



RUI JORGE
MARTINS MATIAS

**DIMENSIONAMENTO E ENSAIO DE
UMA FERRAMENTA PRODUZIDA
POR IMPRESSÃO 3D PARA
ESTAMPAGEM DE ALUMÍNIO**

Relatório de Dissertação do Mestrado em
Engenharia de Produção

ORIENTADORES

Professor Doutor José Filipe Castanheira Pereira
Professor Doutor Ricardo António Lamberto
Duarte Cláudio

Dezembro de 2022

RUI JORGE
MARTINS MATIAS

**DIMENSIONAMENTO E ENSAIO DE
UMA FERRAMENTA PRODUZIDA
POR IMPRESSÃO 3D PARA
ESTAMPAGEM DE ALUMÍNIO**

JÚRI

Presidente: Professor Doutor Pedro Filipe do
Carmo Cunha

Arguente: Professor Doutor Aníbal Jorge de
Jesus Valido

Vogal: Professor Doutor Ricardo António
Lamberto Duarte Cláudio

Dezembro de 2022

Agradecimentos

Ao Professor Doutor Ricardo António Lamberto Duarte Cláudio exprimo gratidão pela disponibilidade, orientação na dissertação do Mestrado em Engenharia de Produção e pelo suporte proporcionado na oportunidade de exercer atividades profissionais no Instituto Politécnico de Setúbal que pude desempenhar com total satisfação.

Ao Professor Doutor José Filipe Castanheira Pereira exprimo gratidão pelo primeiro contacto com o Instituto Politécnico de Setúbal e apresentação do conteúdo do curso de Mestrado em Engenharia de Produção, ao qual me proporcionou vontade em ingressar, assim como pela disponibilidade e orientação na dissertação.

A todos os Professores com quem tive a oportunidade de receber a partilha de conhecimento através da lecionação das diferentes unidades curriculares do curso de Mestrado em Engenharia de Produção.

Ao colega de curso Eng.º Paulo Cardoso que, em representação da empresa Lauak Portugal S.A., sempre proporcionou excelente colaboração e suporte na disponibilidade de materiais, equipamento de ensaio, assim como na partilha de conhecimento de valor acrescentado para o saber pessoal.

Aos meus colegas da empresa SMP Automotive Technology Portugal, S.A., que sempre evidenciaram disponibilidade para que fosse possível atingir esta meta pessoal.

Aos meus amigos, família, ao meu filho que nasceu durante este curso de Mestrado, sendo que foram sempre fonte de energia para, passo a passo, superar os desafios.

Resumo

A tecnologia de impressão 3D vem revolucionar os métodos de produção e de consumo, dando a possibilidade de desenvolver produtos de uma forma rápida e com um investimento reduzido, criando ainda a possibilidade de ser flexível no desenho do produto. A evolução desta tecnologia tem contribuindo em muito para a 4ª revolução industrial, com cada vez maior interesse de aplicação desta tecnologia na indústria.

O presente trabalho procura apresentar uma solução de desenvolvimento de ferramentas, fabricadas por impressão 3D através de técnicas de fabrico por fusão de filamento, que permitam a sua aplicação em processos de estampagem de chapa de alumínio a baixa pressão, por via do processo de *rubber forming*.

Através de técnicas de fabrico rápido de ferramentas, pretende-se evidenciar que é possível a produção de ferramentas de estampagem por fabrico aditivo, em alternativa aos processos de fabrico convencionais, com as inerentes vantagens deste processo produtivo, em termos de redução de tempo de produção e impacto económico de construção de ferramentas, assim como na obtenção de produtos usando-se materiais e processos mais sustentáveis para o ambiente.

No presente trabalho, foi projetada, desenhada e produzida uma ferramenta, por fabrico aditivo, para estampagem de um componente aeronáutico em chapa de alumínio. O processo de estampagem foi simulado pelo método dos elementos finitos, tendo-se estudado o comportamento da chapa em deformação plástica e da ferramenta durante o processo de conformação. Após produção de um protótipo da ferramenta por impressão 3D, verificou-se que a ferramenta impressa cumpria requisitos dimensionais e que estava apta para a realização de ensaios em ambiente industrial.

Concluindo, depois dos ensaios de estampagem realizados a uma amostragem de produção de 3 peças em contínuo, e conferindo os resultados dimensionais das peças, foi possível verificar que a ferramenta resistiu aos esforços sem deformação mensurável, conseguindo-se bons resultados para aplicação na produção de produtos, pelo menos em quantidade de pré-séries ou de baixo volume de produção para o tipo de peça estudada durante este trabalho.

Palavras-chave: Estampagem, Fabrico Rápido de Ferramentas, Impressão 3D, Processos de Fabrico Não Convencionais, *Rubber Forming*, Simulação Numérica.

Abstract

The 3D printing technology is revolutionizing the production and consumptions methods, giving the possibility to develop products in a fast way and with a reduced budget, creating also the possibility to be flexible on the product design. The evolution of this technology has contributed greatly to the 4th industrial revolution, having a greater interest in applying this technology in the industry.

This thesis seeks to present a solution for the tools development, produced by 3D printing through fused filament fabrication technique, which allow their application in low pressure stamping of aluminum metal sheets, being used the rubber forming process.

Through rapid tooling manufacturing techniques, it is intended to clarify that is possible to produce stamping tools by additive manufacturing, as an alternative to conventional manufacturing processes, with the inherent advantages of this production process in terms of reducing time and economic impact on the production by developing these tools, as well as obtaining products using materials and processes that are more sustainable for the environment.

In the current work, a tool was designed and produced by additive manufacturing, for stamping an aeronautical component in aluminum sheet. The stamping process was simulated by the finite element method, studying the behavior of plastic deformation of the sheet plate, and the tool, during the bending process. After producing a prototype of the tool by 3D printing, was verified that the printed tool, meets dimensional requirements, and was able to carry out the testes in an industrial environment.

In conclusion, after the stamping try-outs carried out on a sample of three continuous parts, and checking the dimensional results of the parts, it was possible to verify that the tool resisted to the tension applied without mensurable deformation, achieving good results to apply in the production of products, at least in quantity of pre-series or low volume production for the part studied throughout this work.

Keywords: Stamping, Rapid Tooling Manufacturing, 3D printing, Non-Conventional Manufacturing Processes, Rubber Forming, Numerical Simulation.

Índice

Agradecimentos	i
Resumo	iii
Abstract	iv
Índice	v
Lista de Figuras	viii
Lista de Tabelas	xiii
Lista de Siglas e Acrónimos	xv
Capítulo 1	1
Introdução	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Metodologia	3
1.4. Estrutura do relatório	4
Capítulo 2	6
Revisão bibliográfica	6
2.1. Tecnologias de fabrico rápido de ferramentas	6
<i>2.1.1. Processos convencionais Vs não convencionais</i>	<i>6</i>
<i>2.1.3. Campo de aplicação emergente</i>	<i>7</i>
<i>2.1.2. Comparação económica da tecnologia de prototipagem rápida</i>	<i>8</i>
2.2. A Impressão 3D	10
<i>2.2.1. Principais características</i>	<i>10</i>
<i>2.2.2. Aplicações da impressão 3D</i>	<i>10</i>
<i>2.2.3. Técnicas de fabrico emergentes</i>	<i>11</i>
<i>2.2.4. Materiais usados na impressão 3D</i>	<i>14</i>
2.3. Conformação de chapa	16
<i>2.3.1. Teoria da plasticidade</i>	<i>17</i>
<i>2.3.2. Estampagem de chapa</i>	<i>25</i>
<i>2.3.3. Retorno elástico do material</i>	<i>32</i>
Capítulo 3	39
Desenvolvimento da ferramenta de estampagem	39
3.1. Componente a produzir através da ferramenta	40
3.2. Tolerâncias de fabrico	41
3.3. Material da chapa a estampar e ensaios experimentais para obtenção de	

propriedades mecânicas	42
3.3.1. <i>Ensaio experimental para determinação das propriedades mecânicas da chapa usada</i>	<i>44</i>
3.4. Considerações a ter em conta no desenho da ferramenta	51
3.5. Produção da ferramenta de estampagem.....	52
3.5.1. <i>Seleção de material de impressão.....</i>	<i>53</i>
3.5.2. <i>Atributos fundamentais para o material</i>	<i>54</i>
3.5.3. <i>Seleção para projeto</i>	<i>55</i>
Capítulo 4	58
Modelação e análise numérica	58
4.1. Comportamento em compressão	58
4.1.1. <i>Criação do modelo.....</i>	<i>58</i>
4.1.2. <i>Malha.....</i>	<i>59</i>
4.1.3. <i>Condições do processo.....</i>	<i>60</i>
4.1.4. <i>Resultado das simulações</i>	<i>61</i>
4.2. Comportamento de alívio de carga	64
4.2.1. <i>Condições de processo.....</i>	<i>64</i>
4.2.2. <i>Resultado das simulações</i>	<i>64</i>
4.2.3. <i>Ajuste do modelo.....</i>	<i>66</i>
4.2.4. <i>Comparação analítica da recuperação elástica.....</i>	<i>67</i>
Capítulo 5	69
Desenho, produção e ensaio da ferramenta em ambiente industrial.....	69
5.1. Modelação 3D da ferramenta	69
5.1.1. <i>Desenvolvimento do protótipo virtual.....</i>	<i>69</i>
5.1.2. <i>Montagem virtual.....</i>	<i>70</i>
5.2. Desenho 2D da ferramenta.....	71
5.2.1. <i>Vistas dos desenhos da Matriz e Contra Matriz</i>	<i>71</i>
5.3. Equipamento de impressão	72
5.3.1. <i>Especificações da impressora 3D.....</i>	<i>72</i>
5.3.2. <i>Preparação do processo de impressão</i>	<i>73</i>
5.4. Produção da Ferramenta Protótipo - FP	77
5.4.1. <i>Impressão da FP.....</i>	<i>77</i>
5.4.2. <i>Controlo dimensional da FP.....</i>	<i>78</i>
5.5. Produção da Ferramenta Protótipo Funcional - FPF	80
5.5.1. <i>Impressão da FPF.....</i>	<i>80</i>
5.5.2. <i>Controlo Dimensional da FPF.....</i>	<i>80</i>

5.6. Ensaio da FPF em ambiente industrial.....	85
<i>5.6.1. Ensaio da FPF em prensa industrial por processo rubber forming.....</i>	<i>85</i>
<i>5.6.2. Controlo dimensional do componente estampado.....</i>	<i>87</i>
5.7. Análise aos resultados obtidos.....	91
Capítulo 6.....	93
Conclusões e perspetivas para trabalhos futuros	93
6.1. Conclusões	93
6.2. Perspetivas para trabalhos futuros	95
Bibliografia.....	96
Anexos	102
ANEXO 1 - Desenho 2D do componente a produzir através da ferramenta.....	103
ANEXO 2 - Desenho 2D do elemento ferramenta: Matriz.....	104
ANEXO 3 - Desenho 2D do elemento ferramenta: Contra Matriz	105
ANEXO 4 - Relatório dimensional da Matriz da FPF.....	106
ANEXO 5 - Relatório dimensional das amostras do ensaio <i>rubber forming</i>....	108
ANEXO 6 - Tabela de dados do ensaio de tração do material AA2024-T3	117
ANEXO 7 - Tabela de dados do ensaio de tração do material AA2024-O.....	124

Lista de Figuras

Figura 1 - Ilustração das diferentes fases consideradas para o desenvolvimento do produto.....	3
Figura 2 - Tecnologias Convencionais Vs Tecnologias de Prototipagem Rápida. Adaptado de [6].....	6
Figura 3 - Potencial de poupança gerado pela utilização das tecnologias RP e RT. Adaptado de [6].....	7
Figura 4 - Exemplo de ferramenta com impressão 3D [7].....	7
Figura 5 - Comparação de tempos e custos de produção CNC Vs Impressão 3D. Adaptado de [11].....	9
Figura 6 - Razões de requisição de uma impressão 3D. Adaptado de [13].	10
Figura 7 - Tecnologias de Prototipagem Rápida. Adaptado de [14]	11
Figura 8 - Percentagem de empresas a utilizar impressão 3D entre 2017 e 2018. Adaptado de [24].....	13
Figura 9 - Quantidade de publicações na base de dados Scopus entre 2010 e 2021 com as palavras-chave: "impressão 3D" ou "fabrico aditivo". Adaptado de [25].....	14
Figura 10 - Gráfico de materiais atualmente utilizados para produção por impressão 3D na indústria. Adaptado de [13].	15
Figura 11 - Representação de provete típico para ensaio de tensão uniaxial.	18
Figura 12 - Representação esquemática do gráfico curva tensão-extensão convencional de materiais metálicos. Adaptado de [38].	18
Figura 13 - Representação esquemática do módulo de Young em gráfico de tensão-extensão. Adaptado de [38].	20
Figura 14 - Representação esquemática do gráfico curva tensão-extensão convencional e real. Adaptado de [41].	21
Figura 15 - Representação gráfica das superfícies limite elástico segundo critérios de <i>Tresca</i> e <i>Von Mises</i> de um material isotópico. Adaptado de [46].	24
Figura 16 - Representação da CLC através do Diagrama de Limite de Conformação. Adaptado de [48].	24
Figura 17 - Esquematização da ferramenta de estampagem nas diferentes fases. Adaptado de [55].....	26

Figura 18 - Ilustração de processo de dobra de chapa metálica e parâmetros. Adaptado de [57].	27
Figura 19 - Esquemática da ferramenta em <i>rubber forming</i> . Adaptado de [63]	28
Figura 20 - Exemplo de produto produzido em <i>rubber forming</i> .	28
Figura 21 - Curva Tensão-Extensão do poliuretano 60A com diferentes fatores forma [62].	29
Figura 22 - Curva Tensão-Extensão do poliuretano 80A com diferentes fatores forma [62].	29
Figura 23 - Esquemática do processo de <i>rubber forming</i> .	30
Figura 24 - Esquemática de prensa hidráulica 4000 kN.	31
Figura 25 - Esquemática gráfica tensão-extensão de retorno elástico Adaptado de [38].	32
Figura 26 - Ilustração do fenômeno de Retorno Elástico em dobra de chapa metálica. Adaptado de [57].	33
Figura 27 - Simulação numérica ao comportamento “quinagem em V” para diferentes aberturas da matriz.	37
Figura 28 - Efeito de aplicação de força de retenção da chapa. Adaptado de [91].	38
Figura 29 - Elementos objetivos no desenvolvimento da ferramenta por impressão 3D.	39
Figura 30 - Modelo 3D do componente estrutural a produzir.	41
Figura 31 - Ilustração da chapa recortada (estampa plana) antes do processo de estampagem.	41
Figura 32 - Forno elétrico de tratamento da chapa utilizada para ensaio prático.	43
Figura 33 - Gráfico Tensão (MPa) - Extensão (mm/mm) liga de alumínio AA2024- O.	44
Figura 34 - Máquina de teste de tensão utilizada para ensaio mecânico ao AA2024.	45
Figura 35 - Extensômetro utilizado no teste de tração.	45
Figura 36 - Geometria do provete utilizado para os testes de tração. Segundo ASTM E8/E8M-22.	46
Figura 37 - Amostras de provetes AA2024-O para realização de teste de tração.	46
Figura 38 - Análise da dimensão real do provete AA2024 antes do teste de tração.	47
Figura 39 - Amarra em formato cunha.	47

Figura 40 - Provete colocado máquina de ensaios de tração.	47
Figura 41 - Colocação do extensómetro sobre o provete a testar.	47
Figura 42 - Provetes após teste tração material A2024-T3.....	48
Figura 43 - Curva convencional Tensão (MPa) - Extensão (mm/mm) da chapa AA2024-T3.....	48
Figura 44 - Provetes após teste tração material A2024-O.	49
Figura 45 - Curva convencional Tensão (MPa) - Extensão (mm/mm) da chapa AA2024-O.	50
Figura 46 - Análise da dimensão real do provete AA2024 após teste de tração.	50
Figura 47 - Ilustração do conceito de ferramenta.	52
Figura 48 - Laboratório InLAB da ESTSetúbal.....	52
Figura 49 - Ilustração do processo FDM®.....	53
Figura 50 - Gráfico de comparação de densidades dos materiais.	54
Figura 51 - Gráfico de comparação de custo de compra dos materiais.....	54
Figura 52 - Gráfico de classificação ecológica dos materiais.	55
Figura 53 - Gráfico de relação das propriedades mecânicas dos filamentos dos materiais.	55
Figura 54 - Gráfico Tensão (MPa) – Extensão (mm/mm) a) à compressão, b) à tração [97].....	56
Figura 55 - Modelo utilizado na simulação numérica.	59
Figura 56 - Malha de elementos finitos do modelo utilizado.	60
Figura 57 - Condições de contacto no modelo.	61
Figura 58 - Condições de fronteira (estática) do modelo.	61
Figura 59 - Condições de fronteira (dinâmica) do modelo.	61
Figura 60 - Distribuição de tensões equivalentes de Von Misses (MPa) na Matriz e Chapa com deformação 90°. a) Vista Geral, b) Pormenor da Zona de Deformação.	62
Figura 61 - Tensão Von Misses na chapa após deformação 90°.....	62
Figura 62 - Gráfico da Tensão-Tempo de processo (Elemento nº 262 da chapa)....	63
Figura 63 - Gráfico da Tensão-Tempo de processo (Elemento nº 262 da chapa)....	63
Figura 64 - Tensão Von Misses máxima na chapa durante deformação 90°.....	64
Figura 65 - Distribuição das tensões equivalentes de Von Misses (MPa) na Matriz e Chapa na descompressão. a) Vista geral, b) Pormenor da zona de deformação.....	65

Figura 66 - Comparação da distribuição de tensões equivalentes de Von Misses....	66
Figura 67 - Impacto na Distribuição de Tensões Equivalentes de Von Misses (MPa).....	67
Figura 68 - Comparação da variação do ângulo de recuperação elástica.....	67
Figura 69 - Matriz	70
Figura 70 - Subconjunto Matriz e	70
Figura 71 - Contra Matriz.....	70
Figura 72 - Subconjunto Contra Matriz e Casquilhos	70
Figura 73 - Vista explodida do conjunto final montado do produto (Ferramenta) em modelação 3D.	71
Figura 74 - Desenho técnico da Matriz Ref. ^a : F01.....	71
Figura 75 - Desenho técnico da Contra Matriz Ref. ^a : F02	71
Figura 76 - Equipamento utilizado para impressão 3D.....	72
Figura 77 - Exemplo orientação impressa em	73
Figura 78 - Exemplo orientação impressa em	73
Figura 79 - Exemplo espessura da camada 0,4mm (total de camadas = 30).	73
Figura 80 - Exemplo espessura da camada 0,1mm (total de camadas = 119).	73
Figura 81 - Exemplo espessura da parede 2,5 mm.....	74
Figura 82 - Exemplo espessura da parede 1,2 mm.....	74
Figura 83 - Exemplo densidade preenchimento 30 %.....	74
Figura 84 - Exemplo densidade preenchimento 80 %.....	74
Figura 85 - Exemplo padrão triangular.	75
Figura 86 - Exemplo padrão cúbico.....	75
Figura 87 - Peça virtual do modelo de teste de precisão da impressão 3D.....	75
Figura 88 - Peça real do modelo de teste de precisão da impressão 3D.	76
Figura 89 - Ilustração da simulação de impressão no programa Cura.	77
Figura 90 - Peça real (Contra Matriz) em produção.	78
Figura 91 - Peças reais (Matriz, Contra Matriz) produzidas.	78
Figura 92 - Projetor de perfis MITUTOYO presente na sala de medição da ESTS... ..	78
Figura 93 - Matriz em medição no projetor de perfis.	78
Figura 94 - Variação das características dimensionais principais da FP.....	79
Figura 95 - Equipamento CMM utilizado para medição da Matriz.	81
Figura 96 - Definição de RPS para controlo dimensional da matriz em CMM.....	81
Figura 97 - Ilustração dos pontos de superfície na zona de assentamento da	

chapa.	82
Figura 98 - Resultado dimensional da matriz, zona assentamento da chapa.	82
Figura 99 - Ilustração dos pontos de superfície na zona de dobra do lado esquerdo da chapa.	83
Figura 100 - Resultado dimensional da matriz, zona de dobra do lado esquerdo da chapa.	83
Figura 101 - Ilustração dos pontos de superfície na zona de dobra do lado direito da chapa.	84
Figura 102 - Resultado dimensional da matriz, zona de dobra do lado direito da chapa.	84
Figura 103 - Prensa por processo <i>rubber forming</i> utilizada para ensaio pratico.	85
Figura 104 - Posicionamento da ferramenta na prensa.	86
Figura 105 - Ferramenta e peça estampada após processo de estampagem.	87
Figura 106 - Peça amostra produzida por estampagem através do processo <i>rubber forming</i>	87
Figura 107 - Equipamento CT utilizado para medição do componente estampado.	88
Figura 108 - Ilustração dos pontos de superfície na curvatura da aba esquerda da peça.	89
Figura 109 - Resultado dimensional à aba esquerda das peças estampadas.	89
Figura 110 - Ilustração dos pontos de superfície na curvatura da aba direita da peça.	90
Figura 111 – Resultado do controlo dimensional à aba esquerda das peças estampadas.	90
Figura 112 - Ilustração dos ângulos de dobra da peça, após retorno elástico.	91
Figura 113 - Resultado dimensional à aba esquerda das peças estampadas.	91

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Custo médio aproximado de diferentes processos de fabrico de um modelo de produto em quantidade de uma unidade. Adaptada de [10].	8
Tabela 2 - Resumo dos processos mais utilizados em impressão 3D. Adaptada de [16].	12
Tabela 3 - Tabela de Propriedades dos Materiais usados em Impressão 3D [26].	15
Tabela 4 - Variáveis da conformação em regime plástico. Adaptada de [37].	17
Tabela 5 - Variáveis da conformação em regime plástico. Adaptada de [49].	25
Tabela 6 - Propriedades mecânicas do poliuretano 60A e 80A. Adaptada de [62].	29
Tabela 7 - Propriedades mecânicas do poliuretano HD70. Adaptada de [64].	30
Tabela 8 - Ângulo de retorno elástico empírico para dobra de 90°. Adaptada da empresa LAUAK.	34
Tabela 9 - Ferramentas comerciais de software de simulação de conformação. Adaptada de [85, 86, 87].	36
Tabela 10 - Composição química da liga de alumínio 1100.	38
Tabela 11 - Propriedades mecânicas da liga de alumínio 1100. Adaptada de [62].	38
Tabela 12 - Tabela de tolerâncias dimensionais do componente a produzir.	41
Tabela 13 - Composição química do material AA2024-T3 em estado de chapa.	42
Tabela 14 - Propriedades mecânicas do material AA2024-T3 em estado de chapa [93].	42
Tabela 15 - Tabela de características da chapa do componente a produzir.	43
Tabela 16 - Composição química do material AA2024-O do componente a produzir.	44
Tabela 17 - Propriedades mecânicas do material AA2024-O do componente a produzir [95].	44
Tabela 18 - Diferenças da resistência mecânica de referência [93, 96] e convencional, para o material AA2024-T3 e A2024-O.	51
Tabela 19 - Avaliação geral aos atributos fundamentais dos materiais.	56
Tabela 20 - Propriedades mecânicas do PLA Premium para a ferramenta [97].	56
Tabela 21 - Dimensões das peças modeladas.	59
Tabela 22 - Número de elementos finitos das peças analisadas.	60

Tabela 23 - Condições de fronteira de compressão.	61
Tabela 24 - Condições de fronteira de descompressão.....	64
Tabela 25 - Ângulo da chapa na descompressão.....	66
Tabela 26 - Parâmetros utilizados na impressão da FP.	77
Tabela 27 - Tabela de controlo dimensional da FP.....	79
Tabela 28 - Parâmetros utilizados na impressão da FPF.	80
Tabela 29 - Ângulo de recuperação elástica ensaio real Vs previsão ao material AA2024-O.	92

Lista de Siglas e Acrónimos

2D	Duas Dimensões
3D	Três Dimensões
ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno (<i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i>)
AM	Fabrico Aditivo (<i>Additive Manufacturing</i>)
CAD	Desenho Assistido por Computador (<i>Computer Aided Design</i>)
CAE	Engenharia Assistida por Computador (<i>Computer Aided Engineering</i>)
CAM	Fabrico Assistido por Computador (<i>Computer Aided Manufacturing</i>)
CLC	Curva Limite de Conformação
CMM	Máquina de Medição por Coordenadas (<i>Coordinate Measuring Machine</i>)
CNC	Controle Numérico Computadorizado (<i>Computer Numerical Control</i>)
CT	Tomografia Computadorizada (<i>Computed Tomography</i>)
ESTS	Escola Superior de Tecnologia de Setúbal
FDM	Modelação por Extrusão e Deposição de Material (<i>Fused Deposition Modeling</i>)
FFF	Fabrico por Fusão de Filamento Polimérico (<i>Fused Filament Fabrication</i>)
FP	Ferramenta Protótipo
FPF	Ferramenta Protótipo Funcional
InLAB	InnovationLAB
IPS	Instituto Politécnico de Setúbal
LOM	Fabrico de Objetos Laminados (<i>Laminated Object Manufacturing</i>)
MEF	Método dos Elementos Finitos
MJM	Modelação Multijacto (<i>Multi-Jet Modeling</i>)
PC	Policarbonato (<i>Polycarbonate</i>)
PEI	Polieterimida (<i>Polyetherimide</i>)
PEEK	Poliéter Éter Cetona (<i>Polyether Ether Ketone</i>)
PETG	Polietileno Tereftalato Glicol (<i>Polyethylene Terephthalate Glycol</i>)
PL	Provete laminado Longitudinal
PLA	Ácido Poliláctico (<i>Polylactic Acid</i>)
PT	Provete laminado transversal
RM	Fabrico Rápido (<i>Rapid Manufacturing</i>)
RP	Prototipagem Rápida (<i>Rapid Prototyping</i>)
RT	Fabrico Rápido de Ferramentas (<i>Rapid Tooling</i>)
RPM	Prototipagem Rápida e Fabrico Rápido (<i>Rapid Prototyping and Rapid Manufacturing</i>)
RPS	Sistema de Pontos de Referência (<i>Reference Point System</i>)
SDL	Laminação por Deposição Seletiva (<i>Selective Deposition Lamination</i>)
SLA	Estereolitografia (<i>Stereolithography</i>)
SLM	Derretimento Seletivo a Laser (<i>Selective Laser Melting</i>)
SLS	Sinterização Seletiva a Laser (<i>Selective Laser Sintering</i>)
SM	Fabrico Subtrativo (<i>Subtractive Manufacturing</i>)
UTM	Máquina Universal de Ensaio (Universal Testing Machine)

Lista de Símbolos

θ	Ângulo de dobra
ν	Coefficiente de Poisson
E	Módulo de Young
ϵ_p	Extensão plástica
ρ	Densidade
ϵ	Extensão
ϵ_{lp}	Extensão no ponto limite de proporcionalidade
ϵ_0	Pré-deformação
σ	Tensão
τ_{max}	Tensão de corte máxima
σ_0	Tensão inicial
σ_c	Tensão de cedência
σ_{lp}	Tensão no ponto limite de proporcionalidade
σ_r	Tensão real
A	Área
A_i	Área da seção reta transversal instantânea
F	Carga exercida
r_m	Coefficiente de anisotropia normal
n	Coefficiente de encruamento
K	Coefficiente de resistência ou módulo plástico
d	Diâmetro
e	Espessura
m	Fator de atrito
P	Pressão
r	Raio
k	Tensão limite elástica em corte puro

Capítulo 1

Introdução

1.1. Enquadramento

Uma parte dos produtos que existem no mercado são obtidos através de processos de moldagem, como é o caso da deformação plástica de metais. Para realização destes produtos é essencial recorrer a ferramentas de produção que conjuntamente com maquinaria adequada constituem o equipamento de fabrico necessário para a realização de determinadas fases do processo produtivo de um produto final que chega ao consumidor/utilizador.

