list-style-type: none"> • Elevada resistência mecânica • Elevada rigidez 	[6], [24]	
PC	ABS	<ul style="list-style-type: none"> • Elevada resistência à fratura e ao impacto • Baixa deformação quando exposto a temperaturas elevadas 	[25]
	ISO	<ul style="list-style-type: none"> • Elevada biocompatibilidade • Elevada resistência a altas temperaturas 	[25], [26]
PEEK	<ul style="list-style-type: none"> • Elevada estabilidade química e biológica • Elevada resistência ao desgaste e à fadiga • Elevada resistência altas temperaturas 	[5], [12], [19]	
PLA	<ul style="list-style-type: none"> • Elevada resistência mecânica • Elevada maquinabilidade • Elevada sensibilidade à temperatura, à tensão de corte e à hidrólise 	[6], [15]	

	PLA- <i>flax</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Elevada resistência à tração • Módulo de Young elevado 	[15]
	PLA-FV	<ul style="list-style-type: none"> • Elevada resistência à tração e à flexão 	
	PLA-talco	<ul style="list-style-type: none"> • Elevada dureza • Elevada resistência a elevadas temperaturas • Elevada estabilidade dimensional • Baixo custo de produção 	
	PLA-sulfato de bário	<ul style="list-style-type: none"> • Elevada tenacidade 	
	PLA- carbonato de cálcio	<ul style="list-style-type: none"> • Elevada resistência à tração • Módulo de Young elevado 	
PPSF		<ul style="list-style-type: none"> • Elevada resistência química • Elevada resistência a altas temperaturas • Elevada resistência à deformação 	[6], [13]
TPE		<ul style="list-style-type: none"> • Elevada flexibilidade e elasticidade • Elevada resistência ao desgaste e à tração 	[14]
TPU		<ul style="list-style-type: none"> • Elevada flexibilidade, elasticidade e versatilidade • Elevada biocompatibilidade e reciclagem • Elevada resistência a tensões de corte, ao desgaste e ao impacto • Elevada resistência à corrosão química 	[3], [6], [13], [25]

2.3. Processos de *Rapid Tooling* (RT) e *Rapid Prototyping* (RP)

Segundo A. Equbal, et al. [27], devido à forte competição internacional e à globalização dos mercados, a indústria é obrigada a oferecer produtos de elevada qualidade, pensando na reciclagem e nas questões ambientais, no entanto reduzindo o tempo e os custos. Como solução os autores apresentam o conceito de *Rapid Tooling* (RT) sendo um processo rápido de produção de ferramentas através de *Rapid Prototyping* (RP). As vantagens desta tecnologia apontadas pelos autores são as seguintes: a eliminação dos custos de modificações em ferramentas acabadas, dado que as modificações são previstas na fase de protótipo; a produção pela tecnologia RT tem um tempo de produção cinco vezes menor que a produção pelos métodos convencionais; a redução de mão de obra e, conseqüentemente, a redução de custos de produção; as tecnologias CAD (*Computer Aided Design*) permitem a produção de “*inserts*” e a utilização de matrizes modulares no caso da produção de ferramentas por moldes e a produção de moldes com canais de arrefecimento otimizados [27].

M. Upadhyay et al. [28] realizaram uma revisão sobre a utilização da impressão 3D em *Rapid Casting* por moldação em areia. Segundo M. Upadhyay, et al. [28], a tecnologia RP tornou possível conversão dos ficheiros CAD em protótipos, o que permite a redução de tempo de produção e a realização de testes a vários modelos de uma determinada peça/ferramenta. Esta tecnologia tem-se utilizado em diferentes áreas como na indústria aeroespacial, na medicina e na arquitetura [28]. Os autores explicam que os métodos de fundição por moldação em areia e por cera perdida utilizam tecnologia AM, como por exemplo, SLS, LOM (*Laminated Object Manufacturing*), FFF ou SLA. A tecnologia AM auxilia o processo de produção de modelos de areia, carapaças e conjuntos de montagem completos. Associado à tecnologia AM, M. Upadhyay, et al. apresentam *inkjet printing*, como um processo de produção de moldes de areia para fundição cerâmica e metálica, e moldes poliméricos, os quais tem as seguintes vantagens, excelente relação custo-benefício, torna os métodos de fundição por moldação em areia e por cera perdida mais rápidos, capacidade de trabalho com uma elevada variedade de materiais e processos de pós-tratamento, fácil integração entre os modelos de areia e os canais de distribuição e produção de peças com geometria complexa. A Figura 8 mostra a sequência de etapas do processo de produção por *inkjet printing*.

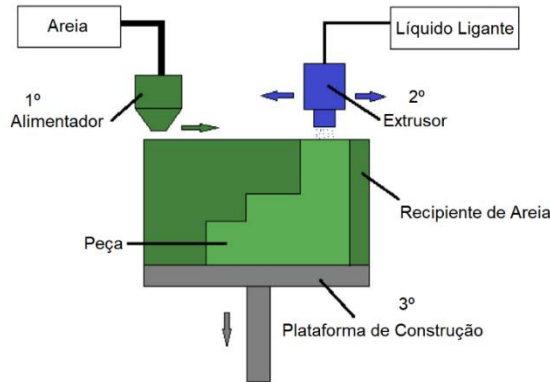


Figura 8 – Processo de produção por *inkjet printing*.
Adaptada M. Upadhyay [28].

Sobre as propriedades e o efeito destas na fundição metálica, os autores explicam que as propriedades de moldes de areia criados por impressão 3D são monitorizadas por vários fatores durante a impressão ou durante os ciclos de cura. Estas são influenciadas pelas características da areia, pela concentração e o tipo de líquido ligante e de ativador, pela velocidade de reposição do pó, pela orientação da construção no interior do recipiente de areia e, em particular, a espessura da camada, que foi verificado que diminuindo este parâmetro e aumentando a saturação do líquido ligante tem como consequência o aumento da resistência à tração, no entanto, a qualidade da superfície diminui [28].

P. A. Thomas, et al. [29] tem como objetivo elaborar um estado de arte sobre a relação entre os processos *Rapid Prototyping*, *Rapid Tooling* e *Rapid Casting* e a aplicabilidade dos mesmos. Primeiramente caracterizam RP como uma ferramenta que reduz o tempo de *design* do produto e correlaciona o *design* do produto com o *marketing*, o planeamento de processo e a produção, visto que a tecnologia RP tem como função tornar algo projetado em protótipos, peças funcionais ou ferramentas [29]. Segundo os autores, *Rapid Tooling* consiste numa das aplicações de RP e tem como função produzir moldes para o fabrico de ferramentas rapidamente através de processos aditivos, subtrativos (remoção de material) ou padronizados. O conceito de RT é dividido em *Direct Tooling*, consiste na produção direta de moldes, “*inserts*” e componentes de suporte proveniente de RP; e *Indirect Tooling* consiste na produção de matrizes resultante da impressão 3D. As tecnologias associadas ao *Direct Tooling* são, por exemplo, a ferramentaria direta AIM (*Accurate Injection Moulding*), SLS RapidSteel e a sinterização metálica a *laser*; enquanto que as tecnologias associadas ao *Indirect Tooling* são, por exemplo, os moldes de silicone RTV (*Room Temperature Vulcanizing*), a ferramentaria de resina *epoxy* fundida e o processo de solidificação rápida [29]. *Rapid Casting* caracteriza-se por fundição auxiliada por RP e tem como função produzir peças favorecendo a escolha de materiais. O conceito *Direct Tooling* associado a *Rapid Casting* classifica-se de acordo com o material utilizado. Os processos de produção de ferramentas/matrizes, fundição com areia e fundição com cera perdida, estão associados ao conceito *Indirect Tooling* e este relacionado com *Rapid Casting* [29]. P. A. Thomas, et al.

apresentaram um caso estudo relacionado com *Rapid Casting* e teve como objetivo comparar a produção de lâminas de turbina pelo método convencional de fundição por cera perdida e por *Rapid Casting*. O estudo consistiu em relacionar o tempo de produção de cada método. O método de *Rapid Casting* teve as seguintes etapas, o desenvolvimento do protótipo das lâminas da turbina em CAD, a produção do protótipo em resina por estereolitografia, o preenchimento do protótipo com gel (*Gel Casting*), a sinterização do conjunto protótipo e gel e a obtenção do molde das lâminas da turbina. O tempo total de produção, pelo método convencional de fundição por cera perdida, foi 170 dias. Enquanto que o tempo total de produção, pelo método *Rapid Casting*, foi 24,5 dias. Os autores concluíram que a produção de lâminas de turbina pelo método *Rapid Casting* foi mais rápida [29].

2.4. Materiais para impressão pelo método FFF adequados para *tooling*

Segundo H. Li et al. [11], as vantagens principais da tecnologia FFF são a redução de custos e de tempos de produção, sem influenciar a qualidade e a repetibilidade dos processos produtivos. Em relação aos polímeros termoplásticos, como por exemplo ABS, PC, ULTEM e PPSF, os investigadores consideram-nos como muito favoráveis para *tooling* na produção de materiais compósitos, de matrizes para estampagem de chapa metálica e, especificamente, na produção por impressão 3D de peças funcionais em ULTEM 9085. Segundo H. Li et al. [11], o material polimérico ULTEM 9085 tem as seguintes características, a elevada resistência mecânica, a elevada resistência à deformação a altas temperaturas e a elevada resistência ao fogo [11].

H. Li et al. [11] realizaram um estudo com o objetivo de diminuir a deformação das ferramentas produzidas em ULTEM 9085 por impressão 3D devido à expansão térmica provocada pelas temperaturas elevadas do processo de *Vacuum Assisted Resin Transfer Molding* (VARTM). Assim, os investigadores utilizaram provetes cilíndricos produzidos em ULTEM 9085 na impressora Stratasys Fortus 400mc, para aplicar no ensaio de compressão a temperatura ambiente até a temperaturas elevadas e para verificar a variação da expansão térmica durante o tratamento térmico incluído no processo de VARTM. Os investigadores dividiram as curvas apresentadas na Figura 9 (a) em fases sendo a fase “A” correspondente ao comportamento elástico linear, a fase “B” correspondente ao comportamento não linear da relação tensão/extensão, a fase “C” correspondente ao início da deformação do provete, a fase “D” correspondente à deformação heterogénea, mas mais pronunciada (Figura 9 (a)). Sobre a relação da variação da tensão de cedência e do coeficiente de elasticidade com a variação da temperatura, os autores do estudo observaram que estes parâmetros diminuem conforme a temperatura aumenta (Figura 9 (b)) [11].

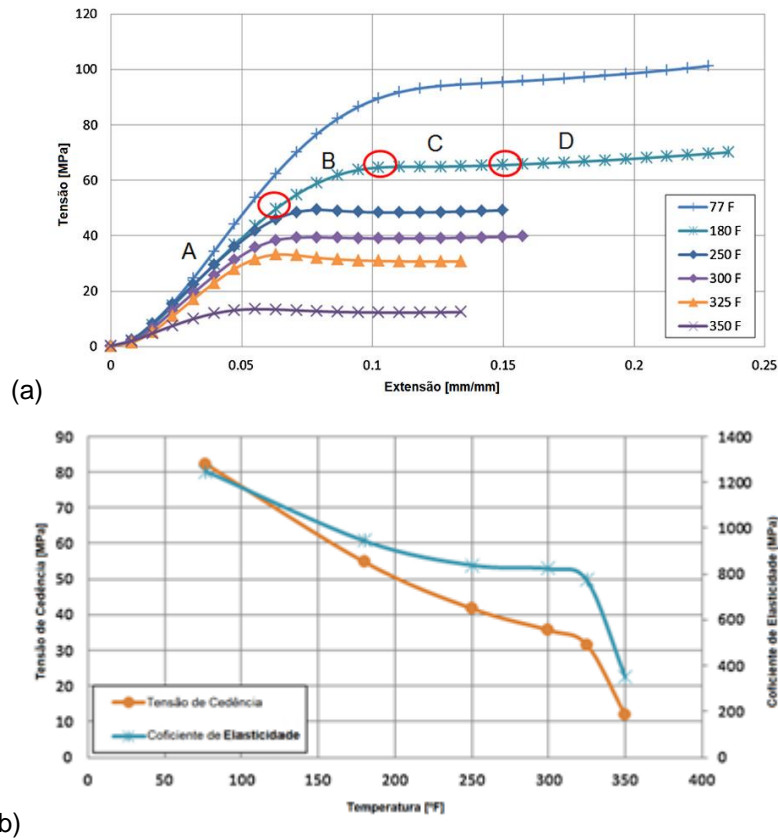


Figura 9 – Resultados dos ensaios de compressão.
 (a) – Tensão vs. Extensão; (b) – Tensão de Cedência/Coeficiente de Elasticidade vs Temperatura
 Adaptada de H. Li et al. [11].

A distribuição de tensões e de temperatura na ferramenta foi analisada com recurso a dois modelos diferentes, um modelo com uma estrutura sólida e o outro com uma estrutura interior com espaços vazios (Figura 10 (b)). Através do *software*, foi realizada uma simulação dos modelos sujeitos a uma aplicação de carga e a um tratamento térmico, em que o ciclo de temperatura se apresenta na Figura 11. H. Li et al. [11] observaram que a tensão máxima de 1,7 MPa ocorreu aos 420 minutos e quando o modelo de estrutura sólida atingiu a temperatura de 126 °F, enquanto que a tensão máxima de 2,5 MPa ocorreu aos 400 minutos e quando o modelo de estrutura interior com espaços vazios atingiu a temperatura de 140 °F [11].

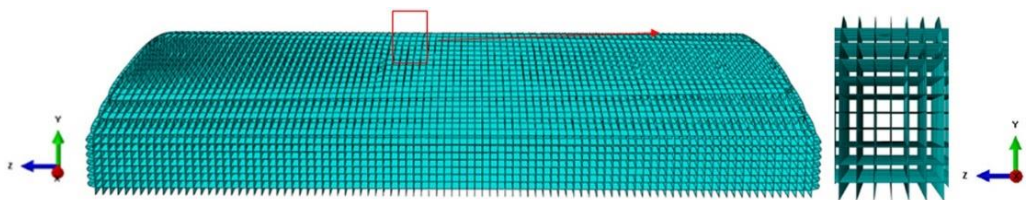


Figura 10 – (a) - Modelo de estrutura sólida da ferramenta; (b) – Estrutura do interior do segundo modelo CAD da ferramenta.
 Adaptada de H. Li et al. [11].

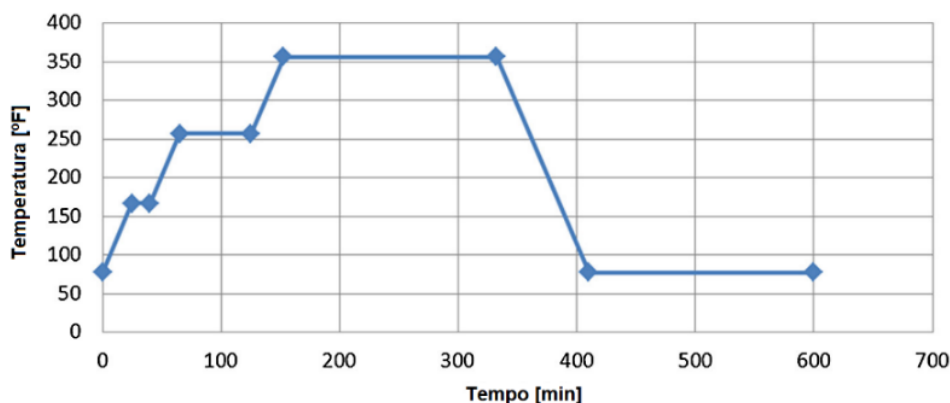


Figura 11 – Variação da temperatura ao longo do tempo do processo de cura da ferramenta a produzir em ULTEM 9085.
Adaptada de H. Li et *al.* [11].

As conclusões do estudo realizado por H. Li et *al.* [11] são que a ferramenta com a estrutura com espaços vazios possui menor custos de produção e deformação durante o ciclo do tratamento térmico comparando com a ferramenta com a estrutura sólida, assim a produção da peça ocorre sem defeitos [11].

Segundo P. Simpson et *al.* [30], a injeção plástica utiliza, como ferramentas, os moldes produzidos em materiais metálicos, como o aço e o alumínio, o que leva a elevados custos e tempos de produção das ferramentas. Os investigadores propõem o fabrico aditivo com a tecnologia apropriada para o fabrico de protótipos ou para a produção em baixa quantidade (produção de 10 a 500 peças) não comprometendo a qualidade das ferramentas. P. Simpson et *al.* [30] identificam, como constringimentos da tecnologia fabrico aditivo, o facto da rugosidade da superfície das peças produzidas ser elevada, por isso há a necessidade de aumentar as forças de extração (peça/ferramenta) e por consequência é inevitável os ajustes dos parâmetros dos processos de forma a diminuir o risco de danificar a peça final ou a ferramenta. Os investigadores apresentam uma diferença importante entre a injeção plástica com a recurso as ferramentas produzidas em metal ou em material polimérico, sendo a condutividade térmica mais elevada nas ferramentas em metal (Tabela 6) [30]. Então é necessário que as variáveis tempo de ciclo, temperatura da ferramenta e pressão de injeção de material sejam ajustadas de modo a permitir que fases do processo de injeção sejam realizadas com sucesso [30].

Tabela 6 – Propriedades térmicas de materiais para ferramentas aplicadas na injeção plástica.
Adaptada de P. Simpson et al. [30].

Material	Condutividade térmica [W/m-K]	Temperatura de deflexão térmica (°C @ 0,45 MPa)
Aço P20	29 - 34	-
ULTEM 1010	0,22	207
FullCure 720	0,178 - 0,187	48
Digital ABS	0,3	58 - 68

A fase experimental desenvolvida por P. Simpson et al. [30] consistiu em produzir as ferramentas de teste em aço P20 e nos polímeros ULTEM 1010, Fullcure 720 e Digital ABS, visto que estes possuem uma elevada temperatura de deflexão térmica. Os autores do estudo consideraram o ULTEM 1010 como um polímero com uma elevada resistência química e a temperaturas altas e uma elevada resistência à tração, assim pretendem verificar se a tecnologia FFF é adequada para a produção de ferramentas para a injeção plástica. Os materiais utilizados para a produção das peças foram o POM (*Polyoxymethylene*), o PC e o PP [30].

A primeira análise consistiu em comparar as peças resultantes do processo de injeção plástica, avaliando as superfícies das peças com o objetivo de ter uma perceção sobre o tipo de acabamento superficial obtido através da tecnologia AM. Depois foi analisada a taxa de contração com o auxílio a instrumentos medição como o paquímetro (Figura 12). Os investigadores verificaram que as peças em PC produzidas pelas ferramentas de Fullcure 720 e ULTEM 1010 não estavam conformes, devido à ejeção do polímero PC a uma temperatura excessivamente elevada para a capacidade térmica das ferramentas, assim a ferramenta fundiu com a peça e fraturou devido à aplicação da força de ejeção. Nos ensaios de flexão, observou-se que os valores do pico de carga aplicada e da dureza das ferramentas produzidas em ULTEM 1010 foram próximos dos valores relativos ao aço P20 [30].

A conclusão do estudo realizado por P. Simpson et al. é o facto das ferramentas produzidas através da tecnologia AM diminuir os custos e os tempos de produção de peças, mesmo para a produção de protótipos ou pequeno lote de peças, principalmente substituindo as ferramentas de fabrico de aço P20 pelo material polimérico ULTEM 1010 [30].

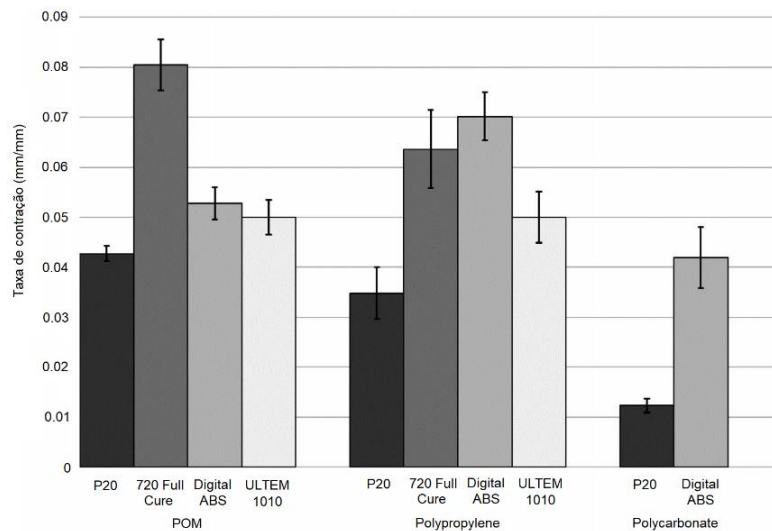


Figura 12 – Taxa de contração de acordo com os materiais das ferramentas e das peças produzidas por injeção plástica.
Adaptada de P. Simpson et al. [30].

Segundo V. G. Zaragoza et al. [31], de modo a responder à elevada procura do mercado pela produção personalizada através de uma fabricação cada vez mais digital, a indústria recorre à tecnologia impressão 3D nos processos produtivos, sendo esta uma tecnologia integrada no fabrico aditivo. Os autores apontam o elevado custo das ferramentas utilizadas na indústria de quinagem de chapa metálica e, conseqüentemente, o limite do volume de produção de médio a alto como as principais características desta tecnologia [31].

V. G. Zaragoza et al. [31] realizaram um estudo com objetivo de comparar a estética das faces das chapas e os erros entre os ângulos medidos e os ângulos nominais, após a quinagem da chapa, proveniente da utilização de vários “*inserts*” produzidos pelas tecnologias maquinação, injeção plástica e impressão 3D; comparar o custo de compra dos materiais e o custo produção dos “*inserts*” e comparar o tempo de vida útil estimado das ferramentas.

Os investigadores construíram dois tipos de ferramentas a aplicar no processo de quinagem de chapa metálica, a primeira foi desenvolvida totalmente em aço C40 e a outra ferramenta com uma parte metálica e uma parte polimérica. A parte metálica consiste numa matriz padronizada (Figura 13) onde se introduz a parte polimérica, esta consiste em vários “*inserts*” com diferentes perfis de seção e diferentes materiais poliméricos conforme as tecnologias de produção (Figura 14). Os investigadores produziram os “*inserts*” em poliuretano e em poliuretano reforçado com fibra de vidro através da maquinação, o *insert* em nylon PA6 através da injeção plástica e o *insert* em policarbonato através da impressão 3D [31]. Os ensaios de quinagem foram realizados em chapas dos metais, alumínio Al1050, aço Fe37 e aço A1008 CR, com as espessuras 0,7 mm, 0,8 mm, 1 mm, 1,5 mm e 2 mm.

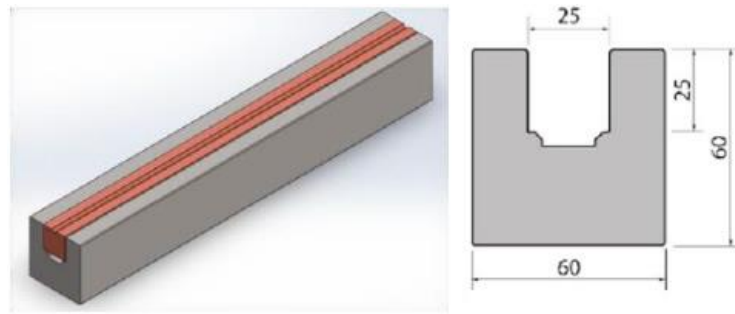


Figura 13 – Perfil da matriz da ferramenta.
Adaptada de V. G. Zaragoza et al. [31].

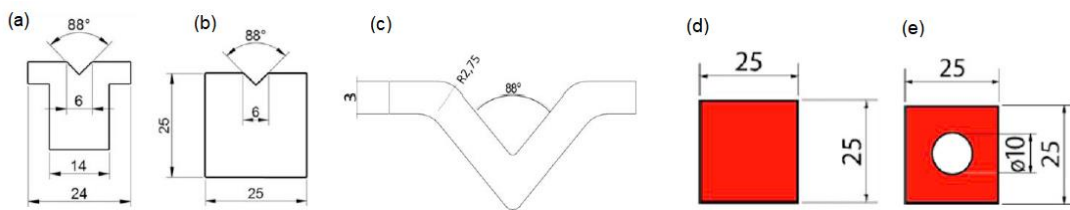


Figura 14 – Perfis dos “inserts” produzidos nos diferentes materiais:
(a) Perfil da seção do “insert” em nylon; (b) Perfil da seção do “insert” em poliuretano; (c) Perfil da seção do “insert” em policarbonato; (d) e (e) Perfis da seção dos “inserts” em borracha.
Adaptada de V. G. Zaragoza et al. [31].

As faces das chapas quinadas na ferramenta totalmente em aço C40 apresentaram alguns riscos na área de contato da ferramenta com a chapa na zona de quinagem, como quando utilizados os “inserts” em nylon. Enquanto que a utilização dos “inserts” em poliuretano e em borracha não causou nenhum desgaste, como marcas ou riscos, na superfície das chapas. Segundo V. G. Zaragoza et al. [31], o custo das ferramentas metálicas e das poliméricas está diretamente relacionado com o número de ferramentas metálicas ou poliméricas produzidas. Interpretando a Figura 15, os autores concluem que, devido ao facto que indústria produz pequenos lotes de peças através da quinagem, as ferramentas totalmente metálicas tornam-se desadequadas por terem um elevado custo de produção e por limitarem o número de aplicações possíveis. Assim como uma solução para redução dos custos, V. G. Zaragoza et al. [31] sugerem que a ferramenta seja desenvolvida com uma matriz metálica e um *insert* polimérico. O estudo sobre o tempo de vida útil da ferramenta consistiu em realizar um conjunto de 50 ensaios experimentais de quinagem e medir os ângulos obtidos. Os investigadores utilizaram o *insert* concebido em policarbonato por impressão 3D e a chapa de alumínio com a espessura de 1,5 mm. Os resultados dos ensaios experimentais mostraram-se com elevada variabilidade e um ligeiro aumento do ângulo de quinagem tendência por cada chapa submetida à quinagem (Figura 16). Segundo a análise de resultados, V. G. Zaragoza et al. [31] reconhecem as ferramentas desenvolvidas aptas para trabalhos que exigem baixas tensões aplicadas e, conseqüentemente, o tempo de vida útil das ferramentas torna-se suficiente conforme a quantidade dos lotes de peças a produzir normalmente pela indústria de quinagem.

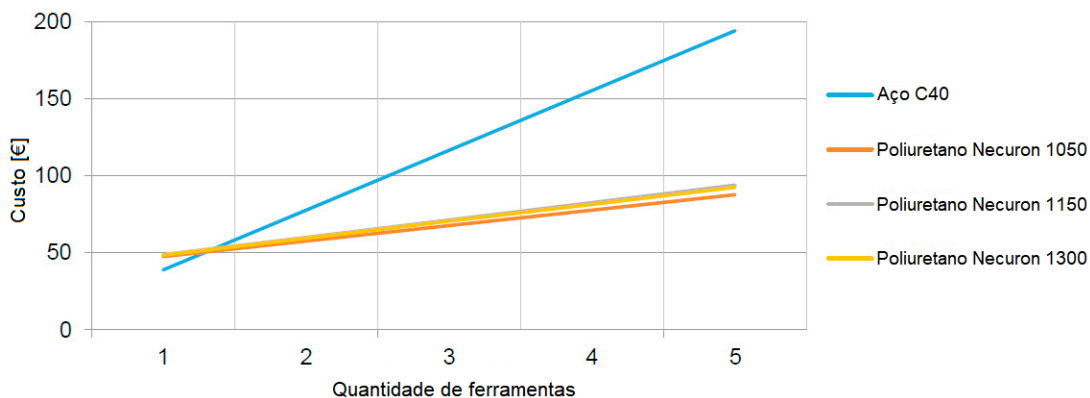


Figura 15 – Gráfico da comparação dos custos das ferramentas metálicas e das poliméricas (*rapid tooling*).
Adaptada de V. G. Zaragoza et al. [31].

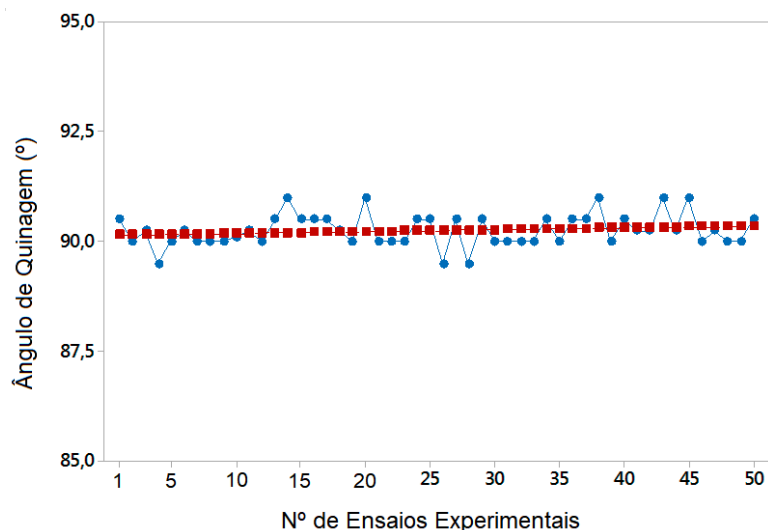


Figura 16 – Resultados da medição dos ângulos de quinagem.
Adaptada de V. G. Zaragoza et al. [31].

2.5. Precisões dimensionais e geométricas

Segundo P. Pombinha, et al. [32], definem a tecnologia FFF como um processo produtivo inserido no fabrico aditivo e tem início na realização de um modelo CAD em 3D de um determinado objeto que é convertido para um ficheiro STL, antes da impressão, através de um *software* onde são definidas as especificações relacionadas com a impressão, como a espessura da camada, a densidade do preenchimento, a velocidade de impressão ou a espessura das superfícies [32], [33]. Os autores caracterizam as discrepâncias como um problema recorrente na impressão 3D. As discrepâncias entre o modelo CAD em 3D e o objeto resultante da impressão ocorrem após a conversão ficheiro STL (*Surface Tessellation Language*), no *software* onde são definidas as especificações relacionadas com a impressão e no decorrer da impressão do objeto.

Os autores realizaram um estudo com o objetivo de analisar a variação das discrepâncias geométricas alterando a densidade do preenchimento (30% e 50%) e a espessura da camada (0,1 mm, 0,125 mm e 0,2 mm). Para o desenvolvimento do estudo foi utilizada uma impressora 3D *Markforged Mark Two*, o *nylon* como material de impressão e uma Máquina de Medição por Coordenadas (CMM). Primeiramente, os autores produziram um modelo CAD (Figura 17) constituído por elementos geométricos que permitem a medição do rectilismo e da angularidade nos eixos x e y da impressora 3D, e a avaliação da planeza das superfícies nos planos xy, zx e zy. O modelo CAD convertido em STL, no *software*, com as características, padrão triangular de preenchimento; quatro camadas no topo e no fundo e duas camadas nas superfícies exteriores [32]. Após a definição de todos os parâmetros relacionados com a realização dos ensaios, obteve-se 18 amostras para analisar. Os resultados consistem no erro de tolerância entre o modelo CAD e os dados obtidos através da CMM, estes são apresentados na Figura 18.