A procura constante por tecnologias que permitam criar maior sustentabilidade dos negócios, tem vindo a permitir o desenvolvimento da ciência e tecnologia para o aumento da competitividade das empresas de forma a ir ao encontro da satisfação dos utilizadores. A história da civilização da humanidade tem sido impulsionada pela evolução tecnológica. No caso da prototipagem rápida e fabrico rápido (RPM – *Rapid Prototyping and Rapid Manufacturing*) e suas técnicas derivadas, podemos identificar tendências que num futuro próximo se beneficiará muito destas tecnologias [1].

Também os materiais têm vindo a apresentar um papel importante na evolução tecnológica, permitindo cada vez mais obter-se materiais com características mecânicas superiores. Neste contexto, e como uma forma de tecnologia avançada de fabrico, surgem processos de fabrico não convencionais com objetivo de alta flexibilidade e alta produtividade, como as tecnologias de fabrico aditivo (AM – *Additive Manufacturing*) que através de impressão 3D de materiais polímeros ou metais, vêm revolucionar os métodos de produção, dando a possibilidade de desenvolver produtos de uma forma rápida e com um investimento reduzido, criando ainda a possibilidade de flexibilidade de desenho de produto.

A impressão 3D é uma das tecnologias de fabrico aditivo (AM) que tem como base a utilização de processos tecnológicos e tecnologias de informação que, através de um princípio de sistema de fabrico assistida por computador (CAM – *Computer Aided Manufacturing*), permitem simular, preparar a produção pretendida e fabricar objetos sólidos tridimensionais diretamente a partir de modelos virtuais, modelados num sistema de desenho assistido por computador (CAD – *Computer Aided Design*) [2].

É com base nesse potencial que o trabalho desta dissertação procura encontrar soluções de desenvolvimento de ferramentas que permitam a sua utilização em estampagem de baixa pressão, adequados ao processo de *rubber forming*, conseguindo desta forma responder às necessidades de produção em quantidades de volumes baixos de peças a várias indústrias.

1.2. Objetivos

Com base na pesquisa bibliográfica, na aprendizagem obtida durante este curso e outros, deseja-se deter os conhecimentos técnico científicos fundamentais com objetivo de desenvolver, simular, projetar, e fabricar uma ferramenta de estampagem, tendo por base a tecnologia de impressão 3D com recurso a materiais poliméricos, com demonstração prática da sua funcionalidade em ambiente industrial.

O trabalho consiste na aplicação de processos de fabrico rápido, através da utilização da impressão 3D, como alternativa ao fabrico convencional, tendo como base dos objetivos, a compreensão dos conceitos de:

- **Seleção de Materiais**

Para garantir que é utilizado um material que contribui para a segurança do produto e que impacte positivamente no custo de fabrico assim como para o custo total do produto final, com relevo na vertente de reciclagem e/ou biodegradabilidade.

- **Comportamento Elasto-Plástico de Materiais**

Para analisar o comportamento da chapa durante o processo de estampagem.

- **Simulação Numérica**

Para garantir o melhor resultado do produto pretendido, dada a possibilidade de análise do processo, e assim pode-se reduzir significativamente custos não planeados de produção e/ou desperdício de material.

- **Projeto e desenho da Ferramenta**

Para garantir que a ferramenta cumpre os requisitos necessários para a produção, reduzindo consideravelmente erros dimensionais e funcionais do produto final.

Assim como dos processos de fabrico:

- **Aditivo por Impressão 3D**

Para identificar todas as potencialidades e vantagens que provoca o surgimento desta tecnologia e processo de fabrico para a produção de ferramentas.

- **Maquinação por remoção de material**

Para identificar as principais limitações e desvantagem que o processo convencional tem na escolha da sua utilização.

- **Estampagem de chapa metálica**

Para identificar o comportamento que um material fica sujeito aquando aplicados esforços de deformação plástica e respetivo estudo da recuperação elástica que a chapa metálica sofre após processo de estampagem.

1.3. Metodologia

O desenvolvimento desta dissertação estará baseado na pesquisa bibliográfica em livros, artigos científicos, teses/dissertações, que permitam identificar quais as vantagens que a impressão 3D levanta face aos problemas existentes em outros métodos de fabrico como a maquinação por remoção de material. Procura-se identificar quais os potenciais das tecnologias de fabrico rápido de ferramentas no ciclo de vida de um produto, assim como as suas áreas de atuação potenciais para a solução da presente dissertação.

Com base num processo de desenvolvimento de produto, ilustrado na Figura 1, que enquadra as atividades que são necessárias executar para atingir os resultados de cada uma das fases caracterizadas, para atingir os objetivos propostos.

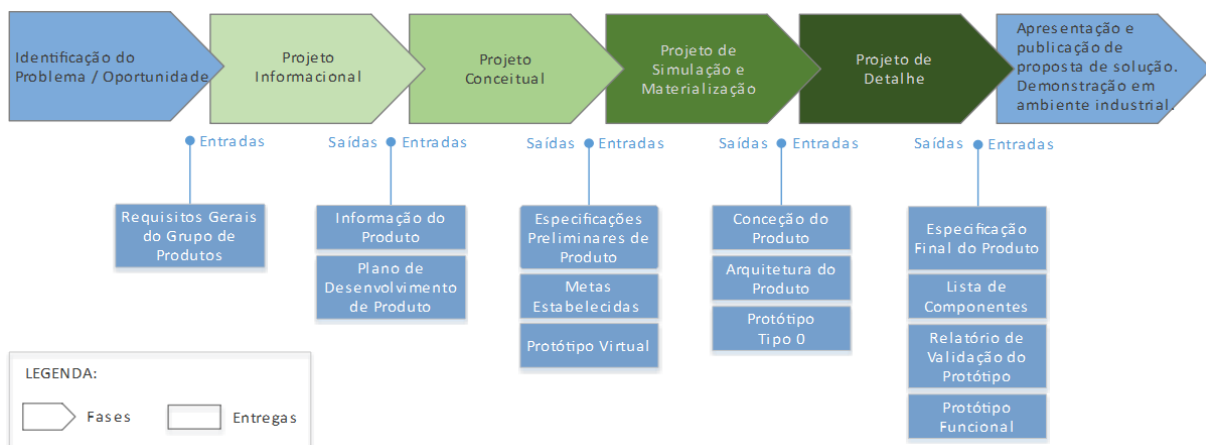


Figura 1 - Ilustração das diferentes fases consideradas para o desenvolvimento do produto.

Primeira fase - Identificação de um Problema / Oportunidade: O início dá-se por uma situação que pode ser considerada de identificação de um problema / oportunidade, devido à evolução humana, científica, tecnologia, ou económica, que será um arranque para que através de diferentes métodos de investigação e desenvolvimento se apresente uma proposta de solução que vá de encontro com a resolução desse problema / oportunidade.

Segunda fase - Projeto Informal: Nesta fase começará a analisar-se e processar a informação disponível para obter uma primeira orientação estratégica do projeto. Esta fase servirá de planeamento para a execução da investigação prática, execução de ensaios de laboratório, execução de testes físicos, identificação de possíveis aspetos fortes e limitações no projeto no que possa ser a utilização de materiais, equipamentos, etc.

Terceira fase - Projeto Conceitual: Será nesta fase que se iniciará a execução, e que se dará corpo ao conceito de ferramenta, criando um modelo virtual do produto que se pretende fabricar, tendo em conta os aspetos de funcionais que o produto deverá cumprir.

Quarta fase - Projeto de Simulação e Materialização: Nesta fase será considerado o objetivo de resolver questões geométricas, dinâmicas e de segurança do produto, como forma de validar os materiais considerados, os processos a utilizar, e simular o processo produtivo industrial, sendo elaborado um produto protótipo físico que permita iniciar verificações necessárias ou melhorias possíveis de aplicar.

Quinta fase - Projeto de Detalhe: Com base na fase anterior pretender-se-á efetivamente detalhar, otimizar, os aspetos de segurança, qualidade, confiabilidade do produto a fabricar, com resultado de criar um produto protótipo funcional para aplicação em processo produtivo com vários ciclos.

Sexta fase - Apresentação e Publicação da Proposta de Solução / Demonstração em ambiente Industrial: Por fim e com base nos resultados obtidos nas fases anteriores, pretende-se tirar conclusões lógicas, técnicas e científicas que visam estabelecer uma proposta de solução, capaz de cumprir com os objetivos expostos, concretizar a demonstração em ambiente industrial, e identificar oportunidades de evolução futura.

Estas fases estarão distribuídas pelos diferentes capítulos deste relatório.

1.4. Estrutura do relatório

Esta dissertação está dividida em 6 Capítulos.

No **primeiro capítulo** trata-se de realizar um enquadramento do tema da dissertação, definir objetivos gerais ao trabalho, descrever a metodologia do projeto utilizada e a metodologia de desenvolvimento de produto caracterizada.

O **segundo capítulo** conduz à revisão bibliográfica de dois conceitos chave do projeto, nomeadamente a impressão 3D, como sendo uma tecnologia de fabrico emergente, identificando as suas potencialidades comparativamente com o estado atual de produção de ferramentas, e os seus problemas ou fraquezas. E o segundo conceito que consiste na deformação plástica dos materiais que normalmente são utilizados em processos de *rubber forming*, assim como ao interesse evidente na indústria por ferramentas de simulação numérica, e a implicação que este método tem para uma solução mais precisa e de melhor previsão do resultado real.

No **terceiro capítulo** serão introduzidas as investigações práticas para o desenvolvimento da ferramenta, com uma análise em laboratório ao comportamento dos materiais utilizados no estudo teórico, como forma de validação dos dados considerados e confirmação de condições para produção da ferramenta e teste prático da funcionalidade da mesma. Ainda será neste capítulo que é escolhido o conceito de ferramenta capaz de estampar a peça necessária, selecionando materiais vantajosos em diferentes elementos objetivos para o fabrico da ferramenta.

No **quarto capítulo** apresentam-se estudos ao comportamento do/s material/ais selecionados, utilizando as tecnologias de engenharia assistida por computador (CAE – *Computer Aided Engineering*). Através da simulação numérica pelo método de elementos finitos será efetuada a

validação de um modelo de ferramenta, que seja segura e de total capacidade para suportar os requisitos funcionais quando sujeita à compressão da chapa. Também será efetuada uma análise numérica quando efetuada a descompressão da chapa, por forma a encontrar a geometria correta para a modelação e desenho técnico.

O **quinto capítulo** é dedicado à utilização do desenho assistido por computador (CAD – *Computer-Aided Design*) para criação do modelo 3D da ferramenta e criação dos desenhos técnicos de fabrico 2D com respetivo toleranciamento geométrico considerado. Abordar-se-á o processo de fabrico, com a escolha do equipamento de impressão 3D e respetivos parâmetros de processo com aplicação na produção da ferramenta e apuramento de resultados geométricos através de meios de medição e/ou máquinas de medição por coordenadas (CMM – *Coordinate Measuring Machine*), e ensaio experimental prático em ambiente industrial com a aplicação da ferramenta funcional através de ensaio em prensa.

E no **sexto capítulo** serão apresentadas as conclusões desta dissertação, com uma visão dos resultados obtidos, e algumas perspetivas para trabalhos futuros, com vista a uma real implementação em empresas, dado ser um mercado que se considera ser de crescimento exponencial.

Capítulo 2

Revisão bibliográfica

2.1. Tecnologias de fabrico rápido de ferramentas

2.1.1. Processos convencionais Vs não convencionais

Os mais recentes desenvolvimentos da ciência e da tecnologia têm contribuído significativamente para o aumento de competitividade das empresas e para a satisfação das necessidades dos utilizadores. Caso deste avanço é o desenvolvimento de tecnologias avançadas de fabrico que usam as tecnologias de informação, como o CAD/CAE, para materializar rapidamente componentes em sistemas de projeto.

Um dos exemplos de aplicação das tecnologias de fabrico, é a prototipagem rápida (RP – *Rapid Prototyping*), que através de processos tecnológicos e de tecnologias de informação permite fabricar modelos físicos tridimensionais diretamente a partir de modelos virtuais gerados num sistema CAD. As tecnologias de fabrico de RP estão a evoluir para tecnologias de fabrico rápido de ferramentas (RT – *Rapid Tooling*), com objetivo de reduzir o tempo de colocação de um produto no mercado, diminuindo a duração não só da fase de desenvolvimento (através do RP), mas também da fase de industrialização (através do RT) [3, 4, 5]. Na Figura 2 apresenta-se a versatilidade e potencialidades destas novas tecnologias, relativamente aos processos convencionais [6].

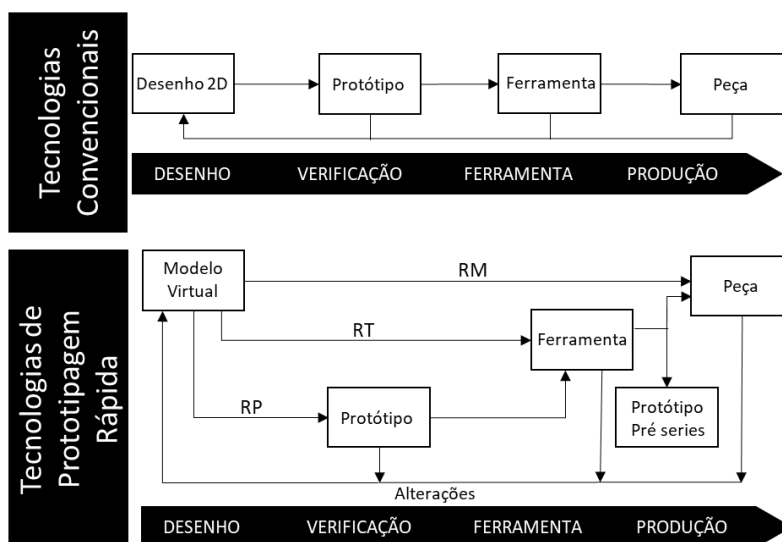


Figura 2 - Tecnologias Convencionais Vs Tecnologias de Prototipagem Rápida.

Adaptado de [6].

2.1.3. Campo de aplicação emergente

Embora ainda em crescimento as competências no desenvolvimento e aplicação da tecnologia RT, reconhece-se que estas tecnologias oferecem um elevado potencial para uma mais rápida resposta às necessidades do mercado, na Figura 3, é demonstrado esta criação de um novo fator de competitividade e potencial de poupança [6].

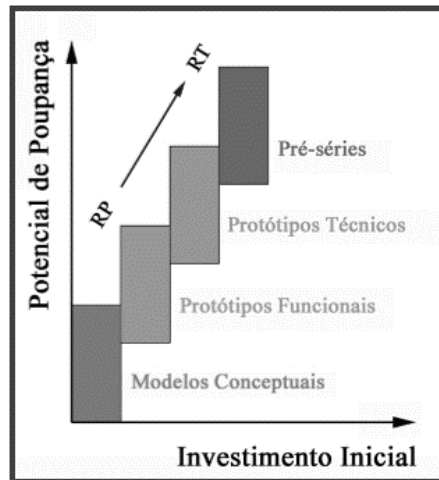


Figura 3 - Potencial de poupança gerado pela utilização das tecnologias RP e RT.

Adaptado de [6].

Uma das empresas internacionais que tem explorado e exposto alguns dos trabalhos neste sentido é a *Stratysys, Inc.* Esta descreve a capacidade de redução da duração de fabrico de ferramentas, de semanas ou meses para fabrico em dias, diminuindo os custos, e proporcionando maior liberdade de projeto sem necessidade de ferramentas complexas (Figura 4). Esta empresa utiliza a impressão 3D para fabrico de RT usados na Indústria Aeroespacial [7].

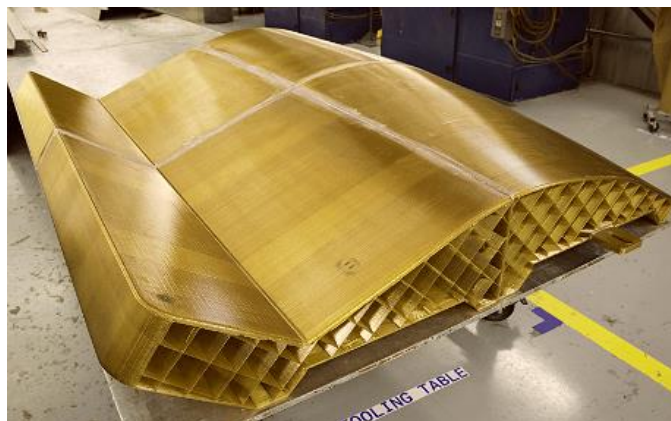


Figura 4 - Exemplo de ferramenta com impressão 3D [7].

2.1.2. Comparação económica da tecnologia de prototipagem rápida

Com o sucesso das tecnologias de prototipagem rápida em redução de tempo e custo no ciclo de fabrico, a ciência e a indústria procuraram aprofundar os processos de forma a obter um impacto ainda maior em tempo e custo [8]. No entanto, a pesquisa sobre a vertente económica de fabrico é ainda um caminho a ser verificado, consoante o tipo de peça, complexidade, materiais, etc. Vários autores concentram-se num modelo de custo para processos aditivos de fabrico rápido da peça (RM – *Rapid Manufacturing*). Hopkinson et al. [9] estudaram o custo do RM, sendo que dividiram os custos em custos de máquinas, custos de mão de obra e custos de material. O modelo de avaliação criado é assenta na suposição de que a máquina se encontraria a produzir apenas cópias da mesma peça, e utilizando um tempo de produção constante.

Uma comparação de custos deve incluir a comparação de custo da mesma peça em processos distintos, embora se torne difícil obter uma conclusão, avaliando um modelo de peça único. Exemplo disso é a variação de capacidades geométricas, precisão, flexibilidade entre materiais, para diferentes processos de fabrico rápido. Pelo que não é razoável calcular o custo exato de fabrico de uma peça de alumínio por uma técnica tradicional e compará-lo com o custo de uma peça em um material de plástico fabricada por uma técnica de prototipagem rápida, pelo que, uma comparação de faixa de custo e magnitude tem mais coerência, considerando a falta de uma base de comparação comum [10].

Na Tabela 1 é apresentado o resumo de custo aproximado para diferentes tecnologias de fabrico rápido comparado com a convencional, em produção por diferentes processos e materiais adequados para o tipo de processo, considerando o fabrico do mesmo modelo de produto na quantidade de uma unidade, repetindo o processo para outros dois modelos de produtos diferentes.

Tabela 1 - Custo médio aproximado de diferentes processos de fabrico de um modelo de produto em quantidade de uma unidade.

Adaptada de [10].

Tecnologia	Processo	Material	Custo Aproximado [dólares; \$]
RP	SLS	DuraForm PA	255
RP	FDM®	ABS	250
Convencional	CNC	Liga Alumínio 6061	900

Os autores concluem que os custos aproximados de fabrico nas diferentes tecnologias de RP são de igual ordem de grandeza, no entanto existe uma mudança significativa no custo aproximado para o fabrico na tecnologia convencional.

Este resultado tem como razão que o processo utilizado por tecnologia convencional apresenta uma vantagem quanto à metodologia bem desenvolvida e custos baixos de material e fabrico, no entanto apresenta custos elevados de engenharia (recursos humanos e equipamentos) que, para baixos

volumes, consomem a eficiência de custos dos processos tradicionais, ao contrário dos custos das tecnologias de prototipagem rápida, que pelos processos apresentados, tem uma magnitude idêntica, a um custo de maior competitividade [10].

Ferreira, Hugo [11] apresentou o impacto económico de utilização de processos de fabrico por impressão 3D para produção de ferramentas de estampagem. O autor avaliou o impacto em produzir ferramentas de 3 grupos dimensionais, com respetivas dimensões para os elementos Matriz e Contra Matriz.

- Grande:
 - Contra Matriz = (337x158x10) mm
 - Matriz = (348x166x48) mm
- Média:
 - Contra Matriz = (248x56x10) mm
 - Matriz = (248x58x39) mm
- Pequena:
 - Contra Matriz = (248x56x10) mm
 - Matriz = (248x58x39) mm

Foi efetuada uma comparação do tempo e custo de produção em impressão 3D com o tempo e custo de produção em processos convencionais de controlo numérico computacional (CNC – *Computer Numeric Control*) que utiliza a tecnologia de remoção de material para produção do produto desejado, em que dos 5 diferentes equipamentos e parâmetros, 3 deles têm impacto de tempo e custo menor que o fabrico convencional, tal como representado na Figura 5.

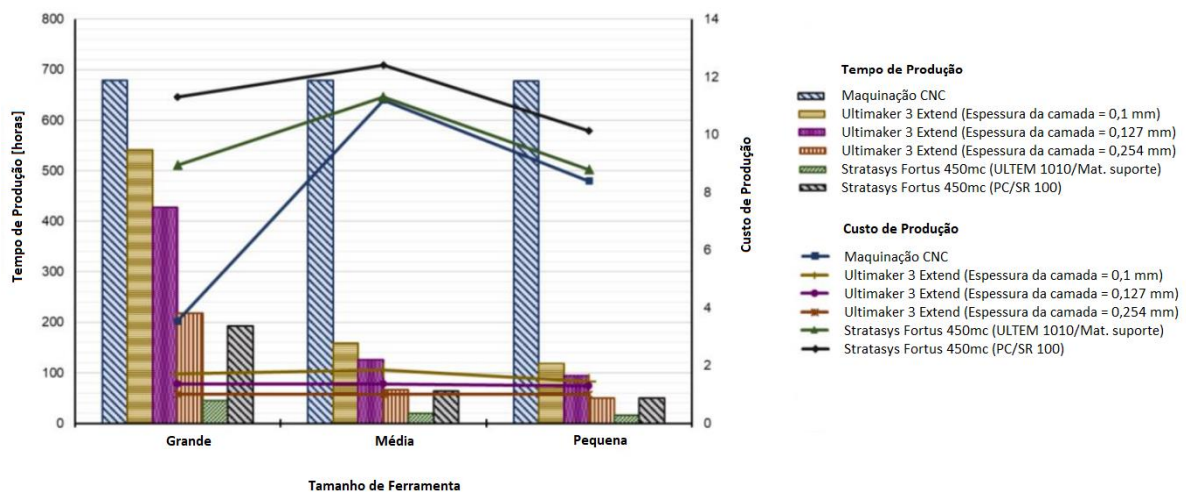


Figura 5 - Comparação de tempos e custos de produção CNC Vs Impressão 3D.

Adaptado de [11].

2.2. A Impressão 3D

2.2.1. Principais características

Podemos afirmar que as principais vantagens desta tecnologia Impressão 3D, comparando com as concorrentes tecnologias de maquinação por remoção de material, estão relacionadas com a relação custo-eficácia e custo-eficiência do processo.

Um fator positivo nesta tecnologia é a redução de desperdício, que é cerca de 40% menor comparando com tecnologias de remoção de material, e ainda a possibilidade de reciclagem do material desperdiçado, onde 95% a 98% do material pode ser reciclado.

A tecnologia de impressão 3D inclui uma capacidade extrema de produzir produtos personalizados em forma de protótipo, com uma possibilidade de alterar e ensaiar modificações de produto com muita facilidade.

Ainda assim esta tecnologia carece de diferentes materiais possíveis de utilização, baixa qualidade de acabamento superficial, limitação de forças, resistência ao calor e humidade [12].

2.2.2. Aplicações da impressão 3D

As características desta tecnologia prestam-se a aplicações de pequenas e médias produções, produtos em massa personalizados, protótipos, peças de reposição, e ainda em áreas da saúde [12].

A Figura 6 demonstra que a prototipagem, a inovação e o desenvolvimento de produtos são a maioria das razões para requisição de uma impressão 3D [13].



Figura 6 - Razões de requisição de uma impressão 3D.

Adaptado de [13].

2.2.3. Técnicas de fabrico emergentes

Os processos de fabrico fundamentais podem ser divididos em duas grandes categorias: subtrativos (SM – *Subtractive Manufacturing*), e aditivos (AM – *Additive Manufacturing*). A categoria de processos aditivos, onde se englobam as técnicas de impressão 3D, pode ser subdividida tendo em conta o estado da matéria-prima, seja ele líquido, sólido ou em partículas. Significa que as diferentes técnicas existentes estão muito relacionadas com o estado da matéria-prima [14].

Procura-se agora efetuar uma breve descrição das técnicas de impressão 3D mais relevantes, sendo que atualmente muitas delas já possuem várias variantes, mas com o mesmo princípio básico. Na Figura 7 são apresentadas as várias técnicas de adição de material.

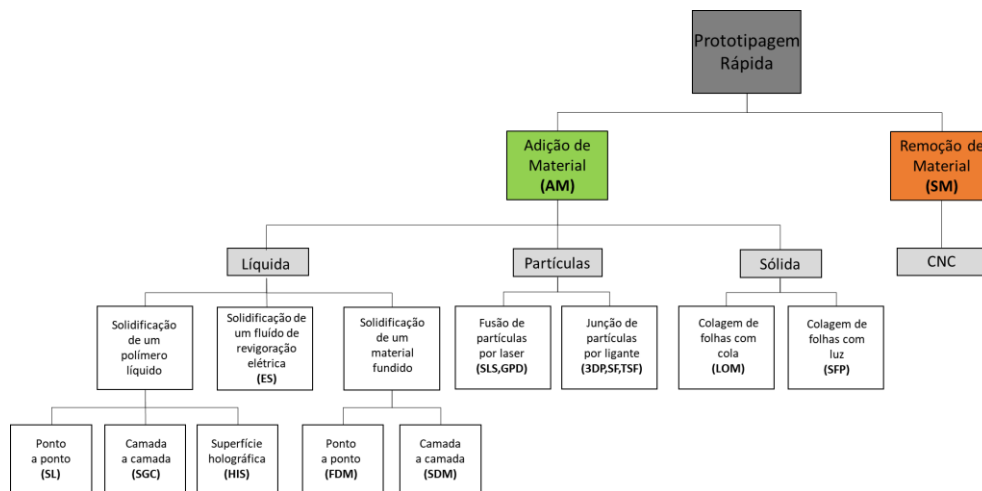


Figura 7 - Tecnologias de Prototipagem Rápida.

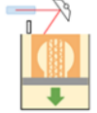
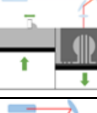



Adaptado de [14]

PROCESSOS DE FABRICO POR IMPRESSÃO 3D

Tal como mencionado anteriormente, existem vários grupos de técnicas de prototipagem rápida ao que se refere à categoria de adição de material. Consoante o objetivo a que se pretende realizar o produto, o material, e outras características, escolhe-se a técnica a adotar, assim como o processo de fabrico e tecnologia de impressão 3D [15]. Na Tabela 2, estão representadas resumidamente os processos e tecnologias correspondentes mais utilizados na impressão 3D [15, 16].

Tabela 2 - Resumo dos processos mais utilizados em impressão 3D.

Adaptada de [16].

PROCESSO	TECNOLOGIA		MATERIAIS
	Designação	Formato	
 Estereolitografia (SLA)	Fotopolimerização	Tina de Material (Líquido)	Resinas Poliméricas
 Sinterização Seletiva por Laser (SLS)	Fusão em camada de pó	Sinterização de Material (Pó)	Termoplásticos Metálicos
 Fabrico de Objetos por Laminados (LOM)	Construção por laminados	Folhas de Papel, Chapa	Papel Cera Metálicos
 Modelação por Multijactos de Material (MJM)	Jato	Jato de Material (Pulverizado)	Resinas Poliméricas Ceras
 Modelação por Extrusão e Deposição de Material (FDM) Fabrico por Fusão de Filamento Polimérico (FFF)	Extrusão	Filamento de Material (Sólido)	Termoplásticos

A estereolitografia (SLA - *stereolithography*) foi o primeiro processo de impressão 3D a ser desenvolvido, e a estrutura é construída usando resinas de cura por feixe ultravioleta (UV - *ultraviolet*). Este processo converte líquido fotossensível em plásticos sólidos 3D, camada a camada, que utiliza um laser de baixa potência e fotopolimerização [17]. A qualidade do acabamento superficial das peças impressas em SLA é maior em comparação com outros métodos de impressão 3D.

O processo de sinterização seletiva a laser (SLS - *selective laser sintering*) é uma tecnologia de impressão baseada em pó. Neste processo, um feixe de laser move-se ao longo de um caminho predeterminado e sinteriza o pó para construir o sólido 3D [18, 19]. Quando o feixe de laser atinge as partículas de pó, elas fundem-se pela transmissão de calor gerado pelo laser, e cada camada impressa é anexada à camada anterior pelo mesmo processo de fusão [20].

O processo de fabrico de objetos laminados (LOM - *laminated object manufacturing*), as folhas são cortadas com recurso a equipamentos de corte laser, ou mecânico, de acordo com a forma necessária. Aquando cada camada impressa fica concluída, a plataforma desce, pronta para a próxima camada. A impressora puxa uma nova folha de material pelo substrato, onde é colada por um rolo aquecido. Esse processo básico continua repetidamente até que a peça 3D seja concluída [21].

A modelagem por multijactos de material (MTM - *multi-jet modeling*) utiliza a deposição de gotículas através do cabeçote da impressora, em que, na maioria das vezes, essas gotículas são compostas por fotopolímeros com materiais secundários, como cera, usados para suportar estruturas durante o processo de fabrico. Seguidamente através da projeção de um feixe UV solidifica o material

fotopolímero para moldar as peças curadas. Na fase final é nivelado o material para criar uma boa superfície plana. Quando o sólido 3D estiver produzido, é necessário um processo de pós-construção para remover o material de suporte [22].

A modelagem de deposição fundida (FDM® - *fused deposition modeling*) ou Fabrico por Fusão de Filamento Polimérico (FFF - *Fused Filament Fabrication*) usa um bico aquecido para converter o filamento termoplástico em uma forma semi-fundida, que é extrudida para construir o sólido 3D através de deposição camada por camada [23].

CRESCIMENTO DA IMPRESSÃO 3D

As vantagens dos processos de AM têm suportado um crescimento maciço no mercado de impressão 3D na última década, na Figura 8 é representado graficamente a utilização da impressão 3D por tipo de tecnologia empregada nas empresas durante 2017 e 2018 [24].

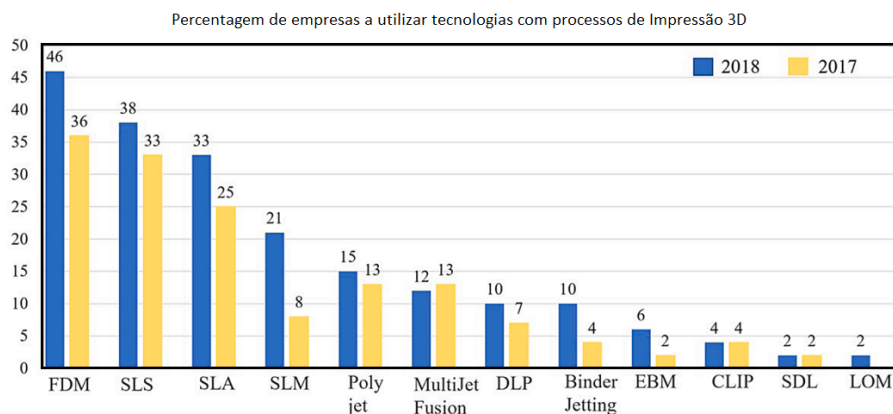


Figura 8 - Percentagem de empresas a utilizar impressão 3D entre 2017 e 2018.

Adaptado de [24].

Este crescimento da AM é consequência da comunidade científica também ela com um aumento exponencial de investigação com um número de publicações relacionadas à impressão 3D, representada na Figura 9, distribuídas entre as áreas de engenharia, ciência dos materiais, ciência da computação, e medicina, com um total de 78624 documentos entre 2010 a 2021 [25].

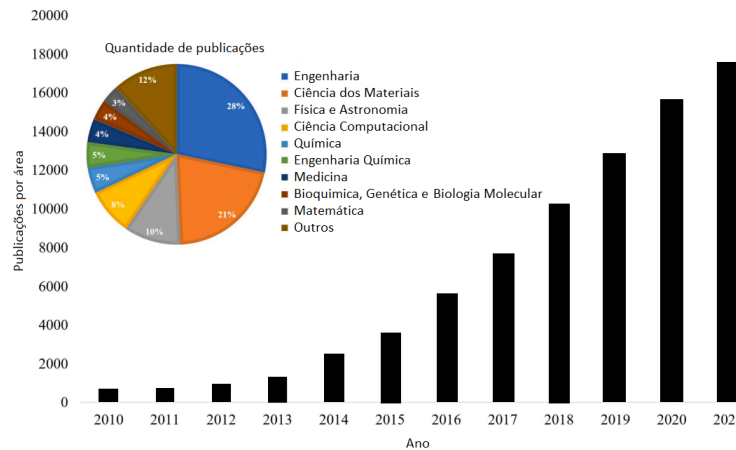


Figura 9 - Quantidade de publicações na base de dados Scopus entre 2010 e 2021 com as palavras-chave: "impressão 3D" ou "fabrico aditivo".

Adaptado de [25].

Como se pode verificar na Figura 8, o processo FDM[®] é o mais utilizado nas empresas. Este processo é explicado com maior detalhe no Capítulo 3 deste trabalho, e é o principal processo e técnica de impressão 3D aqui abordado. As razões prendem-se pelo método FDM[®] oferecer muitas vantagens, dando uma boa relação de custo-benefício, sendo por esses motivos que haja muita pesquisa científica com o FDM[®] de forma a estudar esse processo completamente.

À medida que o FDM[®] se afirma uma tecnologia de fabrico revolucionária, os requisitos de vários setores começam a aumentar e as procuras desses setores são também elas alvo de desenvolvimento para poder responder a essa procura.

EQUIPAMENTOS DE IMPRESSÃO 3D

Empresas de fabrico de impressoras como Stratasys[®], Ultimaker[®], Markforged[®], estão constantemente empenhadas em melhorar os seus equipamentos de impressão 3D, enquanto empresas de software como Autodesk[®], Siemens PLM[®], Dassault Systems[®] estão a desenvolver novos softwares CAD para serem compatíveis com novas impressoras. Mesmo após anos de desenvolvimento, ainda existem vários problemas relacionados à impressão 3D, como o acabamento final da impressão, até à garantia de qualidade e consistência no FDM[®] ou FFF, que são causados por defeitos ou imperfeições não detetados em amostras impressas [25].

2.2.4. Materiais usados na impressão 3D

A indústria tem recorrido ao processo de impressão 3D, com um maior número produtos à base de materiais poliméricos, como observado na Figura 10 [13].

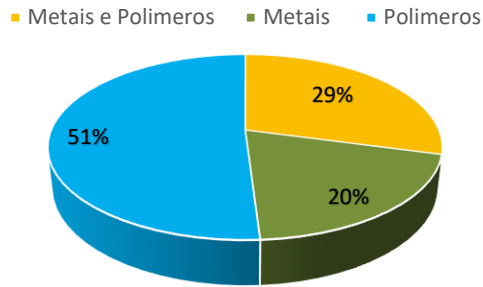


Figura 10 - Gráfico de materiais atualmente utilizados para produção por impressão 3D na indústria.
Adaptado de [13].

Como apresentado os polímeros possuem uma elevada percentagem de utilização para produtos fabricados por impressão 3D. Dentro deste grupo de materiais, são aplicados vários tipos de polímeros na impressão 3D sendo que no método FDM[®] são utilizados principalmente os termoplásticos.

As propriedades dos polímeros termoplásticos usados na impressão 3D são controladas pela estrutura molecular, peso molecular, e pelos aditivos. As propriedades aparentes podem ser ajustadas durante o processo de impressão, controlando a orientação e a densidade. A Tabela 3 fornece um resumo dos materiais mais usados na impressão 3D, obtidos dos fornecedores de máquinas indicados [26].

Tabela 3 - Tabela de Propriedades dos Materiais usados em Impressão 3D [26].

Fornecedor/Processo	Material	Densidade [g/cm ³]	Tensão de Ruptura [MPa]	Modulo de Young [GPa]	Alongamento até à ruptura [%]	HDT [°C a 0,45 MPa]
3D systems/SLA	Polypropylene-like, Visijet Flex	1,19	38	1,60	16	61
3D systems/SLA	ABS-like, Visijet Impact	1,18	48	2,60	14	47
3D systems/SLA	Polycarbonate-like, Visijet Clear	1,17	52	2,60	6	51
3D systems/SLA	High temp, VisijetHiTemp	1,23	66	3,40	6	130
EOS/SLS	General purpose nylon, PA2200	0,93	48	1,70	24	163
EOS/SLS	Biocompatible nylon, PA2221	0,93	44	1,60	10	157
EOS/SLS	Glass bead filled nylon, PA3200GF	1,22	51	3,20	9	166
EOS/SLS	Aluminum filled nylon, Alumide	1,36	48	3,80	4	169
EOS/SLS	Polyaryletherketone, PEEK HP3	1,32	90	4,20	2,8	165
Stratasys/FDM	ABS, M30	1,09	26	2,20	2	96
Stratasys/FDM	PC-ABS	1,11	28	1,70	5	110
Stratasys/FDM	PC	1,14	30	2,00	2,5	138
Stratasys/FDM	PPSF/PPSU	1,33	55	2,10	3	188

Stratasys/FDM	PEI, Ultem 9065	1,21	33	2,30	2.2	153
Stratasys/PolyJet	Tangoblack FLX973	1,14	2	0,10	50	45
Stratasys/PolyJet	Durus RGD430	1,16	25	1,00	40	40
Stratasys/PolyJet	Veroclear RGD810	1,18	50	2,20	10	45
Stratasys/PolyJet	DABS RGD5160	1,17	55	2,60	25	58
Stratasys/PolyJet	High Temp RGD525	1,18	70	3,20	10	63

Atualmente existe uma grande procura de Produtos Espaciais para aplicação em veículos de lançamento ou aeronaves [27].

A empresa *Stratysys, Inc.* é possuidora do registo do método FDM®, e tem desenvolvido fortemente o processo por forma a que possua características relevantes para componentes funcionais [28, 29, 30, 31]. Um dos materiais com elevado foco é o ULTEM®, obtido através de uma mistura termoplástica composta principalmente por polieterimida (PEI) e policarbonato (PC) [29, 30]. Um dos materiais primários que está a ser utilizado fortemente é o ULTEM® 9085, devido às suas propriedades mecânicas que oferecem capacidades de obter produtos alta resistência, excelente resistência química, e garantem também uma estabilidade a altas temperaturas [31, 32, 33, 34, 35].

2.3. Conformação de chapa

A transformação de materiais metálicos tem classificado o seu processo de fabrico de acordo com a norma DIN 8584, com uma divisão de seis grupos [36]:

- Fundição;
- Arranque de apara;
- União;
- Tratamento térmico;
- Tratamento de superfície;
- Conformação.

Este trabalho baseia-se num estudo da conformação de chapa metálica em ligas de alumínio, com utilização de elastómeros de suporte à conformação.

Na prática a conformação é o processo tecnológico com base na função de deformação, sendo este termo técnico utilizado para descrever a capacidade que um material tem em se deformar plasticamente para atingir uma determinada forma sem que atinga a sua rotura. Na tabela 4 são apresentados os fatores que influenciam a função de conformação que envolve as propriedades dos materiais utilizados no processo, os parâmetros do processo e critérios de limite ou tipo de defeitos que surgem após processamento [37].

Tabela 4 - Variáveis da conformação em regime plástico.

Adaptada de [37].

Conformação	Propriedades do material	Mecânicas (ϵ , E , σ , n , r_m , m)
		Metalúrgicas (microestrutura, vazios, inclusões)
		Químicas (composição atômica)
	Parâmetros do processo	Estado de tensão
		Taxa de deformação
		Temperatura
		Geometria
		Lubrificação
	Critérios de limite	Rotura
		Retorno elástico
		Rugas
	Deformação localizada	

Sendo:

ϵ – Extensão [mm/mm]

E – Módulo de Young [MPa]

σ – Tensão [MPa]

n – Coeficiente de encruamento

r_m – Coeficiente de anisotropia

m – Fator de atrito

2.3.1. Teoria da plasticidade

Quando corpos sólidos estão sujeitos a solicitações exteriores, podem sofrer dois tipos de deformações, a deformação elástica e a deformação plástica.

O domínio elástico do material num corpo solido é caracterizado pela recuperação da sua forma original quando terminam as solicitações exteriores impostas sobre ele, anulando a deformação causada.

O domínio plástico do material num corpo sólido é caraterizado pelas deformações das quais o corpo não vai conseguir recuperar a sua forma original.

Quando estamos presentes de conformação de chapa e de forma a analisar-se a capacidade de deformação, recorre-se a vários métodos de caracterização de chapa laminada, sendo de maior utilização, os ensaios de tração.

CURVA TENSÃO-EXTENSÃO

Conhecer as propriedades mecânicas dos materiais é de facto uma tarefa importante no desenvolvimento de um projeto de engenharia, no desenvolvimento de um novo produto.

Os ensaios de tração são realizados em provetes, formato típico o apresentado na Figura 11, e têm grande importância, uma vez que permitem a obtenção de um elevado número de propriedades mecânicas, bem como na confirmação de que o material físico corresponde aos valores teóricos do produtor e/ou para aplicação no projeto.



Figura 11 - Representação de provete típico para ensaio de tensão uniaxial.

Em materiais metálicos é possível extrair do gráfico de tensão - extensão (Figura 12), o detalhe necessário para descrever as diferentes fases do material quando sujeito a esforços de natureza mecânica, isso quer dizer que essas fases determinam a maior ou menor capacidade que o material tem para transmitir ou resistir aos esforços que lhe são aplicados [38]

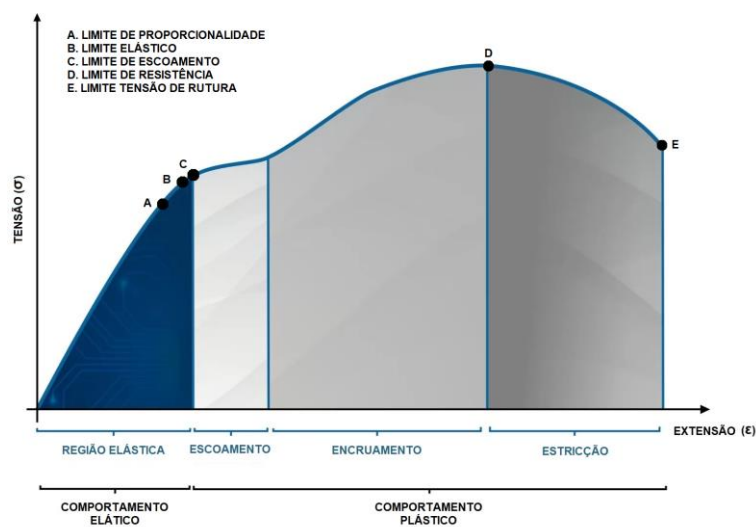


Figura 12 - Representação esquemática do gráfico curva tensão-extensão convencional de materiais metálicos.

Adaptado de [38].

Cada um dos segmentos do gráfico tensão extensão, tem um significado físico e prático, e para cada um deles será descrito de seguida, no âmbito da conformação plástica de metal [39, 40].

- **Região elástica:** nesta região o material é considerado como sob efeito de retorno elástico, isto é, sempre que aplicada uma força que não exceda a tensão de limite elástico, é induzida uma extensão elástica. A remoção desta força provoca o retorno dos átomos à sua posição original, levando para nulas as tensões e extensões. As tensões internas que permanecem após a operação de deformação são tensões residuais do esforço aplicado. Também nesta região é localizado o limite de proporcionalidade, ao qual corresponde o ponto em que deixa de existir uma linearidade entre a tensão e extensão. A relação entre a tensão e extensão é expressa através de (2.1), conhecida como a Lei de *Hooke*.

$$\sigma = E \varepsilon \quad (2.1)$$

Sendo:

σ – Tensão [MPa]

E – Módulo de Young [MPa]

ε – Extensão [mm/mm]

A magnitude do Módulo de Young, para muitos metais típicos, varia entre 45 GPa e 407 GPa, no caso do magnésio e o tungstênio respetivamente. No caso de ligas de alumínio apresenta uma magnitude de 69 GPa para a liga 1100 e 72,4 GPa para a liga 2024. Graficamente, representado na Figura 13, corresponde ao declive da reta tangente à curva tensão-extensão no ponto de limite de proporcionalidade, e pode ser expresso de acordo com (2.2) :

$$E = \frac{\sigma_{lp}}{\varepsilon_{lp}} \quad (2.2)$$

Sendo:

E – Módulo de Young [GPa]

σ_{lp} – Tensão no ponto limite de proporcionalidade [MPa]

ε_{lp} – Extensão no ponto limite de proporcionalidade [mm/mm]

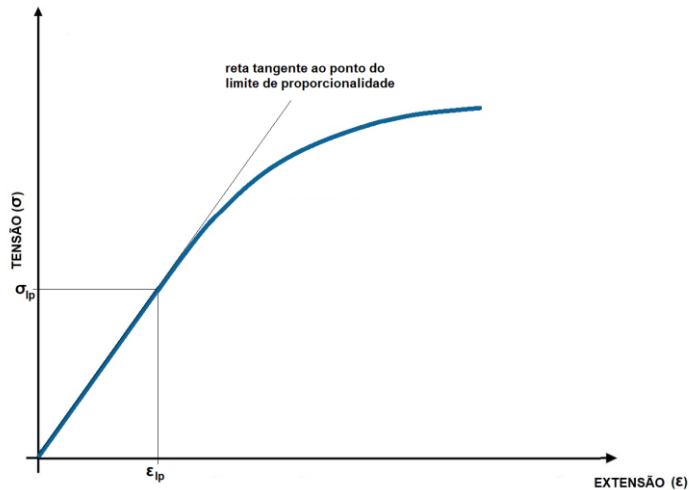


Figura 13 - Representação esquemática do módulo de Young em gráfico de tensão-extensão.

Adaptado de [38].

- **Escoamento:** após se ter atingido o limite elástico, isto é, depois do material passar a tensão de limite de elasticidade, inicia-se a deformação plástica. Esta transição ocorre de um modo gradual e instável, verificando-se um aumento da extensão sem que o valor da tensão aumente de um modo proporcional. Pode-se considerar que estamos na transição elástico – plástica do material, resultando numa súbita descida da tensão, dando origem à tensão de escoamento. Os aços de elevado limite elástico não apresentam esta fase transitória sendo que entram da região elástica para a plástica denominada de encruamento.
- **Encruamento:** a tensão aumenta com o aumento da extensão, até ao ponto de estricção denominado de limite de resistência. A partir deste ponto, continua o crescimento da extensão, sem que exista um aumento de tensão até ao ponto de limite de tensão de rotura. Durante toda a fase de comportamento plástico dá-se um dos mais importantes mecanismos da deformação plástica, o encruamento, sendo este um dos principais parâmetros de análise dos metais usados na conformação plástica.

Conforme apresentado na Figura 14, a curva convencional tensão-extensão é na realidade diferente quando ensaiado o material, isto resulta porque a secção retangular do provete quando atingido o ponto de limite de resistência, inicia uma diminuição muito significativa da secção ao entrar na região de estricção, e o cálculo convencional é considerando que não existe essa diminuição de secção transversal, portanto resulta numa queda repentina da tensão. Por sua vez, a realidade, é que ao ser considerada a variação da área da secção transversal o comportamento de tensão-extensão apresenta um resultado diferente assim como uma curvatura gráfica distinta. Em alguns casos de estudo de engenharia é necessário utilizar um esquema fundamentado em tensão-extensão real, sendo esta definida segundo (2.3).

$$\sigma_r = \frac{F}{A_i} \quad (2.3)$$

Sendo:

σ_r - Tensão real [MPa]

F - Carga exercida [N]

A_i - Área da seção reta transversal instantânea [mm²]

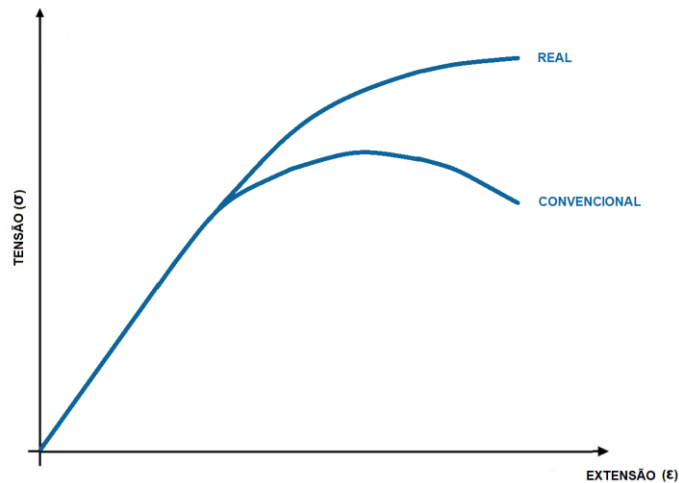


Figura 14 - Representação esquemática do gráfico curva tensão-extensão convencional e real.

Adaptado de [41].

Existem ainda modelos matemáticos para descrever a zona de comportamento plástico da curva tensão-extensão. De seguida são descritos os mais usados.

Modelo de Ludwick:

Este foi um primeiro modelo proposto por *Ludwick*, que por (2.4) descreve a zona de comportamento plástico, até ao ponto da tensão de rotura [40].

$$\sigma_r = \sigma_0 + K \cdot \epsilon_p^n \quad (2.4)$$

Sendo:

σ_r - Tensão real [MPa]

σ_0 - Tensão inicial [MPa]

ϵ_p - Extensão plástica [mm/mm]

K - Coeficiente de resistência ou módulo plástico [MPa]

n - Coeficiente de encruamento do material

Modelo de *Swift*:

O modelo de *Swift* tem em conta a pré-deformação para descrever a lei de endurecimento do material, assumindo (2.5) no seu modelo [40].

$$\sigma_r = K (\varepsilon_0 + \varepsilon_p)^n \quad (2.5)$$

Sendo:

σ_0 - Tensão inicial [MPa]

σ_r - Tensão real [MPa]

ε_0 - Pré-deformação [mm/mm]

ε_p - Extensão plástica [mm/mm]

K - Coeficiente de resistência ou módulo plástico [MPa]

n - Coeficiente de encruamento do material

O coeficiente de encruamento varia entre o valor de zero e um, sendo $n = 0$ para um sólido perfeitamente plástico ou $n = 1$ para um sólido perfeitamente elástico. Segundo os autores [40] o modelo de *Swift* proporciona um resultado de maior precisão para alongamentos maiores, comparativamente com a equação *Ludwig*.

- **Estricção:** Quando o carregamento atinge o ponto de carga máximo, inicia-se a estricção e surgimento de um estado triaxial de tensões do provete. Posteriormente, o valor da tensão aplicada supera o fenómeno de estricção, atingindo de seguida, a rotura.

CRITÉRIOS DE PLASTICIDADE

Um corpo sólido quando deformado pela aplicação de um carregamento externo, tem tendência a armazenar energia internamente em todo o seu volume.

Essa energia origina tensões e deformações e varia de acordo com o material que se está a utilizar, que pode ser um material frágil (exemplo, a porcelana, ou vidro) ou um material dúctil (exemplo, o aço, cobre, alumínio) e que por sua vez têm limites mecânicos geralmente conhecidos por um provete submetido a um ensaio uniaxial de tração.

O estabelecimento de relações entre as tensões, que permite saber as condições em que o material sai do domínio elástico e entra no domínio plástico, ou seja, quando ultrapassa o limite de elasticidade, independentemente do estado de tensão a que o sólido está sujeito, são caracterizadas pelos critérios de plasticidade [42].

No estudo do comportamento de sólidos em materiais metálicos, os critérios de plasticidade mais aplicados são os de *Tresca* e *Von Mises* [44, 45].

- *Tresca* admite que a deformação plástica se inicia quando a tensão de corte máxima (τ_{max}) igualar o valor de tensão de corte máxima (τ_y) resultante do ensaio de tração realizado a um provete com o mesmo material.

A tensão de corte máxima num provete quando sujeito a um ensaio de tração é dada por (2.6):

$$\tau_y = \frac{\sigma_c}{2} \quad (2.6)$$

Em que σ_c é a tensão de cedência.

Para o estado plano de tensão, no caso das tensões principais serem ambas negativas ou ambas positivas, a tensão de corte máxima segundo o critério de *Tresca* é dada por (2.7).

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{\sigma_{m\acute{a}x}}{2} \quad (2.7)$$

No caso das tensões principais tiverem sinais opostos, a tensão de corte máxima segundo o critério de *Tresca*, é dada por (2.8):

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (2.8)$$

Em que σ_1 e σ_3 são as tensões principais.

Segundo o critério de *Tresca* resulta que a tensão equivalente é dada por (2.9):

$$\sigma_{eq} = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (2.9)$$

- *Von Mises*, que avalia a máxima energia de distorção de um dado elemento, ou seja, a energia associada a mudanças na forma desse elemento [58], admite que a deformação plástica se inicia quando a energia elástica de distorção atinge um valor crítico. Este critério pode ser expresso de uma forma simples, em termos de tensões, designando que a deformação plástica do material ocorre quando uma tensão equivalente igualar a tensão de cedência (σ_c) resultante do ensaio de tração realizado a um provete com o mesmo material.