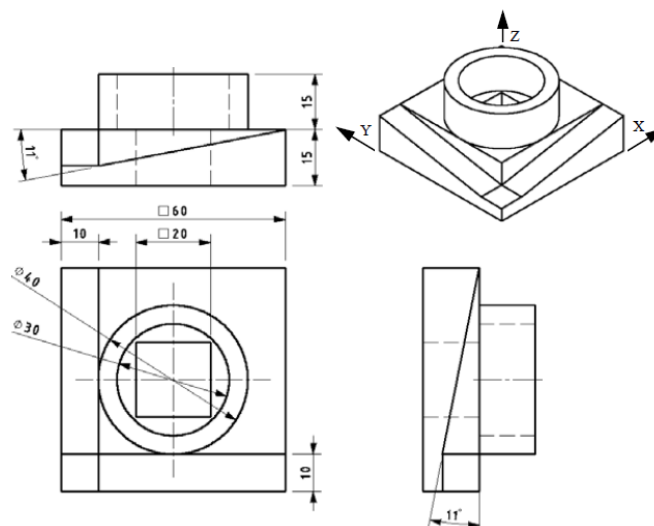


Figura 17 – Desenhos 2D cotados e vista isométrica do modelo CAD. Dimensões em milímetros [32].

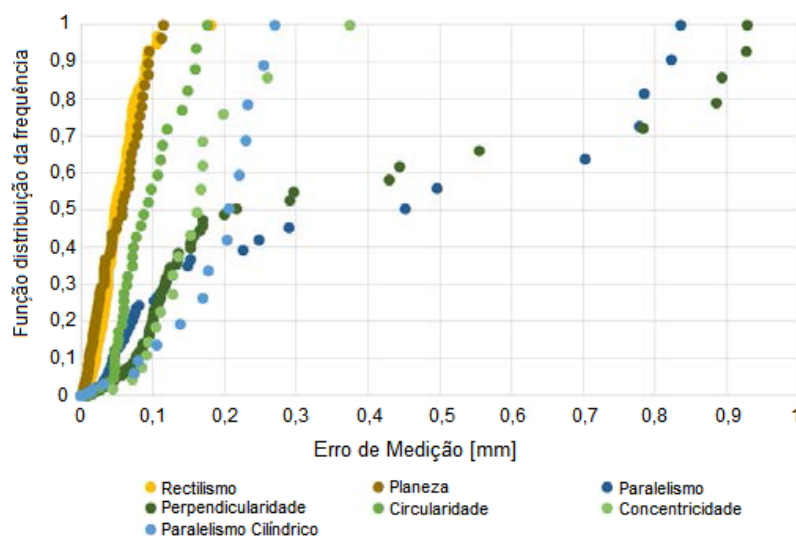


Figura 18 – Tolerância geométrica para cada conjunto de amostras. Função distribuição da frequência vs. valores do erro da tolerância.
Adaptada de P. Pombinha, et al. [32].

Os autores analisaram os resultados obtidos (Figura 18) e verificaram que os tipos de tolerância geométrica tomaram valores diferentes: os menores valores de erro correspondem ao rectilismo e à planeza, enquanto que os valores de erro mais elevados correspondem ao paralelismo e à perpendicularidade [32]. O objetivo do estudo realizado por P. Pombinha, et al. [32] foi verificar a influência da espessura de camada e a densidade de preenchimento na produção de um modelo CAD em nylon através de uma impressora 3D FFF. O modelo CAD foi desenvolvido com elementos geométricos que permitem a medição das tolerâncias geométricas. Os autores consideram que os resultados devem-se a deformações por variações térmicas, a vibrações ou a erros de posicionamento da cabeça de impressão.

Segundo P. Minetola et al. [34], as peças poliméricas são produzidas sem necessidade de ajustes relativos às tolerâncias dimensionais e geométricas de modo a corresponder ao *design* pretendido. As etapas de pós-produção, como a pintura, são apenas para melhorar a parte estética. Assim, a análise da precisão dimensional do processo de produção por AM e do processo de produção convencional é extremamente importante [34]. Os autores explicam que devido à inexistência de normas ou diretrizes sobre o procedimento de teste de desempenho nas máquinas de RP (Máquinas CNC ou Impressoras 3D), o desempenho é classificado a partir de uma comparação tendo em conta a precisão dimensional de peças padrão [34].

P. Minetola et al. [34] citaram o desenvolvimento das peças padrão com diferentes geometrias e formas realizado por alguns investigadores: Gargulio (1992) apresentou uma peça padrão quadrada para analisar a precisão do plano XY de uma máquina SLA; Ippolito usou o modelo da peça padrão do investigador anterior para avaliar a precisão em máquinas das tecnologias SLA, SGC (*Solid Ground Curing*), SLS, FDM e LOM; Cruz Sanchez et al. (2014) sugeriu um protocolo experimental normalizado para a qualificar a precisão dimensional de peças padrão de

impressoras FDM *open source* utilizando uma versão diferente do modelo de NIST (*National Institute of Standards and Technology*); em 2015, P. Minetola et al. [34] desenvolveram uma nova peça padrão para caracterizar a precisão dimensional nas máquinas AM para vários intervalos de dimensões ISO até 120 mm; recentemente, Aguilar-Duque et al. produziram 5 novas peças padrão com o objetivo de implementar no processo de melhoria da precisão de sistemas FFF [34].

P. Minetola et al. [34] desenvolveram um estudo sobre a precisão dimensional na produção de peças padrão de materiais poliméricos em 3 sistemas AM. Estes são constituídos pelas impressoras 3D, a Ultimaker 2, composta por uma estrutura de movimentação cartesiana, uma cama quente com uma área de impressão de 223 mm x 223 mm e a precisão de posição nos eixos X e Y é 12,5 µm e 5 µm no eixo Z; a EOS Formiga Velocis produz através da tecnologia SLS, tem um volume de construção de 250 mm x 250 mm x 330 mm e a cama quente e a câmara de construção atingem, respetivamente, 155 °C e 170°C, o que permite a diminuição da contração do material durante o processo de produção e a Arburg freeformer produz através do processo APF (*Arburg Plastic Freeforming*), ou seja, o polímero, em forma de *pellets*, é fundido e depositado no prato de impressão em gotas produzindo a peça camada a camada. A impressora 3D tem um volume de trabalho de 135 mm x 250 mm x 230 mm e a temperatura máxima da cama quente e do bico extrusor é, respetivamente, 100 °C e 300 °C.

Segundo B. S. Rupal et al. [35], a tecnologia de fabrico aditivo tem uma elevada utilidade para as indústrias e empresas de produção de protótipos, modelos físicos e componentes funcionais, devido aos baixos custos e tempos de produção. Verifica-se também que a partir desta tecnologia é possível conceber componentes com formas geométricas complexas [35]. B. S. Rupal et al. [35] apresentaram um estudo de revisão sobre a modelação e a minimização de discrepâncias nas formas e análise de tolerâncias geométricas. Primeiramente citaram Moroni et al., que apresentam um método que consiste numa análise das configurações STL e tem como objetivo estimar as discrepâncias de um componente produzido por FFF através do cálculo erro volumétrico. De seguida, citaram Shahrain et al. que analisaram o efeito de 13 parâmetros relacionados com as características das tolerâncias dimensionais e geométricas de FFF e concluíram que os parâmetros que mais influenciam as tolerâncias dimensionais e geométricas são a temperatura de extrusão, a densidade do preenchimento e a orientação da impressão [35]. O objetivo do estudo, realizado por B. S. Rupal et al. [35], foi pesquisar os efeitos da amplitude do passo do motor passo-a-passo nas tolerâncias dimensionais e geométricas. O estudo experimental consistiu em verificar as tolerâncias dimensionais e geométricas de peças produzidas por FFF garantindo a montagem dessas peças. Os investigadores começaram por desenvolver duas peças padrão de forma cilíndrica, com objetivo de analisar o efeito da triangulação, na conversão do modelo CAD para o formato STL, e dos passos do motor responsável pelo movimento da cabeça de impressão. As peças padrão consistiram num pino e num elemento com um furo passante (Figura 19).

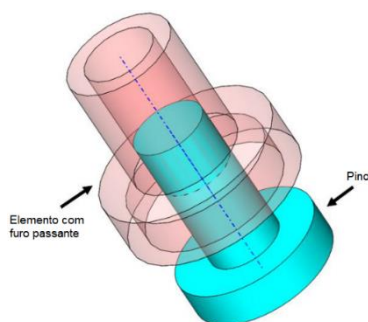


Figura 19 – Peças padrão em condição de montagem.
Adaptada de B. S. Rupal et al. [35].

O método de planeamento de experiências consistiu numa tabela ortogonal Taguchi L9, garantindo que seria realizado o menor número de experiências. As variáveis de entrada são a dimensão da peça, a qual permite a medição do erro relacionado com a montagem e os desalinhamentos; a configuração STL que consiste na definição da triangulação do modelo CAD, a qual influencia a precisão da geometria da peça; o *microstepping* define o menor incremento do motor, assim, a resolução do movimento e, conseqüentemente, da precisão; a variação de temperatura que altera as propriedades mecânicas, térmicas e da superfície das peças poliméricas. As características, cilindridade, planeza, paralelismo e concentricidade (variáveis de saída), foram analisadas com recurso a uma tabela L9, resultando na impressão de 54 peças padrão garantindo a repetibilidade. O planeamento de Taguchi sugere que as características sejam analisadas através do conceito “Quanto menor melhor”; ou seja, os investigadores determinaram que as variáveis de saída devem ser o menor valor possível. Os parâmetros relacionados com o planeamento de experiências de Taguchi encontram-se na Figura 20. B. S. Rupal et al. [35] atribuíram 3 níveis para cada variável de entrada (Tabela 7). Os resultados mostram que o material polimérico e a dimensão da peça têm um efeito elevado nas variáveis cilindridade e concentricidade, ao que se deve à variação da dimensão e ao efeito da resolução do motor responsável pelo movimento na geometria da peça. O objetivo do planeamento de experiências de Taguchi prende-se com a determinação das configurações ótimas, assim os investigadores obtiveram configurações ótimas e produziram a Tabela 8 [35]. Através do método de Taguchi para planeamento de experiências, B. S. Rupal et al. [35] concluíram que o *microstepping* interfere nas tolerâncias dimensionais e geométricas e que a qualidade das peças produzidas por FFF aumenta conforme o aumento da dimensão das peças [35].

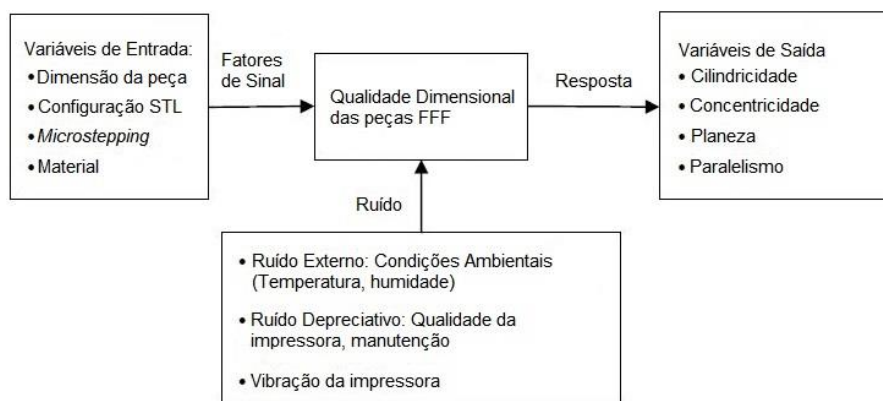


Figura 20 – Relação entre as variáveis de entrada e de saída.
Adaptada de B. S. Rupal et al. [35].

Tabela 7 – Fatores e níveis definidos pelos autores.
Adaptada de B. S. Rupal et al. [35]

Fator	Nível 1	Nível 2	Nível 3
Dimensão da peça	Pequeno 80%	Nominal 100%	Grande 120%
Configuração STL	Grosseira	Fina	Ótima
<i>Microstepping</i>	1/4	1/16	1/4
Material utilizado	ABS	PLA	PLA Ferro Magnético

Tabela 8 – Configurações ótimas para impressão 3D com erros dimensionais e geométricos mínimos.

Adaptada de B. S. Rupal et al. [35].

Variáveis	Dimensão	Configuração STL	<i>Microstepping</i>	Material
Cilindricidade	Grande	Ótima	1/4	ABS
Planeza	Grande	Ótima	1/16	PLA Ferro Magnético
Paralelismo	Grande	Ótima	1/4	PLA Ferro Magnético
Concentricidade	Grande	Ótima	1/16	PLA
FPC Média (<i>Flatness, Parallelism, and Concentricity</i>)	Pequena	Ótima	1/16	PLA Ferro Magnético

2.6. Comparação - Impressão 3D vs. Maquinação Convencional

Atualmente, a indústria está em constante desenvolvimento, sendo um destes exemplos a indústria automóvel onde são desenvolvidos novos modelos e *designs*, levando à necessidade de produzir novas ferramentas ou remodelação das mesmas [36]. Segundo R. Leal, et al. [37], o fabrico aditivo é a tecnologia mais promissora e que satisfaz eficazmente as necessidades existentes no mercado. Os autores afirmam também que a procura de componentes produzidos por estampagem têm aumentado exponencialmente nas últimas décadas [37].

R. Leal, et al. [37] realizaram um estudo sobre o fabrico aditivo e o convencional de ferramentas, na perspetiva dos processos e materiais utilizados. O objetivo do estudo foi averiguar o tempo de fabrico e os custos envolvidos. O estudo consistiu na produção de 5 ferramentas “*inserts*” para estampagem, a aplicar no componente automóvel apresentado na Figura 21, por 3 métodos de fabrico diferentes, a maquinação convencional com aço laminado, produção com modelos de cera perdida e por impressão 3D através da tecnologia DMLS (*Direct Metal Laser Sintering*). Do estudo, compararam os custos e tempos de produção entre os diferentes métodos. O processo de maquinação com aço laminado 1.2358 e 1.2379 consistiu no corte da chapa e na aplicação de um tratamento térmico e um acabamento superficial; o processo de fundição com modelos em cera perdida necessita da produção prévia dos modelos, geralmente esta etapa fica encarregue de terceiros o que aumenta substancialmente o tempo produção da ferramenta e o processo DMLS utiliza uma máquina composta por um sistema dispensador de pó metálico, uma plataforma de construção e um *laser* ótico de alta potência. As ferramentas “*inserts*” foram preparadas por um *software* de impressão específico (Figura 22) e definidos os parâmetros de impressão (Tabela 9). Os acabamentos superficiais são efetuados por operações de pós-processamento, como por exemplo, maquinação mecânica, retificação ou polimento. Ainda após a produção, efetua-se tratamento térmico em vácuo a 490 °C durante 6 horas e arrefecimento ao ar [37].

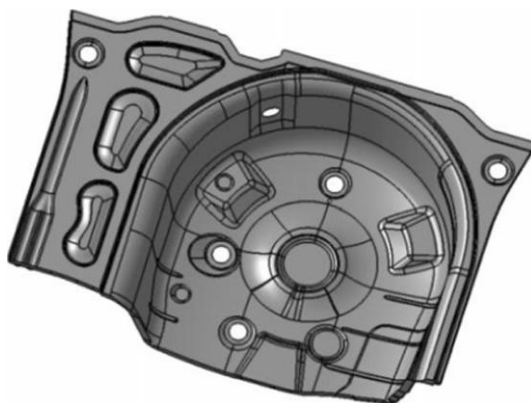


Figura 21 – Componente em estudo [37].

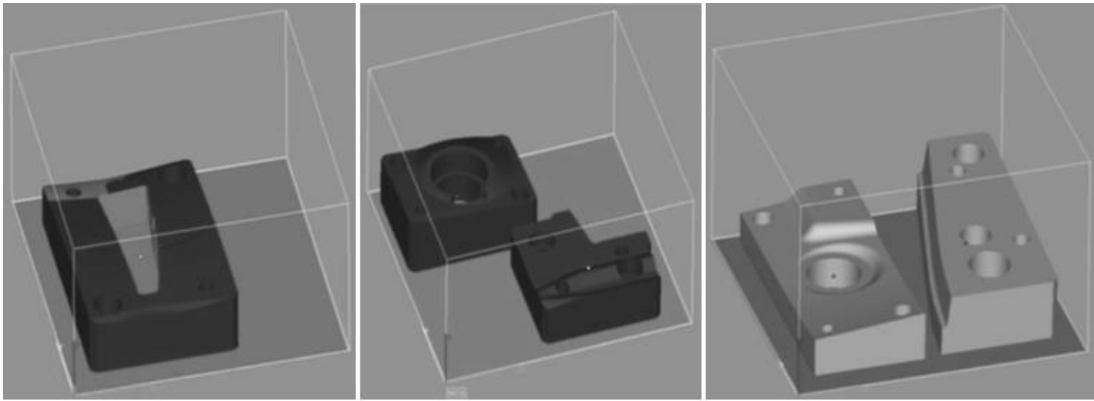


Figura 22 – Orientação e posição dos “inserts” dentro de compartimento de impressão [37].

Tabela 9 – Parâmetros de impressão DMLS.
Adaptada de R. Leal, et al. [37].

Parâmetro	Valor
Velocidade de Impressão [mm ³ /s]	3
Espessura de Camada [μm]	40
Potência do Laser [W]	200

R. Leal, et al. [37] concluíram que a tecnologia com maior custos de produção é o fabrico aditivo, devido ao elevado custo do pó metálico e do equipamento, no entanto, o tempo de produção é consideravelmente mais baixo do que o tempo de produção dos processos convencionais (Figura 23).

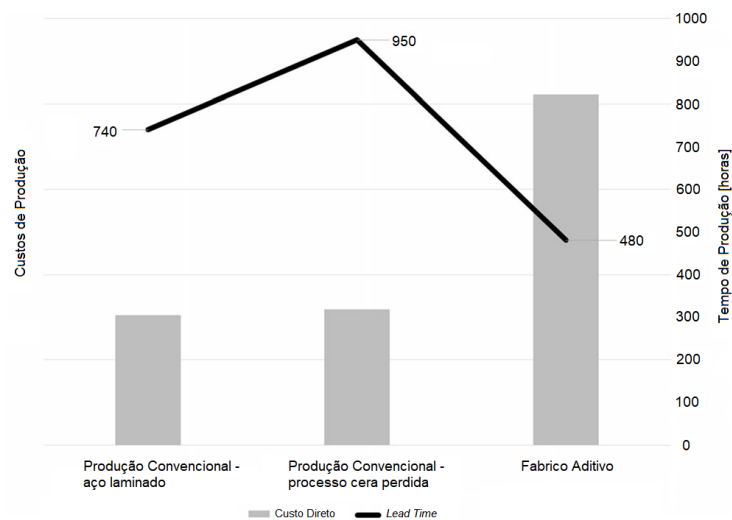


Figura 23 – Comparação dos custos e tempos de produção.
Adaptada de R. Leal, et al. [37].

Devido aos prazos exigidos pela indústria automóvel, o baixo tempo de produção comprovado pelo fabrico aditivo torna este processo bastante vantajoso para a produção automóvel. Comparando o número de operações nos processos fabrico aditivo e fundição com modelos em cera perdida, verificou-se que o fabrico aditivo necessita de menos operações o que diminui o tempo de produção da ferramenta e facilita os processos internos de logística. Pela análise específica dos tempos de produção do processo de maquinação com aço laminado e do processo fabrico aditivo, os autores verificaram que o processo de maquinação com aço laminado é o que apresenta os custos de produção mais baixos mas também o tempo de produção maior [37].

Por fim, os “*inserts*” foram produzidos e testados com sucesso e constatou-se que esta ferramenta, produzida por fabrico aditivo, alcançou desempenhos semelhantes aos mesmos das ferramentas produzidas por métodos convencionais [37].

Segundo R. J. Urbanic et al. [38], o fabrico aditivo divide-se em métodos de produção conforme a matéria-prima esteja sob a forma de pó (SLA), de filamento (FDM) ou líquida (*binder jetting*). As tecnologias integradas no fabrico aditivo têm a capacidade de produzir objetos/peças com geometrias complexas sem a necessidade de ferramentas devido à metodologia de produção camada a camada. O fabrico aditivo apresenta aplicações na área automóvel, aeroespacial, medicina e medicina dentária. Os autores consideram que nos processos AM, dependendo da geometria do objeto a produzir, pode ser necessário adicionar estruturas de suporte na etapa de preparação da produção o que leva a operações após a produção. No caso da produção de peças através da tecnologia SLA, as peças devem ser sujeitas a tratamentos térmicos [38]. Segundo R. J. Urbanic et al. [38], as variáveis relativas ao planeamento da impressão como o volume da peça a produzir, o tipo de material definido para a impressão da peça e da estrutura de suporte e todos os parâmetros de impressão definidos no *software slicer* (velocidades de impressão, temperatura do extrusor e do prato de impressão e espessura da camada) possuem uma elevada influência sobre a necessidade e a metodologia das operações de pós-produção (remoção da estrutura de suporte ou polimento) [38].

O processo de produção de peças por maquinação CNC requer a definição de um conjunto de operações com o objetivo de descrever e planear a transformação da peça desde o início ao fim do processo de maquinação CNC. As principais operações a definir ou a planear são as seguintes [38]:

- Seleção das ferramentas a utilizar em cada operação;
- Definição do percurso de desbaste da ferramenta durante cada operação;
- Definição da forma como a ferramenta ataca o bloco de maquinação e termina o percurso de desbaste em cada operação;
- Definição da quantidade de material a remover a cada passagem pela ferramenta em cada operação;

- Decisão sobre a utilização de líquido de refrigeração;
- Simulação do processo de maquinação de modo a evitar a colisão acidental entre a ferramenta e a bloco de maquinação.

Os autores recolheram toda a informação sobre os processos de produção por impressão 3D e por maquinação CNC, organizaram essa informação e produziram um fluxograma com o objetivo de comparar os dois processos de produção. O fluxograma é apresentado na Figura 24.

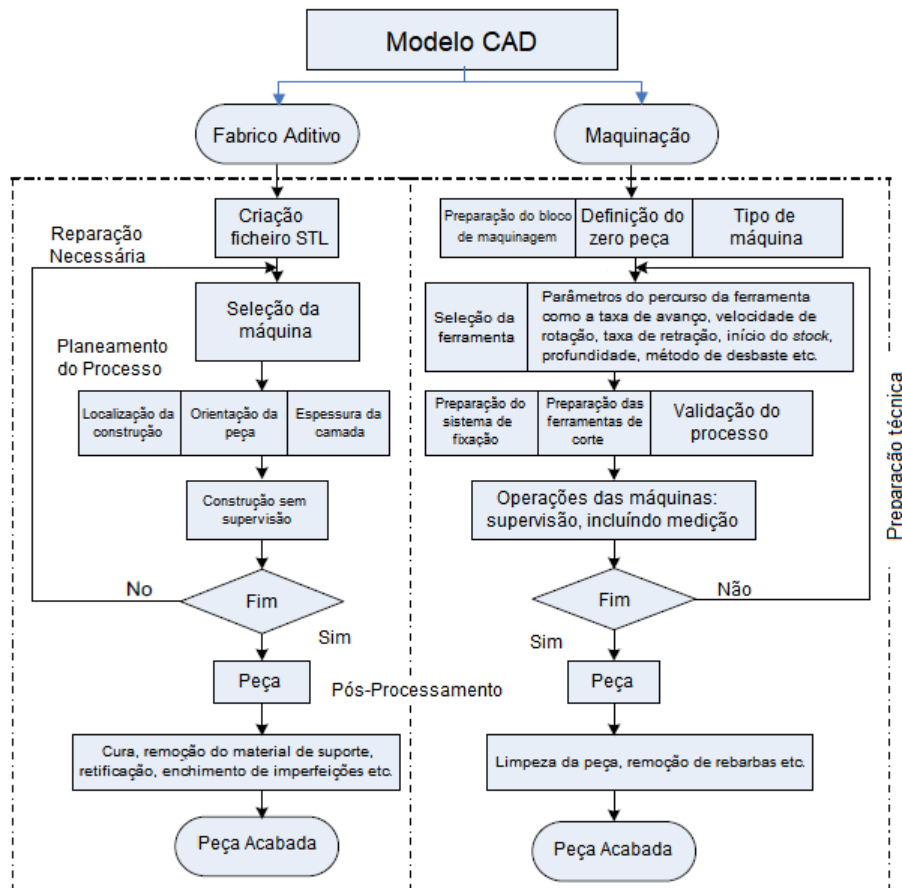


Figura 24 – Comparação dos processos de produção por impressão 3D (esquerda) e por maquinação CNC (direita).

Adaptada de R. J. Urbanic et al. [38].

R. J. Urbanic et al. [38] realizaram uma análise de custo sobre a produção de peças por maquinação CNC e por fabrico aditivo. Primeiramente, os investigadores definiram seis modelos de peças, descreveram todos os elementos de construção das peças (furos, contornos, faces planas e rasgos) e determinaram as medidas e o volume do bruto de maquinação de cada peça. O material utilizado para produção das peças por maquinação CNC e por impressão 3D foi o polímero ABS, enquanto que o modelo CAD nº 6 foi produzido por fundição em molde de areia. Os investigadores mediram o tempo de planeamento do processo e o tempo de trabalho relativo

à maquinação CNC, o tempo de construção relativo à impressão 3D e recolheram os dados sobre o volume de material de construção e de material da estrutura de suporte [38]. Os resultados apresentam-se na Tabela 10 e na Figura 25.

Tabela 10 - Excerto dos resultados relativos à maquinação CNC e à impressão 3D.
Adaptada de R. J. Urbanic et al. [38].

Modelos CAD	Maquinação CNC			FDM		
	Tempo de planeamento de processo	Tempo de trabalho	% de material removido	Tempo de construção [h]	Material de construção [cm ³]	Material da estrutura de suporte [cm ³]
1	35min	2min 50s	51,5	16,08	504	6,7
2	1h 25min	11min 36s	51,1	2	250,9	6,5
3	2h 15min	55min 38s	72,4	13,81	383	45,4
4	3h	1h 21min	47,8	5,53	143,7	52,4
5	8h 55min	2h 26min	75,8	11,51	579,3	23,6

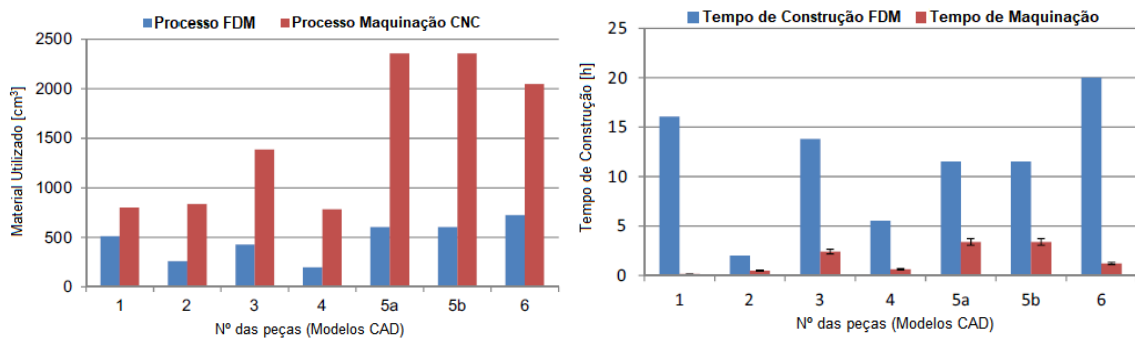


Figura 25 – Comparação do material utilizado e do tempo de construção de cada modelo.
Adaptada de R. J. Urbanic et al. [38].

A comparação do custo de produção do modelo CAD nº 6 através da fundição em moldes de areia e da impressão 3D, considerando o custo de mão de obra e o custo do processo de 65 dólares por hora e o custo do processo de impressão 3D de 7,5 dólares por hora, apresenta-se na Figura 26. Os autores verificaram que o custo de produção por impressão 3D é inferior ao custo de produção por fundição até à produção de seis a sete peças, a partir deste número de peças, o custo de produção por impressão 3D torna-se superior ao custo de produção por fundição. R. J. Urbanic et al. [38] observaram que o processo de produção por fundição, até à produção de seis a sete peças, custa mais cerca de mil dólares do que a produção por impressão 3D, enquanto que para uma produção de peças elevada, o custo de produção por fundição é cerca de quatro mil dólares mais baixo do que o custo de produção por impressão 3D (Figura 26 (b)) [38]. Os autores desenvolveram uma solução que consistiu na maquinação CNC do bloco

de maquinagem produzido por impressão 3D, assim o planeamento do processo, da maquinação, os tempos de *setup* e as dimensões do bloco de maquinagem foram ajustados. A única melhoria do processo de produção verificada pelos autores foi a redução do número de operações de maquinação. A solução apresentou resultados desfavoráveis comparando com o processo de produção utilizando unicamente as tecnologias impressão 3D e maquinação CNC, pelos seguintes motivos [38]:

- O custo do ABS a utilizar na impressão 3D é maior do que custo do ABS a utilizar na maquinação CNC;
- O planeamento das operações de acabamento das peças causa um consumo de tempo adicional;
- A maquinação de alta qualidade da superfície aumenta consideravelmente o tempo total de maquinação.

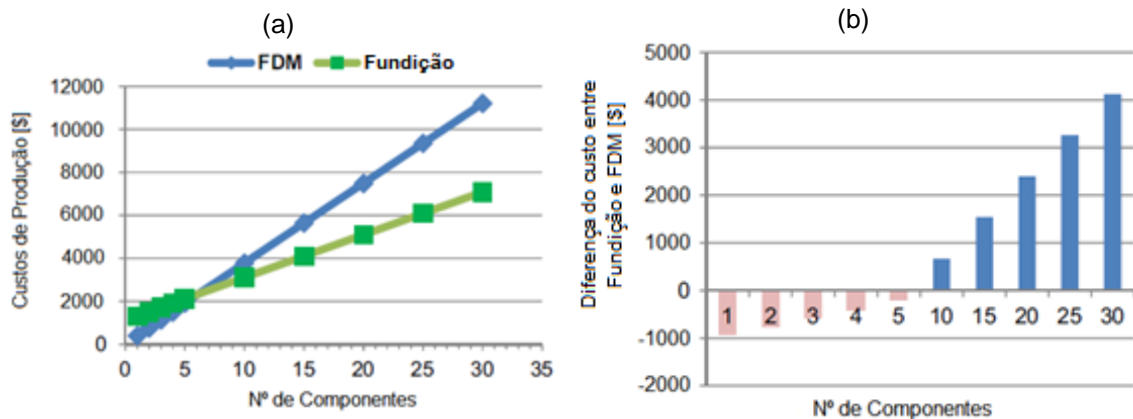


Figura 26 – Análise de custo da produção do modelo CAD nº 6 por fundição e impressão 3D. Adaptada de R. J. Urbanic et al. [38].

Os investigadores criaram ainda outro modelo de grandes dimensões denominado por tampa de ventilação e com as seguintes características elevada dimensão da superfície, baixa espessura da parede e elevado número de furos. O bloco de maquinagem tem dimensões 394 mm de comprimento, 166 mm de largura e 116 mm de altura, ao qual é retirado 96% de material na produção por maquinação CNC. Devido às características deste modelo e os elevados custos de produção por maquinação CNC (Figura 27), o processo de produção mais benéfico é a impressão 3D, mas para um elevado número de peças a produzir (na ordem das 1000 a 5000 peças), os autores sugerem a produção do modelo por moldes.