Segundo o critério de *von Mises* resulta que a tensão equivalente, caracterizado pelas tensões principais, σ_i ($i=1,2,3$), é dada por (2.10):

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (2.10)$$

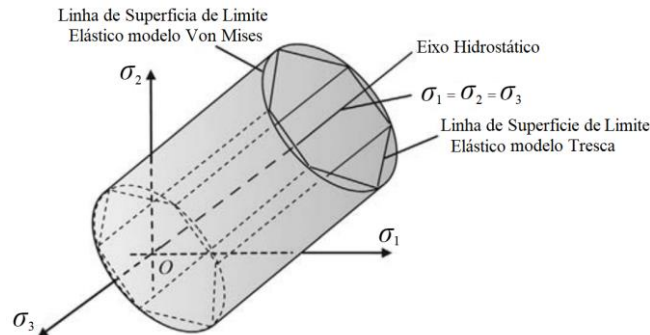


Figura 15 - Representação gráfica das superfícies limite elástica segundo critérios de *Tresca* e *Von Mises* de um material isotópico. Adaptado de [46].

CURVA LIMITE DE CONFORMAÇÃO

A Curva Limite de Conformação (CLC) é o critério mais usado para avaliação da capacidade de deformação dos materiais metálicos. A CLC mostra a quantidade de deformação que um material pode resistir em função do modo de deformação, sendo a relação da deformação maior com a deformação menor. Para identificar se uma peça pode ser conformada, sem existência de falhas, é utilizada a CLC, que indica quais as deformações possíveis durante o processo de estampagem. O principal motivo de utilizar a CLC é que no processo de estampagem existem tensões de corte até estados de tração biaxial. Pela análise das deformações numa região da peça, é possível determinar se irá ocorrer falha do material [47]. Através do Diagrama de Limite de Confirmação, Figura 16, que apresentada a CLC de um determinado material [48].

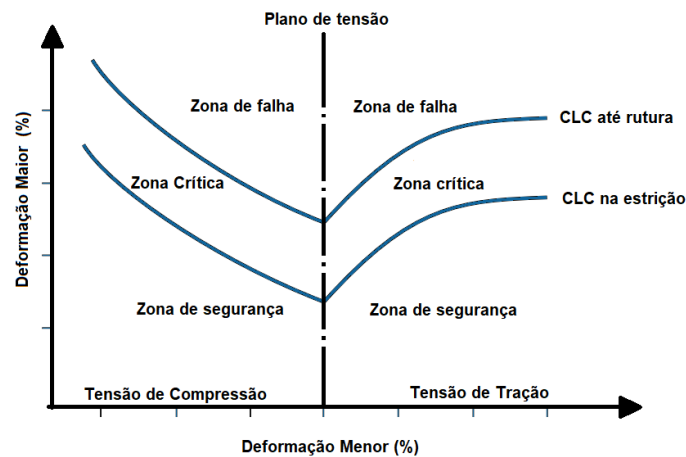


Figura 16 - Representação da CLC através do Diagrama de Limite de Conformação. Adaptado de [48].

2.3.2. Estampagem de chapa

A conformação de chapa é uma das principais técnicas de fabrico que possibilita produzir em elevada cadência de produção, com boas características mecânicas finais das peças, e com precisão dimensional. É vulgarmente utilizado na indústria automóvel e aeronáutica para peças estruturais.

Os processos de conformação podem dividir-se segundo o principal estado de tensão que estão sujeitos, isto é, de acordo com o sentido de direção das forças aplicadas, que podem ser de compressão, de tração, ou ambos.

O processo de conformação plástica está dependente de variáveis associadas à sua transformação, na Tabela 5 são apresentadas as principais variáveis consideradas [49], ao qual se pode afirmar que para fabrico de um produto e conseguir a deformação plástica imposta à chapa, utiliza-se uma ferramenta específica, montada em prensa mecânica ou hidráulica [50].

Tabela 5 - Variáveis da conformação em regime plástico.

Adaptada de [49].

Operação (Quinagem, Corte, Estampagem, etc)	Produto	Geometria	Tolerâncias
			Acabamento / aspeto
		Função	Estrutural
	Segurança		
	Funcional		
	Material	Aço	Convencional
			Especiais
			Avançados
		Outras Ligas	Alumínio
			Cobre
			Latão
	Equipamento	Prensa	Cadência
			Força
			Flexibilidade
		Ferramenta	Método
Tribologia			
Materiais			
Tratamentos			
Temperatura			

O processo de estampagem constitui a técnica de fabrico por conformação plástica capaz de realizar uma variedade de peças de diferentes complexidades. O processo requer três elementos fundamentais para a sua produção, uma matriz, um aperta-chapas e um punção. Pode ser realizado a diferentes temperaturas conforme a solicitação da peça a produzir [51].

O sucesso da operação depende de fatores como [52]:

- Forma da Peça;
- Dimensão da Chapa;
- Forma e dimensão da Ferramenta;
- Características da Prensa;
- Condições de atrito entre Ferramenta e Chapa.

As operações de estampagem mais usuais são normalmente constituídas por 4 fases de execução.

- Fase 1: inicia-se com a colocação de uma chapa metálica plana, previamente cortada, sobre a matriz.
- Fase 2: segue a colocação do aperta-chapas, que através de uma força aplicada exerce o bloqueio da própria chapa.
- Fase 3: posteriormente inicia-se a descida do punção que através da aplicação de uma força provocará a deformação da chapa até atingir a forma final da chapa.
- Fase 4: por fim, o punção procede à subida para libertar o aperta-chapas e permitir extrair a peça da ferramenta [53, 54].

Na Figura 17 pode-se ver esquematicamente o processo de estampagem de chapa metálica, para as diferentes fases anteriormente referidas, tendo em conta os principais elementos que o caracterizam [55], nomeadamente:

- Matriz;
- Aperta-Chapa;
- Chapa;
- Punção.

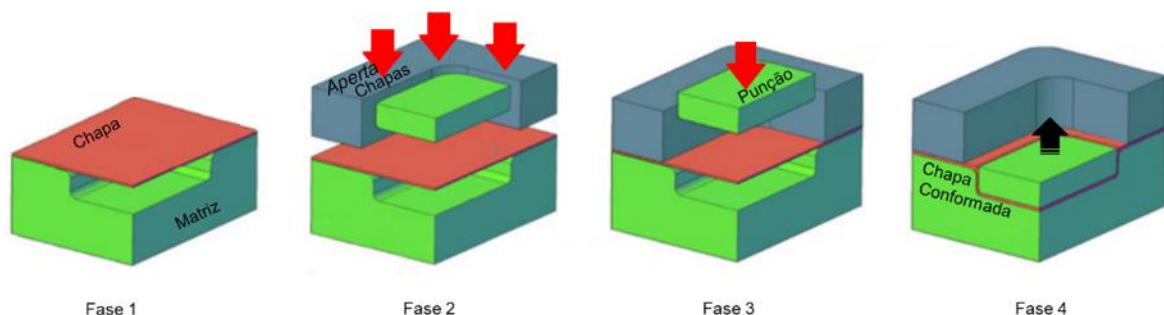


Figura 17 - Esquemática da ferramenta de estampagem nas diferentes fases.

Adaptado de [55].

PARÂMETROS DO PROCESSO

Com base neste processo de estampagem, Yi Qin et *al.* [57] menciona a dobra como sendo um processo principal de formação de chapas comumente utilizado na fabricação de peças em chapas metálicas. Os autores definem a flexão como a deformação do metal em torno de um eixo reto em que existe um plano neutro para a chapa metálica em torno do qual a seção superior do material pode ser esticada durante a dobra enquanto a seção inferior é comprimida, tal como representado na Figura 18. As operações de dobra podem ser realizadas com punções, rolos, matrizes, o movimento descendente das ferramentas de dobra, dependendo dos processos, como dobra em V, em U, ou L. [57].

Os parâmetros chave neste processo são:

- O ângulo de quinagem;
- Raio de quinagem;
- Largura de quinagem;
- Espessura da chapa;

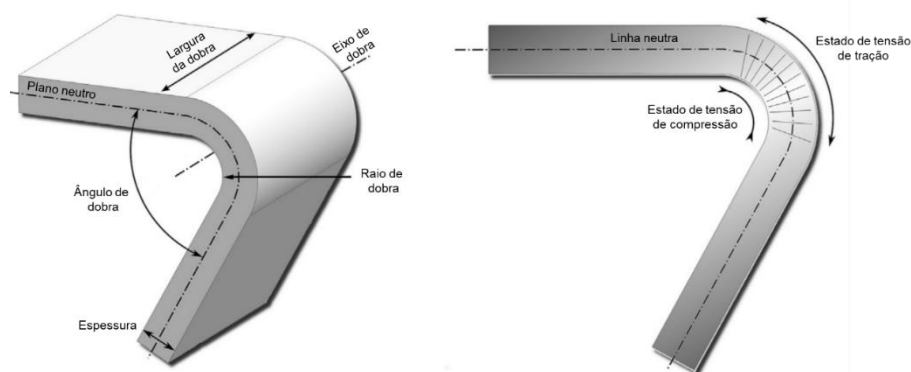


Figura 18 - Ilustração de processo de dobra de chapa metálica e parâmetros.

Adaptado de [57].

TÉCNICA DE RUBBER FORMING

A conformação de metais ou ligas metálicas, através de prensagem com borracha, denominado de técnica *rubber forming*, é um processo principalmente utilizado na área da aeronáutica como pioneira da implementação deste processo, portanto pode ser visto como um processo apropriado para produção de pequenas séries [58].

Este processo caracteriza-se pela flexibilidade de fabrico de peças com geometrias complexas substituindo um processo convencional de conformação manual que necessitaria de várias fases de produção até chegar à geometria final de um determinado produto [59].

Esta técnica requer apenas uma metade rígida da ferramenta, que é a parte necessária para dar forma à chapa a conformar, sendo que a chapa é pressionada através do contacto de um diafragma de borracha que é apoiado pela pressão de óleo que provoca uma deslocação do topo da mesa da prensa, como sendo a outra metade da ferramenta. O diafragma de borracha é aplicado no sentido de este distribuir uma pressão homogénea em toda a superfície da chapa na zona de conformação, à medida que é pressionada ao redor da parte de ferramenta de forma [60].

Também a dispensabilidade de alinhamento e folgas entre matriz e punção, é referida como uma vantagem deste processo dado que o tempo de preparação é significativamente reduzido, assim como a o mesmo do diafragma pode ser reutilizado para formar diferentes geometrias de peças. Mais uma vantagem que é considerada está relacionada com a não necessidade de lubrificação, dado que não existe contacto tão agressivo entre os diferentes materiais, o que também origina um melhor acabamento na peça final [60, 62, 63].

Na Figura 19 e Figura 20 demonstra-se como é constituído o conjunto de ferramenta tipo de um processo *rubber forming* e o resultado do produto produzido com base de materiais metálicos [63].

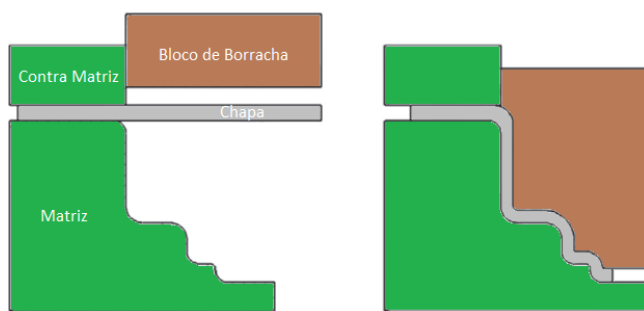


Figura 19 - Esquematização da ferramenta em *rubber forming*.
Adaptado de [63]



Figura 20 - Exemplo de produto produzido em *rubber forming*.

A borracha de poliuretano tem propriedades significativas para o *rubber forming*. Segundo Thirumarudchelvan [61] considerou que os uretanos são considerados o melhor material para ferramentas de moldagem flexível tipo usado neste processo. Concluiu que os uretanos apresentam boa resistência ao desgaste, alta estabilidade térmica e capacidade de carga

Mahmut Tandogan, *et al.* [62] analisaram o comportamento da estampagem de chapa metálica quando sujeita à compressão de borracha poliuretano com rigidez 60A e 80A considerando o módulo de Young da Tabela 6, e quando sujeita ao processo de matriz e punção convencional, em conformação de geometria de baixa complexidade no material liga de alumínio 1100 com espessura de 0,5 mm.

Tabela 6 - Propriedades mecânicas do poliuretano 60A e 80A.

Adaptada de [62].

Tipo	Módulo de Young E [MPa]	Coefficiente de Poisson ν
60A	11	0,4997
80A	20	0,4995

Os autores realizaram também um estudo em que é analisada a resistência à compressão dos dois poliuretanos tendo em atenção uma relação de fator de forma, em (2.11), correspondente à razão entre a superfície sob carga e a superfície total, sendo os seguintes dados do provete a ter em conta: espessura e , diâmetro d .

$$\text{Fator de Forma} = \frac{d}{4e} \quad (2.11)$$

Os provetes foram submetidos a ensaios de compressão-extensão, segundo autores respeitando a norma ASTM D3574, e tendo em conta o fator forma, os resultados das curvas de tensão - extensão quando os provetes estão sujeitos à compressão, estão representados na Figura 21 para o poliuretano 60A e Figura 22 para o poliuretano 80A.

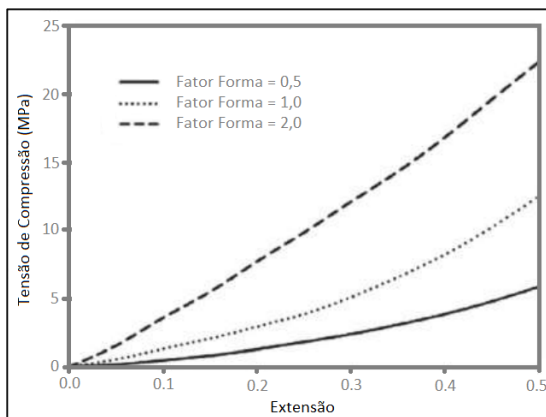


Figura 21 - Curva Tensão-Extensão do poliuretano 60A com diferentes fatores forma [62].

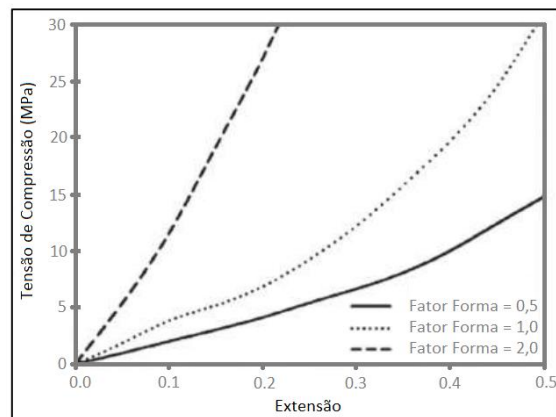


Figura 22 - Curva Tensão-Extensão do poliuretano 80A com diferentes fatores forma [62].

Muamar Benisa *et al.* [64] analisaram a geometria na estampagem de chapa metálica quando sujeita à compressão de borracha poliuretano com rigidez HD70 considerando o módulo de Young da Tabela 7, em conformação de geometria de baixa complexidade no material liga de alumínio 2024-T3 com espessura de 0,6 mm.

Tabela 7 - Propriedades mecânicas do poliuretano HD70.

Adaptada de [64].

Tipo	Módulo de Young E [MPa]	Coefficiente de Poisson ν
HD70	17	0,4999

Os autores elaboraram um ensaio em prensa hidráulica do fabricante *REXROTH*[®], sendo utilizada uma capacidade máxima de 160 toneladas no processo de *rubber forming*. Consideraram ainda que o processo é dividido em três etapas:

- **Primeira fase:** representa a auto deformação do diafragma (parte flexível da ferramenta);
- **Segunda fase:** neste estágio é efetuada a deformação da chapa, sob pressão da borracha do diafragma quando atinge o fundo da matriz rígida de forma;
- **Terceira fase:** a chapa preenche todas as cavidades da matriz até que estejam completamente preenchidas.

Na Figura 23 é representado esquematicamente o conjunto ferramenta, mesa de apoio da ferramenta, chapa, e almofada de borracha que está incorporada à prensa de estampagem por *rubber forming*.

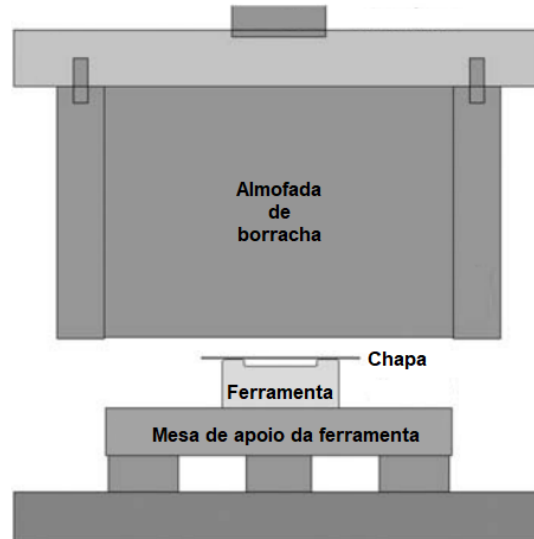


Figura 23 - Esquemática do processo de *rubber forming*.

Adaptado de [64].

Com base nos diferentes estudos dos autores referenciados, pode-se dizer que a dureza da borracha do diafragma pode influenciar o resultado da peça, podendo esta ser vista como uma característica ao nível de durabilidade da borracha pois borrachas mais elásticas podem ter menor durabilidade, dependendo da geometria da peça, ao nível de eliminação de ondulações que possam surgir na peça

metálica após o processo de fabrico, e ao nível de distribuição de tensões nas zonas de deformação.

De acordo com o tipo de produto, dimensão da peça a conformar, é necessário idealizar a prensa a utilizar, sendo que existem no mercado prensas hidráulicas até 11000 toneladas, que podem ser utilizadas para produção de várias peças em distintas ferramentas num ciclo único.

PRENSAS HIDRÁULICAS PARA *RUBBER FORMING*

Estes equipamentos têm os seus movimentos feitos através de pressão de óleo, que provoca o movimento do eixo de atuação, sendo que é desta forma transmitida a força transmitir como todos os esforços na ferramenta com o objetivo da produção do componente conformado [67].

Estas prensas são muito importantes no processo de conformação, o ajuste de parâmetros é indispensável para a correta deformação plástica pretendida dar à chapa a conformar. Esses parâmetros são indicados como sendo os primeiros a controlar, pois constituem uma variável de todo o sistema [68], sendo eles:

- A velocidade que associa à cadencia da máquina;
- A posição do carro;
- A força aplicada.

Segundo a vários autores [69, 70, 71], a técnica de *rubber forming* utiliza a prensa hidráulica (Figura 24) para execução do processo de estampagem, pelo facto de proporcionam maior versatilidade na variação do curso e da pressão de fecho. Estas prensas, são usadas principalmente em operações de estampagem profunda, onde existem maiores deslocamentos e extensão de material.

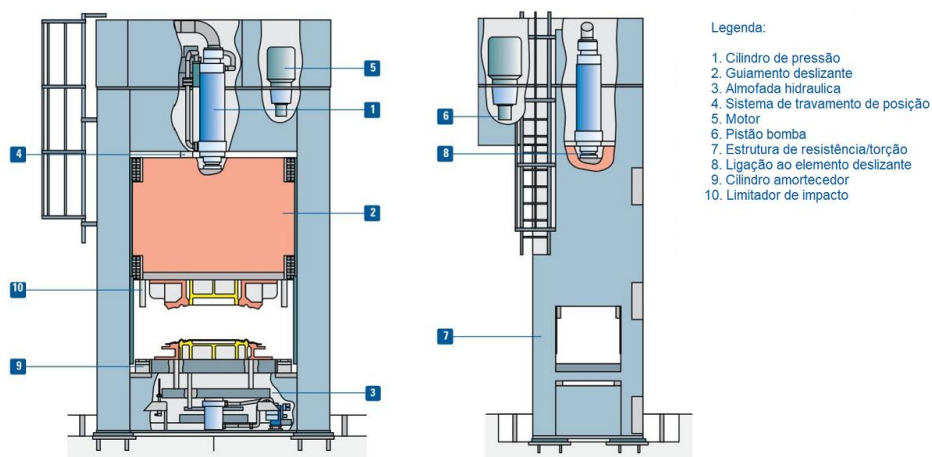


Figura 24 - Esquemática de prensa hidráulica 4000 kN.

Adaptado de Schuler AG [72].

Em prensas hidráulicas a força exercida no guiamento deslizante que atuará sobre a peça, depende do trabalho a ser executado, a pressão irá aumentado conforme a solicitação de maior carga. A carga exercida máxima pode ser limitada, se pretendido, através da regulação de uma válvula de alívio.

Em resumo, as principais características da prensa hidráulica:

- Curso variável;
- Posição e movimento controlado ao longo de todo o curso;
- Velocidade controlada, normalmente aproximação rápida, estampagem lenta, retorno à posição rápida);
- Capacidade máxima da prensa em qualquer ponto do curso.

2.3.3. Retorno elástico do material

Devido a sua complexidade, o processo de estampagem traz também alguns defeitos associados. Estes defeitos provocam aspetos alterados em relação a forma ou dimensionamento, deformação na superfície do material, propriedades não satisfatórias. Exemplos destes defeitos são o aparecimento de ondulações ou fissuras, e o retorno elástico [55].

As causas mais ocorrentes de defeitos nas peças provocadas por processo de estampagem são um deficiente projeto da peça, i.e., incorreta escolha do material ou desenho não adequado.

O fenómeno de retorno elástico do material surge após o processo de estampagem (aplicação de carga sobre o material) e separação do contacto dos elementos da ferramenta (alívio de carga), sendo a chapa vai recuperar a componente elástica, tal como ilustrado na Figura 25.

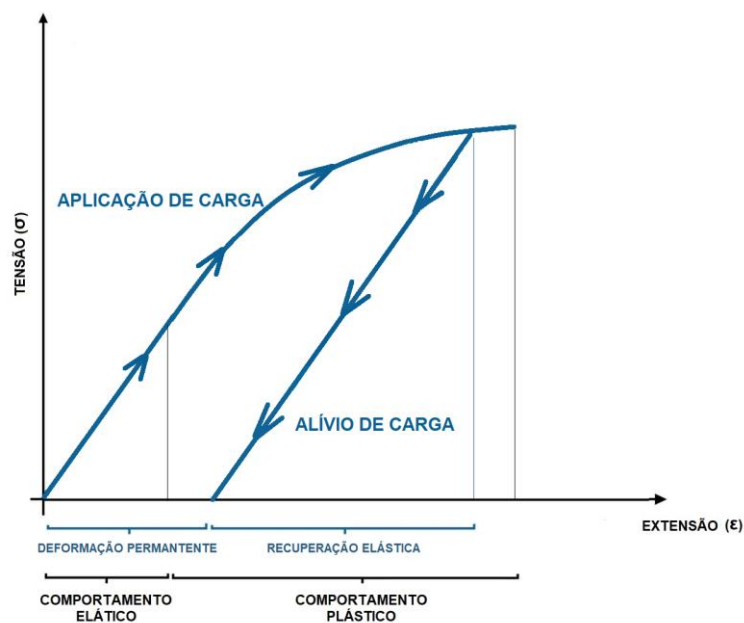


Figura 25 - Esquemática gráica tensão-extensão de retorno elástico

Adaptado de [38].

O retorno elástico depende da resistência mecânica do material, do raio de dobra e da espessura do material. Quanto maior a possibilidade de encruamento de um determinado material maior será a sua recuperação elástica. Este facto é relativamente importante na qualidade geométrica da peça final que queremos obter, pois, uma dimensão fora de parâmetros de tolerância admissível poderá levar ao erro de montagem da peça estampada no subconjunto que se pretende obter [73, 74].

A deformação plástica que ocorre na operação de estampagem provoca uma distribuição desigual das tensões ao longo da secção transversal da peça conformada, e esta condição provoca o retorno elástico do material. Encontram-se implícitos a este fenómeno fatores como as propriedades mecânicas do material, o atrito reduzido entre ferramenta e chapa, assim como a geometria da ferramenta em raio de curvatura adequado na matriz que permita um fluxo suave do material [75, 76].

No caso de estampagem, o tamanho do grão relativo à espessura da chapa metálica, distribuição do grão, condições de contorno de grão, na respetiva seção de dobra da zona conformada, terão influências significativas no processo de dobra e qualidade de dobra. Para Yi Qin et al. [57] não existe uma definição universal em termos do nível dessas influências, mas dos principais temas desafiadores na dobra de chapas finas é evitar o empeno da chapa e superar os problemas relacionados com o retorno elástico, ilustrado em Figura 26.

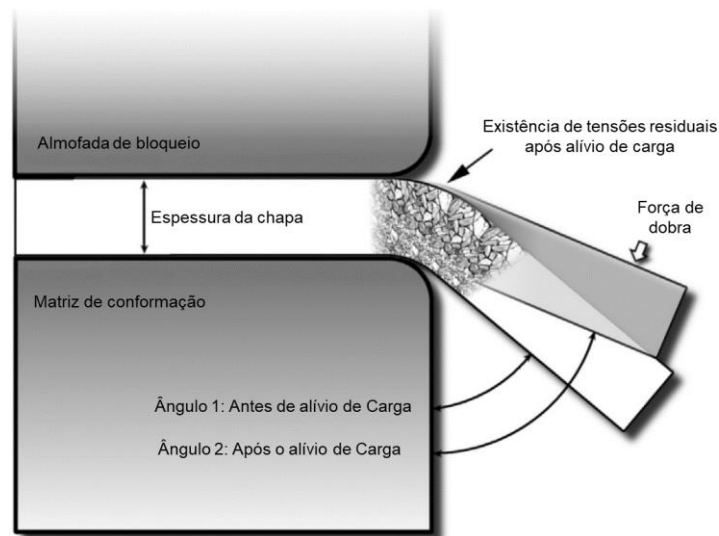


Figura 26 - Ilustração do fenómeno de Retorno Elástico em dobra de chapa metálica.

Adaptado de [57].

MÉTODOS DE PREVISÃO DO RETORNO ELÁSTICO

Para resolver e antecipar problemas que ocorram devido ao retorno elástico, existem formas de previsão de qual o comportamento esperado no processo. Dos quais, tabelas empíricas utilizadas na

indústria com base no conhecimento e experiência obtida na prática, matematicamente através do cálculo analítico, assim como através métodos de análise de engenharia, ao qual se consegue identificar qual será o resultado prático do retorno elástico e tomar medidas no âmbito de projeto de ferramenta para compensar este efeito [77].

Tal como referido por Sala G [78], que propôs uma abordagem numérica e experimental para otimizar a estampagem de ligas de alumínio por *rubber forming*, também para esta dissertação tem em consideração esta metodologia, dado o processo de estampagem aplicado e dado que se utiliza no estudo a chapa de alumínio com baixa espessura.

Método empírico por tabelas:

Definir os corretos parâmetros de processo e geometria de ferramenta adequados de forma a diminuir ou eliminar o retorno elástico pode tornar-se uma tarefa demorada e economicamente de custo maior, pelo que algumas empresas utilizam procedimentos empíricos de tentativa e erro, e de resultados obtidos com a experiência para definir os seus parâmetros de ferramenta. Existem tabelas, como o exemplo da Tabela 8, com dados empíricos que permitem prever a recuperação elástica da operação.

Tabela 8 - Ângulo de retorno elástico empírico para dobra de 90°.

Adaptada da empresa LAUAK.

Raio de Dobra [mm]	Espessura da Chapa [mm]	Tratamento	Dimensão da Aba conformada [mm]					
			6	8	10	12	16	20
2	0,6	W	6°	5°30	5°30	5°	4°30	4°30
		T3	8°	8°	8°	8°	7°30	7°30
		O	-	-	-	-	-	-
2	0,8	W	5°30	5°	5°	5°	4°30	4°30
		T3	8°	8°	8°	7°30	7°30	7°30
		O	2°30	2°30	2°30	2°30	2°30	2°30
2,5	1	W	5°30	5°30	5°	5°	5°	5°
		T3	8°	8°	8°	7°30	7°30	7°30
		O	2°30	2°30	2°30	2°30	2°30	2°30
3	1,2	W	6°	5°30	5°	5°	5°	5°
		T3	-	8°	8°	7°30	7°30	7°30
		O	3°	3°	3°	3°	3°	3°
3,5	1,4	W	-	6°	5°30	5°30	5°	5°
		T3	-	8°	8°	7°30	7°30	7°30
		O	-	3°	3°	3°	3°	3°

Método matemático de cálculo analítico:

Através de métodos matemáticos, a recuperação elástica analítica, para um ângulo de dobra 90°, pode ser calculada através (2.12), em que as variáveis em causa são, raio de curvatura da matriz (r), espessura da chapa (e), ângulo de dobra da chapa (θ), e fator-k que é uma relação entre a distância de linha neutra à superfície interna da chapa e a espessura da chapa [79].

O valor do fator-k considerado é de 0,33 tendo sido em ponderado pela “regra geral” em materiais de alumínio leves [80].

$$\text{Recuperação Elástica} = 2 (r + e) - \theta \left(\frac{\pi}{180^\circ} \right) (r + k \cdot e) \quad (2.12)$$

Método dos elementos finitos por simulação numérica computacional:

A análise pelo método de elementos finitos (MEF) possibilita uma variada análise em processos de deformação plástica, dado que permite o estudo de quaisquer casos independentemente das características da chapa a conformar, da geometria da ferramenta, e das condições de atrito entre ambas. É um método numérico que permite resolver equações diferenciais em que o domínio é dividido em elementos, permitindo resolver problemas de análise muito complexa por outros métodos, e assim obter-se a distribuição de tensões, extensões, variação de volume e variação de temperatura à medida que a deformação se processa.

Atualmente o MEF é utilizado em forma de algoritmo através de programas computacionais que resolvem de forma mais rápida e eficiente o problema em estudo. Estes são referenciados como programas de Simulação Numérica [81].

PROGRAMAS COMERCIAIS PARA SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO PROCESSO DE CONFORMAÇÃO

Existe um interesse evidente na indústria por esta ferramenta dado que permite conhecer o comportamento da conformação e da deformação dos materiais, garantindo uma validação virtual do resultado final. A correta definição das condições e parâmetros do processo que se utilizam na simulação, dita a precisão dos resultados obtidos na simulação [82, 83].

A obtenção do estado de tensão e de deformação em componentes sujeitos a carregamentos mecânicos diversos foi um dos primeiros casos onde foi aplicado o MEF. [84].

Existem vários programas comerciais para a análise de MEF disponíveis no mercado. Alguns exemplos de referir o *Ansys*®, *Patran*® e o *ABAQUS*®, conforme apresentado na Tabela 9, que são sistemas informáticos capazes de simular processos de conformação plástica. Algumas entidades de investigação como, como o IDDRG – *International Deep Drawing Reserach Group* e o NAFEMS – *International Association for the Engineering Modelling*, assim com ações de estudos de *benchmark* têm vindo a contribuir para o desenvolvimento científico da simulação numérica através do MEF na

conformação plástica, onde são simuladas diferentes geometrias com diferentes métodos [85, 86].

Tabela 9 - Ferramentas comerciais de software de simulação de conformação.

Adaptada de [85, 86, 87].

Progama	Empresa	Origem	Vários estágios do processo de conformação	Análise de capacidade de deformação	Análise de Retorno Elástico
ABAQUS	3DS	França	Sim	Sim	Sim
ANSYS	ANSYS	E.U.A.	Sim	Sim	Sim
AUTOFORM	AUTOFORM	Suíça	Sim	Sim	Sim
DEFORM	SFTC	E.U.A.	Não	Não	Sim
DYNAFORM	ETA	E.U.A.	Sim	Sim	Sim
PAM-STAMP	ESI	França	Sim	Sim	Sim
PATRAN	HEXAGON	Suíça	Sim	Sim	Sim
QFORM	QFORM	Reino Unido	Sim	Sim	Não
STAMPACK	STAMPACK	Alemanha	Sim	Sim	Sim

A estrutura desses programas assenta num pré-processador, processador e pós-processador [88].

Nos casos de estudo de MEF e simulação numérica são considerados três grandes grupos dos principais objetivos industriais relativamente à utilização da simulação numérica dos processos de conformação de chapas metálicas [89]:

1. Redução do tempo:
 - Verificação atempada da viabilidade de produção da peça;
 - Resposta rápida a modificações necessárias;
 - Período de desenvolvimento;
 - Número de tentativa-e-erro.
2. Redução de custos:
 - Produtos mais baratos para o mercado;
 - Ferramentas mais bem dimensionadas;
 - Aumento de fiabilidade.
3. Aumento da qualidade do produto:
 - Seleção ótima do material;
 - Repetibilidade nos processos de conformação;
 - Otimização.

Por este motivo são colocados os seguintes requisitos à modelação e simulação numérica por elementos finitos no que se refere a um processo de conformação [89]:

1. Simulação de todo o processo, inclui todas a dobragens necessárias;
2. Precisão e fiabilidade nos resultados da simulação;
3. Previsão de defeitos da conformação, nomeadamente, ondulações, retorno elástico;
4. Utilização e modelação do comportamento dos diferentes materiais (metais, plásticos);
5. Realização da modelação num intervalo de tempo aceitável.

Para além da estratégia de integração, o resultado da simulação depende ainda outras características aplicadas ao processo, dos quais:

1. Tipos de elementos finitos utilizados (sólidos, ou casca);
2. Descrição das ferramentas (analiticamente rígidas, flexíveis, por pontos, por elementos finitos)
3. Modelação do comportamento finito da chapa (critérios de cedência, anisotrópica);
4. Modelação da interação das diferentes partes que constituem o modelo (contacto, atrito).

Pedro Bastardo [90] estuda, através simulação numérica, qual a influência da abertura da matriz no comportamento do retorno elástico em processos de quinagem em “V” de chapa metálica. No mesmo estudo avalia pela simulação numérica qual o comportamento do retorno elástico com a influência da tensão de cedência da chapa a ser quinada. Na Figura 27 podemos ver o resultado da simulação para a mesma chapa e com duas dimensões de abertura de quinagem diferentes.

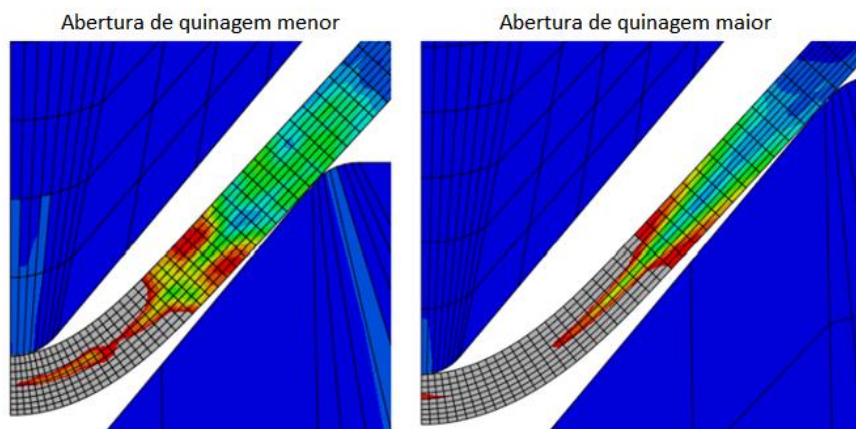


Figura 27 - Simulação numérica ao comportamento “quinagem em V” para diferentes aberturas da matriz.
Adaptado de [90].

Kévin A. Mouta et al. [91] estuda as diferenças de aplicar uma força de retenção da chapa para um processo de conformação de chapa, que tal como apresentado na Figura 28, através da simulação e para a mesma escala temporal, se verifica o efeito de ondulações aquando não aplicação de retenção.

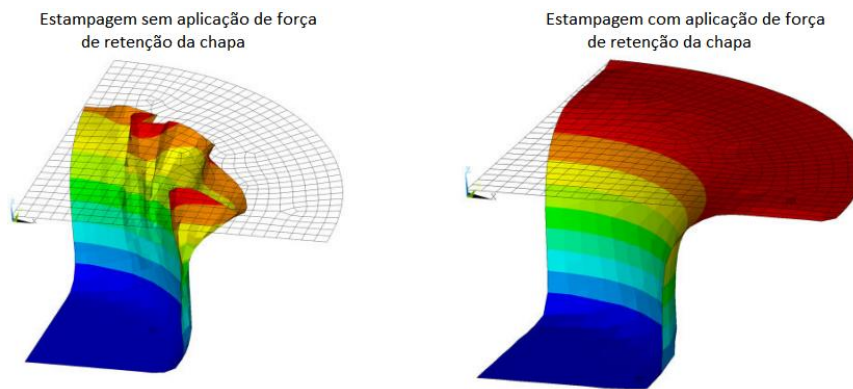


Figura 28 - Efeito de aplicação de força de retenção da chapa.

Adaptado de [91].

Mahmut Tandogan, et al. [64] realizaram um estudo ao comportamento de Tensão-Extensão da chapa normalmente utilizada em indústria aeronáutica. A chapa considerada (AA1100) utilizada no ensaio é de espessura 0,5 mm e foi utilizada para ensaio.

Na Tabela 10 e Tabela 11 é apresentada a composição química [92] e mecânica [62], respetivamente, deste material.

Tabela 10 - Composição química da liga de alumínio 1100.

Elemento	Mg [%]	Si [%]	Mn [%]	Cu [%]	Zn [%]	Fe [%]	Ti [%]	Cr [%]	Ni [%]
Valor Nominal	1,2 a 1,8	0,5 máx.	0,3 a 0,9	3,8 a 4,9	0,25 máx.	0,6 máx.	0,15 máx.	0,1 máx.	0,05 máx.

Tabela 11 - Propriedades mecânicas da liga de alumínio 1100.

Adaptada de [62].

Densidade ρ [g/cm ³]	Módulo de Young E [GPa]	Coefficiente de Poisson ν	Tensão de Cedência [MPa]	Tensão de Ruptura [MPa]
2,7	70	0,33	105	110

A distribuição de tensão efetiva obtida foi de um máximo de 39,1 MPa, 44,1 MPa, e 87,3 MPa, respetivamente. Verifica-se que utilizando um poliuretano no processo, existe uma redução significativa na aplicação de esforços na chapa. No entanto verifica-se que a carga necessária para formar esta geometria de peça foram de 13442,8 N para poliuretano 80A e 6476,0 N para o poliuretano 60A, e na conformação convencional a carga foi de 962 N.

Capítulo 3

Desenvolvimento da ferramenta de estampagem

Neste capítulo pretende-se identificar os elementos que são afetados ao desenvolvimento da ferramenta, sendo estes as oportunidades de inovação e melhoria do produto desenvolvido face ao convencional.

Na Figura 29 segmentam-se 7 elementos objetivos de provar a vantagem na solução deste produto.



Figura 29 - Elementos objetivos no desenvolvimento da ferramenta por impressão 3D.

- **Estrutural:**
Procurar a redução de peso nos produtos. Este elemento pode estar associado a materiais ou a geometrias possíveis de obter com processos de fabrico não convencionais. Este elemento pode reduzir a necessidade de meios de auxílio ao manuseamento, ao transporte do produto, procurando melhorar a ergonomia.
- **Resistência estrutural:**
Por sua vez reduzir o peso não pode colocar em causa a integridade estrutural dos produtos. Portanto, a procura de redução de peso utilizando materiais alternativos ou por alterações da geometria tem de garantir resistência mecânica suficiente para o fim a que se destina.

- **Económico:**

Um produto só pode ser realmente competitivo e uma solução alternativa se tiver efetivamente um impacto económico positivo na sua cadeia de valor. Este elemento é diretamente ligado ao objetivo de menores custos de produção, de procura por maiores vendas, e, conseqüentemente, maior lucro.

- **Ambiental:**

A colocação de produtos no mercado tem obrigatoriamente que no século presente ser visto como um produto sustentável no que refere ao impacto ambiental. Isto é, deve apresentar melhor desempenho ambiental durante todo o seu ciclo de vida garantindo igual ou melhor funcionalidade, qualidade e satisfação de um produto comum. Um dos objetivos de qualquer empresa será a preservação do meio ambiente, exemplo da utilização de materiais biodegradáveis e eliminação de desperdício.

- **Recursos humanos:**

A necessidade de recursos humanos para o desenvolvimento e produção pode ser minimizada com utilização de novas tecnologias inteligentes e inovadoras que permitam os sistemas computadorizados reduzir a necessidade de tarefas feitas por humanos.

- **Equipamentos:**

Os equipamentos necessários para o fabrico dos produtos podem impactar significativamente, custos de aquisição, a dificuldade de aquisição, a formação especializada, a área de ocupação. Este elemento é importante para demonstrar alternativas que permitam dar a possibilidade de o fabricante sair de grandes polos industriais e aproximar-se geograficamente dos centros de consumidores ou onde o produto final seja necessário.

- **Temporal:**

O aspeto temporal é um elemento-chave para a produção. Cada vez mais se pretende ter um produto rapidamente após a sua necessidade. É neste elemento que o processo não convencional tem como objetivo reduzir todo o tempo da sua cadeia de fabrico.

3.1. Componente a produzir através da ferramenta

O componente que é pretendido produzir, com utilização da ferramenta de produção construída em impressão 3D, é um elemento estrutural, baseado numa peça produzida pela empresa LAUAK, neste caso de estudo com algumas alterações geométricas conforme ANEXO 1, e respetiva modelação 3D representada na Figura 30.

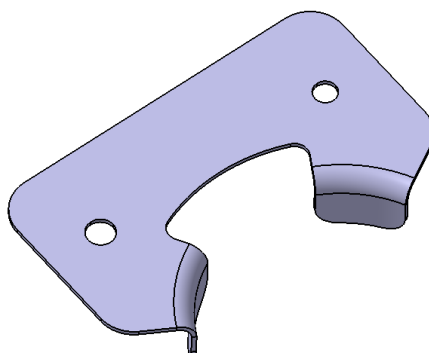


Figura 30 - Modelo 3D do componente estrutural a produzir.

Na Figura 31 é apresentada a estampa plana da chapa, obtida através do software *CATIA*® V5 mostrando os contornos que lhe dão forma para posterior estampagem.

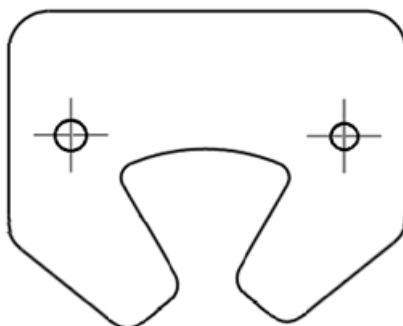


Figura 31 - Ilustração da chapa recortada (estampa plana) antes do processo de estampagem.

A forma geométrica, é obtida após o processo de estampagem designado por *rubber forming*, mencionado no capítulo anterior, uma vez que tem duas abas estampadas e com uma curvatura conseguindo-se com esta geometria obter por este processo em uma única etapa do processo de estampagem.

3.2. Tolerâncias de fabrico

As tolerâncias dimensionais máximas deste tipo de peças são conforme o apresentado Tabela 12.

Tabela 12 - Tabela de tolerâncias dimensionais do componente a produzir.

Diâmetro de Furos circulares [mm]	$\pm 0,1$
Comprimento de Abas conformadas [mm]	$\pm 0,8$
Dimensões gerais de Forma [mm]	0,5

3.3. Material da chapa a estampar e ensaios experimentais para obtenção de propriedades mecânicas

A chapa de fabrico considerada, é usualmente utilizada na aeronáutica, sendo de um material pertencente à classe de ligas de alumínio, com denominação AA2024-T3, fornecida com a espessura de 1,2 mm.

Na Tabela 13 e Tabela 14 é apresentada a composição química e as propriedades mecânicas deste material [93].

Tabela 13 - Composição química do material AA2024-T3 em estado de chapa.

Elemento	Mg [%]	Si [%]	Mn [%]	Cu [%]	Zn [%]	Fe [%]	Ti [%]	Cr [%]
Valor Nominal	0,3 a 0,9	0,5 máx.	0,4 a 1,2	3,8 a 4,9	0,25 máx.	0,5 máx.	0,2 máx.	0,1 máx.

Tabela 14 - Propriedades mecânicas do material AA2024-T3 em estado de chapa [93].

Densidade ρ [g/cm³]	Módulo de Young E [GPa]	Coefficiente de Poisson ν	Tensão de Cedência [MPa]	Tensão de Ruptura [MPa]
2,7	73,1	0,33	330	450

Esta chapa recortada é seguidamente sujeita a um processo de recozimento.

Este é um processo que tem como objetivo reduzir a dureza do material para que seja possível obter um processo de estampagem mais suave e favorável para geometrias de deformação plástica elevada, neste caso prático, nas dobras das 2 abas.

O processo é elaborado em 3 etapas, caracterizadas da seguinte forma:

- Primeiro estágio: Recuperação

Durante a recuperação, é aquecido o material no forno, com objetivo de aquecer o metal a uma temperatura em que possa existir relaxação e tornar o material mais dúctil.

- Segundo estágio: Recristalização

Nesta etapa é levado o material a uma temperatura de 340 °C durante 1 hora, com objetivo de que novos grãos se comecem a desenvolver na estrutura interna do metal eliminando tensões.

- Terceiro estágio: Crescimento dos grãos

Durante esta etapa final, os grãos que surgiram no segundo estágio, podem desenvolver-se na totalidade, com um controlo lento do arrefecimento, sendo que este aumento do grão cria um material mais dúctil.

Na Figura 32 está representado o forno utilizado nas chapas deste trabalho, presente na LAUAK, do fabricante *FOURS NAGAT*[®], modelo CF 15, sendo que é aquecido através de energia elétrica.



Figura 32 - Forno elétrico de tratamento da chapa utilizada para ensaio prático.

Em resumo, na Tabela 15 são apresentadas as características da chapa a levar para o processo de estampagem.

Tabela 15 - Tabela de características da chapa do componente a produzir.

Espessura [mm]	1,2
Classe de Material	Liga de Alumínio
Simbologia do Material	AA2024
Tipo de Tratamento	Recozido
Simbologia do Tratamento	O

Na Tabela 16 e Tabela 17 é apresentada a composição química e as propriedades mecânicas deste material [94, 95, 96].

Tabela 16 - Composição química do material AA2024-O do componente a produzir.

Elemento	Mg [%]	Si [%]	Mn [%]	Cu [%]	Zn [%]	Fe [%]	Ti [%]	Cr [%]
Valor Nominal	0,3 a 0,9	0,5 máx.	0,4 a 1,2	3,8 a 4,9	0,25 máx.	0,5 máx.	0,2 máx.	0,1 máx.

Tabela 17 - Propriedades mecânicas do material AA2024-O do componente a produzir [95].

Densidade ρ [g/cm ³]	Módulo de Young E [GPa]	Coefficiente de Poisson ν	Tensão de Limite Elástico [MPa]	Tensão de Ruptura [MPa]
2,7	73,1	0,33	100	200

Na Figura 33 é apresentado o gráfico tensão - extensão tido em consideração no caso de estudo [96].

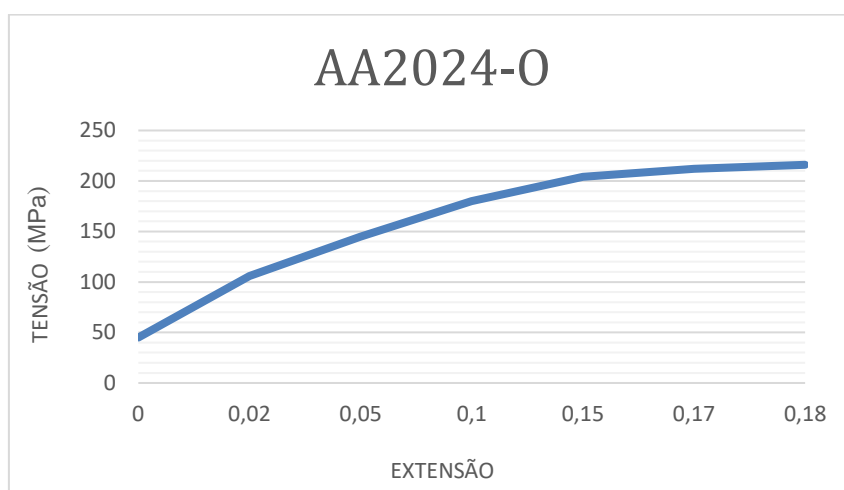


Figura 33 - Gráfico Tensão (MPa) - Extensão (mm/mm) liga de alumínio AA2024-O.

3.3.1. Ensaio experimental para determinação das propriedades mecânicas da chapa usada

EQUIPAMENTO LABORATORIAL

A máquina utilizada é uma ImpactTest TS300, equipada com uma célula de carga de ± 50 kN. Os dados são obtidos e processados computacionalmente durante todo o processo, permitindo a posterior análise das informações referentes ao material ensaiado. Também possui capacidade para os resultados serem exibidos na forma de um diagrama de força - deslocamento ou uma curva de tensão - extensão, que é então usada para determinar os valores característicos do material, como resistência à tração ou pontos de escoamento. Este equipamento, representado na Figura 34, encontra-se disponível no Laboratório de Mecânica (Vibrações e Ruído, Ensaio Mecânicos, Materiais) da ESTSetúbal.



Figura 34 - Máquina de teste de tensão utilizada para ensaio mecânico ao AA2024.

Foi utilizado um extensómetro, modelo 3542 SERIES, produto do fabricante *Epsilon*[®], com uma capacidade de 50 mm, sendo este equipamento um auxiliar para medição da deformação no provete. Este dispositivo, representado na Figura 35 é um extensómetro de encaixe, o mais comum utilizar-se neste tipo de teste de laboratório, e permite fornecer dados precisos e estáveis, sendo normalmente mais económicos que extensómetros sem contacto ou de contacto automático.



Figura 35 - Extensómetro utilizado no teste de tração.

PROVETES UTILIZADOS NO ENSAIO

Os provetes metálicos utilizados para o ensaio foram projetados segundo norma ASTM E8/E8M-22 “*Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*” [98], utilizando a geometria do provete tipo “*standard*” para “*Sheet-Type Specimens*”, representada na Figura 36, que contempla uma seção retangular.

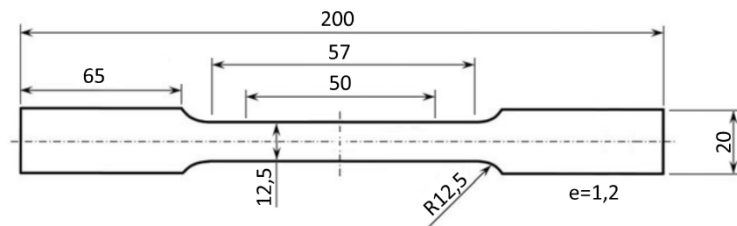


Figura 36 - Geometria do provete utilizado para os testes de tração.
Segundo ASTM E8/E8M-22.

Foram produzidas 20 unidades de provetes em material AA2024-T3, das quais 10 unidades com um laminado transversal (PT – Provette laminado Transversal) e 10 unidades com laminado longitudinal (PL – Provette laminado Longitudinal). Após corte, 6 PT e 6 PL, foram submetidos ao recozimento AA2024-O, amostras representadas na Figura 37, prontas para realização do teste de tração.

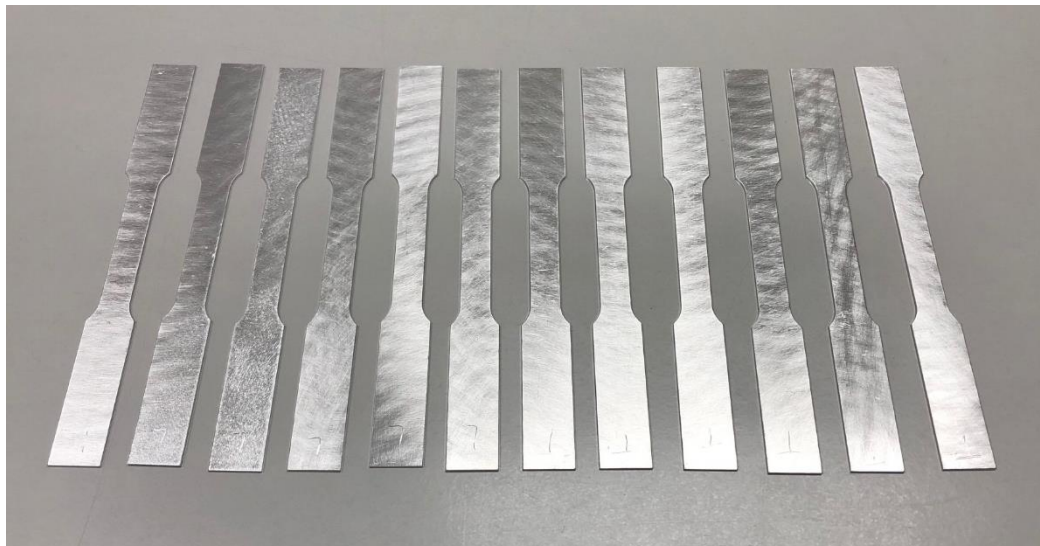


Figura 37 - Amostras de provetes AA2024-O para realização de teste de tração.

PREPARAÇÃO DO ENSAIO

Antes do ensaio de cada provete, foram aferidas as dimensões conforme Figura 38.



Figura 38 - Análise da dimensão real do provete AA2024 antes do teste de tração.

Para um correto processo de ensaio, inicialmente são abertas amarras em cunha (Figura 39), superior e inferior, para permitir a colocação do provete de livre contacto com os mordentes. De seguida é colocado o provete a ensaiar e apertado entre as amarras de forma que não exista escorregamento, e garantindo o paralelismo de movimento vertical, representado na Figura 40. Por último, foi colocado o extensómetro no centro do provete, tal como Figura 41, para que seja possível medir a deformação de forma correta.



Figura 39 - Amarra em formato cunha.



Figura 40 - Provete colocado máquina de ensaios de tração.



Figura 41 - Colocação do extensómetro sobre o provete a testar.

O equipamento foi parametrizado com uma velocidade constante de 5 mm/min, estando a sala a uma temperatura ambiente de aproximadamente 23 °C.

COMPORTAMENTO À TRACÇÃO DO AA2024-T3

Para a realização do teste de tensão ao AA2024 em estado “T3” foram utilizados 2 PL e 2 PT e ensaiados na UTM até rotura, tal como visualizado na Figura 42.



Figura 42 - Provetes após teste tração material A2024-T3.