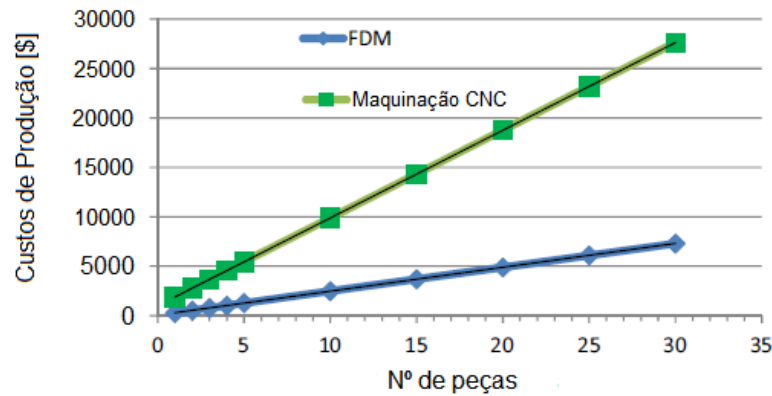


Figura 27 – Comparação do custo de produção da tampa de ventilação através de impressão 3D e maquinação CNC.

Adaptada de R. J. Urbanic et al. [38].

O estudo desenvolvido por R. J. Urbanic et al. [38] teve como objetivo a realização de análise de custo comparativa entre tecnologias de produção, maquinação CNC, impressão 3D e fundição em areia. O estudo do processo de produção através da maquinação mostrou que este método de produção necessita de maior quantidade de matéria-prima e o tempo de construção é menor comparando com o método de impressão 3D. O estudo do processo de produção através da fundição em areia revelou que este método de produção só é viável a partir da 6ª/7ª peça produzida comparando com utilização da tecnologia impressão 3D. R. J. Urbanic et al. [38] produziram mais dois modelos, o primeiro revelou-se desfavorável porque o custo do material aumenta, visto que o ABS para impressão 3D é mais caro, o planeamento das operações de acabamento das peças e maquinação de alta qualidade da superfície aumenta, respetivamente o tempo de planeamento do processo e o tempo total de maquinação; o segundo modelo mostrou-se mais vantajoso quando produzido por impressão 3D, mas a vantagem aumenta quando produzido por moldes, em grandes quantidades. Em relação ao método da análise de custos, os autores concluem que é necessário efetuar uma análise de erros visto que os custos foram obtidos a partir de estimativas. R. J. Urbanic et al. [38] consideram que se a quantidade disponível e o nível de experiência da mão de obra para o desenvolvimento do presente estudo fosse maior, a decisão sobre o processo de produção ótimo seria influenciada [38].

Após a finalização do estudo, R. J. Urbanic et al. [38] concluíram que cada método de produção (maquinação CNC e impressão 3D) só é viável conforme determinados requisitos de produção, e desvantajoso para outros. Assim os autores consideram que a solução mais próxima do ideal seria a combinação dos dois métodos de produção no mesmo projeto de planeamento CAM (*Computer Aided Manufacturing*), ou seja, o processo de produção seria constituído por operações de adição e subtração de material, respetivamente, pela tecnologia impressão 3D e pela maquinação CNC.

As perspectivas futuras para melhoria do estudo desenvolvido pelos autores são as seguintes [38]:

- Produção de modelos para estudo com um design mais complexo, contemplando a facilidade em produção de peças complexas pela tecnologia impressão 3D;
- Ponderação sobre a utilização de materiais mais avançados, como compósitos de ABS reforçado com fibras, compósitos cerâmicos e compósitos formados por partículas metálicas e termoplásticos;
- Consideração sobre a influência da integração da reciclagem dos materiais na análise de custos dos materiais;
- Consideração sobre a combinação dos métodos de produção, fabrico aditivo com compósitos metálicos e maquinação CNC.

2.7. Requisitos para Impressão 3D

Segundo J. M. Chacón et al. [39], a tecnologia FFF é um processo complexo com um elevado número de parâmetros que influenciam a qualidade e o comportamento mecânico das peças produzidas, sendo a combinação desses parâmetros muitas vezes difícil de entender [39], [40]. J. M. Chacón et al. [39] analisaram o desempenho mecânico de provetes produzidos em PLA, consideram os parâmetros de impressão, a espessura de camada, a taxa de fluxo do filamento, o padrão do preenchimento, o espaço vazio entre filamentos na estrutura de preenchimento e a largura do filamento na estrutura de preenchimento. Os resultados consistiram na leitura dos valores da resistência à tração, à flexão e a rigidez, considerando a impressão de provetes em diferentes condições (Figura 28) [39].

Considerando a impressão do provete na vertical (Figura 28 A), os autores observaram que quanto maior a espessura da camada maior a resistência à tração e à flexão. Este efeito deve-se ao facto existir menos camadas ao longo do comprimento do provete, assim o número de camadas unidas entre si diminui, o que levou ao aumento da resistência. Considerando a impressão a partir da face com espessura inferior (Figura 28 B) e a impressão a partir da face com espessura superior (Figura 28 C), os autores observaram que as variações da resistência à tração e à flexão foram consideradas irrelevantes, consoante a espessura de camada [39]. Considerando a impressão do provete na vertical (Figura 28 A), os autores observaram que quanto maior taxa de fluxo do filamento menor a resistência à tração e à flexão. Considerando a impressão a partir da face com espessura inferior (Figura 28 B) e a impressão a partir da face com espessura superior (Figura 28 C), os autores observaram que o efeito da taxa de fluxo do filamento sob a resistência à tração e à flexão foram consideradas irrelevantes [39].

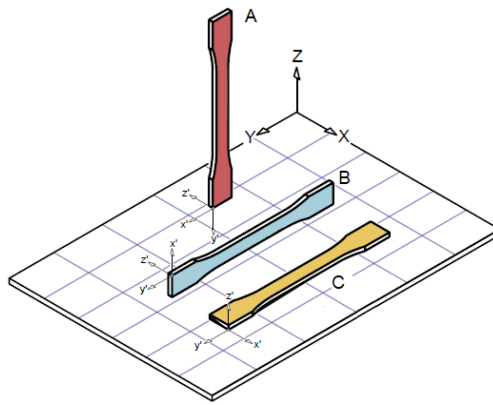


Figura 28 – Orientação dos provetes.

A – Impressão vertical; B – Impressão a partir da face com espessura inferior; C – Impressão a partir da face com espessura superior.
 Adaptada de J. M. Chacón et al. [39].

J. M. Chacón et al. [39] concluíram que o custo de produção está relacionado com a espessura da camada e a taxa de fluxo do filamento. Considerando a orientação da produção da peça em relação aos eixos da máquina, a impressão a partir da face com espessura inferior (B) corresponde a um elevado desempenho do provete quando avaliada a resistência à tração e à flexão. Considerando a variação da espessura de camada, o provete impresso verticalmente (A) corresponde ao aumento da resistência à tração e à flexão; o provete impresso a partir da face com espessura inferior (B) e o provete impresso a partir da face com espessura superior (C) correspondem a variações pouco significativas da resistência à tração e à flexão. Considerando a variação da taxa de fluxo do filamento, o provete impresso verticalmente (A) corresponde diminuição da resistência à tração e à flexão conforme o aumento taxa de fluxo do filamento; o provete impresso a partir da face com espessura inferior (B) e o provete impresso a partir da face com espessura superior (C) mostraram que a variação da taxa de fluxo do filamento não varia a resistência à tração e à flexão [39].

Fizeram ainda algumas considerações importantes para a impressão 3D de peças com boas propriedades mecânicas. A impressão a partir da face com espessura inferior possibilita o desempenho mecânico ótimo considerando a resistência, a rigidez e a ductilidade. As características recomendadas para a impressão vertical e a impressão a partir da face com espessura inferior são a espessura de camada elevada e baixa taxa de fluxo de filamento. As características recomendadas para a impressão a partir da face com espessura superior são a espessura de camada baixa e elevada taxa de fluxo de filamento [39]. A impressão 3D no mínimo tempo, recomendam-se as características elevada espessura de camada e elevada taxa de fluxo de filamento.

Capítulo 3

Projeto de ferramentas por impressão 3D

3.1. Preparação da impressora DeltaIPS para impressão de ferramentas

Verificou-se que a impressora DeltaIPS apresentava alguns desvios dimensionais consideráveis. De forma a resolver estes problemas a impressora DeltaIPS foi revista do ponto de vista de montagem da estrutura (as colunas, chumaceiras, braços e prato de impressão), como medição de todos os componentes constituintes da estrutura, tendo-se também procedido à sua calibração.

Além da impressora DeltaIPS, a impressora Blocks One MKII foi sujeita a um processo de preparação para impressão semelhante ao processo de preparação da impressora DeltaIPS, ou seja, a calibração, a impressão, o controlo dimensional e o respetivo ajuste.

3.1.1. Caso de estudo, impressora DeltaIPS

O projeto de construção da impressora DeltaIPS foi iniciado no ano letivo 2016/2017 com o objetivo de conceber uma máquina capaz de produzir componentes em materiais como o ULTEM 9085. Este material pode ser certificado para utilização em aeronaves.

A impressora DeltaIPS caracteriza-se por ter uma configuração delta linear de grandes dimensões (400 mm de diâmetro por aproximadamente 900 mm de altura), um extrusor com capacidade de atingir 500 °C, um prato de impressão com cama quente que atinge 200 °C, estufa capaz de atingir os 80 °C e um controlador Duet3D com a possibilidade de controlo remoto em rede *wireless* (Figura 29).

Os componentes principais de uma impressora com configuração delta linear são três colunas dispostas, verticalmente, na forma de um triângulo equilátero, três componentes deslizantes acoplados às colunas e três pares de braços que une os componentes deslizantes ao extrusor (Figura 30). O movimento do extrusor depende do deslocamento vertical dos componentes deslizantes, assim o deslocamento vertical provoca o movimento do extrusor no plano XY se os componentes deslizantes se movimentarem de forma assíncrona. Para que o extrusor se movimente ao longo do eixo Z é necessário que os componentes deslizantes se movimentem de forma síncrona [41].



Figura 29 – Impressora DeltaIPS.

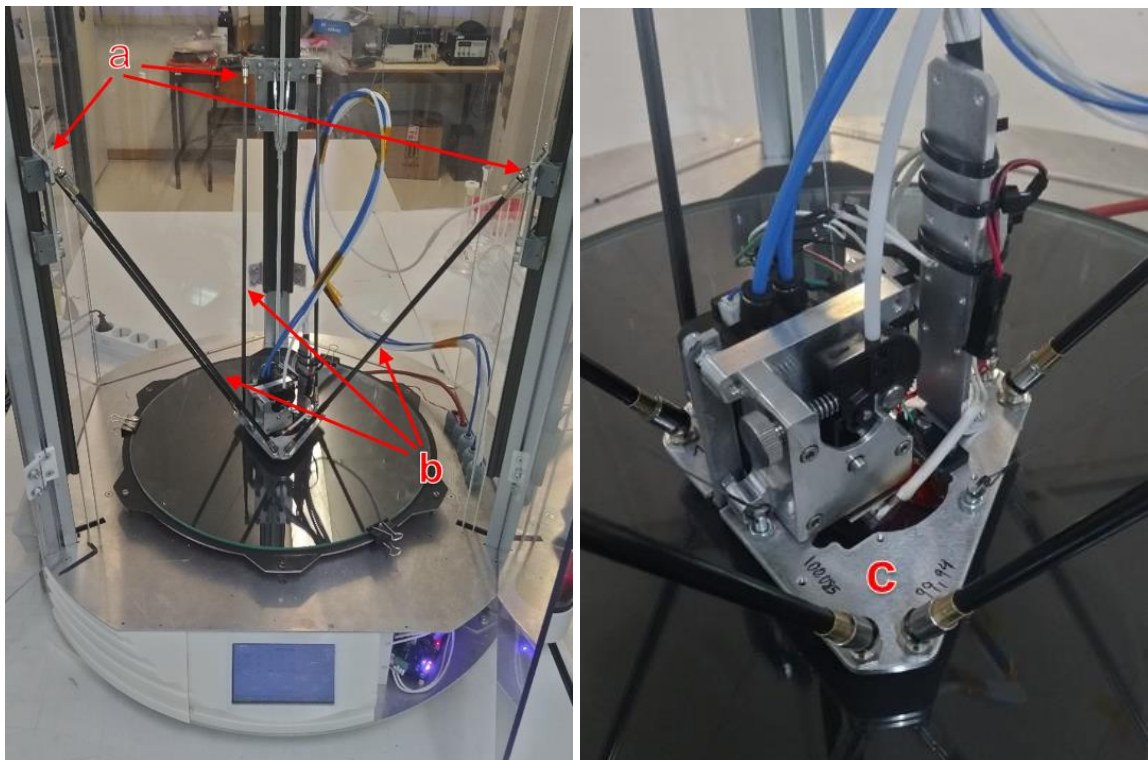


Figura 30 – Alguns componentes da impressora DeltaIPS.
(a) – Componente Deslizante; (b) – Braços; (c) – Extrusor.

3.1.2. Calibração da impressora e aumento de precisão melhorando a montagem da impressora

A montagem da impressora tem de ser rigorosa, caso contrário, inviabiliza a correção matemática do mecanismo a partir do *software*. Assim, é requerido a validação dos seguintes pontos:

- As colunas devem ser paralelas entre si;
- O ângulo entre o prato de impressão e as colunas deve ser igual nas direções X e Y;
- Todos os braços devem ter a mesma dimensão;
- O espaçamento entre as chumaceiras esféricas magnéticas, colocadas nos carrinhos, deve ser igual ao espaçamento entre as chumaceiras esféricas magnéticas colocadas na cabeça de impressão;
- A estrutura de suporte da cabeça de impressão deve permitir o movimento desta por toda a área do prato de impressão;
- As esferas das chumaceiras colocadas em cada carrinho devem ter a mesma altura;
- As uniões não devem ter folga.

O método para avaliar a planeza entre as rótulas, consistiu em assentar um gabarito desenvolvido para o efeito sobre as rótulas, colocar alguma pressão numa das extremidades e verificar se as outras extremidades deixavam de tocar nas rótulas (Figura 31) e o método para avaliar as distâncias entre os centros das rótulas, consistiu em assentar o gabarito sobre as rótulas de forma a que estas ficassem encaixadas nas cavidades semiesféricas sem folgas.



Figura 31 – Modelo utilizado para avaliar a planeza entre as rótulas e as distâncias entre os centros das mesmas.

A etapa seguinte do procedimento, para a calibração da impressora pelo *software*, foi a medição de todos componentes da estrutura e comparar os resultados com o modelo CAD. Esta etapa permitiu a deteção e a respetiva correção de erros no modelo.

A calibração foi executada a partir de um guia, disponibilizado no site de *DUET3D* e consiste numa sequência de comandos a introduzir no controlador.

Inicia-se o processo de calibração através da definição da *trigger height*, ou seja, a distância máxima sobre o eixo Z entre o bico de impressão e o prato de impressão correspondente à altura máxima de impressão. O procedimento consiste nas etapas seguintes:

- Garantir que o bico de impressão não tem filamento que este está a alta temperatura;
- Eliminar qualquer compensação do prato de impressão;
- Enviar o comando M208 S1 Z-3, para ser possível o deslocamento do bico de impressão no eixo Z para próximo do prato de impressão;
- Colocar o bico de impressão para as coordenadas do ponto que se pretende e baixá-lo lentamente até tocar no prato de impressão. Pode ser necessário enviar o comando M564 S0 para permitir o deslocamento abaixo do ponto de origem do eixo Z;
- Enviar o comando G92 Z0 para determinar o novo ponto de origem do eixo Z;
- Enviar o comando G30 S-1 para analisar o prato de impressão sem modificar a posição do ponto de origem do eixo Z;
- Consultar o resultado do comando G30 S-1 no *status* do controlador. O resultado apresentado corresponde à altura máxima de impressão.

A partir dos comandos M665 e M666 é possível conhecer os parâmetros geométricos da impressora calculados pelo controlador:

- L, comprimento diagonal dos braços, medido entre os centros das esferas das chumaceiras;
- R, comprimento projetado na horizontal medido em cada braço quando o conjunto da cabeça de impressão está no centro do prato de impressão (Figura 32);
- H, distância entre o bico de impressão e o prato de impressão quando os carrinhos estão na posição de ativação dos interruptores fim de curso;
- B, distância entre o centro do prato de impressão e a posição máxima no plano XY do bico de impressão;
- X, Y, Z, correções da posição em relação às colunas.

A informação proveniente dos comandos M665 e M666 e o valor da *trigger height* é registada no ficheiro *config.g* armazenado na memória do controlador.

O comando G32 executa uma calibração automática com o objetivo de compensar eventuais erros na altura do prato de impressão. Por fim, envia-se o comando G29 para produzir um mapeamento da altura do prato de impressão em vários pontos e um esquema gráfico com escala de cores representativo do mapeamento (Figura 33).

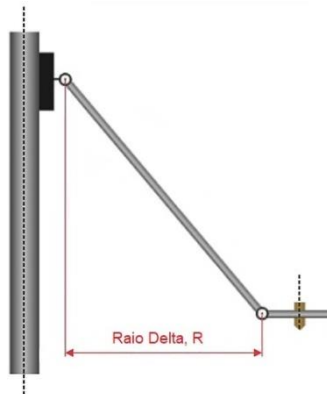


Figura 32 – Representação esquemática do raio Delta (R).
Adaptada de [42].

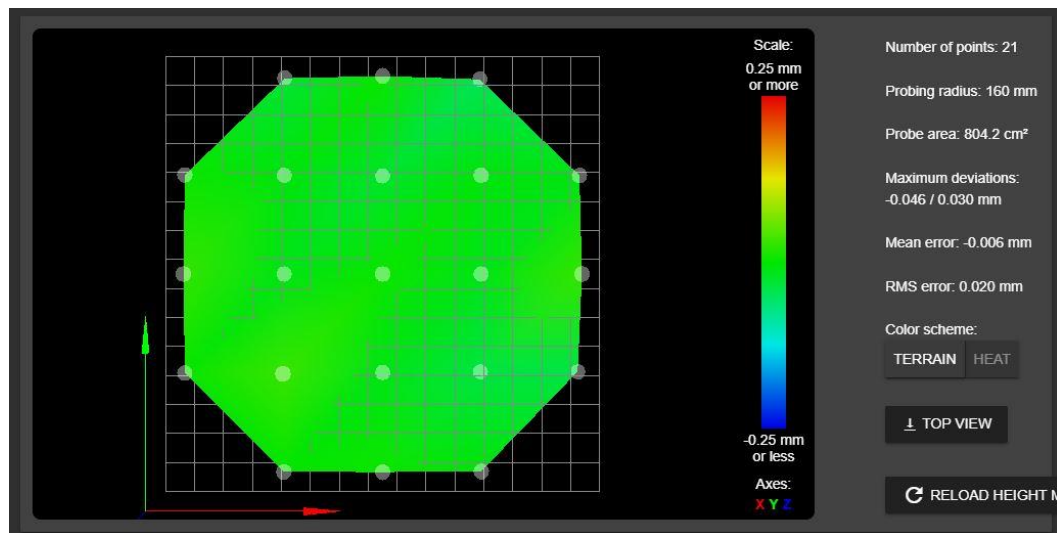


Figura 33 – Exemplo de esquema gráfico com escala de cores representativo do mapeamento altura do prato de impressão.

Elaboração própria através do controlador da impressora DeltaIPS.

3.1.3. Precisões dimensionais medidas

A baixa precisão dimensional relativa à impressão 3D de peças pode causar desvios entre o modelo CAD e a peça produzida, assim é esperado que as dimensões gerais e os diâmetros dos furos das peças tenham uma diferença comparando com o modelo CAD.

A calibração da impressora Blocks One MKII teve como objetivo aumentar a precisão dimensional e foi realizada através do *software* do controlador da própria impressora. Para testar esta calibração foi impresso na impressora Blocks One MKII um modelo em PLA em forma de cruz que permite realizar o controlo dimensional das cotas interiores e exteriores em diferentes zonas da impressora (Figura 34). Após o controlo dimensional do modelo, seguiu-se o ajuste do perfil de impressão com o seguinte procedimento:

- Criação de gráficos a partir das cotas nominais e as cotas reais do modelo;
- Produção das linhas de tendência e as respetivas equações de reta;
- Levantamento do valor obtido do fator de escala pelo declive da reta e do valor da expansão horizontal, correspondente à média dos valores das ordenadas na origem;
- Introdução dos valores, acima descritos, no perfil de impressão.

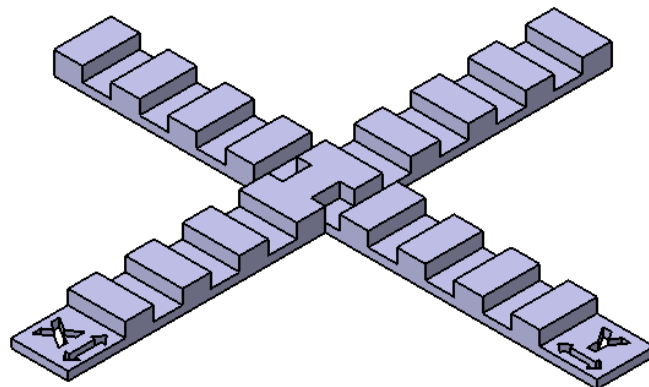


Figura 34 – Modelo produzido para calibração da impressora Blocks One MKII.
Elaboração própria através do CATIA V5.

A calibração da impressora DeltaIPS para o aumento da precisão teve um procedimento semelhante ao da calibração da impressora Blocks One MKII. Foram impressos na impressora DeltaIPS três modelos em forma de cruz que permite realizar o controlo dimensional das cotas interiores e exteriores, em que cada impressão destes foram desfasados 30°, com o objetivo de mapear os desvios entre as cotas nominais e as cotas reais em toda área do prato de impressão. Os resultados provenientes do controlo dimensional realizado aos três modelos encontram-se no ANEXO 1. Após o controlo dimensional do modelo produzido na impressora DeltaIPS, seguiu-se o ajuste do perfil de impressão pelo mesmo método aplicado no ajuste do perfil de impressão da impressora Blocks One MKII.

3.2. Produção de ferramentas para estampagem por prototipagem rápida

O objetivo do estudo apresentado consiste numa comparação do processo de produção de ferramentas para estampagem pelo método convencional atual da Lauak e por impressão 3D.

No capítulo 3.2. é apresentado uma descrição dos dois processos de produção e um trabalho experimental sobre o desenvolvimento e o teste de uma ferramenta produzida por impressão 3D para a estampagem de chapa de alumínio.

3.2.1. Processo de fabrico convencional vs. impressão 3D

As principais diferenças entre os processos de fabrico convencional e de impressão 3D é na forma como peça é produzida. Os processos convencionais são geralmente processos subtrativos enquanto o processo de impressão 3D é um processo aditivo. Este aspeto tem influência nos custos da matéria-prima e das máquinas, nos tempos de produção, nos tipos de tarefas a realizar e nos envolvidos no processo de produção. No caso específico de ferramentas de estampagem pelos processos de *hydroforming* ou *rubber pad forming*, em que só é necessária uma parte da ferramenta de estampagem, estas são geralmente produzidas a partir de um bloco de alumínio. Dadas as formas geométricas, o processo de fabrico habitual é a maquinação num centro de maquinação CNC, O processo de fabrico convencional é caracterizado por (Tabela 11):

- *Inputs* - O alumínio 2017 A como a matéria-prima, as fresas, os mandris ou as pastilhas de corte como ferramentas de maquinação, os dispositivos de apoio, as prensas mecânicas e as pinças de aperto como ferramentas de aperto, os engenheiros, os responsáveis técnicos e os operadores como a mão de obra e a energia elétrica;
- Maquinação CNC - as operações de desbaste, de facejamento, de furação, de boleamento e de contorno;
- *Outputs* - a ferramenta acabada que consiste na conclusão de todas as operações de maquinação e o desperdício que consiste no volume de material retirado do bloco de material na forma de limalhas ou aparas;
- Cliente - a etapa seguinte à maquinação CNC, normalmente o controlo dimensional da ferramenta acabada.

O processo de impressão 3D, pela técnica de FFF, a matéria-prima é o filamento, sendo habitualmente usados materiais mais rígidos e com maior resistência mecânica à compressão como é o caso do Policarbonato e ULTEM 1010 ou materiais menos convencionais para este tipo de aplicações como é o caso do PLA. Neste processo apenas são necessários alguns produtos elementares (como laca ou folha de policarbonato) para assegurar a fixação da peça a ser construída (Tabela 12). Nas tabelas 11 e 12 são apresentados os modelos SIPOC (*Supply, Input, Product, Output, Customer*) de ambos os processos de fabrico.

Tabela 11 – Modelo SIPOC do processo de fabrico convencional.

Fornecedor	Inputs	Processo	Outputs	Cliente
Fornecedor de Matéria-Prima Inventário das Ferramentas de Maquinação e de Aperto	Matéria-Prima Ferramentas de Maquinação Ferramentas de Aperto Mão de Obra Energia Elétrica	Maquinação	Peça Acabada Desperdício	Controlo Dimensional

Tabela 12 – Modelo SIPOC do processo de impressão 3D.

Fornecedor	Inputs	Processo	Outputs	Cliente
Fornecedor de Matéria-Prima Inventário dos Consumíveis	Matéria-Prima Consumíveis Mão de Obra Energia Elétrica	Impressão 3D	Ferramenta Acabada Desperdício	Controlo Dimensional

O projeto de uma ferramenta inicia-se com uma reunião onde se realiza o planeamento da produção, incluindo a caracterização da ferramenta, a definição dos métodos e das tecnologias de produção, a análise de custos de matéria-prima e de produção, a recolha de documentação relacionada com os requisitos do cliente e a distribuição de tarefas pelos responsáveis dos departamentos. Após a aprovação das etapas anteriores, toma-se a decisão sobre a subcontratação do fabrico da ferramenta. Se a subcontratação for validada, efetua-se a receção e controlo dimensional da ferramenta; caso contrário, o processo de produção progride com a realização da ficha gama, a aquisição de matéria e o fabrico (incluindo a programação CNC) e a montagem da ferramenta. Após a conformidade da ferramenta pelo controlo dimensional, a ferramenta é sujeita à validação pelo cliente e assim é possível o fabrico das primeiras peças. Caso o relatório sobre o fabrico das primeiras peças seja validado pelo cliente, é emitido um certificado da ferramenta e termina o projeto. O certificado da ferramenta permite que a produção das ferramentas necessárias seja concretizada. A Figura 35 representa um fluxograma do processo de fabrico de uma ferramenta executado na Lauak, baseado na informação recolhida por reunião com responsáveis da empresa.

O processo de produção de ferramentas pela impressão 3D requer muito menos etapas que o processo convencional (Figura 35). Após o projeto da ferramenta, que acaba por ser muito semelhante ao de uma ferramenta para ser produzida por processos convencionais, segue-se a preparação da peça para impressão 3D (*slicer*). Nesta operação são definidos parâmetros como a velocidade de impressão, a espessura da camada, a temperatura de impressão e a utilização de suporte, que podem estar previamente estabelecidos num *template*. De seguida procede-se à efetivação da impressão por um operador, sendo apenas necessário preparar a base de impressão (aplicando laca) e lançar o processo. Tal como nos processos convencionais é necessário algum acabamento final para remover pequenas imperfeições. Por fim procede-se ao controlo dimensional, geralmente por comparação com o modelo CAD.

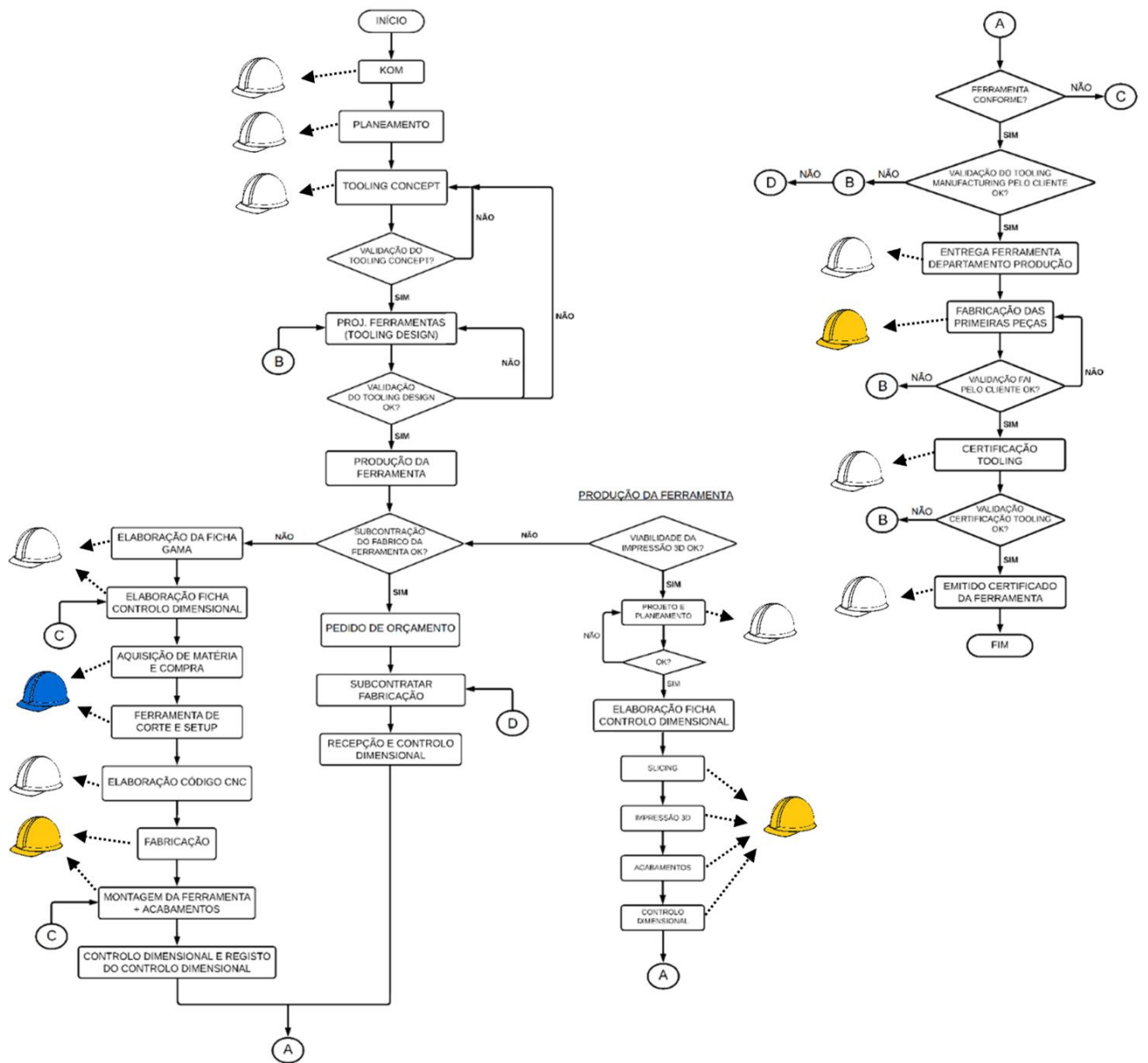


Figura 35 – Fluxograma representativo do processo produtivo de uma ferramenta, integrando a impressão 3D.
 Legenda: Capacete Branco - Engenheiro; Capacete Azul - Responsável; Capacete Amarelo - Operador.

3.2.2. Desenvolvimento e teste de uma ferramenta de estampagem por *rubber pad forming*

3.2.2.1. Processo de *rubber pad forming* em aeronáutica

O processo de *rubber pad forming* consiste num processo de enformação plástica de chapa metálica executado por uma máquina constituída por (Figura 36) [43]:

- Punção, o qual aplica a força no bloco de borracha;
- Placa superior, a qual suporta a caixa e o bloco de borracha;
- Caixa, a qual contém o bloco de borracha;
- Bloco de borracha, o qual é responsável pela deformação da chapa metálica;
- Colunas guia, onde desliza verticalmente o conjunto placa superior, caixa e bloco de borracha;
- Matriz, pela qual a chapa se molda conforme o bloco de borracha deforma a chapa
- Placa inferior, a qual suporta todos os elementos anteriores.

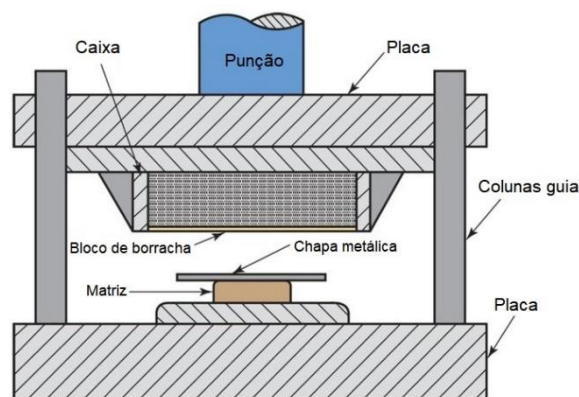


Figura 36 – Esquema de máquina de *rubber pad forming*.
Adaptada de John R. Walker et al. [44].

Devido ao baixo volume de produção de componentes da indústria aeronáutica, tipicamente da área da deformação de chapa metálica, considera-se que a tecnologia *rubber pad forming* é a mais adequada para o fabrico destes componentes e também para a produção de protótipos. Segundo G. Sala, as vantagens da tecnologia *rubber pad forming* são a possibilidade de utilização de matrizes de diferentes materiais e espessuras e o baixo tempo de *setup*, visto que é não necessário o alinhamento entre o punção e a matriz. Os autores apresentam como desvantagem, desta tecnologia, o reduzido número de ciclos de operações do bloco de borracha [43].

3.2.2.2. Ferramenta desenvolvida

A ferramenta desenvolvida para realizar os ensaios e, posteriormente, a análise do desgaste ao longo dos ensaios, foi desenhada num software CAD e produzida em PLA na impressora Blocks One MKII cujos parâmetros de impressão encontram-se na Tabela 13. A ferramenta é constituída pelos seguintes componentes: dois pinos de alinhamento, respetivamente $\varnothing 5$ mm e $\varnothing 6$ mm (garantem a posição certa da chapa de alumínio); dois pares de casquilhos, respetivamente $\varnothing 10$ mm \times 10 mm e $\varnothing 12$ mm \times 10 mm (evitam o desgaste dos furos da ferramenta provocado pelos pinos); o elemento aperta chapa tem a função de manter a chapa na posição certa (Figura 37 (a)) e a matriz que irá dar forma à chapa quando é exercida a pressão pelo bloco de borracha. A matriz foi desenvolvida tendo por base várias características geométricas que são habituais na Lauak tais como, estampagem de uma aba com curvatura positiva e negativa, pescoço de cavalo, e quinagem com diferentes raios (Figura 37 (b) e (c)). O desenho 2D cotado da ferramenta encontra-se no ANEXO 2.

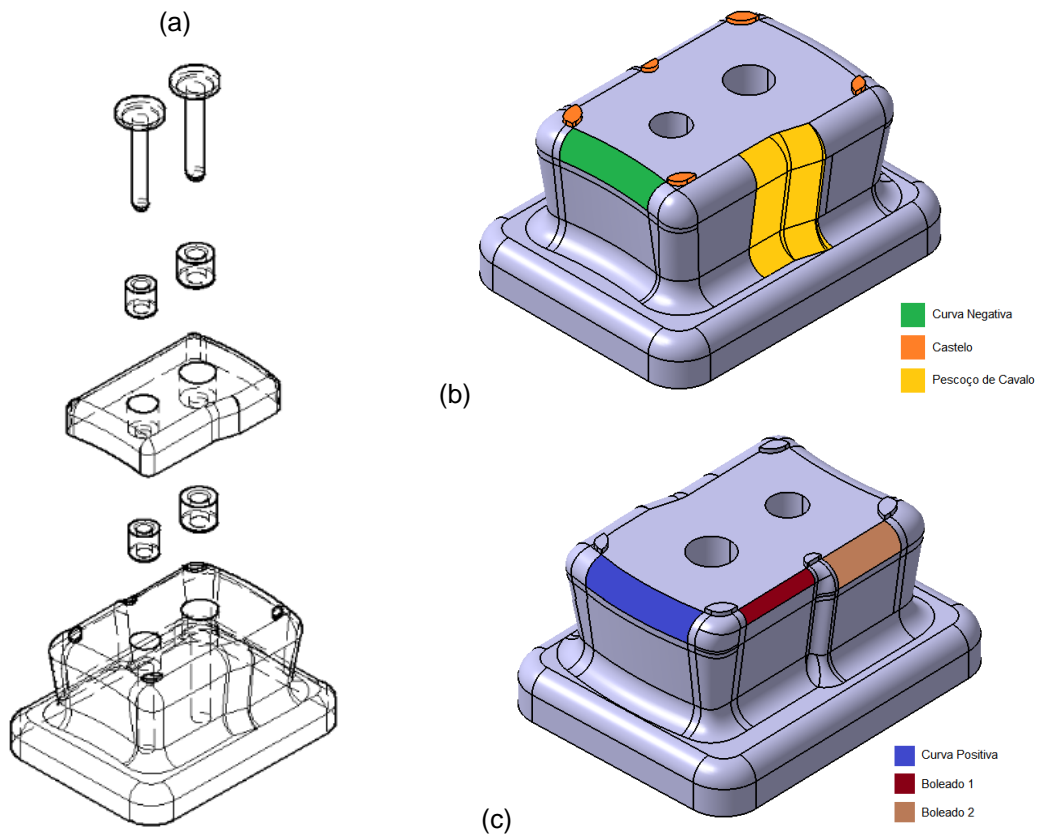


Figura 37 – (a) - Esquema de montagem da ferramenta de teste para estampagem; (b) e (c) - Identificação dos elementos de construção.
Elaboração própria através do CATIA V5.

Tabela 13 - Parâmetros de impressão da ferramenta de teste.

Parâmetro		Unidade	
Espessura de camada		0,1	mm
Densidade de preenchimento		100	%
Temperatura	extrusor	215	°C
	prato de impressão	60	°C
Velocidade de impressão		60	mm/s

3.2.2.3. Procedimento para ensaios de estampagem e controlo dimensional

O objetivo dos ensaios foi a análise da deformação e do desgaste da ferramenta após a estampagem de várias chapas de alumínio 2024-T3 com 1.2 mm de espessura. A análise da ferramenta foi feita com base em sucessivas medições numa máquina CMM, comparando as medições com o modelo CAD. A ferramenta foi medida 10 vezes durante a produção de 20 peças. Ou seja, mediu-se a ferramenta após a estampagem da peça 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 14, 17 e 20. O controlo dimensional da ferramenta foi executado na máquina CMM Wenzel LH1210 equipada com um cabeçote Renishaw PH10M e um sensor Renishaw P200B. O programa de medição CMM foi produzido através do *software* Metrosoft CM SP4. A estampagem das chapas de alumínio foi realizada na prensa ACB EMC4200.

O procedimento do ensaio de estampagem teve início na determinação de um conjunto de pontos no modelo CAD da ferramenta (Figura 38); a partir dos pontos definidos, foi desenvolvido um programa de medição CMM; a seguir foi executado o programa de medição, num ambiente a 19 °C e humidade a 62,3%, e o registo das coordenadas dos pontos de forma a obter uma referência antes de começar a estampagem; depois são preparadas a ferramenta e a chapa a deformar, coloca-se o conjunto na plataforma e aciona-se a prensa a 280 bar; após o ciclo de estampagem, a ferramenta é desmontada, a chapa é retirada e regista-se na chapa a informação sobre o número do ensaio, número da ferramenta, a data e a hora; por fim, executa-se a medição através do mesmo programa criado anteriormente (Figura 39).

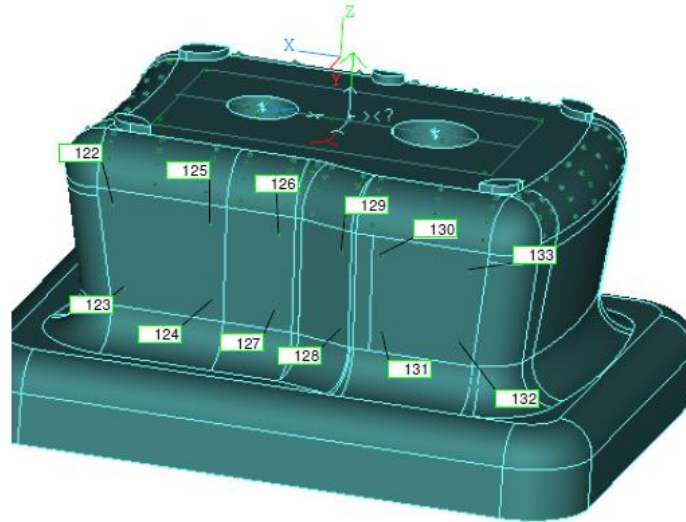


Figura 38 – Modelo CAD da ferramenta com a localização de parte dos pontos a controlar.
Elaboração através de Metrosoft CM SP4.

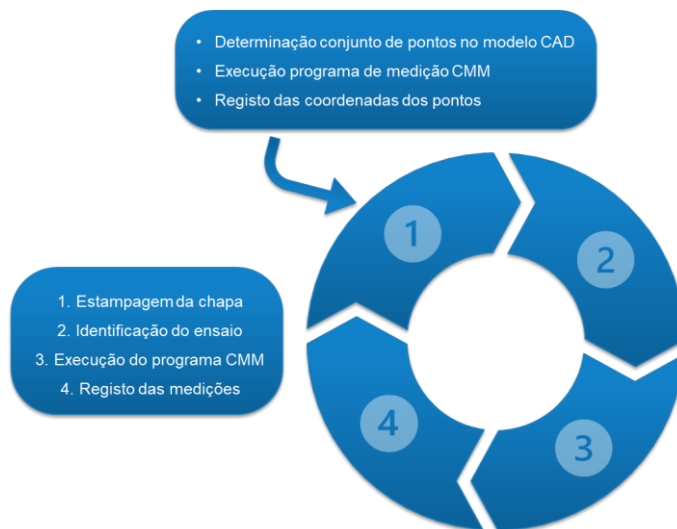


Figura 39 – Esquema cíclico dos ensaios de estampagem.
Elaboração própria.

3.2.2.4. Resultados

Os resultados dos ensaios experimentais, extraídos do Metrossoft CM SP4, foram as coordenadas X, Y e Z dos pontos do modelo CAD e dos mesmos pontos localizados na ferramenta (ANEXO 3). O sistema de eixos foi definido entre os dois furos de centragem, sendo o plano XY o plano da parte superior da ferramenta, conforme Figura 39. O tratamento dos resultados começou pela determinação de um conjunto de pontos referentes à superfície, com ou sem contato com a chapa, de cada elemento de construção (curva positiva e negativa, pescoço de cavalo e boleados). A etapa seguinte consistiu no cálculo da diferença entre as coordenadas X e Y dos pontos do modelo CAD e os pontos medidos na ferramenta, de modo a indicar os deslocamentos desses pontos provocado pela deformação e pelo desgaste da ferramenta após a estampagem das chapas. Uma vez que a referência foi estabelecida no plano de cima da ferramenta, não foram considerados os desvios em Z. No ANEXO 4 encontram-se os desvios pontos pertencentes às superfícies da ferramenta de teste.

3.2.2.5. Análise

Nas figuras seguintes é apresentada a evolução de alguns pontos de controle sobre a ferramenta em função do número de ciclos de estampagem. Durante o ensaio verificou-se que os casquilhos que foram colocados nos furos de centragem da chapa, e que eram usados para se definir o zero da peça, apresentavam ligeira folga, podendo ser responsáveis por alguns eventuais desvios nas medições. Esta situação veio-se a verificar, notando-se alguma dispersão em todos os gráficos, contudo sem se notar qualquer tendência ascendente ou descendente.

Os desvios dos pontos das curvas positiva e negativa e dos boleados foram analisados e avaliados conforme a norma correspondente à tolerância geométrica da forma de uma superfície, enquanto os desvios dos pontos do pescoço de cavalo foram analisados e avaliados conforme a norma correspondente à tolerância dimensional, ambas utilizadas pela Lauak. Segundo a tolerância geométrica da forma de uma superfície, verifica-se que todos os desvios dos pontos das curvas positiva e negativa e dos boleados estão conformes. Segundo a tolerância dimensional utilizada pela Lauak, verifica-se que todos os desvios dos pontos do pescoço de cavalo estão conformes.

A Figura 40 representa o gráfico da variação da deformação da ferramenta na direção do eixo X e do eixo Y, nas superfícies dos elementos de construção, curvas positiva e negativa e boleados, na zona de contato entre a ferramenta e a chapa, enquanto que a Figura 41 representa o gráfico da variação da deformação da ferramenta nas superfícies na zona sem contato entre a ferramenta e a chapa. A Figura 42 representa o gráfico da variação da deformação da ferramenta na superfície do elemento de construção, pescoço de cavalo, na zona com e sem contato entre a ferramenta e a chapa. A análise dos desvios dos pontos da zona sem contato entre a ferramenta e a chapa tem como objetivo a definição de uma referência onde a deformação da ferramenta é considerada nula. Mesmo nos pontos onde não há contato entre a chapa e a

ferramenta nota-se uma dispersão semelhante à dos pontos de contato, certamente resultado da folga que se detetou entre os furos e os casquilhos.

Representação dos pontos na zona de contato entre a ferramenta e a chapa.



Figura 40 – Variação da deformação da ferramenta nas superfícies das curvas positiva e negativa e boleados, em diversos pontos conforme ANEXO 3.
(a) - Direção eixo XX; (b) - Direção eixo YY.

Representação dos pontos na zona sem contato entre a ferramenta e a chapa.

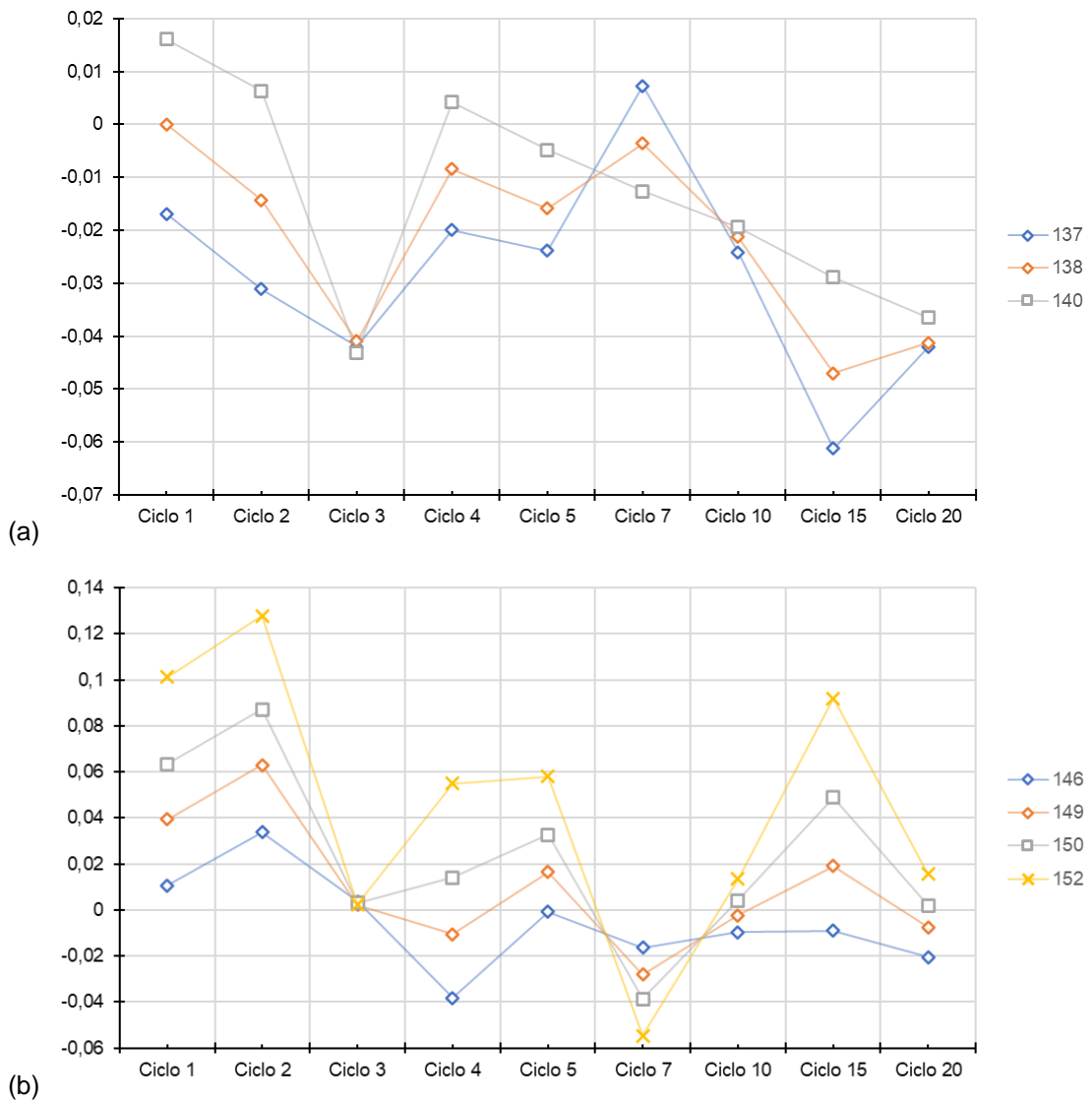


Figura 41 – Variação da deformação da ferramenta nas superfícies das curvas positiva e negativa e boleados, em diversos pontos conforme ANEXO 3.
 (a) - Direção eixo XX; (b) - Direção eixo YY.

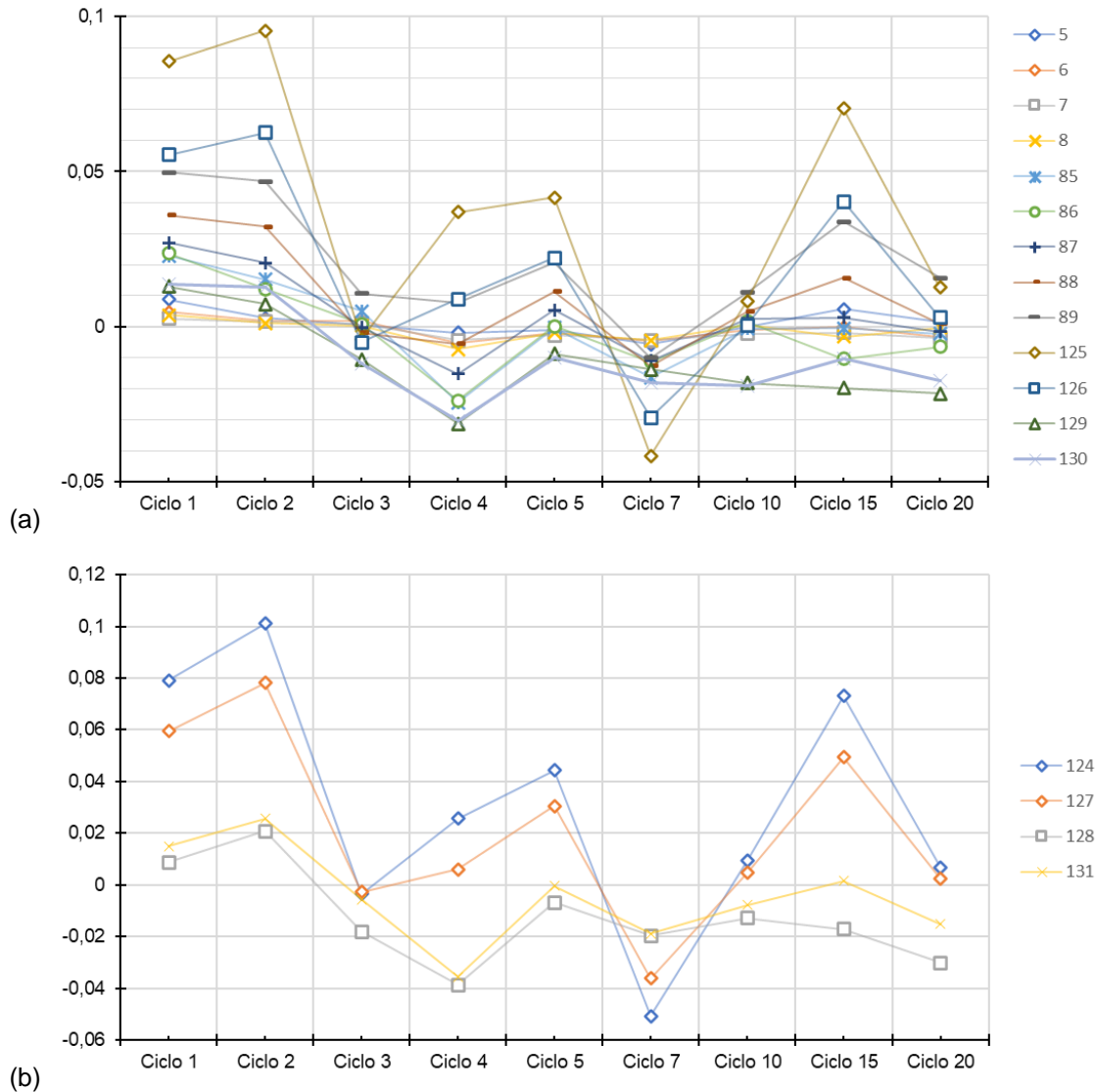


Figura 42 – Variação da deformação da ferramenta na superfície do pescoço de cavalo, conforme ANEXO 3.

(a) - Zona de contato com a chapa; (b) - Zona sem contato com a chapa.

3.2.2.6. Conclusões

A análise dos gráficos e a análise desvios dos pontos, dos elementos de construção, permite concluir que os desvios medidos estão dentro da tolerância definida para o fabrico da ferramenta. A tolerância aplicada no elemento de construção pescoço de cavalo é $\pm 0,05$, enquanto que a tolerância aplicada nos boleados da ferramenta é de 0 a $+0.5$ mm. Ainda assim estes resultados seriam provavelmente muito melhores se não tivesse sido detetada folga entre os furos e os casquilhos.

3.2.3. Considerações sobre o projeto de ferramentas por impressão 3D

No processo de fabricação de ferramentas por impressão 3D é essencial ter em consideração alguns aspectos que são intrínsecos ao próprio processo de fabricação:

- Orientação adequada das peças no tabuleiro de impressão;
- Segundo W. Wu, et al. [19], os provetes produzidos com ângulos de preenchimento 0° / 90° apresentaram os maiores valores de tensão à tração e à flexão. O ângulo de preenchimento corresponde ao ângulo entre a direção de depósito de material pelo bico de impressão e o eixo X (Figura 43) [19].

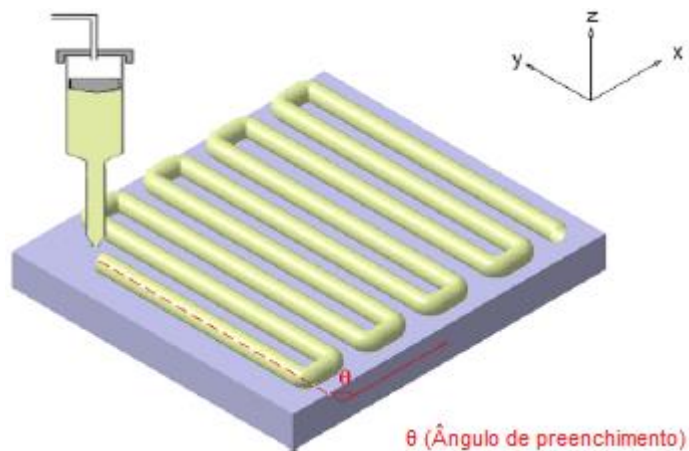


Figura 43 – Representação do ângulo de preenchimento.
Adaptada de W. Wu, et al [19].

- Recomenda-se a realização da calibração da impressora antes da impressão, programada regularmente e quando se muda o bico de impressão, os parâmetros de impressão ou o tipo de material.
- Construção de ferramentas com ângulos negativos, normalmente correspondem a valores menores que 45° . Os ângulos negativos levam à necessidade de construção de uma estrutura de suporte e após a produção da ferramenta a sua remoção, o que implica o aumento do tempo e dos custos de produção e redução de qualidade (Figura 44);

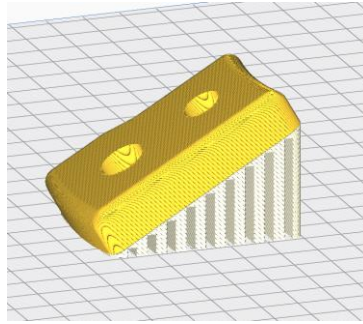


Figura 44 – Ferramenta com estrutura de suporte.

- Definição dos parâmetros de impressão:
 - Velocidade e temperatura de impressão da primeira camada: a impressão da primeira camada deve ser a uma velocidade de impressão baixa e a uma temperatura de impressão elevada, de forma que a camada de material se fixe ao prato de impressão. Mesmo que esta camada acabe por ficar com menor qualidade, acaba por não ter influência no desempenho da ferramenta em estampagem uma vez que esta superfície nunca irá estar em contato com a peça;
 - Espessura da camada: permite a determinar a resolução da superfície exterior da ferramenta, dado que para uma espessura da camada elevada, a rugosidade da superfície aumenta e para uma espessura da camada baixa, a rugosidade da superfície diminui. Este parâmetro tem uma elevada influência no custo e no tempo de impressão.
 - Número de contornos: consiste no número de contornos que são gerados na peça, também designados por perímetros, casca exterior ou casca vertical (Figura 45). Recomenda-se que no mínimo sejam definidos 5 contornos uma vez que entre a estrutura de preenchimento e os contornos (*infill* ou *raster*) há geralmente alguns defeitos de construção que podem reduzir a performance da ferramenta;

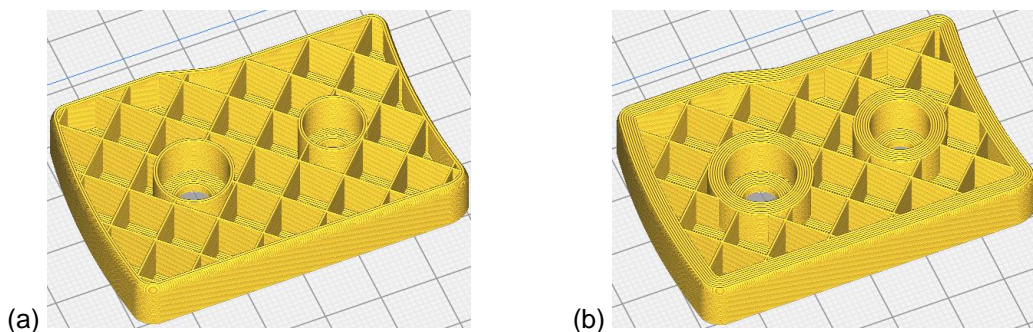


Figura 45 – Comparação da espessura da parede: (a) - 1 mm; (b) - 3 mm.

- Cálculo das folgas: considerando que as ferramentas podem ser montadas em conjuntos de componentes e que se podem adicionar elementos nas ferramentas, é importante ter em conta as folgas onde existe encaixe entre a ferramenta e o conjunto de ferramentas ou entre a ferramenta e os elementos. O dimensionamento correto das folgas evita o retrabalho, o desperdício de material e, conseqüentemente, previne o aumento dos custos e tempos de produção. Na fase de projeto da ferramenta é comum aplicar uma folga de encaixe de 0,3 mm;
- Encasquilhar os furos: Os furos sofrem desgaste por elementos passantes, como pinos de alinhamento ou veios, ou deformação devido a pressões elevadas, em ferramentas poliméricas recomenda-se encasquilhar todos os furos.

Capítulo 4

Estudo da viabilidade de produção de ferramentas por impressão 3D

4.1. Resistência à compressão e ao desgaste

Resultante do estudo conduzido na secção 3.2, verificou-se que a ferramenta não apresentava desvios dimensionais ao longo dos ciclos de estampagem, até 20 ciclos. Neste sentido pode-se considerar que a resistência à compressão está assegurada, e que o desgaste, a ocorrer, será muito baixo uma vez que não foi detetada nenhuma evidência durante as medições. Do ponto de vista técnico, pelo menos até 20 ciclos de estampagem, a ferramenta consegue garantir a integridade estrutural em conformidade com os requisitos de aeronáutica para a estampagem de peças em chapa de alumínio. O estudo foi conduzido com chapa em alumínio tratado termicamente (tratamento T3) o que representa uma situação mais exigente quando comparada com a habitual em que a chapa é enformada no estado recozido.

4.2. Tolerâncias dimensionais e geométricas

A precisão dimensional das ferramentas é importante para se conseguir produzir peças dentro das tolerâncias exigidas pelo cliente final, caso não aconteça as peças são encaminhadas para retrabalho ou são consideradas desperdício. A maioria das peças produzidas pelas ferramentas de estampagem são sujeitas a retrabalho com o objetivo de ajustar a forma até estarem em conformidade com as tolerâncias exigidas. Uma consequência do retrabalho é o aumento considerável do custo e do tempo de produção e também aumento de mão de obra exclusiva para esta etapa do processo produtivo.

As tolerâncias dimensionais e geométricas têm sido estudadas por diferentes autores com objetivo de alcançar a produção de peças pela tecnologia impressão 3D com elevada precisão dimensional e geométrica. Consideram-se os seguintes parâmetros definidos pelos autores como os principais responsáveis na caracterização das tolerâncias dimensionais e geométricas:

- Variações térmicas, vibrações ou erros de posicionamento da cabeça de impressão [32];
- Temperatura de extrusão, a densidade do preenchimento, a orientação da impressão e o *microstepping* [35].

Segundo a Stratasys, a utilização da impressora Fortus 450mc permite a produção de peças com uma precisão de $\pm 0,127\text{mm}$ ou $\pm 0,0015\text{ mm/mm}$ [25]. Segundo a Blocks, a utilização da impressora ONE MKII permite a produção de peças com uma precisão de $0,02\text{ mm}$ a $0,3\text{ mm}$ [47].

4.3. Viabilidade económica do processo de impressão 3D vs. processo convencional

A viabilidade económica pode ser considerada como uma das fases de um projeto de implementação de algo a nível micro como a instalação de uma máquina numa linha de produção, ou de algo a nível macro como instalação de uma fábrica de grandes dimensões. A viabilidade económica consiste numa análise detalhada sobre os custos, os benefícios e as limitações da implementação do objeto em estudo. O procedimento a aplicar na viabilidade económica é o seguinte:

- Recolha e tratamento de informação;
- Descrição dos benefícios e das limitações;
- Análise de custos e tempos;
- Considerações do projeto;
- Discussão dos resultados.

4.3.1. Recolha e tratamento de informação

A informação para o desenvolvimento do estudo foi recolhida através de reuniões com os responsáveis e de visitas à Lauak. O tratamento da informação consistiu no cálculo dos custos e tempos, na organização dos dados em tabelas e na criação de esquemas gráficos de forma a compreender as principais diferenças entre o processo de maquinação CNC e o processo de impressão 3D, a nível dos custos e dos tempos.