Os dados foram obtidos pelo extensômetro, e extraídos pelo programa computacional, com valores para os seguintes parâmetros:

- Tempo (*Time* [s])
- Posição da galga superior (*Position* [mm])
- Carga (*Load* [kN])
- Extensão (*Extension* [mm])

Foram extraídos todos os valores dos dados para um provete de cada tipo de laminado, e estes dados foram tratados matematicamente (ANEXO 6) para cálculo de curva tensão - extensão do material A2024 com tratamento térmico "T3" da chapa com laminado longitudinal e da chapa com laminado transversal. Esta curva pode ser visualizada no gráfico apresentado na Figura 43.

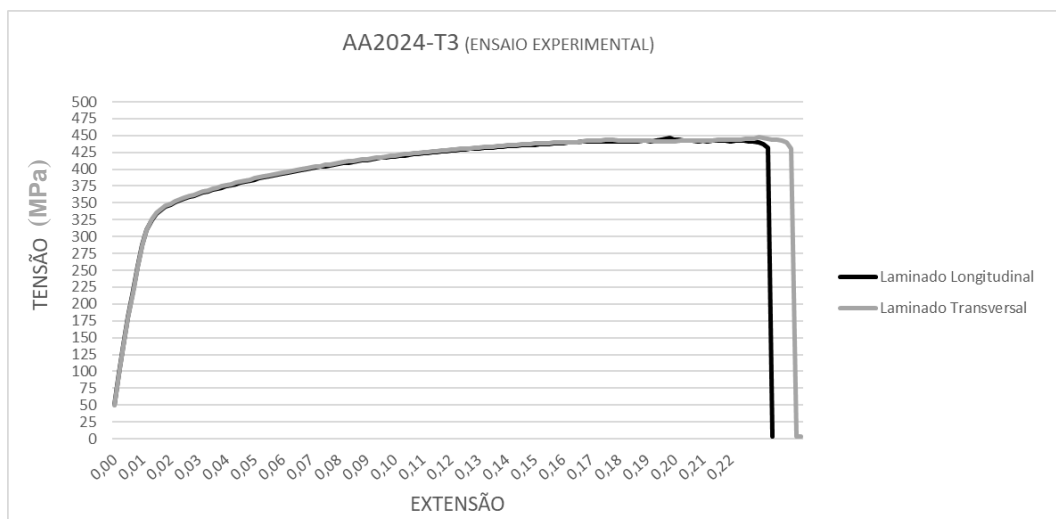


Figura 43 - Curva convencional Tensão (MPa) - Extensão (mm/mm) da chapa AA2024-T3.

COMPORTAMENTO À TRAÇÃO DO AA2024-O

Para a realização do teste de tensão ao AA2024 em estado “O” foram utilizados 4 PL e 4 PT e ensaiados na UTM até rotura, tal como visualizado na Figura 44.



Figura 44 - Provetes após teste tração material A2024-O.

Os dados foram obtidos pelo extensómetro, e extraídos pelo programa computacional, com valores para os seguintes parâmetros:

- Tempo (*Time* [s])
- Posição da galga superior (*Position* [mm])
- Carga (*Load* [KN])
- Extensão (*Extension* [mm])

Foram extraídos todos os valores dos dados para um provete de cada tipo de laminado, e estes dados foram tratados matematicamente (ANEXO 7) para cálculo de curva tensão – extensão do material A2024 com recozido “O” da chapa com laminado longitudinal e da chapa com laminado transversal. Esta curva pode ser visualizada no gráfico apresentado na Figura 45.

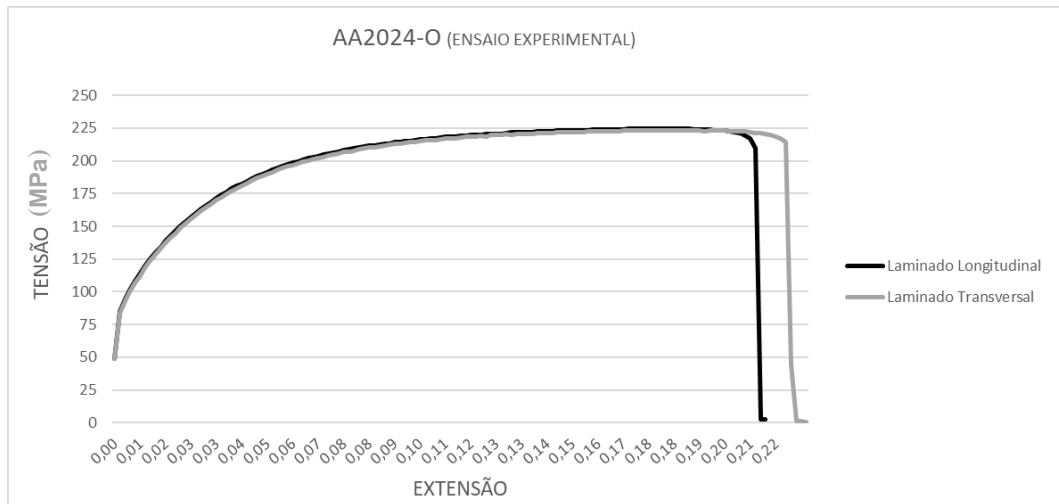


Figura 45 - Curva convencional Tensão (MPa) - Extensão (mm/mm) da chapa AA2024-O.

Por fim, realizou-se uma verificação à dimensão real longitudinal total de cada provete, que tal como demonstrado na Figura 46, se verificou a dimensão de aproximadamente 210 mm, ou seja, um aumento de 10 mm face ao valor desta dimensão antes da realização do teste de tração.

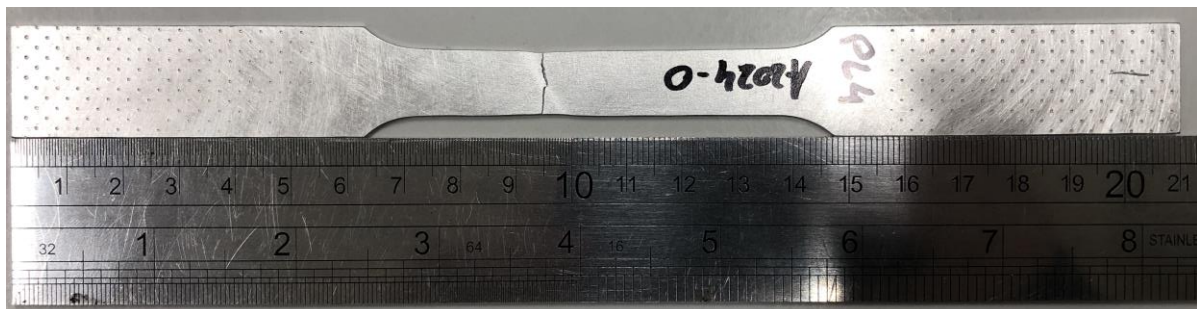


Figura 46 - Análise da dimensão real do provete AA2024 após teste de tração.

CONCLUSÕES AOS RESULTADOS OBTIDOS

Através da análise visual aos provetes A2024-T3 e aos provetes A2024-O, após ensaio, pode-se considerar que pela fratura apresentada, o material tanto no estado térmico “T3” como no estado recozido “O”, é considerado dúctil, notando-se uma fratura a 45°.

Também se visualiza que os provetes AA2024-T3 com laminado transversal aparentam um comportamento mais fibroso na zona da fratura, se comparado com os provetes AA2024-T3 com laminado longitudinal, estes aparentam uma fratura de 45° linear em toda a secção.

Os provetes AA2024-O com laminado transversal aparentam um comportamento mais fibroso na zona da fratura, estes aparentam uma fratura de 0° linear em toda a secção, e os provetes AA2024-O com laminado longitudinal aparentam maior inclinação da fratura.

A curva de tensão - extensão para o material AA2024-T3 tem comportamento similar tanto para o laminado longitudinal como para o laminado transversal. No entanto é evidente que o comportamento do material em estado recozido "O" tem uma menor tensão, com valores máximos de 225 MPa para o laminado longitudinal, e 224 MPa para o laminado transversal, quando comparado com o material em estado "T3" que possui valores máximos de 446 MPa para o laminado longitudinal e 447 MPa para o laminado transversal.

Na tabela 18 é apresentado um resumo de comparação de valores de tensão de rotura de referência e real testada em laboratório, onde se verifica uma diferença de 1 % para o material A2024-T3, relativamente desprezável, no entanto para o material AA2024-O existe uma diferença de 12 %, que leva a concluir que fatores do processo de recozimento podem influenciar resultados de limites de tensão. Por sua vez é validada a condição de recozimento do material com uma redução de aproximadamente 50% no valor das tensões de rotura.

Tabela 18 - Diferenças da resistência mecânica de referência [93, 96] e convencional, para o material AA2024-T3 e A2024-O.

Material	Tensão de Rotura [MPa]			Relação Tensão
	Referência	Convencional (PL)	Convencional (PT)	Referência / Convencional
A2024-T3	450	446	447	1 %
A2024-O	200	225	224	12 %
Redução Tensão	56 %	50 %	50 %	

3.4. Considerações a ter em conta no desenho da ferramenta

Para execução do componente, é considerado que a ferramenta obedeça a um conjunto de princípios fundamentais básicos:

- Suportar uma chapa de material deformável em liga de alumínio;
- Se considerada a recuperação elástica da chapa;
- A sua matriz e contra matriz estarão em contacto com este material, dado que:
 - A matriz assistirá o processo na forma da geometria a conformar a chapa,
 - A contra matriz assistirá o processo como um bloqueio da chapa na zona a não conformar.
- A direção da força aplicada será pelo lado superior através da deslocação da mesa da Prensa. No processo de *rubber forming*, a força é aplicada sobre a forma de uma pressão exercida através de uma borracha;

Na Figura 47 está uma representação do processo de estampagem.

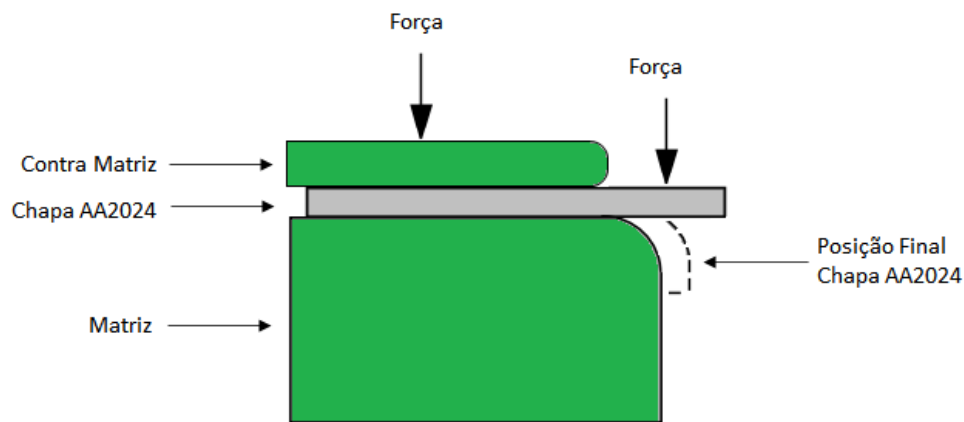


Figura 47 - Ilustração do conceito de ferramenta.

3.5. Produção da ferramenta de estampagem

O processo de fabrico selecionado, será por impressão 3D, utilizando-se o equipamento disponível para estudo e atividades de desenvolvimento académico no InLAB – *InnovationLAB*, da Escola Superior de Tecnologia de Setúbal (ESTSetúbal).

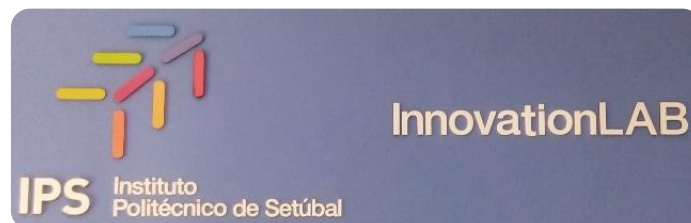


Figura 48 - Laboratório InLAB da ESTSetúbal.

No projeto foi considerado o processo de impressão pelo método FFF, e pesquisados diferentes materiais e suas características que tenham a compatibilidade com o referido processo.

O processo FFF conjuga a técnica de extrusão de plástico, com a deposição em camadas do mesmo após fundido. A peça é produzida camada a camada. O material de base é apresentado em forma de fio e é alimentado via bobine, utilizando fundamentalmente materiais termoplásticos. O filamento é fundido e extrudido através de um bico sobre uma plataforma, onde acaba por solidificar [15], este processo é ilustrado na Figura 49.



Figura 49 - Ilustração do processo FDM®.

3.5.1. Seleção de material de impressão

A seleção de material consiste em identificar o material ideal para o tipo de processo que se pretende utilizar no desenvolvimento do produto, dado que estes serão os “inputs” principais para todo o desenrolar da construção e estudo do caso prático.

Os materiais mais comuns que são utilizados para a impressão através do processo FDM® são:

PLA:

Vantagens: é o mais popular, tem baixo custo, e é fácil de imprimir.

Desvantagens: baixa resistência à temperatura.

ABS:

Vantagens: boa resistência.

Desvantagens: Empena facilmente.

PETG:

Vantagens: baixo preço, fácil de imprimir.

Desvantagens: pouco rígido.

PEEK:

Vantagens: excelente resistência ao fogo, excelente resistência mecânica.

Desvantagens: Custo elevado.

3.5.2. Atributos fundamentais para o material

Em cada material existem uma variedade de características que são tidas em ponderação na altura de escolha do material a utilizar no processo de impressão 3D.

No presente capítulo são avaliados aspetos no que corresponde aos aspetos:

- Densidade do Material;
- Custo de compra;
- Classificação ecológica;
- Propriedades mecânicas dos filamentos.

Nos gráficos da Figura 50 à Figura 53, são apresentadas as diferentes análises às características dos materiais estudados para a produção do modelo de ferramenta sob processo de impressão 3D.

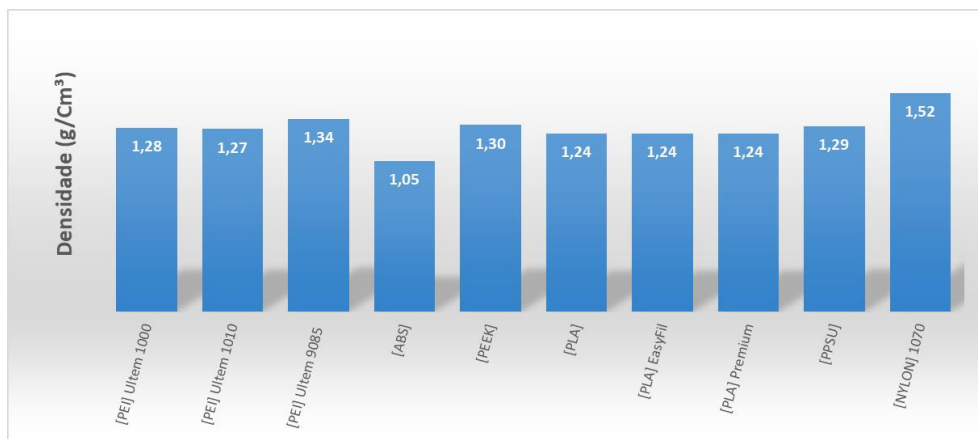


Figura 50 - Gráfico de comparação de densidades dos materiais.

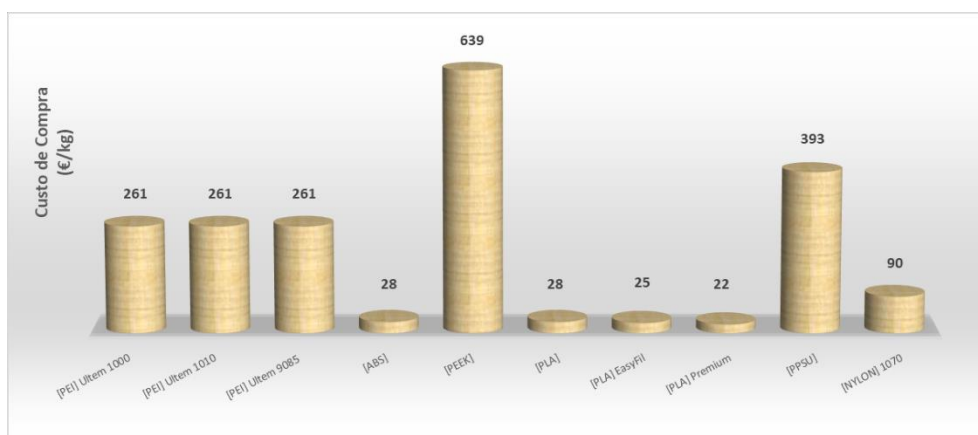


Figura 51 - Gráfico de comparação de custo de compra dos materiais.

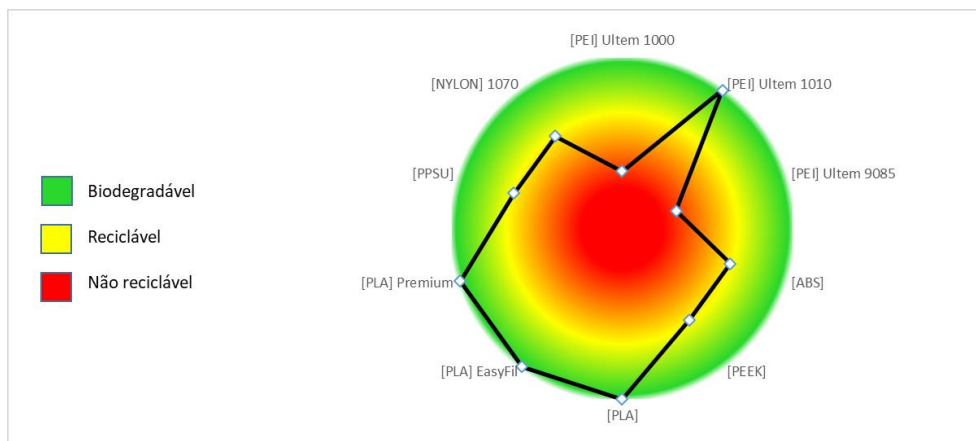


Figura 52 - Gráfico de classificação ecológica dos materiais.

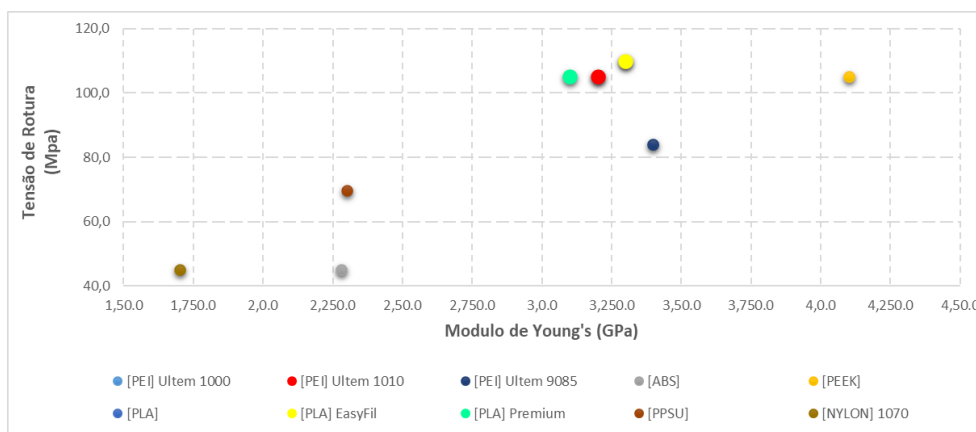


Figura 53 - Gráfico de relação das propriedades mecânicas dos filamentos dos materiais.

3.5.3. Seleção para projeto

De acordo com uma avaliação aos atributos fundamentais dos materiais, os principais materiais com a melhor pontuação em termos de avaliação geral, de acordo com pontuação apresentada na Tabela 18, encontram-se os materiais dentro da gama PLA – Políácido Láctico, como termoplástico de bom desempenho, de baixo custo e amigo do ambiente em termos ecológicos dado que se caracteriza por ser biodegradável e proveniente de recursos naturais. Este material é extremamente fácil de imprimir, sendo esta gama de materiais a mais popular. Desta forma é considerado o material PLA Premium para o estudo do caso prático, dado que apresenta boas propriedades mecânicas é mais económico que os materiais alternativos..

Tabela 19 - Avaliação geral aos atributos fundamentais dos materiais.

Grau de Classificação da Característica

Mau - 1 | Bom - 2 | Muito Bom - 3

Material	Característica				GERAL
	Densidade	Mecânica	Custo	Ecológica	
[PEI] Ultem 1000	2	2	2	1	7
[PEI] Ultem 1010	2	2	2	3	9
[PEI] Ultem 9085	1	2	2	1	6
[ABS]	3	1	3	2	9
[PEEK]	1	3	1	2	7
[PLA]	2	2	3	3	10
[PLA] EasyFil	2	2	3	3	10
[PLA] Premium	2	2	3	3	10
[PPSU]	2	1	1	2	6
[NYLON] 1070	1	1	2	2	6

Na Tabela 19 são apresentadas as propriedades à tração e compressão do material impresso PLA (REAL Filament PLA com 1,75 mm de diâmetro), com parâmetros de impressão otimizados para compressão:

Tabela 20 - Propriedades mecânicas do PLA Premium para a ferramenta [97].

Carga aplicada	Densidade ρ [g/mm ³]	Módulo de Young E [MPa]	Coefficiente de Poisson ν	Tensão de Cedência [MPa]	Tensão de Ruptura [MPa]
Tração YZ	1,24e ⁻³	3145	0,33	52,57	55,76
Compressão	1,24e ⁻³	2948	0,33	69,49	73,20

Na Figura 54 são apresentados os gráficos tensão-extensão tidos em consideração no caso de estudo.

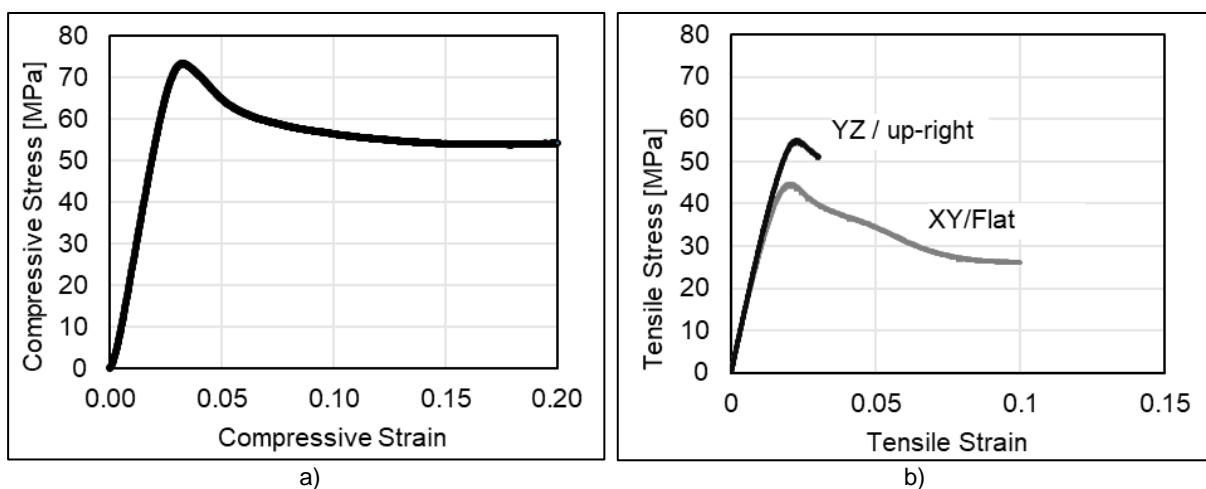


Figura 54 - Gráfico Tensão (MPa) – Extensão (mm/mm) a) à compressão, b) à tração [97].

Com base nesta seleção de material para projeto, estão também identificados 4 elementos objetivos de provar a vantagem na solução deste produto:

- Estrutural:

O produto selecionado, PLA Premium, contém uma densidade de 1,24 g/cm³, que comparativamente com um material metálico para este tipo de ferramenta, por exemplo o aço com uma densidade 7,90 g/cm³, apresenta uma redução de aproximadamente 84,5 %, ou no caso de um alumínio laminado com uma densidade de 2,70 g/cm³ apresenta uma redução de aproximadamente 54,1 %.

- Económico:

O PLA Premium apresenta um custo de compra dos valores mais inferiores da totalidade dos materiais pesquisados, o que em termos de custo de produção será por sua vez um peso significativo no valor total de custo de produção.

- Ambiental:

A colocação de produtos no mercado tem obrigatoriamente que no seculo presente ser visto como um produto sustentável no que refere ao impacto ambiental. Isto é, deve apresentar melhor desempenho ambiental durante todo o seu ciclo de vida garantindo igual ou melhor funcionalidade, qualidade e satisfação de um produto comum. No caso do material selecionado é um material que vai totalmente de encontro com o aspeto ambiental mais adequado, que é a biodegradabilidade.

- Resistência estrutural:

Por sua vez reduzir o peso não pode colocar em causa a resistência mecânica nos produtos. Portanto a procura de redução de peso utilizando materiais alternativos ou nas geométricas dos produtos tem de conseguir atingir igual ou melhor comportamento mecânico dos materiais e geometrias convencionais. O PLA Premium apresenta uma boa característica do seu filamento, no entanto, a validação de uma boa resistência estrutural é tida em consideração num estudo de MEF através da simulação numérica abordada no capítulo seguinte.

Capítulo 4

Modelação e análise numérica

Através da modelação e análise numérica, pretendem-se executar cálculos que descrevam o sistema estudado neste projeto de ferramenta, e com o objetivo de encontrar possíveis problemas físicos prevenindo erros de projeto que coloquem em causa a eficácia do produto.

O principal aspeto estudado, está relacionado com a característica de estampagem da peça metálica, que possui um ângulo de 90°, ao qual será avaliado o comportamento da dobra quando submetida uma carga sobre a matriz, e o comportamento da chapa quando aliviada a carga. Este estudo obrigou a uma análise não linear. Dado que não se teve acesso a algum dos programas comerciais mencionados anteriormente, foi utilizada uma ferramenta geral de simulação por elementos finitos.

No caso prático apresentado, optou-se por definir o conceito de ferramenta em 2D, executar o estudo de simulação numérica tendo em conta todas as propriedades dos materiais e respetivo conceito de ferramenta, seguindo-se então para a modelação 3D do produto considerando os diferentes resultados e conclusões obtidas no estudo MEF.

4.1. Comportamento em compressão

Pretende-se realizar a análise ao comportamento da chapa submetida a uma carga. Tanto a matriz da ferramenta como a chapa serão modeladas com uma superfície deformável de acordo com o seu material e características dimensionais. A chapa é bloqueada por uma contra matriz, e será considerada com uma superfície rígida. A chapa é comprimida contra a matriz através do deslocamento de um punção, este será considerado igualmente com uma superfície rígida. Esta carga exercida, em conjunto com as condições de fronteira estabelecidas e atrito aplicado entre matriz e chapa, controlará como o material é levado contra a matriz durante o processo de conformação.

4.1.1. Criação do modelo

Para a modelação tem-se em conta 2 aspetos fundamentais, a espessura da chapa, e o raio de curvatura da ferramenta. No modelo são criadas 2 peças 2D. Uma delas é a chapa, modelada tendo em conta o comportamento plástico, com módulo de Young 72,4 GPa, coeficiente de Poisson 0,33 e curva Tensão-Extensão mencionada na Figura 33. A outra peça é a matriz, modelada com um comportamento linear elástico com módulo de Young 3,145 GPa e coeficiente de Poisson 0,33. É gerada uma malha adequada para cada peça que permita um estudo do comportamento dos nós em detalhe. A montagem de todas as partes constituintes é realizada, conforme apresentado na Figura 55.