4.3.2. Descrição dos benefícios e das limitações

A realização do estudo de viabilidade económica permitiu ter-se uma perceção geral sobre os custos inerentes a todas as etapas do processo de produção das ferramentas, incluindo as etapas que não acrescentam valor ao produto final. Com este estudo deve-se ter a capacidade de decidir sobre o investimento para a melhoria do processo produtivo ou para a implementação de um novo processo de produção. A limitação principal do estudo da viabilidade económica foi a impossibilidade de analisar o custo de ciclo de vida das ferramentas produzidas por maquinação CNC e por impressão 3D. O ciclo de vida das ferramentas corresponde ao intervalo de tempo ou ao número de ciclos que a ferramenta executa de modo a atingir os requisitos de

desempenho para os quais foi desenvolvida [48], assim a análise do custo do ciclo de vida torna-se deficiente devido à falta de informação sobre intervalo de tempo ou ao número de ciclos que a ferramenta, produzida por maquinação CNC ou por impressão 3D, executa até atingir a etapa de descarte (durabilidade). Contudo, em produção aeronáutica, muitas das peças produzidas são em pequenas séries em que a vida da ferramenta desenvolvida, pelo menos por processos convencionais, supera em muito a quantidade de peças a produzir. Relativamente às ferramentas produzidas por impressão 3D, o presente estudo analisa a situação para a produção de 20 unidades, contudo deveria abranger um lote maior e estudar-se também outros materiais para além do PLA.

4.3.3. Considerações do projeto

A análise de custos requer a aplicação da taxa horária a cada etapa do processo. A taxa horária, do processo de maquinação CNC, consiste no custo por hora associada à atividade da empresa, como por exemplo o custo por hora da mão de obra, da energia consumida, da manutenção, dos equipamentos/máquinas e das instalações (edifício da empresa). A taxa horária usada como referência neste trabalho relacionada com as etapas do processo de maquinação CNC encontra-se na Tabela 14.

O processo produtivo convencional maquinação CNC tem inerente um tempo de ciclo de fabrico, ou seja, previamente a cada etapa da maquinação CNC está associada uma fila de espera de tarefas ou de produção de ferramentas. O tempo de ciclo de fabrico contabilizado do processo de maquinação CNC entre as principais etapas são no mínimo quatro semanas (valores indicados pela Lauak), ao passo que, do processo de impressão 3D é residual porque o fluxo do processo não permite a acumulação de tarefas.

Tabela 14 - Registo da taxa horária relacionada com as etapas do processo de maquinação CNC.

Taxa horária [€/h]				
Programação	Preparação de bloco maquinagem	Setup + Maquinação CNC	Acabamento	Montagem
45	28	60	30	28

A simulação da impressão da ferramenta, consistiu na utilização de três modelos CAD de ferramentas de pequena, média e grande dimensão (Tabela 15) e no desenvolvimento de um perfil de impressão, através de um *software slicer*, obtendo-se de imediato os tempos de produção e os consumos de material. Neste estudo considerou-se uma impressora de gama baixa, (Ultimaker 3 Extend) e uma impressora de gama alta (Stratasys Fortus 450mc). O perfil de impressão aplicado na Ultimaker 3 Extend foi definido com o material do filamento PLA e as espessuras de camada de 0,1 mm, 0,127 mm e 0,254 mm. Devido ao facto do volume da ferramenta de grandes dimensões ser mais elevado do que o volume de impressão da Ultimaker 3 Extend, foi necessário criar uma versão da impressora, no *software slicer*, com um volume de impressão adequado para se poder fazer a simulação. Para o perfil de impressão aplicado na Stratasys Fortus 450mc consideraram-se dois materiais PC e ULTEM 1010, e a espessura de camada 0,127 mm e 0,254 mm, respetivamente (mínimo permitido pela impressora). Em todos os perfis de impressão definiu-se uma densidade de preenchimento de 100%.

Tabela 15 - Dimensões gerais ferramentas utilizadas na simulação de impressão.

		Dimensões da ferramenta [mm]		
		Comprimento	Largura	Altura
Ferramenta Grande	Aperta Chapa	336,92	158,03	10
	Ferramenta	348,07	166,56	48,2
Ferramenta Média	Aperta Chapa	248,35	56,942	10
	Ferramenta	248,35	58,298	39
Ferramenta Pequena	Aperta Chapa	156,174	40,239	10
	Ferramenta	196,174	85,988	49

Os parâmetros para o cálculo da taxa horária do processo de impressão 3D são os seguintes:

- Custo da impressora 3D;
- Custo da revisão anual de cada impressora;
- Tempo de vida útil: produto entre o tempo de bom funcionamento das impressoras Ultimaker 3 Extend e Stratasys Fortus 450mc, respetivamente, 5 e 8 anos; 250 dias por ano e 12 horas de trabalho por dia.

O custo do filamento utilizado na produção de ferramentas na impressora Ultimaker 3 Extend foi obtido a partir do catálogo da Ultimaker. O custo do filamento utilizado na produção de ferramentas na impressora Stratasys Fortus 450mc é constituído pelo preço do filamento e a relação entre o preço dos bicos de impressão e a quantidade de rolos de filamento utilizada durante a vida útil de cada bico de impressão, a qual foi definida como 5 unidades.

4.3.4. Análise de custos e tempos de produção

A análise de custos da produção de ferramentas tem como objetivo comparar os custos do processo produtivo das ferramentas produzidas por maquinação CNC e por impressão 3D.

Os tempos que permitiram o cálculo do custo relativo à produção de ferramentas e encontram-se na Tabela 16 e na Tabela 17.

Devido à necessidade de discrição da divulgação de informação confidencial, os custos apresentados, na análise, são relativos, ou seja, os custos são calculados através da relação entre o custo em avaliação e o custo menor verificado na ferramenta grande, média ou pequena.

A análise da informação sobre os custos envolventes ao processo produtivo das ferramentas de estampagem permitiu o cálculo dos seguintes custos:

- O custo de desperdício é apresentado na Figura 48 e tem em conta os seguintes pressupostos:
 - Maquinação CNC: os dados para o cálculo do custo de desperdício são o volume do bloco de maquinagem; o volume da peça; a massa volúmica do alumínio e o custo do alumínio. Assim o custo de desperdício corresponde ao custo do material resultante das operações de desbaste (limalhas e aparas). Neste custo não se apurou o custo das ferramentas de corte nem de energia consumida;
 - Impressão 3D (gama baixa): o custo de desperdício foi considerado residual, assim não é contabilizado;
 - Impressão 3D (gama alta): o custo de desperdício corresponde ao custo da quantidade de solução de remoção e o custo das folhas para a base de impressão.

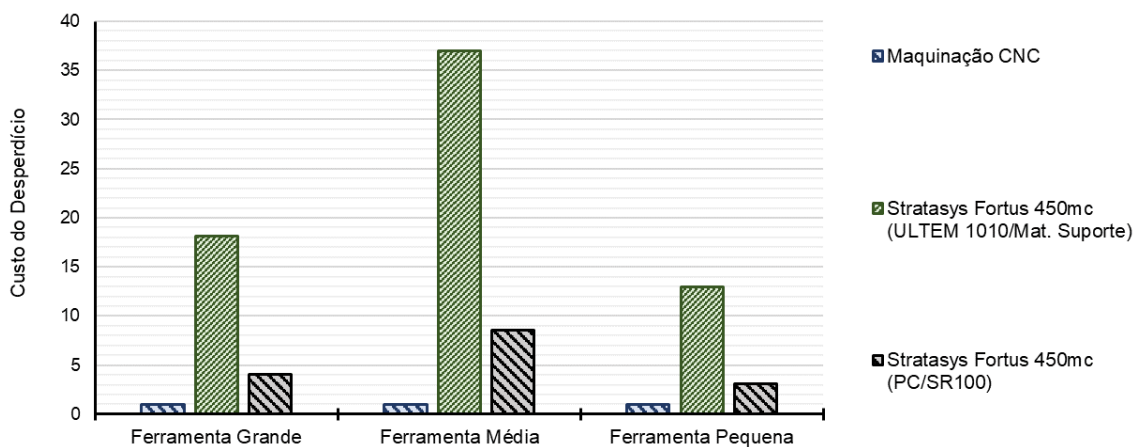


Figura 48 – Representação do custo de desperdício associado à produção das ferramentas.

- Custo do material (Figura 49):
 - Maquinação CNC: o custo do material corresponde ao produto do volume do bloco de maquinação; da massa volúmica do alumínio, proveniente da literatura e do custo do alumínio;
 - Impressão 3D (gama baixa): o custo do material corresponde ao produto entre o peso da ferramenta e o custo do filamento Ultimaker;
 - Impressão 3D (gama alta): o custo do material corresponde ao produto entre o volume da ferramenta e o custo do filamento Stratasys.

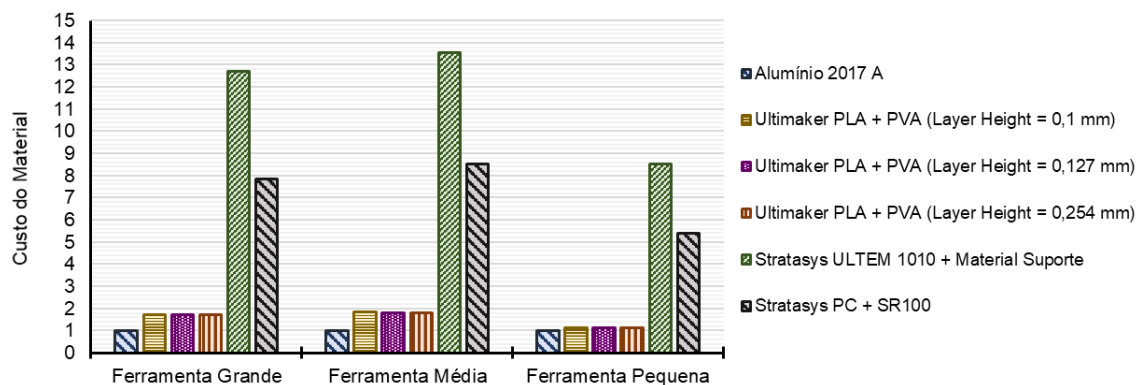


Figura 49 – Representação do custo do material das ferramentas.

- Custo das operações, o cálculo do custo de operações obtém-se pelo produto da taxa horária correspondente ao operador responsável pela etapa do processo produtivo, da maquinação CNC e da impressão 3D, e o tempo previsto de execução dessa mesma etapa (Figura 50);

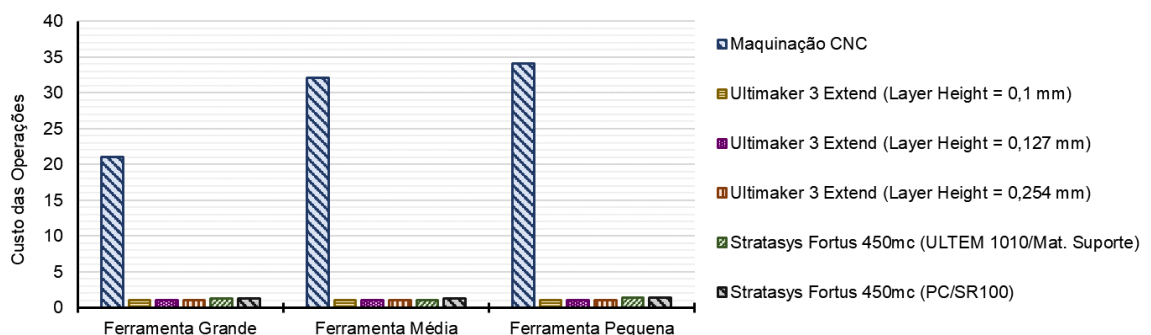


Figura 50 – Representação do custo das operações.

- Custo de manutenção (Figura 51):

- Maquinação CNC: o custo da manutenção da máquina CNC corresponde valor contratado pela empresa;
- Impressão 3D: o custo da manutenção das impressoras 3D corresponde ao custo da revisão anual.

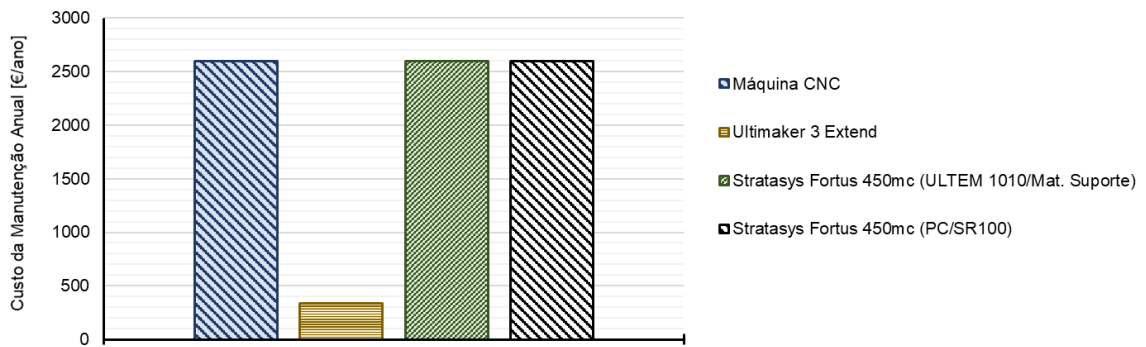


Figura 51 – Representação do custo da manutenção do equipamento por ano.

- Custo de produção (Figura 52):

- Maquinação CNC: o custo de produção corresponde à soma dos custos previstos do material, de mão de obra e dos componentes de montagem;
- Impressão 3D: o custo de produção corresponde à soma dos custos previstos do material, de mão de obra, do *setup*, da energia e do equipamento.

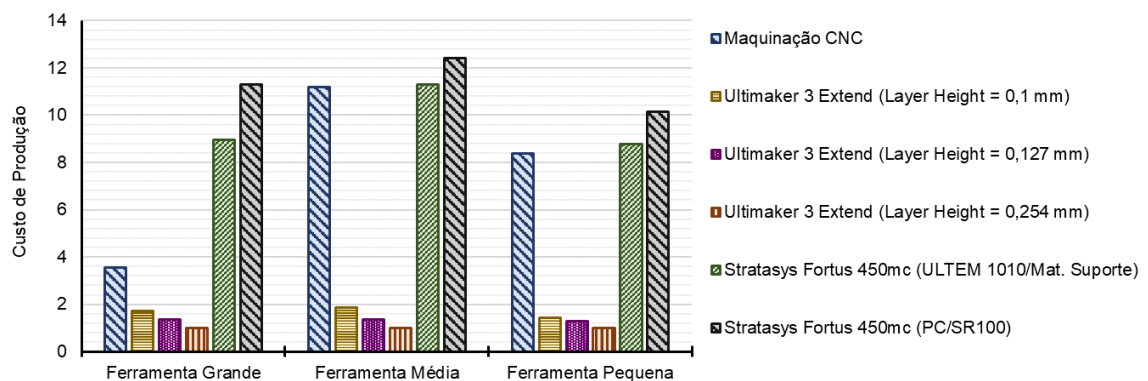


Figura 52 – Representação do custo de produção das ferramentas.

A análise da informação sobre os tempos de execução das etapas do processo produtivo das ferramentas de estampagem permitiu calcular o tempo total de produção (Figura 53):

- Maquinação CNC, o tempo total do processo de maquinação CNC corresponde à soma dos tempos de execução, do projeto, da preparação de bloco maquinagem, da programação, do setup e maquinação CNC, do acabamento e da montagem;
- Impressão 3D, o tempo total do processo de impressão 3D corresponde à soma dos tempos de execução, do projeto, do *slicing*, do setup e impressão, do acabamento e da montagem.

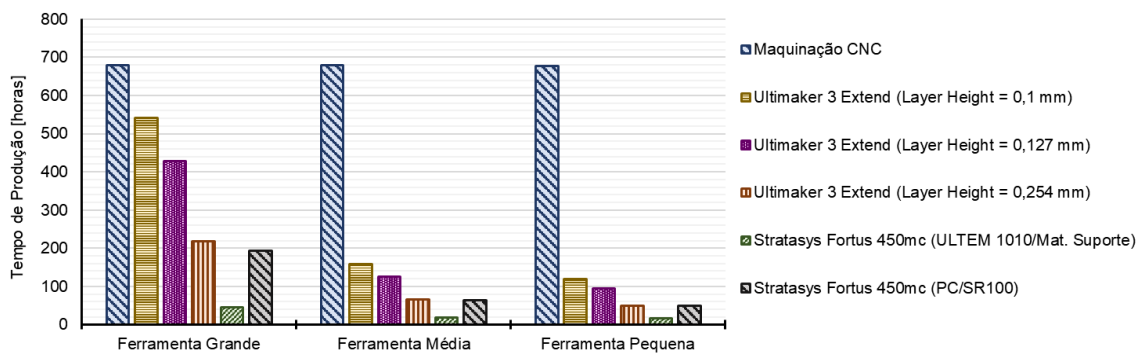


Figura 53 – Representação do tempo de produção das ferramentas.

Tabela 16 - Registo dos tempos associados à produção de ferramentas por maquinação CNC.

		Tempo de Projeto [horas]	Tempo de preparação de bloco maquinagem (débito material) [horas]	Tempo de Programação [horas]	Tempo de setup + Maquinação CNC [horas]	Tempo de acabamento [horas]	Tempo de Montagem [horas]	Tempo de Ciclo de Fabrico [horas]	Tempo de Produção [horas]
Ferramenta Grande	Aperta Chapa	3	0,25	1	2,5	0,27		672,00	679,02
	Ferramenta	3	0,25	2	6	0,28	0,08		683,61
Ferramenta Média	Aperta Chapa	3	0,25	1	2,5	0,20			678,95
	Ferramenta	3	0,25	2	6	0,20	0,08		683,53
Ferramenta Pequena	Aperta Chapa	2,5	0,25	1	1,5	0,12			677,37
	Ferramenta	2,5	0,25	2	3,5	0,16	0,08		680,49

Tabela 17 - Registo dos tempos associados à produção de ferramentas por impressão 3D.

	Tempo de Projeto [horas]			Tempo de Slicing [horas]			Tempo de Preparação Impressão [horas]			Tempo de Impressão [horas]		
	Ferramenta Grande	Ferramenta Média	Ferramenta Pequena	Ferramenta Grande	Ferramenta Média	Ferramenta Pequena	Ferramenta Grande	Ferramenta Média	Ferramenta Pequena	Ferramenta Grande	Ferramenta Média	Ferramenta Pequena
Ultimaker 3 Extend (Layer Height = 0,1 mm)	6	6	5	0,167	0,083	0,083	0,083	0,083	0,083	534,12	151,28	112,97
Ultimaker 3 Extend (Layer Height = 0,127 mm)										420,47	119,03	89,03
Ultimaker 3 Extend (Layer Height = 0,254 mm)										211,40	59,88	44,73
Stratasys Fortus 450mc (ULTEM 1010/Mat. Suporte)							0,167	0,167	0,167	37,50	12,25	9,95
Stratasys Fortus 450mc (PC/SR100)							185,283	56,22	43,83			

	Tempo de Acabamento [horas]			Tempo de Montagem [horas]			Tempo de produção [horas]		
	Ferramenta Grande	Ferramenta Média	Ferramenta Pequena	Ferramenta Grande	Ferramenta Média	Ferramenta Pequena	Ferramenta Grande	Ferramenta Média	Ferramenta Pequena
Ultimaker 3 Extend (Layer Height = 0,1 mm)	0,75	0,5	0,25	0,08	0,08	0,08	541,2	158,0	118,5
Ultimaker 3 Extend (Layer Height = 0,127 mm)							427,5	125,8	94,5
Ultimaker 3 Extend (Layer Height = 0,254 mm)							218,5	66,6	50,2
Stratasys Fortus 450mc (ULTEM 1010/Mat. Suporte)	1	0,75	0,5				44,9	19,3	15,8
Stratasys Fortus 450mc (PC/SR100)							192,7	63,3	49,7

4.3.5. Discussão dos resultados

No subcapítulo 3.2.2, foi descrito o desenvolvimento dos ensaios à ferramenta de estampagem durante o processo de *rubber pad forming*. Após a realização dos ensaios, foi efetuada a análise dos gráficos e a análise desvios dos pontos, dos elementos de construção, que permitiu concluir que o processo de estampagem de chapa tem a capacidade de produzir ferramentas com tolerâncias adequadas e que suportam as cargas de estampagem pelo menos durante 20 ciclos, visto que estas provocam uma deformação insignificante na ferramenta.

- Custo de desperdício

Relativamente à impressão 3D, o processo de produção de ferramentas que apresenta o custo de desperdício mais elevado corresponde à impressora Stratasys Fortus 450mc com filamento ULTEM1010, qualquer que seja dimensão da ferramenta, devido ao custo elevado dos filamentos aplicados e das folhas de fixação. Através da Figura 48, verifica-se o seguinte:

- Stratasys Fortus 450mc com filamento ULTEM1010: o custo de desperdício da produção da ferramenta grande é cerca de 18 vezes superior ao custo do desperdício utilizando a maquinação CNC, o custo de desperdício da produção da ferramenta média é cerca de 37 vezes superior ao custo do desperdício utilizando a maquinação CNC e o custo de desperdício da produção da ferramenta pequena é cerca de 13 vezes superior ao custo do desperdício utilizando a maquinação CNC. Verifica-se que a produção de todas as ferramentas, pela impressora Stratasys Fortus 450mc com filamento ULTEM1010, tem associado um custo de desperdício superior ao custo de desperdício associada à produção pela maquinação CNC, devido ao custo superior dos filamentos aplicados do que o alumínio 2017 A;
- Stratasys Fortus 450mc com filamento PC: o custo de desperdício da produção da ferramenta grande é cerca de 4 vezes superior ao custo do desperdício utilizando a maquinação CNC, o custo de desperdício da produção da ferramenta média é cerca de 9 vezes superior ao custo do desperdício utilizando a maquinação CNC e o custo de desperdício da produção da ferramenta pequena é cerca de 3 vezes superior ao custo do desperdício utilizando a maquinação CNC. Verifica-se que a produção de todas as ferramentas, pela impressora Stratasys Fortus 450mc com filamento PC, tem associado um custo de desperdício mais elevado do que o custo de desperdício associada à produção pela maquinação CNC, devido ao custo mais elevado dos filamentos aplicados comparando com o alumínio 2017 A;
- Maquinação CNC: o custo do desperdício utilizando a maquinação CNC corresponde ao menor valor, mesmo que seja o processo de produção que gere maior quantidade de desperdício, devido ao custo baixo da matéria-prima comparando com os filamentos usados na Stratasys Fortus 450mc.

- Custo do material

O processo de produção de ferramentas que apresenta o custo de material mais elevado corresponde ao processo de impressão utilizando os filamentos ULTEM 1010/Material de suporte na impressora Stratasys Fortus 450mc, devido ao custo elevado dos filamentos aplicados em comparação com o custo do alumínio 2017 A. Através do gráfico da Figura 49, verifica-se o seguinte:

- Alumínio 2017 A: o custo do material na produção da ferramenta maquinação CNC corresponde ao menor valor, devido ao custo baixo da matéria-prima comparando com os filamentos usados na Ultimaker 3 Extend e na Stratasys Fortus 450mc;
- Filamento Ultimaker PLA/PVA: o custo do material na produção da ferramenta grande e da ferramenta média é aproximadamente 2 vezes superior ao custo do material utilizando a maquinação CNC e o custo do material na produção da ferramenta pequena é aproximadamente 1,1 vezes superior ao custo do material utilizando a maquinação CNC. Verifica-se que a produção de todas as ferramentas, com filamento Ultimaker PLA/PVA, tem associado um custo mais elevado do que o custo do alumínio 2017 A;
- Filamento ULTEM 1010/Material de suporte: o custo do material na produção da ferramenta grande é aproximadamente 13 vezes superior ao custo do material utilizando a maquinação CNC, o custo do material na produção da ferramenta média é aproximadamente 14 vezes superior ao custo do material utilizando a maquinação CNC e o custo do material na produção da ferramenta pequena é aproximadamente 8,5 vezes superior ao custo do material utilizando a maquinação CNC. Verifica-se que a produção de todas as ferramentas, com filamento ULTEM 1010/Material de suporte, tem associado um custo mais elevado do que o custo do alumínio 2017 A;
- Filamento PC/SR100: o custo do material na produção da ferramenta grande é aproximadamente 8 vezes superior ao custo do material utilizando a maquinação CNC, o custo do material na produção da ferramenta média é aproximadamente 8,5 vezes superior ao custo do material utilizando a maquinação CNC e o custo do material na produção da ferramenta pequena é aproximadamente 5 vezes superior ao custo do material utilizando a maquinação CNC. Verifica-se que a produção de todas as ferramentas, com filamento PC/SR100, tem associado um custo mais elevado do que o custo do alumínio 2017 A.

- Custo das operações

O processo de produção de ferramentas que apresenta o custo das operações mais elevado corresponde ao processo de maquinação CNC, devido ao elevado número de etapas do processo comparando com o processo de impressão 3D. Através do gráfico da Figura 50, verifica-se o seguinte:

- Maquinação CNC: o custo das operações do processo de produção da ferramenta grande, utilizando a maquinação CNC, é aproximadamente 21 vezes superior ao custo das operações do processo de produção utilizando a impressão 3D, o custo das operações do processo de produção da ferramenta média, utilizando a maquinação CNC, é aproximadamente 32 vezes superior ao custo das operações do processo de produção utilizando a impressão 3D e o custo das operações do processo de produção da ferramenta pequena, utilizando a maquinação CNC, é aproximadamente 34 vezes superior ao custo das operações do processo de produção utilizando a impressão 3D. Verifica-se que a produção de todas as ferramentas, pela maquinação CNC, tem associado um custo de operações mais elevado do que o custo de operações associada à produção pela impressão 3D, devido ao número de etapas da maquinação CNC superior ao número de etapas da impressão 3D;
- Impressão 3D: o custo das operações do processo de produção de todas as ferramentas utilizando a impressão 3D é consideravelmente inferior ao custo das operações do processo de produção utilizando a maquinação CNC devido ao menor número de operações comparando com o processo de produção utilizando a maquinação CNC e ao facto de não ser necessário um operador a supervisionar o processo.

- Custo de manutenção

Os equipamentos que apresentam o custo de manutenção mais elevado correspondem à máquina CNC e à impressora Stratasys Fortus 450mc. Através do gráfico da Figura 51 verifica-se que o custo da manutenção da impressora Ultimaker 3 Extend é inferior ao custo da manutenção na máquina CNC e na impressora Stratasys Fortus 450mc devido às características e aos componentes das máquinas (máquina CNC e impressora 3D).

- Custo de produção

O processo de produção de ferramentas que apresenta o custo de produção mais elevado corresponde ao processo de impressão utilizando a impressora Stratasys Fortus 450mc e os filamentos PC/SR100, devido ao elevado do custo dos materiais de impressão, do equipamento e da energia consumida e ao elevado do tempo de produção. Através do gráfico da Figura 52, verifica-se o seguinte:

- Maquinação CNC: o custo de produção da ferramenta grande é cerca de 3,5 vezes superior ao custo de produção utilizando a impressora Ultimaker 3 Extend, o custo de produção da ferramenta média é cerca de 11 vezes superior ao custo de produção utilizando a impressora Ultimaker 3 Extend e o custo de produção da ferramenta pequena é cerca de 8 vezes superior ao custo de produção utilizando a impressora Ultimaker 3 Extend. Verifica-se que a produção de todas as ferramentas, pela maquinação CNC, tem associado um custo de produção mais elevado do que o custo de produção através da impressora Ultimaker 3 Extend, devido ao custo dos materiais de impressão, do equipamento e ao tempo de produção;
- Ultimaker 3 Extend: o custo de produção das ferramentas, com uma altura de camada de 0,1 mm e de 0,127 mm, considere-se aproximadamente 2 vezes superior ao custo de produção das ferramentas, com uma altura de camada de 0,254 mm. Este aumento deve-se ao elevado tempo necessário para impressão quando a resolução por camada é superior;
- Stratasys Fortus 450mc com filamento ULTEM1010: o custo de produção da ferramenta grande é cerca de 9 vezes superior ao custo de produção utilizando a impressora Ultimaker 3 Extend, o custo de produção da ferramenta média é cerca de 11 vezes superior ao custo de produção utilizando a impressora Ultimaker 3 Extend e o custo de produção da ferramenta pequena é cerca de 9 vezes superior ao custo de produção utilizando a impressora Ultimaker 3 Extend. Verifica-se que a produção de todas as ferramentas, através da Stratasys Fortus 450mc com filamento ULTEM1010, tem associado um custo de produção mais elevado do que o custo de produção através da impressora Ultimaker 3 Extend, devido ao custo dos materiais de impressão, do equipamento e ao tempo de produção;
- Stratasys Fortus 450mc com filamento PC: o custo de produção da ferramenta grande é cerca de 11 vezes superior ao custo de produção utilizando a impressora Ultimaker 3 Extend, o custo de produção da ferramenta média é cerca de 12 vezes superior ao custo de produção utilizando a impressora Ultimaker 3 Extend e o custo de produção da ferramenta pequena é cerca de 10 vezes superior ao custo de produção utilizando a impressora Ultimaker 3 Extend. Verifica-se que a produção de todas as ferramentas, através da Stratasys Fortus 450mc com filamento PC, tem associado um custo de produção mais elevado do que o custo de produção através da impressora Ultimaker 3 Extend, devido ao custo dos materiais de impressão, do equipamento e ao tempo de

produção.

- Tempo de produção

O processo de produção de ferramentas que apresenta o tempo de produção mais elevado corresponde ao processo de maquinação CNC, devido ao tempo de ciclo de fabrico bastante elevado associado ao processo implementado na Lauak e ao elevado número de etapas da maquinação CNC. Através do gráfico da Figura 53, verifica-se o seguinte:

- Maquinação CNC: o processo de produção das ferramentas grande, média e pequena tem uma duração aproximada de 680 horas;
- Ultimaker 3 Extend: o processo de produção da ferramenta grande com as alturas de camada de 0,1 mm, 0,127 mm e 0,254 mm tem uma duração aproximada de 541 horas, 428 horas e 218 horas, respetivamente; a produção da ferramenta média com as alturas de camada de 0,1 mm, 0,127 mm e 0,254 mm tem uma duração aproximada de 158 horas, 126 horas e 67 horas, respetivamente, a produção da ferramenta pequena com as alturas de camada de 0,1 mm, 0,127 mm e 0,254 mm tem uma duração aproximada de 118 horas, 95 horas e 50 horas, respetivamente. Verifica-se que os tempos do processo de produção utilizando a impressora Ultimaker 3 Extend são mais baixos comparando com os tempos do processo de produção utilizando a maquinação CNC, devido ao menor número de etapas do processo de produção e ao tempo de ciclo de fabrico nulo. Verifica-se também que os tempos do processo de produção utilizando a impressora Ultimaker 3 Extend são mais elevados comparando com os tempos do processo de produção utilizando a impressora Stratasys Fortus 450mc devido ao modo de funcionamento demorado e das características da impressora Ultimaker 3 Extend;
- Stratasys Fortus 450mc com filamento ULTEM1010: o processo de produção da ferramenta grande tem uma duração aproximada de 45 horas, o processo de produção da ferramenta média tem uma duração aproximada de 19 horas e o processo de produção da ferramenta pequena tem uma duração aproximada de 16 horas. Verifica-se que os tempos do processo de produção utilizando a impressora Stratasys Fortus 450mc com filamento ULTEM1010 são os mais baixos comparando com os tempos do processo de produção utilizando as outras tecnologias (Ultimaker 3 Extend ou Stratasys Fortus 450mc com filamento PC). Verifica-se que os tempos do processo de produção utilizando a impressora Stratasys Fortus 450mc com filamento ULTEM1010 são mais baixos comparando com os tempos do processo de produção utilizando a maquinação CNC, devido ao menor número de etapas do processo de produção e ao tempo de ciclo de fabrico nulo. Verifica-se também que os tempos do processo de produção utilizando a impressora Stratasys Fortus 450mc com filamento ULTEM1010 são os mais baixos comparando com os tempos do processo de produção utilizando a impressora Stratasys Fortus 450mc com filamento PC devido às características da impressão

utilizando o filamento ULTEM1010 na produção de ferramentas;

- Stratays Fortus 450mc com filamento PC: o processo de produção da ferramenta grande tem uma duração aproximada de 193 horas, o processo de produção da ferramenta média tem uma duração aproximada de 63 horas e o processo de produção da ferramenta pequena tem uma duração aproximada de 50 horas. Verifica-se que os tempos do processo de produção utilizando a impressora Stratays Fortus 450mc com filamento PC são mais baixos comparando com os tempos do processo de produção utilizando a maquinação CNC, devido ao menor número de etapas do processo de produção e ao tempo de ciclo de fabrico nulo. Verifica-se também que os tempos do processo de produção utilizando a impressora Stratays Fortus 450mc com filamento PC são os mais elevados comparando com os tempos do processo de produção utilizando a impressora Stratays Fortus 450mc com filamento ULTEM1010 devido às características da impressão utilizando o filamento PC na produção de ferramentas.