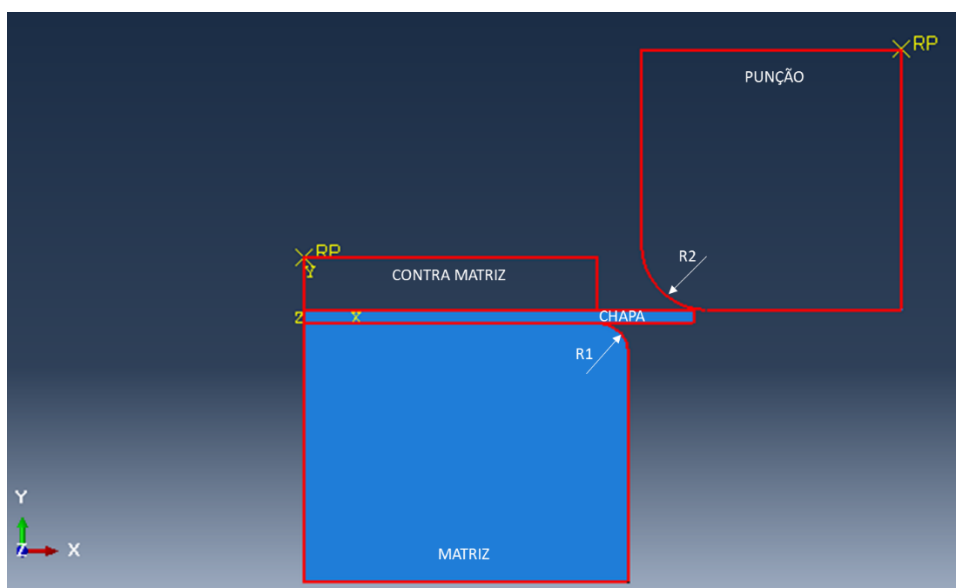


Figura 55 - Modelo utilizado na simulação numérica.

Na Tabela 20 encontram-se as dimensões de cada um dos elementos que constituem o conjunto de ferramenta e chapa.

Tabela 21 - Dimensões das peças modeladas.

Peça	Dimensão [mm]				Material
	X	Y	R1	R2	
MATRIZ	25	25	2,0	-	PLA
CONTRA MATRIZ	22,5	4	-	-	-
PUNÇÃO	20	20	-	5	-
CHAPA	30	1,2	-	-	AA2024-O

4.1.2. Malha

Às peças deformáveis são atribuídos os respetivos materiais. É efetuada a malha (Figura 56) para cada peça, de forma que seja analisado em detalhe as tensões e deformações existentes no processo de simulação. Na tabela 21 identificam-se a quantidade de nós estabelecidos para cada uma das peças analisadas. A malha da matriz é expressivamente refinada na região do raio de dobra. A chapa também é refinada na região de dobra. Os elementos usados na modelação são bidimensionais de tensão plana com 4 nós, quadráticos, de integração reduzida, cuja referência do software Abaqus® é CPS4T [99].

Tabela 22 - Número de elementos finitos das peças analisadas.

Peça	Nº Elementos
Matriz	322
Chapa	280

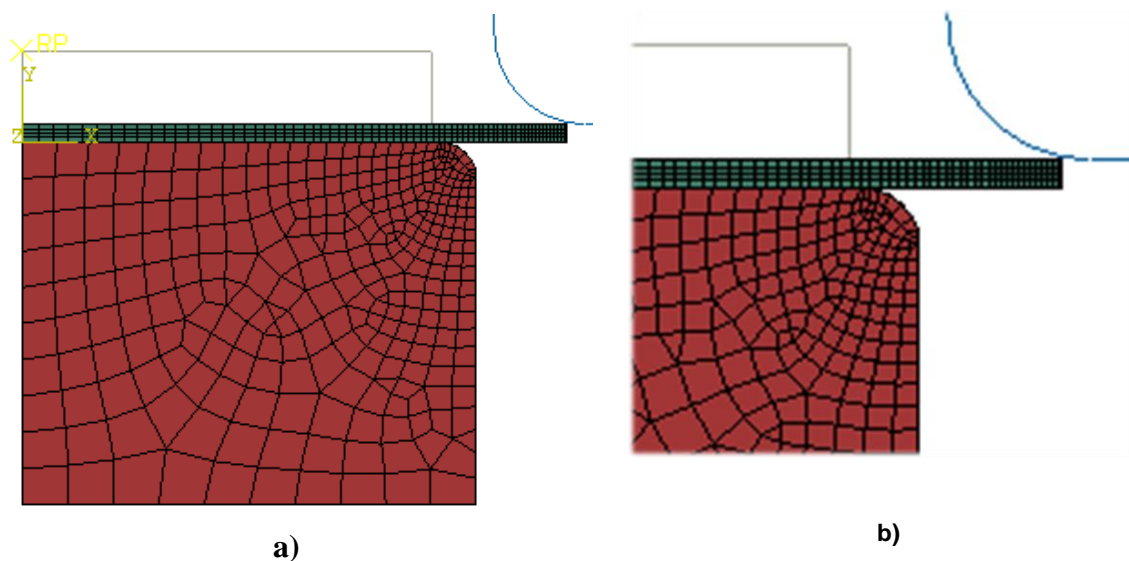


Figura 56 - Malha de elementos finitos do modelo utilizado.
a) Vista geral, b) Pormenor da zona de deformação.

4.1.3. Condições do processo

São definidas as condições de contacto, como sendo *surface-to-surface*, e é utilizada a função *penalty contact method* de forma a impor o contacto intermitente e a condição de deslizamento entre a matriz e a chapa, assim como entre o punção e a chapa (Figura 57).

Para estes pares de peças, é considerado o coeficiente de atrito no valor de 0,10.

As condições de fronteira aplicadas são divididas em um primeiro *step*, em que são definidos as restrições e um segundo *step* em que é definido um deslocamento de translação do punção. A chapa tem bloqueio de deslocação na extremidade e fica livre em translação *y,z*, e rotação em *x,y*, a matriz está encastrada, i.e., não sofre deslocamento em *x,y*, assim como a contra matriz (Figura 58), enquanto que o punção tem os deslocamentos de translação bloqueados à exceção do eixo *y* que será onde exerce o seu deslocamento (Figura 59). Todos as condições de fronteira estão expressas na tabela 22.

Tabela 23 - Condições de fronteira de compressão.

Peça	Translações		Rotações	
	X	Y	X	Y
Matriz (Surface)	0	0	0	0
Contra Matriz (RP)	0	0	0	0
Punção (RP)	0	-15mm	0	0
Chapa (Surface)	0	Livre	Livre	Livre

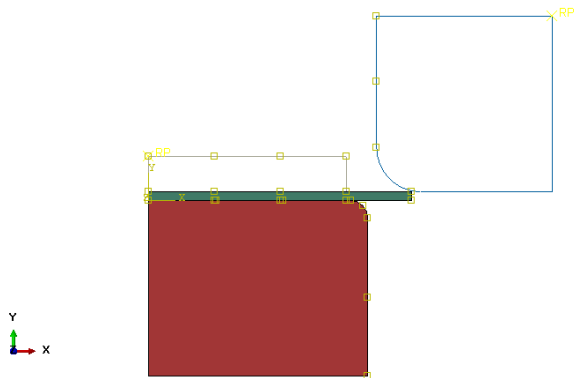


Figura 57 - Condições de contacto no modelo.

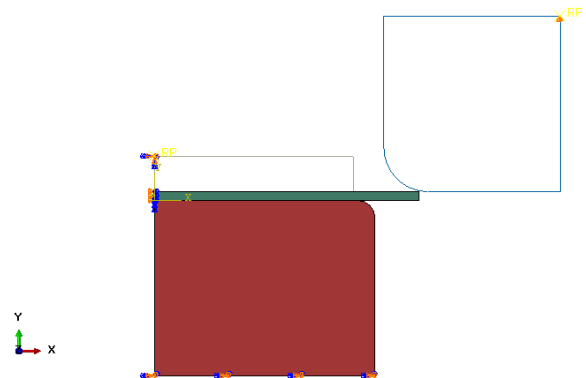


Figura 58 - Condições de fronteira (estática) do modelo.

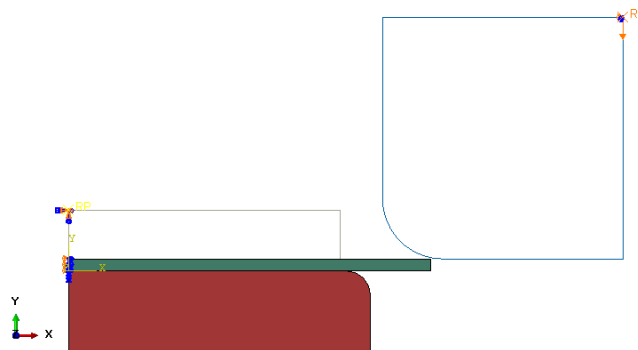


Figura 59 - Condições de fronteira (dinâmica) do modelo.

O modelo de elementos finitos é materialmente não linear, com controlo de deslocamento, tendo sido definido passo inicial de 1×10^{-5} segundos, tendo os seguintes sido calculados automaticamente pelo software até se atingir os 10 segundos em cada passo.

4.1.4. Resultado das simulações

Na simulação pretende-se identificar quais as fases da conformação que existem picos de tensões, tanto na matriz como na chapa, identificar os elementos de cada uma das malhas que possuem esse pico de tensão, e avaliar riscos e/ou oportunidades de melhoria na modelação para aliviar tensões.

Na Figura 60 pode-se identificar o estado de tensões existente na matriz e na chapa, onde se confirma que existe uma tensões menores na matriz em relação à chapa.

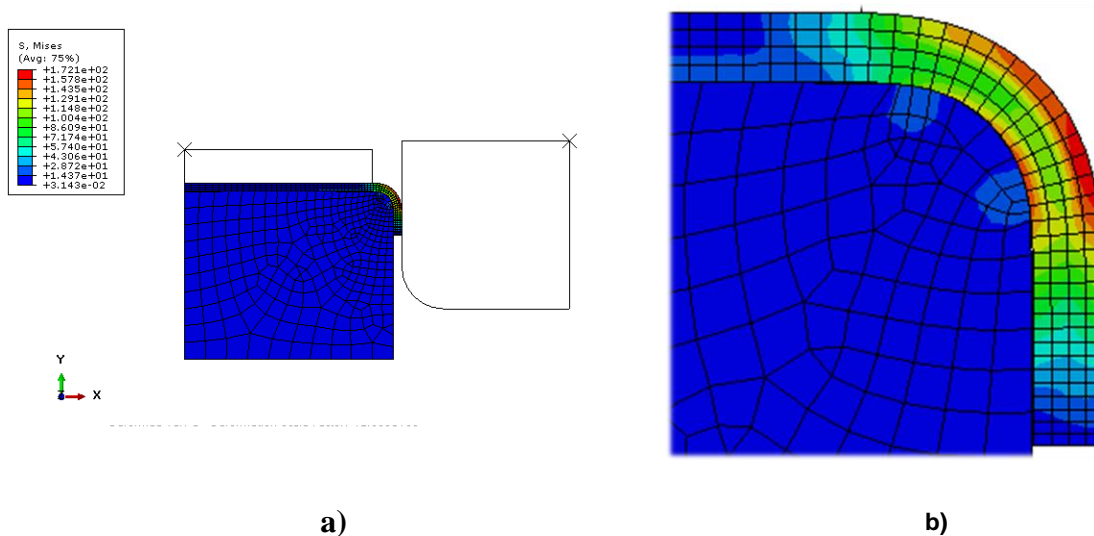


Figura 60 - Distribuição de tensões equivalentes de Von Misses (MPa) na Matriz e Chapa com deformação 90°. a) Vista Geral, b) Pormenor da Zona de Deformação.

Identificada a localização de maior tensão na chapa, afetados os elementos desde o número 355 ao elemento número 265, vamos verificar os valores de tensão Von Misses em cada elemento dessa localização. Identifica-se um máximo de 173 MPa no elemento 262 (Figura 61).

Verifica-se também que a tensão na matriz não ultrapassa os 28,7 MPa, o que é perfeitamente compatível com a resistência do PLA à compressão.

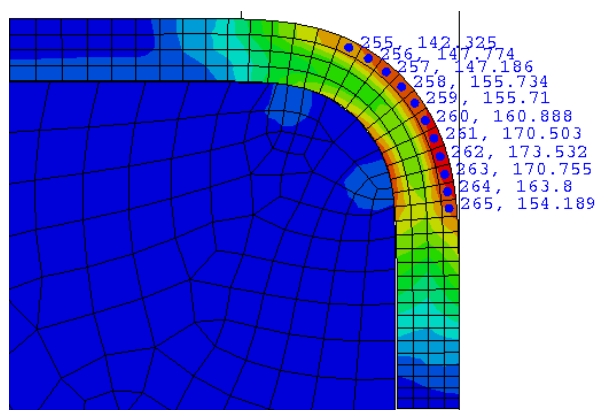


Figura 61 - Tensão Von Misses na chapa após deformação 90°.

Estando identificado o elemento da chapa que possui maior tensão, elemento 262, identifica-se o comportamento deste elemento ao longo do tempo do processo de deformação por compressão, representado graficamente na Figura 62.

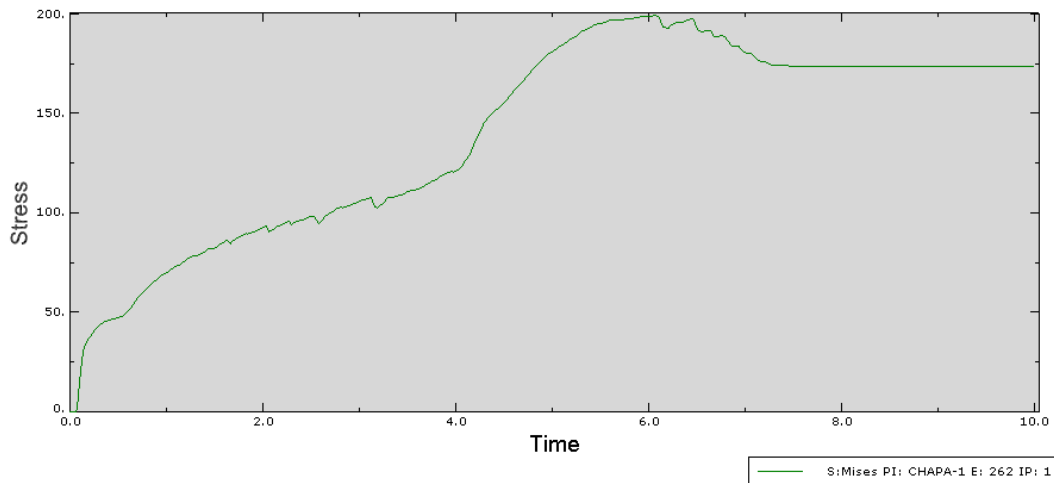


Figura 62 - Gráfico da Tensão-Tempo de processo (Elemento nº 262 da chapa).

Com base no gráfico apresentado, é possível verificar que existe um pico de tensão no tempo de processamento 6,0 aproximadamente, e com isto permite identificar que existe uma tensão no seu pico máximo entre os 0º (início da deformação) e os 90º (final da deformação).

Com base na conclusão anterior é avaliado o comportamento para todo o tempo de processamento, identifica-se no tempo 4,0 aproximadamente (Figura 63) ao elemento número 256, como o pico máximo da tensão na chapa, atingindo o valor de 215 MPa (Figura 64).

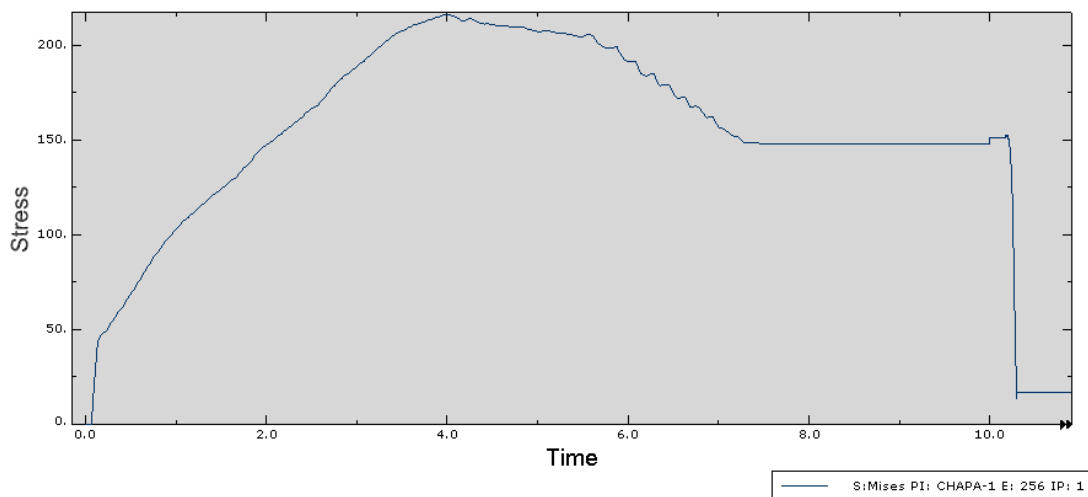


Figura 63 - Gráfico da Tensão-Tempo de processo (Elemento nº 262 da chapa).

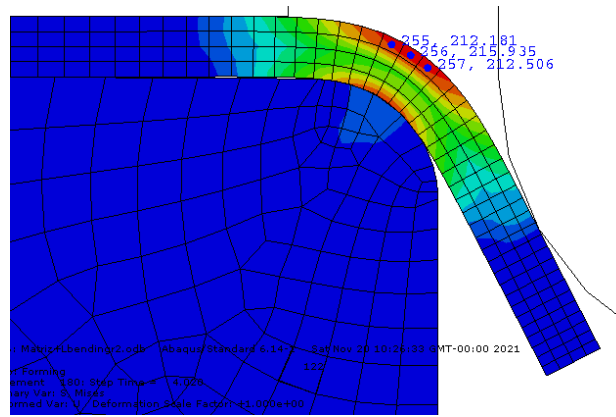


Figura 64 - Tensão Von Misses máxima na chapa durante deformação 90°.

4.2. Comportamento de alívio de carga

Pretende-se realizar a análise ao comportamento da chapa quando alívio da carga. A chapa é aliviada através do deslocamento do punção à sua posição inicial, deixando de estar em contacto com a chapa, e esta saindo da sua fase de plasticidade.

4.2.1. Condições de processo

As condições de fronteira mantêm-se inalteradas, à exceção de que o punção tem o deslocamento de translação no sentido inverso do estudo de compressão, e na grandeza de libertação total do contacto possível com a chapa. Todos as condições de fronteira estão expressas na Tabela 23.

Tabela 24 - Condições de fronteira de descompressão.

Peça	Translações		Rotações	
	X	Y	X	Y
Matriz (Surface)	0	0	0	0
Contra Matriz (RP)	0	0	0	0
Punção (RP)	0	+10mm	0	0
Chapa (Surface)	0	Livre	Livre	Livre

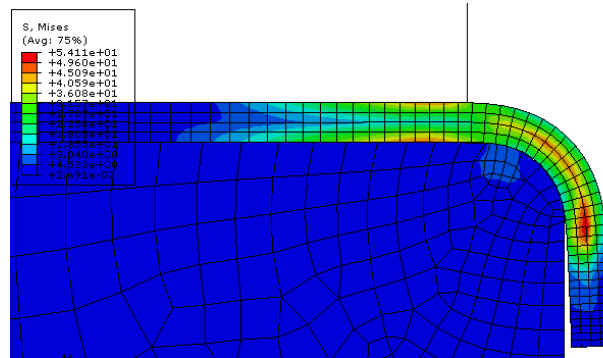
Após elaborada a configuração do modelo de análise, o modelo é submetido para estudo dinâmico de forma que se possa obter os resultados do seu comportamento.

4.2.2. Resultado das simulações

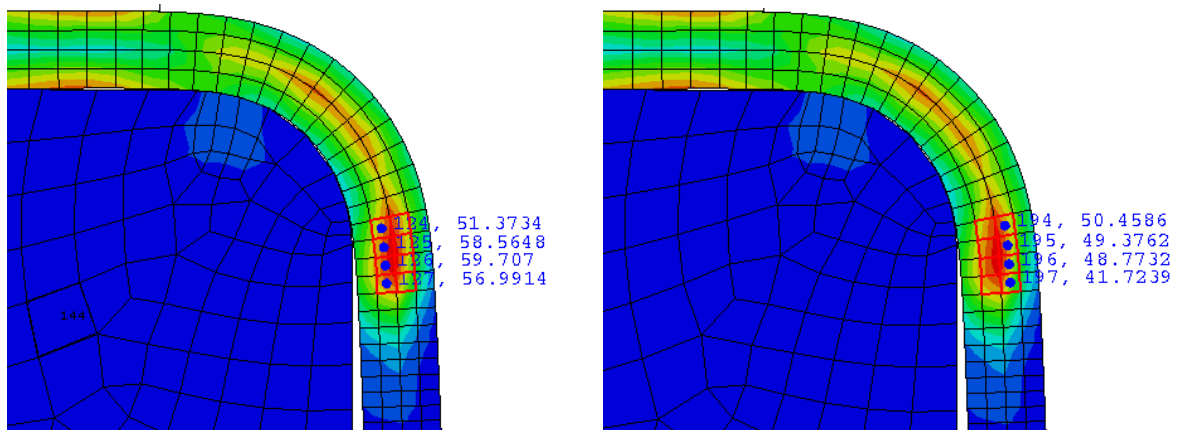
Na simulação pretende-se identificar o comportamento de redução de tensões nos elementos da malha

da chapa e quantificar o ângulo de recuperação elástica da chapa após retirada de carga.

Na Figura 65 pode-se identificar o estado da distribuição de tensões existente na chapa após total alívio de carga.



a)



b)

Figura 65 - Distribuição das tensões equivalentes de Von Mises (MPa) na Matriz e Chapa na descompressão.

a) Vista geral, b) Pormenor da zona de deformação.

Identificada a localização de maior tensão na chapa, afetados os elementos desde o número 124 ao número 127, e os elementos desde o número 194 ao número 297. Identifica-se um máximo de 59 MPa no elemento 126 (Figura 65).

Através das coordenadas de 2 nós localizados na aba da chapa conformada, e após o retorno elástico, vamos calcular o ângulo de recuperação elástica dada pelo resultado da simulação numérica, resultado referido na tabela 25.

Tabela 25 - Ângulo da chapa na descompressão.

Nó da Malha da Chapa	Coordenadas		Ângulo
	X	Y	
206	25,6166	-3,92033	2,2°
213	25,6663	-5,21137	

4.2.3. Ajuste do modelo

De forma a procurar um modelo que alívie das tensões na matriz provocado pela deformação da chapa, ajustou-se o raio de curvatura na zona de dobra, passando de 2,0 mm para 3,0 mm.

Na Figura 66 pode visualizar-se o gráfico de Distribuição de Tensões Von Misses para os diferentes elementos, onde podemos concluir que o comportamento da chapa não sofre alteração significativa.

E na Figura 67 pode visualizar-se que a deformação na matriz tem uma secção mais reduzida com ângulo de 3,0 mm.

No entanto aumentar o raio da matriz, a recuperação elástica da chapa também aumenta, na Figura 68 podemos visualizar a diferença entre os diferentes raios estudados.

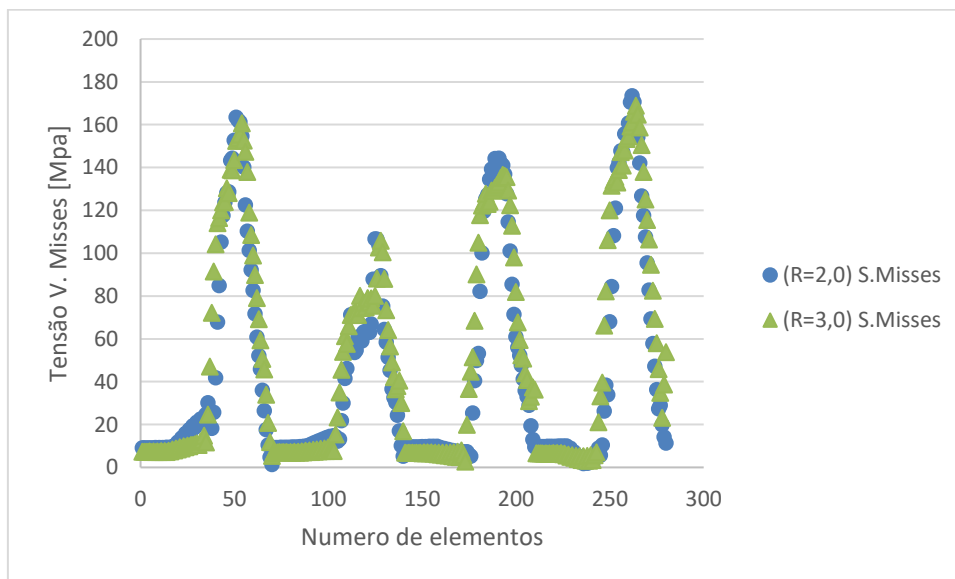


Figura 66 - Comparação da distribuição de tensões equivalentes de Von Misses na chapa para raio de dobra 2,0 mm e 3,0 mm.

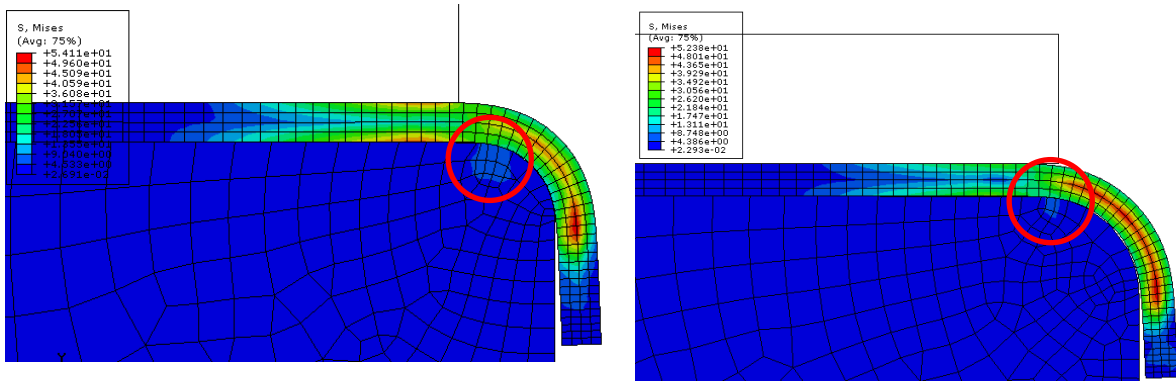


Figura 67 - Impacto na Distribuição de Tensões Equivalentes de Von Mises (MPa) na Matriz para Raio de Dobra 2,0 mm e 3,0 mm.