A análise da Figura 54 permite tirar as seguintes conclusões sobre a produção das ferramentas grande, média e pequena:

- O processo produtivo com maior tempo de produção é a maquinação CNC;
- O processo produtivo com menor tempo de produção é a impressão 3D utilizando a impressora Ultimaker 3 Extend definida para imprimir com espessura de camada 0,254 mm;
- O processo produtivo com maior custo de produção é a impressão 3D utilizando a impressora Stratays Fortus 450mc definida para imprimir com PC/SR100;
- O processo produtivo com menor custo de produção é a corresponde à impressão 3D utilizando a impressora Ultimaker 3 Extend definida para imprimir com espessura de camada 0,254 mm.

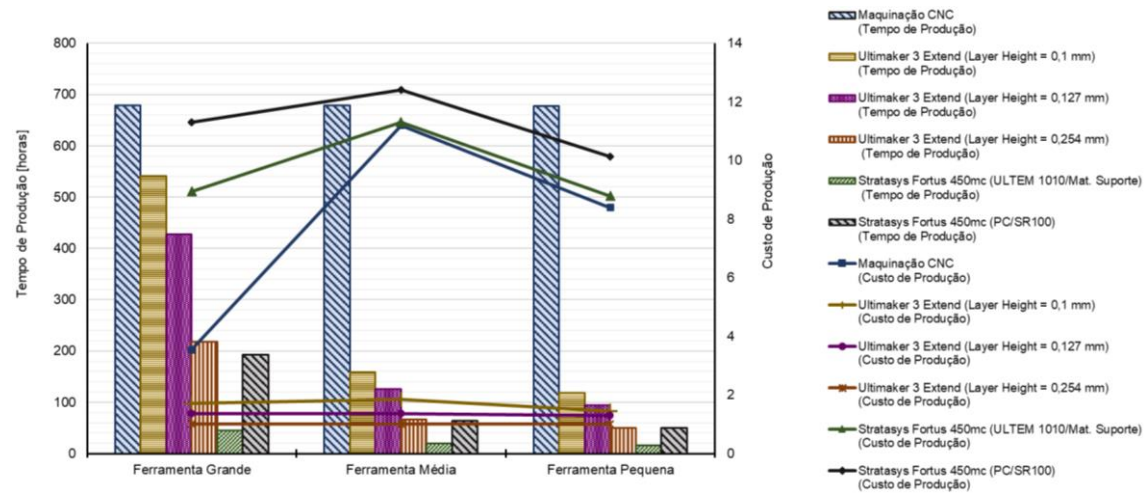


Figura 54 – Comparação dos tempos e dos custos de produção utilizando as diferentes tecnologias.

Capítulo 5

Conclusões

O presente trabalho teve como objetivo a realização de um estudo sobre a viabilidade da impressão 3D de polímeros pelo processo de FFF, na produção de ferramentas de estampagem por *Rubber Pad Forming*. Esta forma de produção é designada por *rapid tooling*, devido a reduzir consideravelmente os tempos de produção, contudo é necessário averiguar se cumpre os requisitos de qualidade e os custos associados. Os conceitos de *rapid tooling*, *rapid prototyping* e *rapid casting* estão fortemente relacionados com o fabrico aditivo, visto que o primeiro consiste num método de produzir ferramentas através de prototipagem rápida, o segundo tem a função de tornar algo projetado em protótipos, peças funcionais ou ferramentas e o terceiro consiste num método de RP através de tecnologias de fabrico aditivo para os processos de fundição (moldes).

Atualmente, os polímeros existentes aplicados na impressão 3D FFF, apresentam as mais variadas características, o que permite um número elevado de aplicações, muitas das quais funcionais, conforme os requisitos a cumprir por parte das peças ou das ferramentas produzidas por impressão 3D FFF. Os polímeros ABS-M30, ASA, PLA-*flax*, PLA-FV e PLA-carbonato de cálcio possuem elevada resistência à tração. Os polímeros HDPE, HIPS, Nylon 12, PC-ABS e TPU possuem elevada resistência ao impacto. Os polímeros HDPE, Nylon 6 e 12 e PEEK possuem elevada resistência à fadiga.

A revisão bibliográfica permitiu descrever os principais conceitos, as tecnologias e os materiais relacionados com o fabrico aditivo e dar a perceção de que o fabrico aditivo tem a capacidade de ser uma tecnologia promissora para a produção de ferramentas em muitas áreas da indústria.

A impressão 3D FFF tem-se tornado uma tecnologia capaz de produzir ferramentas a aplicar nas diferentes áreas da indústria, como a injeção plástica e a produção de moldes de areia. Contudo, a qualidade e a resistência mecânica de peças produzidas pela impressão 3D FFF e a própria precisão dimensional e geométrica são influenciadas pelos parâmetros de impressão definidos e a orientação da peça em relação ao prato de impressão.

O trabalho iniciou-se com a preparação da impressora DeltaIPS que consistiu na calibração e aumento da precisão através do alinhamento da estrutura, do controlo dimensional de um modelo e da calibração pelo *software* controlador da impressora. Calibrou-se também uma impressora convencional do InnovationLAB (Blocks One MKII). Após a calibração das impressoras, realizou-se o ajuste do perfil de impressão associado a cada impressora e produziu-se uma ferramenta no material PLA que foi posteriormente usada para estampagem pelo processo de *Rubber Pad Stamping*

A ferramenta foi testada com a estampagem de 20 peças em chapa de alumínio 2024 T3 com 1,2 mm de espessura, tendo-se feito o controlo dimensional de forma a detetar-se algum desgaste ou deformação, a qual possibilitou a concluir que o processo de estampagem de chapa provoca uma baixa deformação na ferramenta, compatível com as tolerâncias exigidas.

Apresentou-se ainda um estudo sobre a viabilidade da produção de ferramentas por impressão 3D usando materiais poliméricos, comparando-se com o processo tradicional, produção por CNC. O estudo incidiu sobre ferramentas de 3 dimensões diferentes (pequena média e grande) e a simulação da impressão com vários materiais (PLA, PC e ULTEM 1010), recorrendo a impressoras de diferentes gamas.

A recolha e o tratamento da informação, sobre o fabrico convencional atual da Lauak, permitiu concluir que as principais diferenças entre a maquinação CNC e a impressão 3D são os custos da matéria-prima e das máquinas, os tempos de produção, os tipos de tarefas a realizar e os responsáveis encarregues dessas tarefas. Após o tratamento da informação, realizou-se uma análise detalhada dos custos de desperdício, de material consumido, de operações, de manutenção e de produção e também uma avaliação dos tempos de produção pela maquinação CNC e pela impressão 3D.

O custo de produção consiste no custo total de produção das ferramentas e a comparação entre as duas tecnologias em estudo, permitindo concluir que o custo de produção mais elevado corresponde à produção de ferramentas pela impressora Stratasys Fortus 450mc utilizando os filamentos PC/SR100. A comparação do tempo de produção entre a maquinação CNC e a impressão 3D, permitiu concluir que o tempo de produção mais elevado corresponde à produção de ferramentas pela maquinação CNC. Estas conclusões foram apresentadas também pelos investigadores R. Leal, et al. [37] no seu artigo, que justificaram o maior custo de produção e o menor tempo de produção da tecnologia fabrico aditivo, pelo facto do elevado custo do pó metálico e do equipamento e a elevada rapidez do fabrico aditivo.

R. Leal, et al. [37] compararam o número de operações nos processos fabrico aditivo e fundição com modelos em cera perdida e verificaram que o fabrico aditivo necessita de menos operações o que diminui o tempo de produção da ferramenta e facilita os processos internos de logística. Pela análise específica dos tempos de produção do processo de maquinação com aço laminado e do processo fabrico aditivo, os autores verificaram que o processo de maquinação com aço laminado é o que apresenta os custos de produção mais baixos mas também o tempo de produção maior [37].

Assim como R. J. Urbanic et al. [38] verificaram que o custo de produção por impressão 3D é inferior ao custo de produção por fundição até à produção de seis a sete peças, a partir deste número de peças, o custo de produção por impressão 3D torna-se superior ao custo de produção por fundição. R. J. Urbanic et al. [38] observaram que o processo de produção por fundição, até à produção de seis a sete peças, custa mais cerca de mil dólares do que a produção por impressão 3D, enquanto que para uma produção elevada de peças, o custo de produção por fundição é cerca de quatro mil dólares mais baixo do que o custo de produção por impressão 3D

[38].

O estudo da viabilidade económica permitiu concluir que a implementação da impressora Ultimaker 3 Extend na produção das ferramentas de estampagem é uma alternativa mais economicamente vantajosa e mais rápida que a produção de ferramentas por maquinaria CNC, sem o comprometimento da qualidade das peças produzidas, mesmo para peças de grande dimensão. Para peças pequenas os custos de impressão usando impressoras de gama alta são próximos dos custos usando-se processos convencionais, mas os tempos de produção diminuem consideravelmente.

Como perspetivas futuras de trabalho, é proposto o estudo do ciclo de vida das ferramentas produzidas por maquinaria CNC e por impressão 3D com o objetivo de obter uma perceção sobre a durabilidade das ferramentas produzidas pelas duas tecnologias e, assim fundamentar a viabilidade económica.

Bibliografia

- [1] AIRBUS, "No Title," *Airbus delivers strong 2019 commercial aircraft performance*, 2020. <https://www.airbus.com/newsroom/press-releases/en/2020/01/airbus-delivers-strong-2019-commercial-aircraft-performance.html> (accessed Jul. 31, 2020).
- [2] T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. T. Q. Nguyen, and D. Hui, "Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges," *Compos. Part B Eng.*, vol. 143, no. February, pp. 172–196, 2018, doi: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012.
- [3] J. Herzberger, J. M. Serrine, C. B. Williams, and T. E. Long, "Polymer Design for 3D Printing Elastomers: Recent Advances in Structure, Properties, and Printing," *Prog. Polym. Sci.*, vol. 97, p. 101144, 2019, doi: 10.1016/j.progpolymsci.2019.101144.
- [4] A. D. Valino, J. R. C. Dizon, A. H. Espera, Q. Chen, J. Messman, and R. C. Advincula, "Advances in 3D printing of thermoplastic polymer composites and nanocomposites," *Prog. Polym. Sci.*, vol. 98, p. 101162, 2019, doi: 10.1016/j.progpolymsci.2019.101162.
- [5] S. Singh, C. Prakash, and S. Ramakrishna, "3D printing of polyether-ether-ketone for biomedical applications," *Eur. Polym. J.*, vol. 114, no. February, pp. 234–248, 2019, doi: 10.1016/j.eurpolymj.2019.02.035.
- [6] H. Wu *et al.*, "Recent developments in polymers/polymer nanocomposites for additive manufacturing," *Prog. Mater. Sci.*, vol. 111, no. April 2019, 2020, doi: 10.1016/j.pmatsci.2020.100638.
- [7] S. Raam Kumar, S. Sridhar, R. Venkatraman, and M. Venkatesan, "Polymer additive manufacturing of ASA structure: Influence of printing parameters on mechanical properties," *Mater. Today Proc.*, no. xxxx, pp. 2–5, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.04.500.
- [8] Z. Katančić, J. Travaš-Sejdić, and Z. Hrnjak-Murčić, "Study of flammability and thermal properties of high-impact polystyrene nanocomposites," *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 96, no. 12, pp. 2104–2111, 2011, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2011.09.020.
- [9] S. Krishna and C. M. Patel, "Experimental and computational study of mechanical properties of nylon 6 nanocomposites reinforced with coconut shell nanoparticles," *Mater. Today Commun.*, vol. 24, no. December 2019, p. 100981, 2020, doi: 10.1016/j.mtcomm.2020.100981.
- [10] F. Fischer and Stratasys Ltd, "Thermoplastics: The strongest choice for 3D printing," *Www.Stratasys.Com*, 2011, [Online]. Available: <http://www.stratasys.com/resources/~~/media/D4B265BF1B624CDD8DD20CFD2BD298C8.pdf>.
- [11] H. Li, G. Taylor, V. Bheemreddy, O. Iyibilgin, M. Leu, and K. Chandrashekhara, "Modeling

- and characterization of fused deposition modeling tooling for vacuum assisted resin transfer molding process,” *Addit. Manuf.*, vol. 7, pp. 64–72, 2015, doi: 10.1016/j.addma.2015.02.003.
- [12] K. M. Rahman, T. Letcher, and R. Reese, “Mechanical properties of additively manufactured peek components using fused filament fabrication,” *ASME Int. Mech. Eng. Congr. Expo. Proc.*, vol. 2A-2015, no. November, 2015, doi: 10.1115/IMECE2015-52209.
- [13] J. Y. Lee, J. An, and C. K. Chua, “Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials,” *Appl. Mater. Today*, vol. 7, pp. 120–133, 2017, doi: 10.1016/j.apmt.2017.02.004.
- [14] W. Wang *et al.*, “Recent advances in thermoplastic elastomers from living polymerizations: Macromolecular architectures and supramolecular chemistry,” *Prog. Polym. Sci.*, vol. 95, pp. 1–31, 2019, doi: 10.1016/j.progpolymsci.2019.04.002.
- [15] M. Murariu and P. Dubois, “PLA composites: From production to properties,” *Adv. Drug Deliv. Rev.*, vol. 107, pp. 17–46, 2016, doi: 10.1016/j.addr.2016.04.003.
- [16] K. J. Jem and B. Tan, “The development and challenges of poly (lactic acid) and poly (glycolic acid),” *Adv. Ind. Eng. Polym. Res.*, vol. 3, no. 2, pp. 60–70, 2020, doi: 10.1016/j.aiepr.2020.01.002.
- [17] S. Farah, D. G. Anderson, and R. Langer, “Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications — A comprehensive review,” *Adv. Drug Deliv. Rev.*, vol. 107, pp. 367–392, 2016, doi: 10.1016/j.addr.2016.06.012.
- [18] K. G. J. Christiyan, U. Chandrasekhar, and K. Venkateswarlu, “A study on the influence of process parameters on the Mechanical Properties of 3D printed ABS composite,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 114, no. 1, 2016, doi: 10.1088/1757-899X/114/1/012109.
- [19] W. Wu, P. Geng, G. Li, D. Zhao, H. Zhang, and J. Zhao, “Influence of layer thickness and raster angle on the mechanical properties of 3D-printed PEEK and a comparative mechanical study between PEEK and ABS,” *Materials (Basel)*, vol. 8, no. 9, pp. 5834–5846, 2015, doi: 10.3390/ma8095271.
- [20] A. W. Gebisa and H. G. Lemu, “Influence of 3D printing FDM process parameters on tensile property of ultem 9085,” *Procedia Manuf.*, vol. 30, pp. 331–338, 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2019.02.047.
- [21] T. J. Hoskins, K. D. Dearn, and S. N. Kukureka, “Mechanical performance of PEEK produced by additive manufacturing,” *Polym. Test.*, vol. 70, pp. 511–519, 2018, doi: 10.1016/j.polymertesting.2018.08.008.
- [22] N. G. Tanikella, B. Wittbrodt, and J. M. Pearce, “Tensile strength of commercial polymer materials for fused filament fabrication 3D printing,” *Addit. Manuf.*, vol. 15, no. October, pp. 40–47, 2017, doi: 10.1016/j.addma.2017.03.005.

- [23] Stratasys.Inc, "FDM for Composite Tooling 2 . 0," p. 99, 2018.
- [24] Stratasys Ltd, "fdm-nylon-12cf @ www.stratasys.com." <https://www.stratasys.com/materials/search/fdm-nylon-12cf#imageCarousel>.
- [25] Stratasys Ltd, "Stratasys FDM 3D Printers."
- [26] Stratasys Ltd, "pc-iso @ www.stratasys.com." <https://www.stratasys.com/materials/search/pc-iso>.
- [27] A. Equbal, A. K. Sood, and M. Shamim, "Rapid tooling: A major shift in tooling practice," *Manuf. Ind. Eng.*, vol. 14, no. 3–4, pp. 1–9, 2015, doi: 10.12776/mie.v14i3-4.325.
- [28] M. Upadhyay, T. Sivarupan, and M. El Mansori, "3D printing for rapid sand casting—A review," *J. Manuf. Process.*, vol. 29, pp. 211–220, 2017, doi: 10.1016/j.jmapro.2017.07.017.
- [29] P. A. Thomas, P. K. Aahlada, N. S. Kiran, and J. Ivvala, "A Review on Transition in the Manufacturing of Mechanical Components from Conventional Techniques to Rapid Casting Using Rapid Prototyping," *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 5, pp. 11990–12002, 2018, doi: 10.1016/j.matpr.2018.02.173.
- [30] P. Simpson, A. D. Zakula, J. Nelson, J. K. Dworshak, E. M. Johnson, and C. A. Ulven, "Injection molding with an additive manufactured tool," *Polym. Eng. Sci.*, vol. 59, no. 9, pp. 1911–1918, 2019, doi: 10.1002/pen.25192.
- [31] V. G. Zaragoza, M. Strano, L. Iorio, and M. Monno, "Sheet metal bending with flexible tools," *Procedia Manuf.*, vol. 29, pp. 232–239, 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2019.02.131.
- [32] P. Pombinha, M. Leite, A. Carvalho, R. Cláudio, A. Silva, and A. R. Ribeiro, "A study on the effect of layer thickness and infill density on geometric tolerance in FDM.," *Proc. 3rd Int. Conf. Prog. Addit. Manuf. (Pro-AM 2018)*, no. May, pp. 14–17, 2018.
- [33] T. Yao, J. Ye, Z. Deng, K. Zhang, Y. Ma, and H. Ouyang, "Tensile failure strength and separation angle of FDM 3D printing PLA material: Experimental and theoretical analyses," *Compos. Part B Eng.*, vol. 188, no. February, p. 107894, 2020, doi: 10.1016/j.compositesb.2020.107894.
- [34] P. Minetola, F. Calignano, and M. Galati, "Comparing geometric tolerance capabilities of additive manufacturing systems for polymers," *Addit. Manuf.*, vol. 32, no. May 2019, p. 101103, 2020, doi: 10.1016/j.addma.2020.101103.
- [35] B. S. Rupal, K. Ramadass, and A. J. Qureshi, "Investigating the effect of motor micro-stepping on the geometric tolerances of Fused Filament Fabrication printed parts," *Procedia CIRP*, vol. 92, pp. 9–14, 2020, doi: 10.1016/j.procir.2020.05.172.
- [36] N. Ahmed, "Direct metal fabrication in rapid prototyping: A review," *J. Manuf. Process.*, vol. 42, no. January 2018, pp. 167–191, 2019, doi: 10.1016/j.jmapro.2019.05.001.
- [37] R. Leal *et al.*, "Additive manufacturing tooling for the automotive industry," *Int. J. Adv.*

- Manuf. Technol.*, vol. 92, no. 5–8, pp. 1671–1676, 2017, doi: 10.1007/s00170-017-0239-8.
- [38] R. J. Urbanic and S. M. Saqib, “A manufacturing cost analysis framework to evaluate machining and fused filament fabrication additive manufacturing approaches,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 102, no. 9–12, pp. 3091–3108, 2019, doi: 10.1007/s00170-019-03394-x.
- [39] J. M. Chacón, M. A. Caminero, E. García-Plaza, and P. J. Núñez, “Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection,” *Mater. Des.*, vol. 124, pp. 143–157, 2017, doi: 10.1016/j.matdes.2017.03.065.
- [40] D. Popescu, A. Zapciu, C. Amza, F. Baci, and R. Marinescu, “FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review,” *Polym. Test.*, vol. 69, no. April, pp. 157–166, 2018, doi: 10.1016/j.polymertesting.2018.05.020.
- [41] RepRap, “Delta geometry - RepRap,” pp. 1–7, 2019, [Online]. Available: https://reprap.org/wiki/Delta_geometry.
- [42] “resetting-the-origin-of-a-delta @ forum.duet3d.com.” <https://forum.duet3d.com/topic/3800/resetting-the-origin-of-a-delta>.
- [43] G. Sala, “A numerical and experimental approach to optimise sheet stamping technogie: Part II - aluminium alloys rubbers-forming,” *Mater. Des.*, vol. 22, no. 4, pp. 299–315, 2001, doi: 10.1016/s0261-3069(00)00088-1.
- [44] J. R. Walker and K. W. Stier, *Modern Metalworking*, 10^a. Goodheart-Wilcox Co., 2018.
- [45] B. Aloyaydi, S. Sivasankaran, and A. Mustafa, “Investigation of infill-patterns on mechanical response of 3D printed poly-lactic-acid,” *Polym. Test.*, vol. 87, no. April, p. 106557, 2020, doi: 10.1016/j.polymertesting.2020.106557.
- [46] B. Goldschmidt, “What Is an Infill Pattern?” <https://all3dp.com/2/cura-infill-patterns-all-you-need-to-know/> (accessed Apr. 28, 2021).
- [47] BLOCKS, “One MKII.” <https://www.blockstec.com/onemkii.html>.
- [48] C. Isabel, “Integração da análise dos custos do ciclo de vida na aplicação PRONIC - Estruturação de informação para edifícios de betão armado,” Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias, 2017.

Anexos

ANEXO 1- Desvios das cotas medidas no gabarito de calibração da impressora DeltaIPS

ANEXO 1.1. - Desvios das cotas exteriores na rotação 0°

ROTAÇÃO 0° EXTERIORES				
X	Y	Cota Nominal	Cota Real	Diferença
0	180	10	10,38	0,38
0	100	10	10,34	0,34
0	40	10	10,46	0,46
0	0	10	10,38	0,38
0	-40	10	10,51	0,51
0	-100	10	10,5	0,5
0	-180	10	10,49	0,49
180	0	10	10,68	0,68
100	0	10	10,51	0,51
40	0	10	10,48	0,48
0	0	10	10,27	0,27
-40	0	10	10,29	0,29
-100	0	10	10,29	0,29
-180	0	10	10,13	0,13
0	170	30	30,31	0,31
0	110	30	30,38	0,38
0	70	30	30,59	0,59
0	30	30	30,49	0,49
0	-30	30	30,49	0,49
0	-70	30	30,53	0,53
0	-110	30	30,77	0,77
0	-170	30	31,02	1,02
170	0	30	30,81	0,81
110	0	30	30,62	0,62
70	0	30	30,47	0,47
30	0	30	30,4	0,4
-30	0	30	30,25	0,25
-70	0	30	29,98	-0,02
-110	0	30	30,02	0,02
-170	0	30	29,94	-0,06
0	160	50	50,08	0,08
0	120	50	50,2	0,2
0	80	50	50,25	0,25
0	40	50	50,4	0,4
0	0	50	50,42	0,42
0	-40	50	50,62	0,62
0	-80	50	50,83	0,83
0	-120	50	51,03	1,03
0	-160	50	51,34	1,34
160	0	50	51,04	1,04
120	0	50	50,7	0,7
80	0	50	50,58	0,58
40	0	50	50,4	0,4
0	0	50	50,12	0,12
-40	0	50	50	0
-80	0	50	49,86	-0,14
-120	0	50	49,83	-0,17
-160	0	50	49,57	-0,43

ROTAÇÃO 0° EXTERIORES				
X	Y	Cota Nominal	Cota Real	Diferença
0	150	70	69,82	-0,18
0	110	70	70,15	0,15
0	50	70	70,39	0,39
0	-30	70	70,67	0,67
0	-70	70	71,06	1,06
0	-110	70	71,33	1,33
0	-150	70	71,62	1,62
150	0	70	71,24	1,24
110	0	70	70,94	0,94
50	0	70	70,48	0,48
-30	0	70	70,11	0,11
-70	0	70	69,78	-0,22
-110	0	70	69,68	-0,32
-150	0	70	69,47	-0,53
0	140	90	89,79	-0,21
0	100	90	89,99	-0,01
0	60	90	90,17	0,17
0	40	90	90,3	0,3
0	-40	90	90,9	0,9
0	-60	90	91,07	1,07
0	-100	90	91,43	1,43
0	-140	90	91,86	1,86
140	0	90	91,43	1,43
100	0	90	91,01	1,01
60	0	90	90,65	0,65
40	0	90	90,5	0,5
-40	0	90	89,92	-0,08
-60	0	90	89,86	-0,14
-100	0	90	89,55	-0,45
-140	0	90	89,39	-0,61
0	130	110	109,64	-0,36
0	110	110	109,8	-0,2
0	90	110	109,88	-0,12
0	50	110	110,13	0,13
0	10	110	110,46	0,46
0	-10	110	110,65	0,65
0	-50	110	111,12	1,12
0	-90	110	111,54	1,54
0	-110	110	111,75	1,75
0	-130	110	112,05	2,05
130	0	110	111,46	1,46
110	0	110	111,2	1,2
90	0	110	111,01	1,01
50	0	110	111,06	1,06
10	0	110	110,27	0,27
-10	0	110	110,05	0,05
-50	0	110	109,72	-0,28
-90	0	110	109,43	-0,57
-110	0	110	109,24	-0,76
-130	0	110	109,17	-0,83

ROTAÇÃO 0° EXTERIORES				
X	Y	Cota Nominal	Cota Real	Diferença
0	120	130	129,59	-0,41
0	80	130	129,84	-0,16
0	60	130	130,06	0,06
0	20	130	130,4	0,4
0	-20	130	130,85	0,85
0	-60	130	131,39	1,39
0	-80	130	131,69	1,69
0	-120	130	132,19	2,19
120	0	130	131,55	1,55
80	0	130	130,99	0,99
60	0	130	130,81	0,81
20	0	130	130,34	0,34
-20	0	130	129,79	-0,21
-60	0	130	129,66	-0,34
-80	0	130	129,41	-0,59
-120	0	130	129	-1
0	110	150	149,53	-0,47
0	70	150	149,94	-0,06
0	50	150	150,01	0,01
0	10	150	150,54	0,54
0	-30	150	151,09	1,09
0	-70	150	151,73	1,73
0	-110	150	152,37	2,37
110	0	150	151,61	1,61
70	0	150	150,98	0,98
50	0	150	150,72	0,72
10	0	150	150,23	0,23
-30	0	150	149,66	-0,34
-70	0	150	149,35	-0,65
-110	0	150	148,9	-1,1
0	100	170	169,59	-0,41
0	60	170	169,89	-0,11
0	20	170	170,49	0,49
0	0	170	170,75	0,75
0	-40	170	171,38	1,38
0	-60	170	171,74	1,74
0	-100	170	172,46	2,46
100	0	170	171,67	1,67
60	0	170	170,87	0,87
20	0	170	170,4	0,4
0	0	170	170,05	0,05
-40	0	170	169,5	-0,5
-60	0	170	169,35	-0,65
-100	0	170	168,92	-1,08
0	90	190	189,63	-0,37
0	50	190	189,06	0,06
0	30	190	190,35	0,35
0	-10	190	190,97	0,97
0	-30	190	191,32	1,32
0	-50	190	191,67	1,67
0	-90	190	192,51	2,51
90	0	190	191,48	1,48
50	0	190	190,79	0,79
-10	0	190	189,91	-0,09
-50	0	190	189,38	-0,62
-90	0	190	188,74	-1,26

ROTAÇÃO 0° EXTERIORES				
X	Y	Cota Nominal	Cota Real	Diferença
0	80	210	209,45	-0,55
0	60	210	209,85	-0,15
0	20	210	210,35	0,35
0	-20	210	211,01	1,01
0	-60	210	211,88	1,88
0	-80	210	212,47	2,47
80	0	210	211,26	1,26
60	0	210	210,9	0,9
20	0	210	210,21	0,21
-20	0	210	209,55	-0,45
-60	0	210	208,92	-1,08
-80	0	210	208,66	-1,34
0	70	230	229,55	-0,45
0	50	230	229,91	-0,09
0	30	230	230,23	0,23
0	10	230	230,61	0,61
0	-10	230	231,13	1,13
0	-30	230	231,43	1,43
0	-50	230	231,81	1,81
0	-70	230	232,28	2,28
70	0	230	231,27	1,27
50	0	230	230,86	0,86
30	0	230	230,46	0,46
10	0	230	230,06	0,06
-10	0	230	229,64	-0,36
-30	0	230	229,43	-0,57
-50	0	230	229,05	-0,95
-70	0	230	228,74	-1,26
0	60	250	249,72	-0,28
0	40	250	250,13	0,13
0	20	250	250,44	0,44
0	-20	250	251,36	1,36
0	-40	250	251,8	1,8
0	-60	250	252,25	2,25
60	0	250	251,1	1,1
40	0	250	250,62	0,62
20	0	250	250,26	0,26
-20	0	250	249,58	-0,42
-40	0	250	249,07	-0,93
-60	0	250	248,79	-1,21
0	50	270	269,83	-0,17
0	30	270	270,27	0,27
0	10	270	270,65	0,65
0	-10	270	271,12	1,12
0	-30	270	271,65	1,65
0	-50	270	272,17	2,17
50	0	270	270,86	0,86
30	0	270	270,47	0,47
10	0	270	269,96	-0,04
-10	0	270	269,64	-0,36
-30	0	270	269,24	-0,76
-50	0	270	268,76	-1,24
0	40	290	290,08	0,08
0	20	290	290,58	0,58
0	0	290	291,02	1,02
0	-20	290	291,53	1,53
0	-40	290	292,03	2,03
40	0	290	290,69	0,69
20	0	290	290,18	0,18
0	0	290	289,79	-0,21
-20	0	290	289,43	-0,57
-40	0	290	288,98	-1,02

ANEXO 1.2. - Desvios das cotas interiores na rotação 0°

ROTAÇÃO 0° INTERIORES				
X	Y	Cota Nominal	Cota Real	Diferença
0	170	10	9,33	-0,67
0	110	10	9,46	-0,54
0	70	10	9,47	-0,53
0	30	10	9,44	-0,56
0	-30	10	9,63	-0,37
0	-70	10	9,6	-0,4
0	-110	10	9,62	-0,38
0	-170	10	9,53	-0,47
170	0	10	9,64	-0,36
110	0	10	9,61	-0,39
70	0	10	9,59	-0,41
30	0	10	9,63	-0,37
-30	0	10	9,53	-0,47
-70	0	10	9,49	-0,51
-110	0	10	9,5	-0,5
-170	0	10	9,47	-0,53
0	160	30	29,24	-0,76
0	120	30	29,33	-0,67
0	80	30	29,41	-0,59
0	40	30	29,46	-0,54
0	0	30	29,58	-0,42
0	-40	30	29,77	-0,23
0	-80	30	29,83	-0,17
0	-120	30	29,96	-0,04
0	-160	30	30,05	0,05
160	0	30	29,88	-0,12
120	0	30	29,75	-0,25
80	0	30	29,64	-0,36
40	0	30	29,62	-0,38
0	0	30	29,55	-0,45
-40	0	30	29,55	-0,45
-80	0	30	29,3	-0,7
-120	0	30	29,33	-0,67
-160	0	30	29,19	-0,81
0	150	50	49,1	-0,9
0	110	50	49,17	-0,83
0	50	50	49,34	-0,66
0	-30	50	49,79	-0,21
0	-70	50	49,92	-0,08
0	-110	50	50,17	0,17
0	-150	50	50,35	0,35
150	0	50	50,02	0,02
110	0	50	49,88	-0,12
50	0	50	49,67	-0,33
-30	0	50	49,4	-0,6
-70	0	50	49,19	-0,81
-110	0	50	49,13	-0,87
-150	0	50	48,97	-1,03

ROTAÇÃO 0° INTERIORES				
X	Y	Cota Nominal	Cota Real	Diferença
0	140	70	68,96	-1,04
0	100	70	69,15	-0,85
0	60	70	69,31	-0,69
0	40	70	69,39	-0,61
0	0	70	69,59	-0,41
0	-40	70	69,86	-0,14
0	-60	70	70,11	0,11
0	-100	70	70,36	0,36
0	-140	70	70,63	0,63
140	0	70	70,22	0,22
100	0	70	69,64	-0,36
60	0	70	69,8	-0,2
40	0	70	69,65	-0,35
0	0	70	69,48	-0,52
-40	0	70	69,23	-0,77
-60	0	70	69,08	-0,92
-100	0	70	68,95	-1,05
-140	0	70	68,83	-1,17
0	130	90	88,85	-1,15
0	110	90	88,97	-1,03
0	90	90	89,11	-0,89
0	50	90	89,31	-0,69
0	10	90	89,52	-0,48
0	-10	90	89,74	-0,26
0	-50	90	90,11	0,11
0	-90	90	90,51	0,51
0	-110	90	90,69	0,69
0	-130	90	90,88	0,88
130	0	90	90,36	0,36
110	0	90	90,2	0,2
90	0	90	90,05	0,05
50	0	90	89,76	-0,24
10	0	90	89,45	-0,55
-10	0	90	89,34	-0,66
-50	0	90	89,04	-0,96
-90	0	90	88,87	-1,13
-110	0	90	88,69	-1,31
-130	0	90	88,68	-1,32
0	120	110	108,82	-1,18
0	80	110	108,92	-1,08
0	60	110	109,04	-0,96
0	20	110	109,51	-0,49
0	0	110	109,68	-0,32
0	-20	110	109,83	-0,17
0	-60	110	110,33	0,33
0	-80	110	110,65	0,65
0	-120	110	111,04	1,04
120	0	110	110,43	0,43
80	0	110	110,33	0,33
60	0	110	110,21	0,21
20	0	110	109,54	-0,46
0	0	110	109,36	-0,64
-20	0	110	109,14	-0,86
-60	0	110	108,9	-1,1
-80	0	110	108,71	-1,29
-120	0	110	108,46	-1,54

ROTAÇÃO 0° INTERIORES				
X	Y	Cota Nominal	Cota Real	Diferença
0	110	130	128,77	-1,23
0	70	130	129,05	-0,95
0	50	130	129,18	-0,82
0	10	130	129,6	-0,4
0	-30	130	130,09	0,09
0	-70	130	130,63	0,63
0	-110	130	131,17	1,17
110	0	130	130,54	0,54
70	0	130	130,03	0,03
50	0	130	129,85	-0,15
10	0	130	129,4	-0,6
-30	0	130	128,97	-1,03
-70	0	130	128,73	-1,27
-110	0	130	128,38	-1,62
0	100	150	148,68	-1,32
0	60	150	149,06	-0,94
0	20	150	149,52	-0,48
0	0	150	149,73	-0,27
0	-40	150	150,29	0,29
0	-60	150	150,68	0,68
0	-100	150	151,31	1,31
100	0	150	150,59	0,59
60	0	150	150,01	0,01
20	0	150	149,51	-0,49
0	0	150	149,27	-0,73
-40	0	150	148,82	-1,18
-60	0	150	148,68	-1,32
-100	0	150	148,28	-1,72
0	90	170	168,74	-1,26
0	50	170	169,15	-0,85
0	30	170	169,42	-0,58
0	-10	170	169,97	-0,03
0	-30	170	170,22	0,22
0	-50	170	170,59	0,59
0	-90	170	171,32	1,32
90	0	170	170,53	0,53
50	0	170	169,97	-0,03
30	0	170	169,69	-0,31
-10	0	170	169,09	-0,91
-30	0	170	168,9	-1,1
-50	0	170	168,6	-1,4
-90	0	170	168,25	-1,75
0	80	190	188,74	-1,26
0	60	190	188,99	-1,01
0	40	190	189,33	-0,67
0	0	190	189,91	-0,09
0	-20	190	190,2	0,2
0	-40	190	190,58	0,58
0	-60	190	190,94	0,94
0	-80	190	191,34	1,34
80	0	190	190,51	0,51
60	0	190	190,21	0,21
40	0	190	189,84	-0,16
0	0	190	189,2	-0,8
-20	0	190	188,96	-1,04
-40	0	190	188,71	-1,29
-60	0	190	188,41	-1,59
-80	0	190	188,2	-1,8

ROTAÇÃO 0° INTERIORES				
X	Y	Cota Nominal	Cota Real	Diferença
0	70	210	208,76	-1,24
0	50	210	209,07	-0,93
0	30	210	209,38	-0,62
0	10	210	209,75	-0,25
0	-10	210	210,03	0,03
0	-30	210	210,44	0,44
0	-50	210	210,84	0,84
0	-70	210	211,2	1,2
70	0	210	210,42	0,42
50	0	210	209,97	-0,03
30	0	210	209,6	-0,4
10	0	210	209,19	-0,81
-10	0	210	208,95	-1,05
-30	0	210	208,64	-1,36
-50	0	210	208,34	-1,66
-70	0	210	208	-2
0	60	230	228,94	-1,06
0	40	230	229,22	-0,78
0	20	230	229,61	-0,39
0	0	230	229,92	-0,08
0	-20	230	230,38	0,38
0	-40	230	230,73	0,73
0	-60	230	231,16	1,16
60	0	230	230,27	0,27
40	0	230	229,85	-0,15
20	0	230	229,41	-0,59
0	0	230	229,03	-0,97
-20	0	230	228,8	-1,2
-40	0	230	228,42	-1,58
-60	0	230	228,12	-1,88
0	50	250	249,06	-0,94
0	30	250	249,46	-0,54
0	10	250	249,8	-0,2
0	-10	250	250,26	0,26
0	-30	250	250,68	0,68
0	-50	250	251,14	1,14
50	0	250	250,1	0,1
30	0	250	249,67	-0,33
10	0	250	249,28	-0,72
-10	0	250	248,93	-1,07
-30	0	250	248,56	-1,44
-50	0	250	248,18	-1,82
0	40	270	269,26	-0,74
0	20	270	269,59	-0,41
0	0	270	270,14	0,14
0	-20	270	270,54	0,54
0	-40	270	271,05	1,05
40	0	270	269,85	-0,15
20	0	270	269,46	-0,54
0	0	270	269,06	-0,94
-20	0	270	268,67	-1,33
-40	0	270	268,3	-1,7
0	30	290	289,5	-0,5
0	10	290	290,01	0,01
0	-10	290	290,45	0,45
0	-30	290	290,91	0,91
30	0	290	289,77	-0,23
10	0	290	289,33	-0,67
-10	0	290	288,83	-1,17
-30	0	290	288,39	-1,61

ANEXO 1.3. - Desvios das cotas exteriores na rotação 30°

ROTAÇÃO 30°				
EXTERIORES				
X	Y	Cota Nominal	Cota Real	Diferença
90	155,88	10	10,38	0,38
80	138,56	10	10,70	0,70
40	69,28	10	10,49	0,49
10	17,32	10	10,23	0,23
0	0,00	10	10,40	0,40
-20	0,00	10	10,61	0,61
-40	-69,28	10	10,61	0,61
-80	-138,56	10	10,60	0,60
-90	-155,88	10	10,64	0,64
155,88	-90	10	10,68	0,68
138,56	-80	10	10,29	0,29
69,28	-40	10	10,41	0,41
17,32	-10	10	10,46	0,46
0	0	10	10,28	0,28
-34,64	20	10	10,26	0,26
-69,28	40	10	10,24	0,24
-138,56	80	10	10,27	0,27
-155,88	90	10	10,29	0,29
85	147,22	30	30,55	0,55
65	112,58	30	30,63	0,63
45	77,94	30	30,67	0,67
25	43,30	30	30,48	0,48
5	8,66	30	30,64	0,64
-15	-25,98	30	30,65	0,65
-35	-60,62	30	30,48	0,48
-75	-129,90	30	30,73	0,73
-85	-147,22	30	30,77	0,77
147,22	-85	30	30,73	0,73
112,58	-65	30	30,49	0,49
77,94	-45	30	30,59	0,59
43,30	-25	30	30,44	0,44
8,66	-5	30	30,30	0,30
-25,98	15	30	30,13	0,13
-60,62	35	30	29,96	-0,04
-129,90	75	30	29,98	-0,02
-147,22	85	30	29,90	-0,10
80	138,56	50	50,51	0,51
60	103,92	50	50,58	0,58
30	51,96	50	50,55	0,55
10	17,32	50	50,62	0,62
-20	-34,64	50	50,77	0,77
-40	-69,28	50	50,75	0,75
-70	-121,24	50	50,85	0,85
-80	-138,56	50	50,88	0,88
138,56	-80	50	51,05	1,05
103,92	-60	50	50,62	0,62
51,96	-30	50	50,42	0,42
17,32	-10	50	50,08	0,08
-34,64	20	50	49,93	-0,07
-69,28	40	50	49,78	-0,22
-121,24	70	50	49,41	-0,59
-138,56	80	50	49,69	-0,31

ROTAÇÃO 30°				
EXTERIORES				
X	Y	Cota Nominal	Cota Real	Diferença
75	129,90	70	70,66	0,66
65	112,58	70	70,62	0,62
35	60,62	70	70,64	0,64
15	25,98	70	70,85	0,85
-5	-8,66	70	70,91	0,91
-25	-43,30	70	70,55	0,55
-55	-95,26	70	71,08	1,08
-75	-129,90	70	71,07	1,07
129,90	-75	70	71,16	1,16
112,58	-65	70	70,95	0,95
60,62	-35	70	70,47	0,47
25,98	-15	70	69,88	-0,12
-8,66	5	70	69,60	-0,40
-43,30	25	70	69,67	-0,33
-95,26	55	70	69,35	-0,65
-129,90	75	70	69,22	-0,78
70	121,24	90	90,60	0,60
50	86,60	90	90,72	0,72
30	51,96	90	90,67	0,67
10	17,32	90	90,70	0,70
-20	-34,64	90	90,89	0,89
-40	-69,28	90	90,89	0,89
-70	-121,24	90	91,04	1,04
121,24	-70	90	91,23	1,23
86,60	-50	90	90,99	0,99
51,96	-30	90	90,66	0,66
17,32	-10	90	90,31	0,31
-34,64	20	90	89,55	-0,45
-69,28	40	90	89,45	-0,55
-121,24	70	90	89,19	-0,81
65	112,58	110	110,62	0,62
45	77,94	110	110,72	0,72
25	43,30	110	110,75	0,75
5	8,66	110	110,77	0,77
-35	-60,62	110	110,85	0,85
-55	-95,26	110	111,10	1,10
-65	-112,58	110	111,22	1,22
112,58	-65	110	111,31	1,31
77,94	-45	110	110,95	0,95
43,30	-25	110	110,48	0,48
8,66	-5	110	109,70	-0,30
-60,62	35	110	109,32	-0,68
-95,26	55	110	108,89	-1,11
-112,58	65	110	108,72	-1,28
60	103,92	130	130,63	0,63
40	69,28	130	130,75	0,75
10	17,32	130	130,77	0,77
0	0	130	130,83	0,83
-20	-34,64	130	130,88	0,88
-40	-69,28	130	131,10	1,10
-60	-103,92	130	131,32	1,32
103,92	-60	130	131,30	1,30
69,28	-40	130	131,00	1,00
17,32	-10	130	130,64	0,64
0	0	130	130,12	0,12
-34,64	20	130	129,08	-0,92
-69,28	40	130	128,82	-1,18
-103,92	60	130	128,56	-1,44

ROTAÇÃO 30°				
EXTERIORES				
X	Y	Cota Nominal	Cota Real	Diferença
55	95,26	150	150,70	0,70
35	60,62	150	150,89	0,89
25	43,30	150	150,87	0,87
5	8,66	150	150,84	0,84
-15	-25,98	150	150,98	0,98
-35	-60,62	150	151,31	1,31
-55	-95,26	150	151,38	1,38
95,26	-55	150	151,31	1,31
60,62	-35	150	150,79	0,79
43,30	-25	150	150,47	0,47
8,66	-5	150	149,98	-0,02
-25,98	15	150	149,20	-0,80
-60,62	35	150	148,61	-0,41
-95,26	55	150	148,37	-0,63
50	86,60	170	170,85	0,85
40	69,28	170	170,92	0,92
10	17,32	170	170,99	0,99
0	0	170	170,96	0,96
-20	-34,64	170	171,12	1,12
-30	-51,96	170	171,27	1,27
-50	-86,60	170	171,47	1,47
86,60	-50	170	171,08	1,08
69,28	-40	170	170,76	0,76
17,32	-10	170	169,96	-0,04
0	0	170	169,55	-0,45
-34,64	20	170	169,01	-0,99
-51,96	30	170	168,65	-1,35
-86,60	50	170	168,32	-1,68
45	77,94	190	190,71	0,71
35	60,62	190	190,97	0,97
15	25,98	190	191,02	1,02
5	8,66	190	191,17	1,17
-15	-25,98	190	191,14	1,14
-25	-43,30	190	191,30	1,30
-45	-77,94	190	191,39	1,39
77,94	-45	190	191,01	1,01
60,62	-35	190	190,62	0,62
25,98	-15	190	190,19	0,19
8,66	-5	190	189,32	-0,68
-25,98	15	190	189,05	-0,95
-43,30	25	190	188,61	-1,39
-77,94	45	190	188,24	-1,76
40	69,28	210	210,88	0,88
20	34,64	210	211,01	1,01
10	17,32	210	210,98	0,98
0	0	210	211,04	1,04
-10	-17,32	210	211,11	1,11
-30	-51,96	210	211,37	1,37
-40	-69,28	210	211,4	1,4
69,28	-40	210	210,78	0,78
34,64	-20	210	210,39	0,39
17,32	-10	210	209,79	-0,21
0	0	210	209,46	-0,54
-17,32	10	210	209,17	-0,83
-51,96	30	210	208,60	-1,40
-69,28	40	210	208,24	-1,76

ROTAÇÃO 30°				
EXTERIORES				
X	Y	Cota Nominal	Cota Real	Diferença
35	60,62	230	231,01	1,01
25	43,30	230	231,10	1,10
15	25,98	230	231,18	1,18
-5	-8,66	230	231,24	1,24
-15	-25,98	230	231,08	1,08
-25	-43,30	230	231,33	1,33
-35	-60,62	230	231,4	1,4
60,62	-35	230	230,66	0,66
43,30	-25	230	230,09	0,09
25,98	-15	230	229,63	-0,37
-8,66	5	230	229,14	-0,86
-25,98	15	230	228,55	-1,45
-43,30	25	230	228,68	-1,32
-60,62	35	230	228,24	-1,76
30	51,96	250	251,02	1,02
20	34,64	250	251,16	1,16
10	17,32	250	250,88	0,88
0	0	250	251,04	1,04
-10	-17,32	250	251,23	1,23
-20	-34,64	250	251,37	1,37
-30	-51,96	250	251,46	1,46
51,96	-30	250	250,75	0,75
34,64	-20	250	250,13	0,13
17,32	-10	250	249,64	-0,36
0	0	250	249,05	-0,95
-17,32	10	250	248,55	-1,45
-34,64	20	250	247,98	-2,02
-51,96	30	250	247,47	-2,53
25	43,30	270	270,78	0,78
15	25,98	270	270,93	0,93
5	8,66	270	271,05	1,05
-5	-8,66	270	271,14	1,14
-15	-25,98	270	271,22	1,22
-25	-43,30	270	271,5	1,5
43,30	-25	270	270,19	0,19
25,98	-15	270	269,91	-0,09
8,66	-5	270	269,30	-0,70
-8,66	5	270	268,69	-1,31
-25,98	15	270	268,11	-1,89
-43,30	25	270	267,56	-2,44
20	34,64	290	290,86	0,86
10	17,32	290	290,93	0,93
0	0	290	291,17	1,17
-10	-17,32	290	291,43	1,43
-20	-34,64	290	291,4	1,4
34,64	-20	290	290,39	0,39
17,32	-10	290	289,65	-0,35
0	0	290	288,89	-1,11
-17,32	10	290	288,30	-1,70
-34,64	20	290	287,68	-2,32

ANEXO 1.4. - Desvios das cotas interiores na rotação 30°

ROTAÇÃO 30° INTERIORES				
X	Y	Cota Nominal	Cota Real	Diferença
85	147,22	10	9,63	-0,37
65	112,58	10	9,53	-0,47
45	77,94	10	9,51	-0,49
25	43,30	10	9,52	-0,48
5	8,66	10	9,48	-0,52
-15	-25,98	10	9,44	-0,56
-35	-60,62	10	9,39	-0,61
-75	-129,90	10	9,49	-0,51
-95	-147,22	10	9,51	-0,49
-147,22	-85	10	9,82	-0,18
112,58	-65	10	9,76	-0,24
77,94	-45	10	9,68	-0,32
43,30	-25	10	9,62	-0,38
8,66	-5	10	9,64	-0,36
-25,98	15	10	9,59	-0,41
-60,62	35	10	9,47	-0,53
-129,90	75	10	9,33	-0,67
-147,22	95	10	9,29	-0,71
80	138,56	30	29,60	-0,40
60	103,92	30	29,56	-0,44
30	51,96	30	29,66	-0,34
10	17,32	30	29,47	-0,53
-20	-34,64	30	29,60	-0,40
-40	-69,28	30	29,53	-0,47
-70	-121,24	30	29,74	-0,26
-80	-138,56	30	29,66	-0,34
-138,56	-80	30	30,07	0,07
103,92	-60	30	29,94	-0,06
51,96	-30	30	29,75	-0,25
17,32	-10	30	29,59	-0,41
-34,64	20	30	29,43	-0,57
-69,28	40	30	29,31	-0,69
-121,24	70	30	29,93	-1,07
-138,56	80	30	29,92	-1,08
75	129,90	50	49,69	-0,31
65	112,58	50	49,74	-0,26
35	60,62	50	49,78	-0,22
15	25,98	50	49,58	-0,42
-5	-8,66	50	49,69	-0,31
-25	-43,30	50	49,69	-0,31
-55	-95,26	50	49,85	-0,15
-75	-129,90	50	49,90	-0,10
-129,90	-75	50	50,42	0,42
112,58	-65	50	50,30	0,30
60,62	-35	50	49,86	0,14
25,98	-15	50	49,89	-0,31
-8,66	5	50	49,42	-0,58
-43,30	25	50	49,26	-0,74
-95,26	55	50	48,95	-1,05
-129,90	75	50	48,55	-1,45
70	121,24	70	69,76	-0,24
50	86,60	70	69,83	-0,17
30	51,96	70	69,74	-0,26
10	17,32	70	69,64	-0,36
-20	-34,64	70	69,72	-0,28
-40	-69,28	70	69,79	-0,21
-70	-121,24	70	69,98	-0,02
-121,24	-70	70	70,57	0,57
86,60	-50	70	70,18	0,18
51,96	-30	70	69,79	-0,21
17,32	-10	70	69,51	-0,49
-34,64	20	70	69,04	-0,96
-69,28	40	70	68,77	-1,23
-121,24	70	70	68,28	-1,72
65	112,58	90	89,77	-0,23
45	77,94	90	89,85	-0,15
25	43,30	90	89,70	-0,30
5	8,66	90	89,72	-0,28
-35	-60,62	90	89,90	-0,10
-55	-95,26	90	89,96	-0,04
-75	-129,90	90	90,09	0,09
112,58	-65	90	90,77	0,77
77,94	-45	90	90,26	0,26
43,30	-25	90	89,82	-0,18
8,66	-5	90	89,46	-0,54
-60,62	35	90	88,73	-1,27
-95,26	55	90	88,25	-1,75
-112,58	65	90	88,05	-1,95

ROTAÇÃO 30° INTERIORES				
X	Y	Cota Nominal	Cota Real	Diferença
60	103,92	110	109,89	-0,11
40	69,28	110	109,80	-0,20
10	17,32	110	109,76	-0,24
0	0	110	109,84	-0,16
-20	-34,64	110	110,00	0,00
-40	-69,28	110	110,08	0,08
-60	-103,92	110	110,11	0,11
103,92	-60	110	110,82	0,82
69,28	-40	110	110,56	0,56
17,32	-10	110	110,26	0,26
0	0	110	109,06	-0,94
-34,64	20	110	108,56	-1,44
-69,28	40	110	108,43	-1,57
-103,92	60	110	108,06	-1,94
55	95,26	130	129,91	-0,09
35	60,62	130	129,84	-0,16
25	43,30	130	129,91	-0,09
5	8,66	130	130,00	0,00
-15	-25,98	130	129,96	-0,04
-35	-60,62	130	130,13	0,13
-55	-95,26	130	130,26	0,26
95,26	-55	130	130,87	0,87
60,62	-35	130	130,55	0,55
43,30	-25	130	130,19	0,19
8,66	-5	130	129,18	-0,82
-25,98	15	130	128,77	-1,23
-60,62	35	130	128,30	-1,70
-95,26	55	130	127,86	-2,14
50	86,60	150	149,90	-0,10
40	69,28	150	149,94	-0,06
10	17,32	150	150,01	0,01
0	0	150	150,02	0,02
-20	-34,64	150	150,11	0,11
-30	-51,96	150	150,23	0,23
-50	-86,60	150	150,24	0,24
86,60	-50	150	150,49	0,49
69,28	-40	150	150,02	0,02
17,32	-10	150	149,35	-0,65
0	0	150	148,97	-1,03
-34,64	20	150	148,38	-1,62
-51,96	30	150	148,19	-1,81
-86,60	50	150	147,83	-2,17
45	77,94	170	169,92	-0,08
35	60,62	170	169,92	-0,08
15	25,98	170	170,07	0,07
5	8,66	170	170,12	0,12
-15	-25,98	170	170,13	0,13
-25	-43,30	170	170,18	0,18
-45	-77,94	170	170,36	0,36
77,94	-45	170	170,25	0,25
60,62	-35	170	169,89	-0,11
25,98	-15	170	169,55	-0,45
8,66	-5	170	168,80	-1,20
-25,98	15	170	168,41	-1,59
-43,30	25	170	168,16	-1,84
-77,94	45	170	167,65	-2,35
40	69,28	190	189,97	-0,03
20	34,64	190	190,11	0,11
10	17,32	190	190,10	0,10
0	0	190	190,18	0,18
-10	-17,32	190	190,29	0,29
-30	-51,96	190	190,31	0,31
-40	-69,28	190	190,41	0,41
69,28	-40	190	190,24	0,24
34,64	-20	190	189,74	-0,26
17,32	-10	190	189,26	-0,74
0	0	190	188,87	-1,13
-17,32	10	190	188,45	-1,55
-51,96	30	190	188,05	-1,95
-69,28	40	190	187,67	-2,33

ROTAÇÃO 30° INTERIORES				
X	Y	Cota	Cota	Diferença
35	60,62	210	210,05	0,05
25	43,30	210	210,17	0,17
15	25,98	210	210,17	0,17
-5	-8,66	210	210,38	0,38
-15	-25,98	210	210,50	0,50
-25	-43,30	210	210,47	0,47
-35	-60,62	210	210,58	0,58
60,62	-35	210	210,64	0,64
43,30	-25	210	210,20	0,20
25,98	-15	210	209,65	-0,35
-8,66	5	210	208,62	-1,38
-25,98	15	210	208,24	-1,76
-43,30	25	210	207,69	-2,31
-60,62	35	210	207,24	-2,76
30	51,96	230	230,19	0,19
20	34,64	230	230,23	0,23
10	17,32	230	230,32	0,32
0	0	230	230,40	0,40
-10	-17,32	230	230,47	0,47
-20	-34,64	230	230,64	0,64
-30	-51,96	230	230,63	0,63
51,96	-30,00	230	230,41	0,41
34,64	-20	230	229,85	-0,15
17,32	-10	230	229,34	-0,66
0	0	230	228,77	-1,23
-17,32	10	230	228,33	-1,67
-34,64	20	230	227,77	-2,23
-51,96	30	230	227,3	-2,70
25	43,30	250	250,26	0,26
15	25,98	250	250,38	0,38
5	8,66	250	250,37	0,37
-5	-8,66	250	250,51	0,51
-15	-25,98	250	250,62	0,62
-25	-43,30	250	250,70	0,70
43,30	-25	250	250,22	0,22
25,98	-15	250	249,63	-0,37
8,66	-5	250	249	-1,00
-8,66	5	250	248,47	-1,53
-25,98	15	250	247,85	-2,15
-43,30	25	250	247,38	-2,62
20	34,64	270	270,37	0,37
10	17,32	270	270,46	0,46
0	0	270	270,61	0,61
-10	-17,32	270	270,68	0,68
-20	-34,64	270	270,83	0,83
34,64	-20	270	270,00	0,00
17,32	-10	270	269,33	-0,67
0	0	270	268,72	-1,28
-17,32	10	270	267,98	-2,02
-34,64	20	270	267,41	-2,59
15	25,98	290	290,62	0,62
5	8,66	290	290,65	0,65
25,98	-15	290	288,96	-1,04
8,66	-5	290	288,22	-1,78

ANEXO 1.5. - Desvios das cotas exteriores na rotação 60°

ROTAÇÃO 60° EXTERIORES				
X	Y	Cota Nominal	Cota Real	Diferença
155.88	90	10	10.43	0.43
138.56	80	10	10.47	0.47
69.28	40	10	10.41	0.41
17.32	10	10	10.19	0.19
0	0	10	10.22	0.22
-34.64	-20	10	10.19	0.19
-69.28	-40	10	10.32	0.32
-138.56	-80	10	10.24	0.24
-155.88	-90	10	10.35	0.35
90	155.88	10	10.67	0.67
80	138.56	10	10.40	0.40
40	69.28	10	10.38	0.38
10	17.32	10	10.25	0.25
0	0	10	10.35	0.35
-20	-34.64	10	10.39	0.39
-40	-69.28	10	10.29	0.29
-80	-138.56	10	10.36	0.36
-90	-155.88	10	10.32	0.32
147.22	85	30	31.02	1.02
112.58	65	30	30.71	0.71
77.94	45	30	30.51	0.51
43.30	25	30	30.43	0.43
8.66	5	30	30.39	0.39
-25.98	-15	30	30.28	0.28
-60.62	-35	30	30.27	0.27
-129.90	-75	30	30.29	0.29
147.22	85	50	50.92	0.92
85	147.22	30	30.95	0.95
65	112.58	30	30.76	0.76
45	77.94	30	30.61	0.61
25	43.30	30	30.42	0.42
5	-8.66	30	30.24	0.24
-15	25.98	30	30.18	0.18
-35	60.62	30	30.08	0.08
-75	129.90	30	29.89	-0.11
-85	147.22	30	29.89	-0.11
138.56	80	50	50.79	0.79
103.92	60	50	50.66	0.66
51.96	30	50	50.49	0.49
17.32	10	50	50.35	0.35
34.64	-20	50	50.16	0.16
-69.28	-40	50	50.21	0.21
-129.24	-70	50	50.32	0.32
-138.56	-80	50	50.2	0.2
80	138.56	50	51.30	1.30
60	103.92	50	51.02	1.02
30	-51.96	50	50.65	0.65
10	-17.32	50	50.49	0.49
-20	34.64	50	50.16	0.16
-40	69.28	50	50.02	0.02
-70	121.24	50	49.71	-0.29
-80	138.56	50	49.48	-0.52
129.90	75	70	70.92	0.92
112.58	65	70	70.97	0.97
80.62	35	70	70.72	0.72
25.98	15	70	70.49	0.49
-8.66	-5	70	70.37	0.37
43.30	-25	70	70.25	0.25
-95.26	-55	70	70.28	0.28
-129.90	-75	70	70.25	0.25
75	129.90	70	71.58	1.58
65	112.58	70	71.37	1.37
35	-60.62	70	70.84	0.84
15	-25.98	70	70.49	0.49
-5	8.66	70	70.12	0.12
-25	43.30	70	69.95	-0.05
-55	95.26	70	69.71	-0.29
-75	129.90	70	69.35	-0.65
121.24	70	90	91.04	1.04
86.60	50	90	90.9	0.90
51.96	30	90	90.64	0.64
17.32	10	90	90.57	0.57
-34.64	-20	90	90.41	0.41
-69.28	-40	90	90.21	0.21
121.24	-70	90	90.21	0.21
70	121.24	90	91.80	1.80
50	-86.60	90	91.31	1.31
30	-51.96	90	90.83	0.83
10	-17.32	90	90.44	0.44
-20	34.64	90	89.83	-0.17
-40	69.28	90	89.64	-0.36
-70	121.24	90	89.26	-0.74

ROTAÇÃO 60° EXTERIORES				
X	Y	Cota Nominal	Cota Real	Diferença
112.58	65	110	111.19	1.19
77.94	45	110	110.99	0.99
43.30	25	110	110.7	0.70
8.66	5	110	110.49	0.49
-60.62	-35	110	110.23	0.23
-95.26	-55	110	110.22	0.22
-112.58	-65	110	110.27	0.27
65	-112.58	110	111.95	1.95
45	-77.94	110	111.42	1.42
25	-43.30	110	110.77	0.77
5	-8.66	110	110.30	0.30
-35	60.62	110	109.46	-0.54
-55	95.26	110	109.06	-0.94
-65	112.58	110	108.91	-1.09
103.92	60	130	131.27	1.27
69.28	40	130	130.96	0.96
17.32	10	130	130.52	0.52
0	0	130	130.52	0.52
-34.64	-20	130	130.25	0.25
-69.28	-40	130	130.21	0.21
-103.92	-60	130	130.21	0.21
60	-103.92	130	132.03	2.03
40	-69.28	130	131.37	1.37
10	-17.32	130	130.47	0.47
0	0	130	130.21	0.21
-20	34.64	130	129.62	-0.38
-40	69.28	130	129.21	-0.79
-60	103.92	130	128.75	-1.25
95.26	55	150	151.26	1.26
60.62	35	150	150.95	0.95
43.30	25	150	150.82	0.82
8.66	5	150	150.43	0.43
-25.98	-15	150	150.3	0.30
-60.62	-35	150	150.28	0.28
-95.26	-55	150	150.21	0.21
55	-95.26	150	152.13	2.13
35	-60.62	150	151.28	1.28
25	-43.30	150	151.00	1.00
5	-8.66	150	150.30	0.30
-15	25.98	150	149.73	-0.27
-35	60.62	150	149.12	-0.88
-55	95.26	150	148.59	-1.41
86.60	50	170	171.2	1.20
69.28	40	170	171.16	1.16
17.32	10	170	170.7	0.70
0	0	170	170.59	0.59
-34.64	-20	170	170.27	0.27
-51.96	-30	170	170.2	0.20
86.60	-50	170	170.11	0.11
50	-86.60	170	172.05	2.05
40	-69.28	170	171.63	1.63
10	-17.32	170	170.46	0.46
0	0	170	170.05	0.05
-20	34.64	170	169.46	-0.54
-30	51.96	170	169.06	-0.94
-50	86.60	170	168.38	-1.62
77.94	45	190	191.3	1.30
60.62	35	190	191.2	1.20
25.98	15	190	190.66	0.66
8.66	5	190	190.65	0.65
-25.98	-15	190	190.42	0.42
-43.30	-25	190	190.27	0.27
-77.94	-45	190	190.27	0.27
45	-77.94	190	192.01	2.01
35	-60.62	190	191.54	1.54
15	-25.98	190	190.61	0.61
5	-8.66	190	190.21	0.21
-15	25.98	190	189.45	-0.55
-25	43.30	190	189.05	-0.95
-45	77.94	190	188.32	-1.68

ROTAÇÃO 60° EXTERIORES				
X	Y	Cota Nominal	Cota Real	Diferença
69.28	40	210	211.26	1.26
34.64	20	210	210.89	0.89
17.32	10	210	210.58	0.58
0	0	210	210.49	0.49
-17.32	-10	210	210.31	0.31
-51.96	-30	210	210.07	0.07
-69.28	-40	210	210.12	0.12
40	-69.28	210	211.77	1.77
20	-34.64	210	210.80	0.80
10	-17.32	210	210.28	0.28
0	0	210	209.85	-0.15
-10	17.32	210	209.39	-0.61
-30	51.96	210	208.56	-1.44
-40	69.28	210	208.16	-1.84
60.62	35	230	231.1	1.10
43.30	25	230	230.95	0.95
25.98	15	230	230.97	0.97
-8.66	-5	230	230.37	0.37
-25.98	-15	230	230.23	0.23
-43.30	-25	230	230.1	0.10
-60.62	-35	230	230.03	0.03
35	-60.62	230	231.68	1.68
25	-43.30	230	231.11	1.11
15	-25.98	230	230.53	0.53
-5	8.66	230	229.52	-0.48
-15	25.98	230	229.06	-0.94
-25	43.30	230	228.67	-1.33
-35	60.62	230	228.19	-1.81
51.96	30	250	251.07	1.07
34.64	20	250	250.98	0.98
17.32	10	250	250.78	0.78
0	0	250	250.47	0.47
-17.32	-10	250	250.45	0.45
-34.64	-20	250	250.17	0.17
-51.96	-30	250	250.13	0.13
30	-51.96	250	251.54	1.54
20	-34.64	250	250.94	0.94
10	-17.32	250	250.35	0.35
0	0	250	249.79	-0.21
-10	17.32	250	249.31	-0.69
-20	34.64	250	248.72	-1.28
-30	51.96	250	248.30	-1.70
43.30	25	270	271.09	1.09
25.98	15	270	270.9	0.90
8.66	5	270	270.75	0.75
-8.66	-5	270	270.53	0.53
-25.98	-15	270	270.37	0.37
-43.30	-25	270	270.2	0.20
25	-43.30	270	271.37	1.37
15	-25.98	270	270.77	0.77
5	-8.66	270	270.14	0.14
-5	8.66	270	269.59	-0.41
-15	25.98	270	268.95	-1.05
-25	43.30	270	268.43	-1.57
34.64	20	290	291.12	1.12
17.32	10	290	290.88	0.88
0	0	290	290.77	0.77
-17.32	-10	290	290.48	0.48
-34.64	-20	290	290.45	0.45
20	-34.64	290	291.11	1.11
10	-17.32	290	290.44	0.44
0	0	290	289.87	-0.13
-10	17.32	290	289.14	-0.86
-20	34.64	290	288.54	-1.46

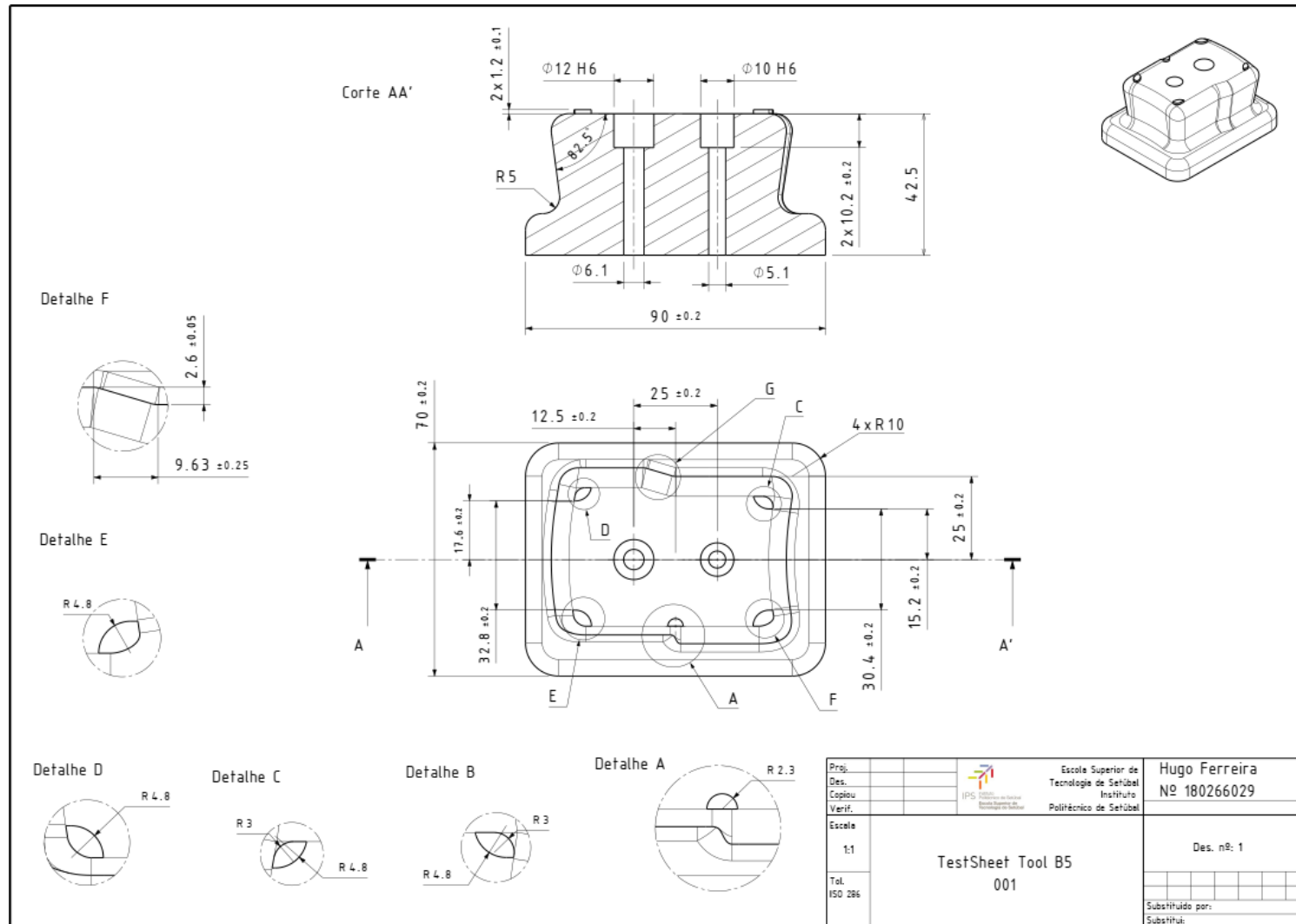
ANEXO 1.6. - Desvios das cotas interiores na rotação 60°

ROTAÇÃO 60° INTERIORES				
X	Y	Cota Nominal	Cota Real	Diferença
147.22	85	10	9.62	-0.38
112.58	65	10	9.72	-0.28
77.94	45	10	9.72	-0.28
43.30	25	10	9.7	-0.30
8.66	5	10	9.54	-0.46
-25.98	-15	10	9.53	-0.47
-60.62	-35	10	9.53	-0.47
-129.90	-75	10	9.57	-0.43
-147.22	-95	10	9.65	-0.35
85	-147.22	10	9.85	-0.15
65	-112.58	10	9.70	-0.30
45	-77.94	10	9.64	-0.36
5	-43.30	10	9.62	-0.38
-15	-25.98	10	9.50	-0.50
-35	-60.62	10	9.51	-0.49
-35	60.62	10	9.42	-0.58
-75	129.90	10	9.28	-0.72
-85	147.22	10	9.30	-0.70
138.66	80	30	29.79	-0.21
103.92	60	30	29.72	-0.28
51.96	30	30	29.75	-0.25
17.32	10	30	29.65	-0.35
-34.64	-20	30	29.57	-0.43
-69.28	-40	30	29.61	-0.39
-121.24	-70	30	29.64	-0.36
-138.56	-80	30	29.57	-0.43
80	-138.56	30	28.23	0.23
60	-103.92	30	29.90	-0.10
30	-51.96	30	29.67	-0.33
10	-17.32	30	29.64	-0.36
-20	34.64	30	29.39	-0.61
-40	69.28	30	29.18	-0.82
-70	121.24	30	29.08	-0.82
-80	138.56	30	28.91	-1.09
129.90	75	50	50	0.00
112.58	65	50	49.94	-0.06
60.62	35	50	49.89	-0.11
25.98	15	50	49.7	-0.30
-8.66	-5	50	49.67	-0.33
-43.30	-25	50	49.53	-0.47
-95.26	-55	50	49.62	-0.38
129.90	75	50	49.58	-0.42
15	-129.90	50	50.53	0.53
65	-112.58	50	50.30	0.30
35	-60.62	50	49.83	-0.17
15	-25.98	50	49.85	-0.35
5	8.66	50	49.27	-0.73
-25	43.30	50	49.18	-0.82
-55	95.26	50	48.88	-1.12
-75	129.90	50	48.74	-1.26
121.24	70	70	70.09	0.09
86.60	50	70	69.94	-0.06
51.96	30	70	69.9	-0.10
17.32	10	70	69.74	-0.26
-34.64	-20	70	69.6	-0.40
-69.28	-40	70	69.54	-0.46
-121.24	-70	70	69.58	-0.42
-147.22	-90	70	70.69	0.69
70	-121.24	70	70.69	0.69
50	-86.60	70	70.28	0.28
30	-51.96	70	69.94	-0.06
10	-17.32	70	69.53	-0.47
-20	34.64	70	69.10	-0.90
-40	69.28	70	68.89	-1.11
-70	121.24	70	68.40	-1.60
112.58	65	90	90.26	0.26
77.94	45	90	90.12	0.12
43.30	25	90	89.93	-0.07
8.66	5	90	89.57	-0.43
-60.62	-35	90	89.69	-0.31
-95.26	-55	90	89.48	-0.52
-112.58	-65	90	89.55	-0.45
85	-112.58	90	90.91	0.91
45	-77.94	90	90.28	0.28
25	-43.30	90	89.84	-0.16
5	-8.66	90	89.45	-0.55
-35	60.62	90	88.76	-1.24
-55	95.26	90	88.33	-1.67
-65	112.58	90	88.21	-1.79

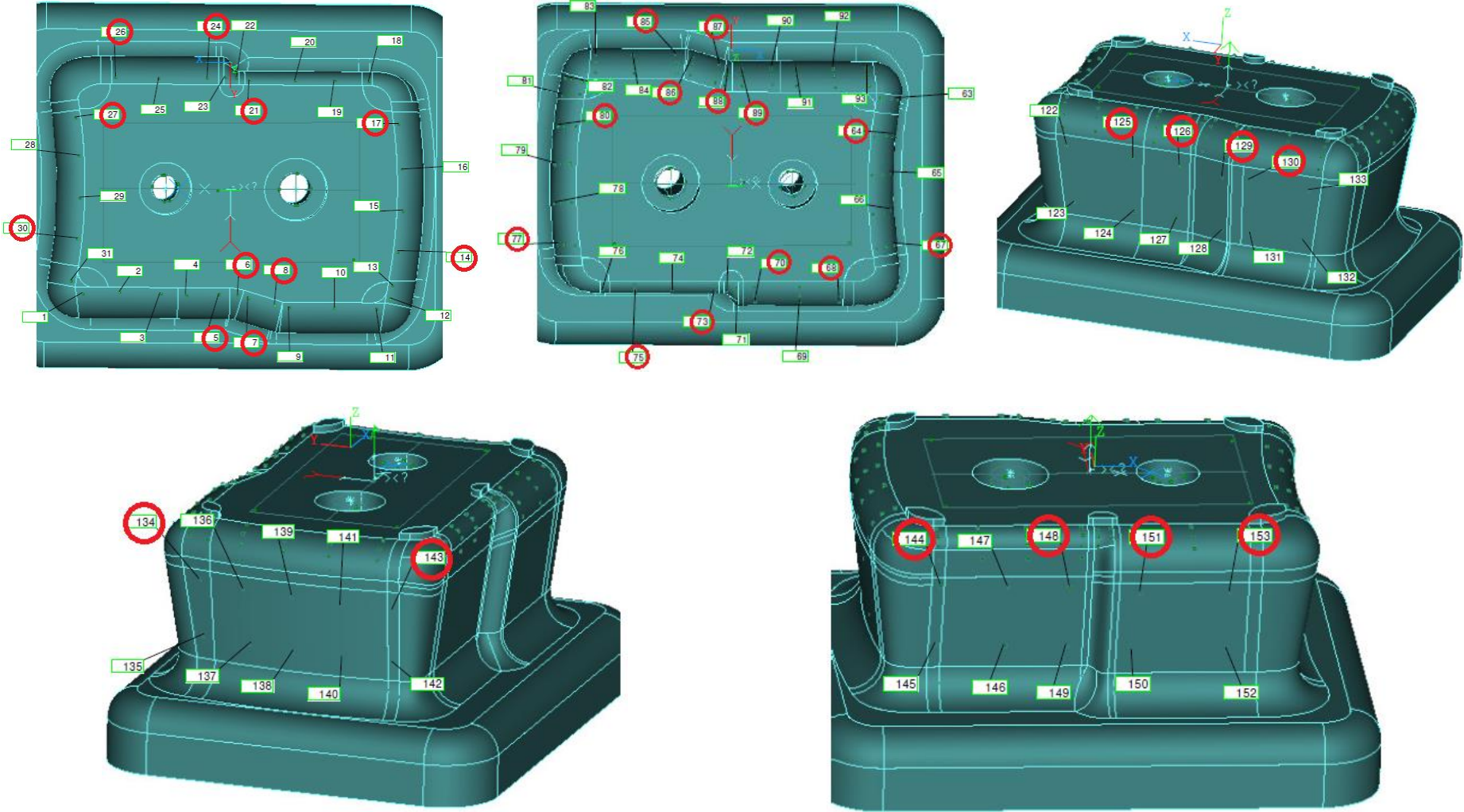
ROTAÇÃO 60° INTERIORES				
X	Y	Cota Nominal	Cota Real	Diferença
103.92	60	110	110.29	0.29
69.28	40	110	110.12	0.12
17.32	10	110	109.83	-0.17
0	0	110	109.68	-0.32
-34.64	-20	110	109.6	-0.40
-69.28	-40	110	109.53	-0.47
-103.92	-60	110	109.54	-0.46
60	-103.92	110	111.06	1.06
40	-69.28	110	110.46	0.46
10	-17.32	110	109.55	-0.45
0	0	110	109.32	-0.68
-20	34.64	110	108.85	-1.15
-40	69.28	110	108.45	-1.55
-60	103.92	110	107.96	-2.04
95.26	55	130	130.44	0.44
60.62	35	130	130.15	0.15
43.30	25	130	130.06	0.06
8.66	5	130	129.77	-0.23
-25.98	-15	130	129.65	-0.35
-60.62	-35	130	129.54	-0.46
-95.26	-55	130	129.49	-0.51
55	-95.26	130	131.10	1.10
35	-60.62	130	130.40	0.40
25	-43.30	130	130.05	0.05
5	-8.66	130	129.45	-0.55
-15	25.98	130	128.90	-1.10
-35	60.62	130	128.39	-1.61
-55	95.26	130	127.87	-2.13
86.60	50	150	150.46	0.46
69.28	40	150	150.28	0.28
17.32	10	150	149.92	-0.08
0	0	150	149.79	-0.21
-34.64	-20	150	149.65	-0.35
-61.96	-30	150	149.63	-0.37
-86.60	-50	150	149.48	-0.52
50	-86.60	150	151.24	1.24
40	-69.28	150	150.71	0.71
10	-17.32	150	149.61	-0.39
0	0	150	149.22	-0.78
-20	34.64	150	148.62	-1.38
-30	51.96	150	148.31	-1.69
-50	86.60	150	147.76	-2.24
77.94	45	170	170.46	0.46
60.62	35	170	170.32	0.32
26.98	15	170	170.07	0.07
8.66	5	170	169.88	-0.12
-25.98	-15	170	169.6	-0.40
-43.30	-25	170	169.58	-0.42
-77.94	-45	170	169.48	-0.52
45	-77.94	170	171.14	1.14
35	-60.62	170	170.63	0.63
15	-25.98	170	169.80	-0.20
5	-8.66	170	169.36	-0.64
-15	25.98	170	168.67	-1.33
-25	43.30	170	168.33	-1.67
-45	77.94	170	167.68	-2.32
69.28	40	190	190.56	0.56
34.64	20	190	190.19	0.19
17.32	10	190	190.1	0.10
0	0	190	189.96	-0.04
-17.32	-10	190	189.81	-0.19
-51.96	-30	190	189.65	-0.35
-69.28	-40	190	189.63	-0.37
40	-69.28	190	191.06	1.06
20	-34.64	190	190.06	0.06
10	-17.32	190	189.60	-0.40
0	0	190	189.04	-0.96
-10	17.32	190	188.74	-1.26
-30	51.96	190	187.96	-2.04
-40	69.28	190	187.55	-2.45

ROTAÇÃO 60° INTERIORES				
X	Y	Cota Nominal	Cota Real	Diferença
60.62	35	210	210.45	0.45
43.30	25	210	210.23	0.23
25.98	15	210	210.06	0.06
-8.66	-5	210	209.77	-0.23
-25.98	-15	210	209.7	-0.30
-43.30	-25	210	209.57	-0.43
-60.62	-35	210	209.5	-0.50
35	-60.62	210	210.93	0.93
25	-43.30	210	210.40	0.40
15	-25.98	210	209.82	-0.18
-5	8.66	210	208.88	-1.12
-15	25.98	210	208.47	-1.53
-25	43.30	210	208.02	-1.98
-35	60.62	210	207.61	-2.39
51.96	30	230	230.45	0.45
34.64	20	230	230.24	0.24
17.32	10	230	230.07	0.07
0	0	230	229.95	-0.05
-17.32	-10	230	229.84	-0.16
-34.64	-20	230	229.68	-0.32
-51.96	-30	230	229.53	-0.47
30	-51.96	230	230.79	0.79
20	-34.64	230	230.20	0.20
10	-17.32	230	229.62	-0.38
0	0	230	229.09	-0.91
-10	17.32	230	228.60	-1.40
-20	34.64	230	228.07	-1.93
-30	51.96	230	227.62	-2.38
43.30	25	250	250.34	0.34
25.98	15	250	250.16	0.16
8.66	5	250	250.03	0.03
-8.66	-5	250	249.97	-0.03
-25.98	-15	250	249.76	-0.24
-43.30	-25	250	249.63	-0.37
25	-43.30	250	250.66	0.66
15	-25.98	250	249.97	-0.03
5	-8.66	250	249.38	-0.62
-5	8.66	250	248.83	-1.17
-15	25.98	250	248.23	-1.77
-25	43.30	250	247.74	-2.26
34.64	20	270	270.42	0.42
17.32	10	270	270.17	0.17
0	0	270	270.06	0.06
-17.32	-10	270	269.93	-0.07
-34.64	-20	270	269.77	-0.23
20	-34.64	270	270.42	0.42
10	-17.32	270	269.69	-0.31
0	0	270	269.1	-0.90
-10	17.32	270	268.44	-1.56
-20	34.64	270	267.87	-2.13
25.98	15	290	290.37	0.37
8.66	5	290	290.15	0.15
-8.66	-5	290	290.04	0.04
-25.98	-15	290	289.95	-0.05
15	-25.98	290	290.14	0.14
10	-8.66	290	289.47	-0.53
-10	8.66	290	288.73	-1.27
-15	25.98	290	288.13	-1.87

ANEXO 2 – Desenho 2D cotado da ferramenta utilizada para ensaios de estampagem



ANEXO 3 - Localização dos pontos definidos para controlo dimensional



ANEXO 4 - Desvios entre os pontos medidos na ferramenta e os pontos do modelo CAD da ferramenta

DESVIOS DOS PONTOS DE SUPERFÍCIE EIXO X (CONTATO COM A CHAPA)																					
	14	17	21	24	26	27	30	64	67	68	70	73	75	77	80	134	143	144	148	151	153
Ciclo 1	0,0042	-0,0063	-0,0017	0,0018	-0,0008	0,0026	0,0010	-0,0245	0,0496	-0,0002	0,0013	0,0029	0,0016	0,0222	-0,0203	-0,0274	0,0457	0,0000	0,0001	-0,0018	0,0013
Ciclo 2	0,0071	0,0065	0,0029	0,0042	0,0059	-0,0026	-0,0065	-0,0524	0,0216	0,0013	0,0006	0,0038	0,0001	0,0328	-0,0227	-0,0451	0,0316	0,0007	0,0005	0,0006	0,0022
Ciclo 3	0,0006	-0,0066	-0,0072	0,0011	0,0020	-0,0046	-0,0029	-0,0362	-0,0365	-0,0056	-0,0028	-0,0006	-0,0007	-0,0323	-0,0379	-0,0270	-0,0256	-0,0002	-0,0035	-0,0008	-0,0022
Ciclo 4	0,0075	0,0074	-0,0024	0,0040	0,0051	-0,0075	-0,0057	-0,0357	0,0316	-0,0024	0,0004	0,0016	0,0026	0,0221	-0,0091	-0,0430	0,0230	0,0002	-0,0025	-0,0020	0,0018
Ciclo 5	0,0111	0,0056	-0,0026	0,0024	0,0036	-0,0082	-0,0066	-0,0329	0,0103	-0,0020	-0,0010	-0,0013	0,0041	0,0155	-0,0138	-0,0297	0,0119	-0,0003	-0,0011	-0,0023	0,0002
Ciclo 6	0,0093	0,0017	-0,0017	0,0025	0,0008	0,0027	-0,0008	0,0090	-0,0198	-0,0012	0,0006	-0,0011	0,0035	-0,0104	0,0125	0,0184	-0,0116	0,0000	-0,0012	-0,0014	0,0005
Ciclo 7	0,0024	-0,0010	-0,0006	0,0030	0,0017	-0,0038	-0,0001	-0,0173	-0,0030	-0,0025	0,0026	0,0063	-0,0002	-0,0048	-0,0119	-0,0138	-0,0047	0,0022	0,0038	0,0018	-0,0005
Ciclo 8	0,0045	0,0011	-0,0066	0,0002	-0,0011	-0,0154	-0,0034	-0,0614	0,0091	-0,0094	-0,0017	0,0023	-0,0014	-0,0028	-0,0427	-0,0771	-0,0050	0,0004	-0,0041	-0,0025	-0,0047
Ciclo 9	0,0019	0,0018	-0,0074	0,0009	-0,0031	-0,0056	0,0003	-0,0332	-0,0102	-0,0095	-0,0023	-0,0036	-0,0013	-0,0257	-0,0321	-0,0391	-0,0148	-0,0015	-0,0051	-0,0043	-0,0035

DESVIOS DOS PONTOS DE SUPERFÍCIE EIXO X (SEM CONTATO COM A CHAPA)			
	137	138	140
Ciclo 1	-0,0169	0,0000	0,0161
Ciclo 2	-0,0311	-0,0143	0,0063
Ciclo 3	-0,0420	-0,0410	-0,0431
Ciclo 4	-0,0200	-0,0084	0,0042
Ciclo 5	-0,0239	-0,0159	-0,0048
Ciclo 6	0,0073	-0,0036	-0,0126
Ciclo 7	-0,0241	-0,0213	-0,0194
Ciclo 8	-0,0612	-0,0470	-0,0289
Ciclo 9	-0,0420	-0,0412	-0,0365

DESVIOS DOS PONTOS DE SUPERFÍCIE EIXO Y (CONTATO COM A CHAPA)																					
	14	17	21	24	26	27	30	64	67	68	70	73	75	77	80	134	143	144	148	151	153
Ciclo 1	-0,0014	0,0005	-0,0022	0,0063	-0,0006	0,0044	0,0033	0,0010	0,0775	0,0371	0,0411	-0,0003	-0,0003	-0,0003	0,0015	0,0027	0,0055	-0,0160	0,0354	0,0676	0,1033
Ciclo 2	-0,0048	0,0173	0,0123	0,0148	0,0008	0,0059	0,0090	-0,0031	0,1095	0,0682	0,0534	0,0134	-0,0013	-0,0013	0,0019	-0,0012	0,0016	-0,0079	0,0485	0,0787	0,1133
Ciclo 3	0,0024	-0,0015	-0,0029	0,0053	-0,0011	-0,0001	0,0013	-0,0045	0,0012	-0,0017	-0,0098	0,0043	-0,0050	-0,0050	0,0036	0,0027	-0,0020	0,0007	0,0014	0,0047	0,0015
Ciclo 4	-0,0022	0,0004	-0,0009	0,0031	-0,0008	0,0066	0,0041	0,0005	0,0443	0,0105	-0,0116	-0,0311	-0,0008	-0,0008	0,0010	-0,0001	0,0033	-0,0591	-0,0086	0,0269	0,0559
Ciclo 5	-0,0015	0,0104	0,0052	0,0110	-0,0019	0,0064	0,0056	-0,0013	0,0524	0,0266	0,0043	-0,0050	-0,0015	-0,0015	0,0026	0,0001	0,0004	-0,0254	0,0109	0,0284	0,0525
Ciclo 6	-0,0013	-0,0031	-0,0054	-0,0019	-0,0011	0,0057	0,0003	-0,0053	-0,0423	-0,0311	-0,0270	0,0049	-0,0062	-0,0062	-0,0011	-0,0058	-0,0050	0,0021	-0,0221	-0,0290	-0,0536
Ciclo 7	-0,0032	0,0024	0,0014	0,0061	-0,0014	0,0056	0,0024	-0,0059	0,0148	-0,0017	-0,0152	-0,0116	-0,0062	-0,0062	0,0011	0,0010	-0,0024	-0,0201	-0,0088	-0,0012	0,0064
Ciclo 8	0,0008	0,0084	0,0050	0,0112	-0,0006	0,0011	0,0046	-0,0021	0,0818	0,0391	0,0129	-0,0166	-0,0026	-0,0026	0,0026	0,0114	0,0015	-0,0470	0,0153	0,0455	0,0849
Ciclo 9	0,0003	-0,0016	-0,0040	0,0002	-0,0002	0,0014	0,0021	-0,0037	0,0155	-0,0058	-0,0064	-0,0128	-0,0042	-0,0042	0,0034	0,0046	-0,0004	-0,0227	-0,0081	0,0043	0,0178

DESVIOS DOS PONTOS DE SUPERFÍCIE EIXO Y (SEM CONTATO COM A CHAPA)				
	146	149	150	152
Ciclo 1	0,0106	0,0395	0,0633	0,1011
Ciclo 2	0,0338	0,0630	0,0871	0,1277
Ciclo 3	0,0038	0,0022	0,0032	0,0024
Ciclo 4	-0,0382	-0,0105	0,0141	0,0550
Ciclo 5	-0,0007	0,0165	0,0326	0,0580
Ciclo 6	-0,0163	-0,0280	-0,0387	-0,0545
Ciclo 7	-0,0097	-0,0022	0,0041	0,0135
Ciclo 8	-0,0091	0,0190	0,0488	0,0919
Ciclo 9	-0,0204	-0,0075	0,0020	0,0157

DESVIOS DOS PONTOS DO PESCOÇO DE CAVALO EIXO Y (CONTATO COM A CHAPA)													
	5	6	7	8	85	86	87	88	89	125	126	129	130
Ciclo 1	0,0088	0,0047	0,0026	0,0038	0,0229	0,0236	0,0270	0,0360	0,0497	0,0855	0,0554	0,0129	0,0136
Ciclo 2	0,0027	0,0019	0,0017	0,0012	0,0152	0,0122	0,0206	0,0323	0,0468	0,0954	0,0625	0,0073	0,0126
Ciclo 3	0,0005	0,0018	0,0009	0,0004	0,0051	0,0008	-0,0002	-0,0020	0,0107	-0,0041	-0,0050	-0,0106	-0,0119
Ciclo 4	-0,0020	-0,0053	-0,0044	-0,0073	-0,0245	-0,0238	-0,0153	-0,0055	0,0076	0,0369	0,0089	-0,0312	-0,0305
Ciclo 5	-0,0009	-0,0021	-0,0027	-0,0020	-0,0003	0,0002	0,0054	0,0113	0,0206	0,0417	0,0222	-0,0087	-0,0100
Ciclo 6	-0,0056	-0,0047	-0,0043	-0,0043	-0,0164	-0,0114	-0,0111	-0,0126	-0,0101	-0,0417	-0,0294	-0,0138	-0,0182
Ciclo 7	-0,0001	-0,0009	-0,0022	0,0007	-0,0006	0,0016	0,0026	0,0049	0,0110	0,0083	0,0005	-0,0181	-0,0189
Ciclo 8	0,0057	-0,0002	-0,0019	-0,0033	-0,0005	-0,0104	0,0029	0,0157	0,0338	0,0704	0,0403	-0,0197	-0,0104
Ciclo 9	0,0016	-0,0033	-0,0035	-0,0004	-0,0022	-0,0065	-0,0017	0,0009	0,0158	0,0127	0,0029	-0,0215	-0,0174

DESVIOS DOS PONTOS DO PESCOÇO DE CAVALO (SEM CONTATO COM A CHAPA)				
	124	127	128	131
Ciclo 1	0,0792	0,0594	0,0088	0,0149
Ciclo 2	0,1011	0,0782	0,0207	0,0256
Ciclo 3	-0,0035	-0,0027	-0,0181	-0,0056
Ciclo 4	0,0257	0,0061	-0,0388	-0,0357
Ciclo 5	0,0444	0,0306	-0,0069	-0,0005
Ciclo 6	-0,0507	-0,0362	-0,0196	-0,0188
Ciclo 7	0,0093	0,0047	-0,0129	-0,0078
Ciclo 8	0,0731	0,0494	-0,0172	0,0016
Ciclo 9	0,0065	0,0024	-0,0302	-0,0152