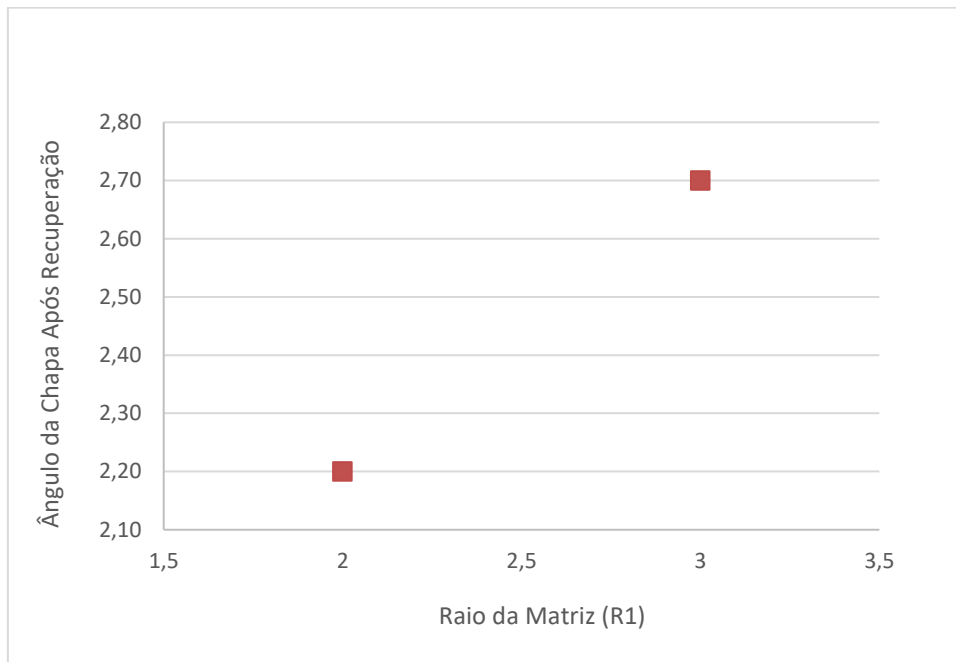


Figura 68 - Comparação da variação do ângulo de recuperação elástica na chapa para raio de dobra 2,0 mm e 3,0 mm.

4.2.4. Comparação analítica da recuperação elástica

De forma a verificar os resultados do ângulo de recuperação obtido através dos dados da simulação numérica computacional, elaborou-se uma comparação com resultados analíticos de recuperação elástica, considerando (2.12).

Cálculos para um raio 2,0 mm:

$$\text{Recuperação Elástica} = 2(2 + 1,2) - 90^{\circ} \left(\frac{\pi}{180^{\circ}} \right) (2 + 0,33 \times 1,2) \approx 2,6^{\circ} \equiv 2^{\circ}38'$$

Cálculos para um raio 3,0 mm:

$$\text{Recuperação Elástica} = 2(3 + 1,2) - 90^{\circ} \left(\frac{\pi}{180^{\circ}} \right) (3 + 0,33 \times 1) \approx 3,1^{\circ} \equiv 3^{\circ}4'$$

Com base nos cálculos analíticos efetuados e comparando com os resultados numéricos, pode-se avaliar como válido o estudo efetuado e considerar o mesmo para o desenho de projeto da Ferramenta.

Assim ter-se-á em consideração para o projeto, um raio de 3,0 mm na zona de dobra da chapa, dado que é sempre objetivo reduzir ao máximo tensões na Matriz da ferramenta, e garantindo que a chapa é deformável à geometria pretendia.

O ângulo de recuperação elástica, atribuído à ferramenta é de 3° , tendo em consideração o valor de $2,7^{\circ}$ ($\equiv 2^{\circ}42'$) obtidos na simulação numérica, e $3,1^{\circ}$ ($\equiv 3^{\circ}4'$) obtidos no cálculo analítico, sendo objetivo que este possa ser o ângulo de compensação necessário ter na Matriz.

Capítulo 5

Desenho, produção e ensaio da ferramenta em ambiente industrial

5.1. Modelação 3D da ferramenta

5.1.1. Desenvolvimento do protótipo virtual

O protótipo virtual é realizado através de um sistema de ajuda computacional ao desenho CAD, pelo programa de modelação *CATIA*® V5 são modeladas, em 3D, as principais peças que constituem a ferramenta:

- Matriz;
- Contra matriz.

As restantes peças que constituem o conjunto de ferramenta (ver Figura 73), considerados acessórios, encontram-se já modelados devido a serem produtos utilizados com frequência na indústria:

- Casquilho Din179 B5;
- Casquilho Din179 B6;
- Pino 5;
- Pino 6.

De forma que o comportamento da ferramenta seja eficaz no seu processo de estampagem, existem algumas especificações preliminares que se devem ter em ponderação no desenho da ferramenta aquando modelação, tais como:

- Raio de curvatura na zona a conformação (estudado no Capítulo 4);
- Ângulo de compensação (estudado no Capítulo 4);
- Zonas de não sobreposição entre os produtos modelados (princípio geral);
- Eliminação de arestas vivas em zonas críticas que influenciem pressão sobre a borracha do tapete usado no processo de conformação (princípio de aumento de durabilidade).

A topo da Matriz é desenhada para receber a chapa previamente cortada, e é modelada considerando as especificações definidas (Figura 69) e para receber os acessórios identificados anteriormente que permitam a correta montagem com aperto (Figura 70).

A base da Contra Matriz é desenhada para apoiar sobre a chapa, modelada considerando as especificações definidas (Figura 71) e para receber os acessórios identificados anteriormente que permitam a correta montagem (Figura 72).

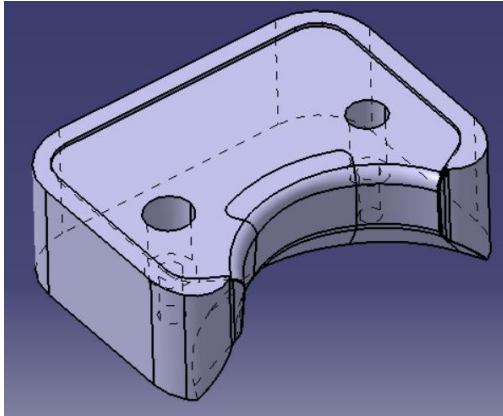


Figura 69 - Matriz

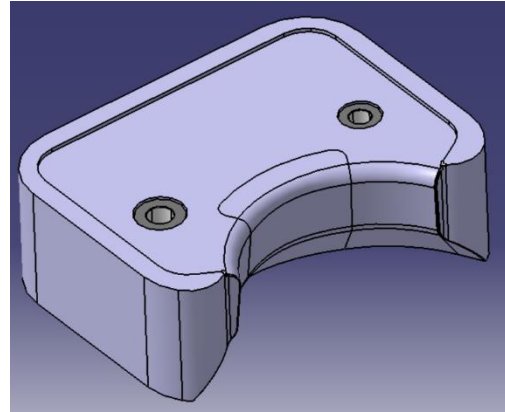


Figura 70 - Subconjunto Matriz e Casquilhos

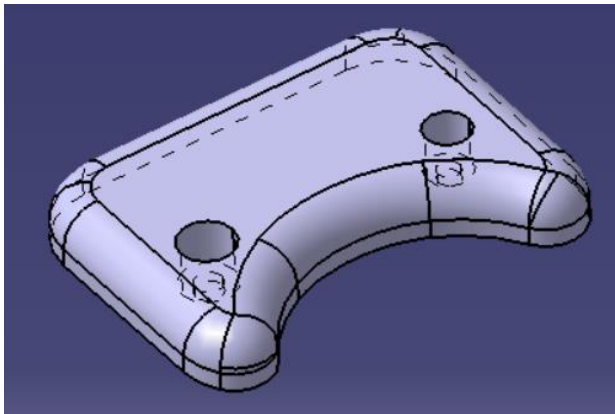


Figura 71 - Contra Matriz

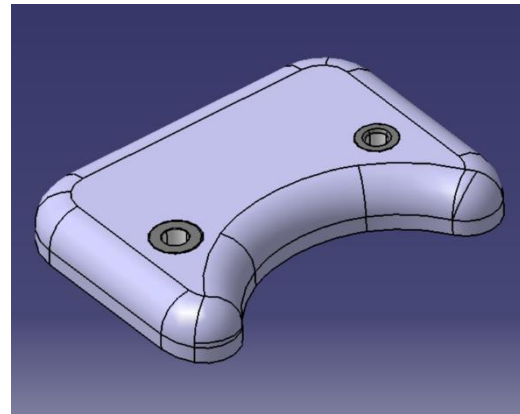


Figura 72 - Subconjunto Contra Matriz e Casquilhos

5.1.2. Montagem virtual

Através do programa de modelação CATIA® V5 são montadas todas as diferentes peças da ferramenta de forma a verificar que são garantidas todas as especificações. Na Figura 73 pode-se visualizar, em vista explodida, todos os elementos que completam o conjunto do produto Ferramenta.

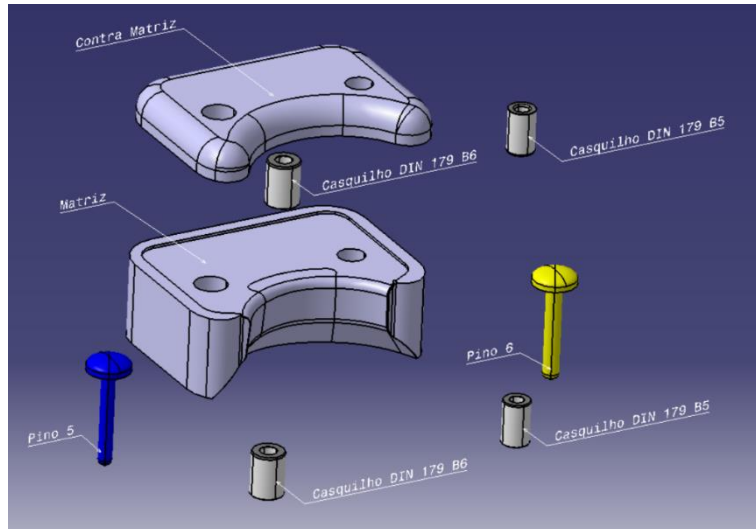


Figura 73 - Vista explodida do conjunto final montado do produto (Ferramenta) em modelação 3D.

5.2. Desenho 2D da ferramenta

5.2.1. Vistas dos desenhos da Matriz e Contra Matriz

Através do programa de modelação *CATIA®* são desenhadas em 2D as peças Matriz e Contra Matriz da ferramenta. O fluxo de trabalho é gerar o desenho 2D através do modelo 3D. Através do desenho 2D é elaborada a cotação das dimensões da peça que serão úteis para os passos seguintes, como seja o controlo dimensional. Desenho da Matriz (ANEXO 2) e Desenho da Contra Matriz (ANEXO 3).

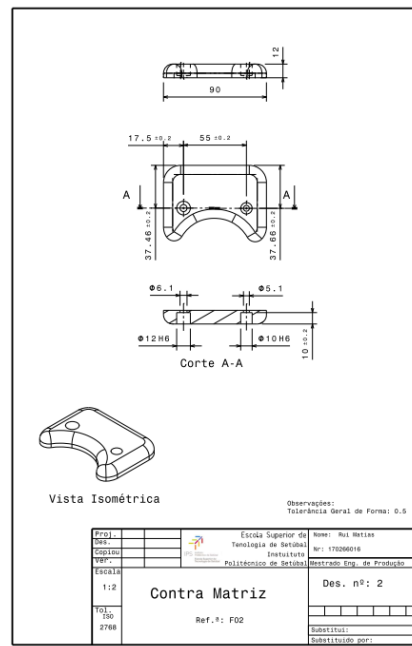
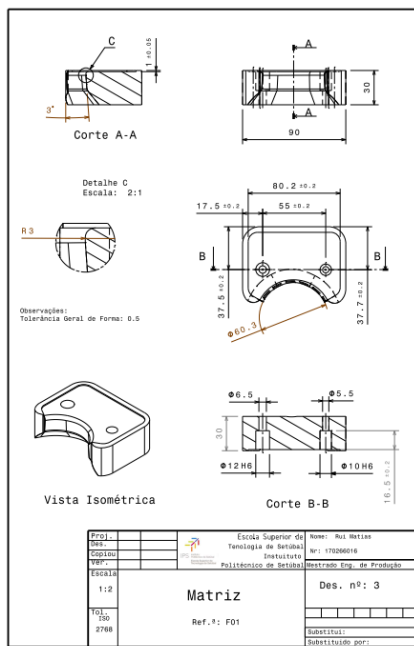


Figura 74 - Desenho técnico da Matriz Ref.ª: F01.

Figura 75 - Desenho técnico da Contra Matriz Ref.ª: F02

5.3. Equipamento de impressão

5.3.1. Especificações da impressora 3D

A impressora utilizada para produzir a ferramenta pelo método de FDM® é o modelo *One MKII* da marca portuguesa *BLOCKS*®.

Este equipamento, representado na Figura 76, encontra-se disponível no InLAB da ESTS e possui as seguintes especificações:

- Volume de impressão: 210 x 210 x 210 mm
- Resolução do Bico de Impressão 0,4 mm: 20-200 microns
- Plataforma de impressão: Prato de vidro
- Calibração: Automática
- Diâmetro de filamento: 1,75 mm
- Temperatura do Bico de Impressão: 170 °C a 275 °C
- Temperatura do Prato: 30 °C a 90 °C
- Tempo de aquecimento do Bico de Impressão: 1 minuto aprox.
- Tempo de aquecimento do Prato: 2 minutos aprox.
- Velocidade de impressão: 60 mm/s
- Velocidade de deslocamento: até 200 mm/s
- Temperatura ambiente de funcionamento: 15 °C a 30 °C
- Temperatura para armazenamento: 5 °C a 35 °C
- Materiais: PLA, Flex, ABS, PETG, HIPS, ASA
- Meio preferencial de impressão: Cartão SD
- Software: Cura, Simplify 3D, Slic3r

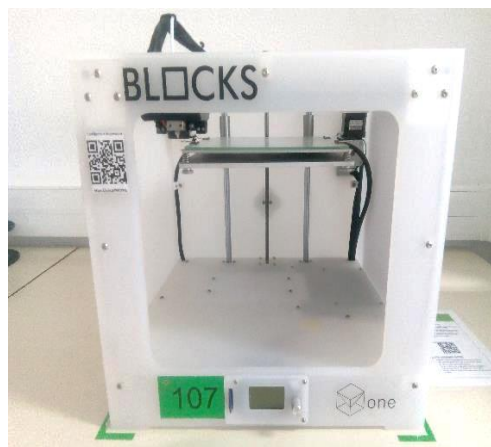


Figura 76 - Equipamento utilizado para impressão 3D.

5.3.2. Preparação do processo de impressão

O comportamento da impressora é importante para que se possa conhecer as limitações da tecnologia de impressão FDM®, do material PLA e do próprio equipamento de impressão utilizado.

Existem alguns aspetos intrínsecos ao processo de fabrico por impressão 3D que é essencial ter em consideração, tais como:

- Preparação da orientação adequada das peças no tabuleiro da impressora (Figuras 77 e 78).

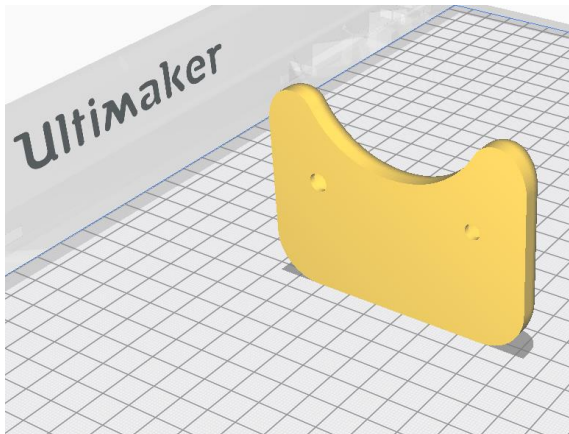


Figura 77 - Exemplo orientação impressa em posição vertical.

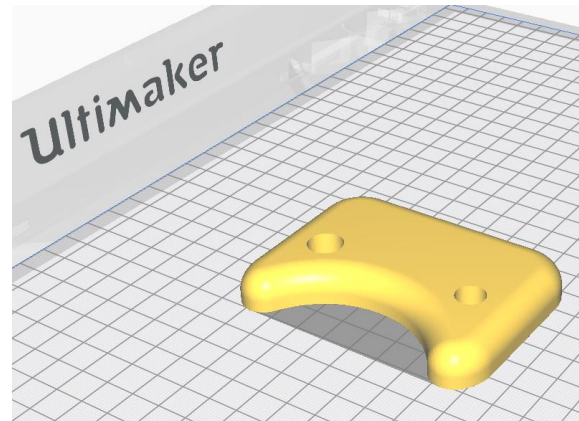


Figura 78 - Exemplo orientação impressa em posição horizontal.

- Ângulo de preenchimento do depósito de material pelo bico de impressão;
- Ângulo acentuado de impressão;
- Definição dos parâmetros de impressão:
 - Espessura da camada: permite estabelecer o nível de qualidade que pretendemos dar ao produto, pois valores altos de espessura podem imprimir mais rápido a um nível de resolução menor, assim como valores baixos de espessura podem imprimir menos rápido a um nível de resolução maior (Figuras 79 e 80).

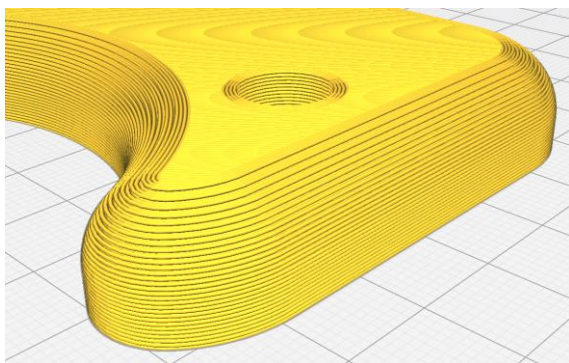


Figura 79 - Exemplo espessura da camada 0,4mm (total de camadas = 30).

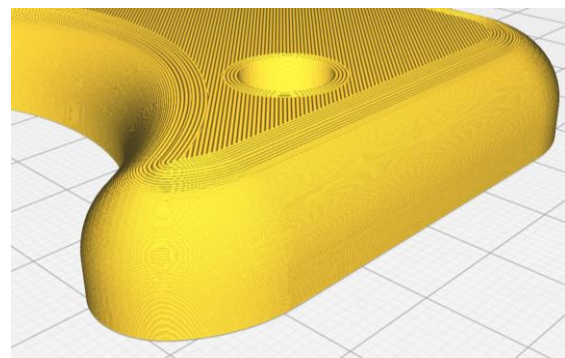


Figura 80 - Exemplo espessura da camada 0,1mm (total de camadas = 119).

- Paredes da impressão: permite definir a camada da casca da peça, ao nível de espessura, número de camadas, distancia entre camadas, e é relacionada com a resolução da superfície exterior pois para uma espessura da camada maior a rugosidade da superfície aumenta e para uma espessura da camada menor a rugosidade da superfície diminui (Figuras 81 e 82).

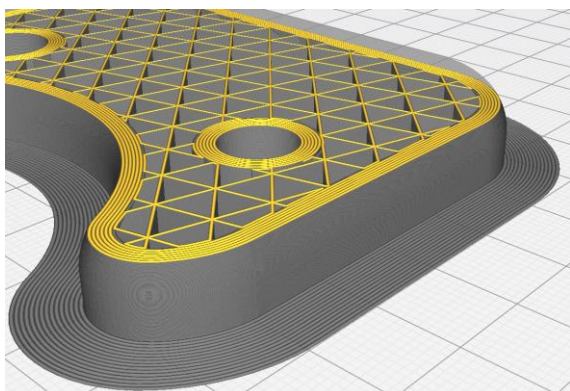


Figura 81 - Exemplo espessura da parede 2,5 mm.

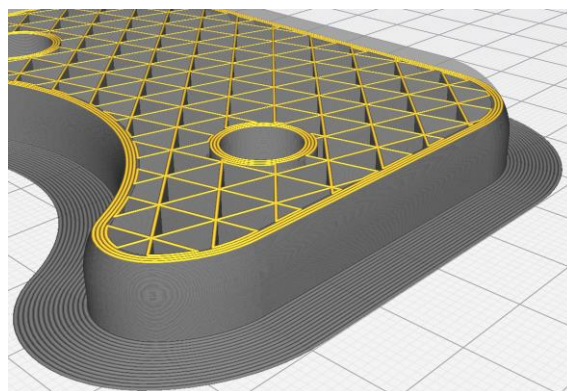


Figura 82 - Exemplo espessura da parede 1,2 mm.

- Enchimento: permite definir como é preenchido o interior da peça na sua impressão, tem dois aspetos importantes:
 - Em termos de densidade do preenchimento, pois relaciona o volume de espaço vazio e o volume de material da estrutura interior, quanto menor valor, mais oca é a peça, e quanto maior valor mais sólida (Figuras 83 e 84).

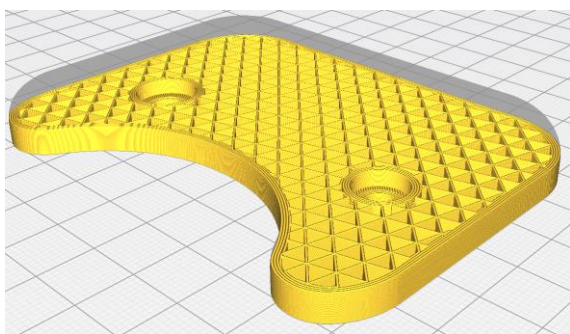


Figura 83 - Exemplo densidade preenchimento 30 %.

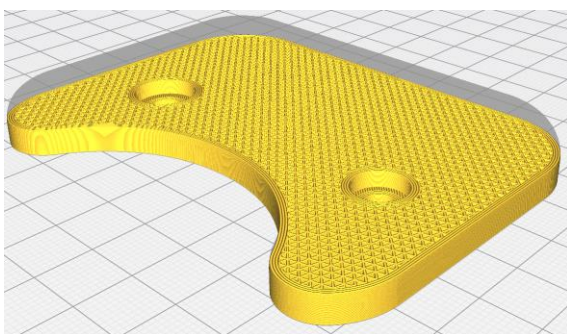


Figura 84 - Exemplo densidade preenchimento 80 %.

- Em termos de padrão, pois este padrão pode ter várias formas geométricas, como as triangulares, lineares, cúbicas, e relaciona o resultado final de resistência mecânica da peça impressa (Figuras 85 e 86).

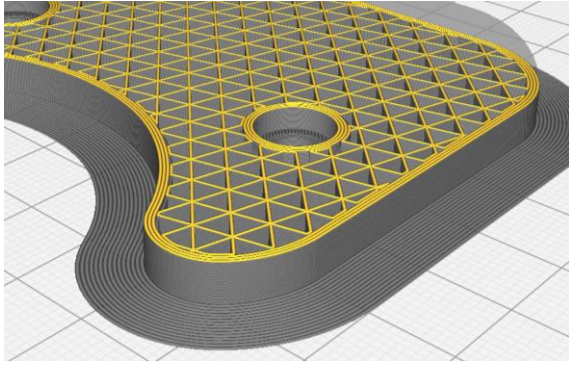


Figura 85 - Exemplo padrão triangular.

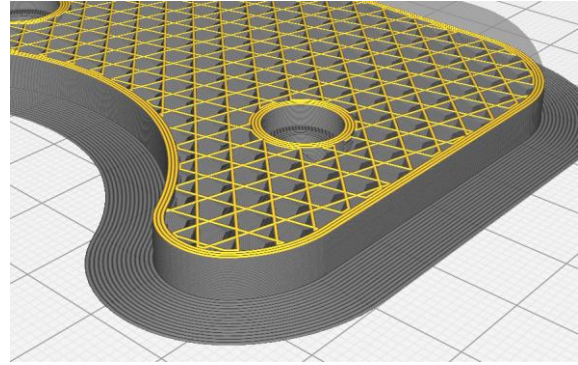


Figura 86 - Exemplo padrão cúbico.

- Temperaturas de impressão: permite definir o calor transmitido do bico da impressora ao material, e está relacionada diretamente com o tipo de material a imprimir, a sua densidade e sua fluidez.
- Temperatura do prato: permite definir a forma como as primeiras camadas se estabelecem ao prato de impressão, normalmente associada a velocidades baixas nestas camadas iniciais.
- Velocidade de impressão: é a velocidade da cabeça de impressão, e afeta o tempo de impressão e nível de acabamento, importante para a função da peça final pretendida, e em caso extremos podendo levar a imperfeição das camadas e rotura estrutural da peça impressa.

De forma a ter o melhor rigor, é efetuado um processo de preparação para impressão, que consiste em calibrar a impressora, definir parâmetros adequados, imprimir, medir, e ajuste. Com recurso ao programa Cura da *ULTIMAKER*®, de forma a analisar o comportamento, é utilizado um modelo CAD específico, Figura 87, contendo geometrias quadrangulares, retangulares, circulares, e angulares.

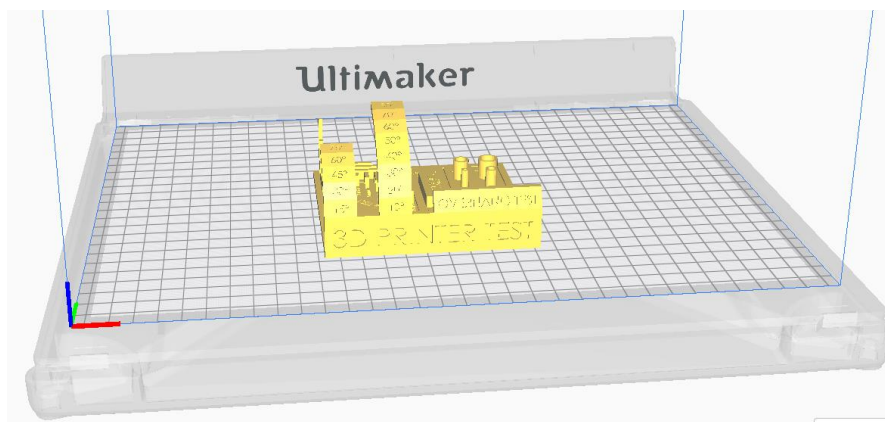


Figura 87 - Peça virtual do modelo de teste de precisão da impressão 3D.

A primeira parte do processo de preparação da impressora é efetuada por auto calibração da *BLOCKS*.

O seguinte passo é definir os parâmetros desejados, ao qual se consideraram:

- Espessura da Camada: 0,15 mm
- Densidade do Preenchimento Interior: 20 %
- Padrão do Preenchimento Interior: Triângulo
- Temperatura do Bico de Impressão: 200 °C
- Temperatura do Prato: 50 °C
- Velocidade de Impressão: 30 mm/s
- Material: Generic PLA

O programa Cura gera automaticamente o código “G” e ficheiro executável na extensão .gcode que servirá para utilizar na impressão 3D, assim como dá ao utilizador uma previsão dos elementos:

- Tempo de Impressão: 5h23m
- Consumo de material: 65 g . 8,20 m

É executado na impressora 3D, o ficheiro .gcode que se pretende imprimir a peça para o estudo do funcionamento da impressora e a mesma é impressa tal como apresentado na Figura 88.

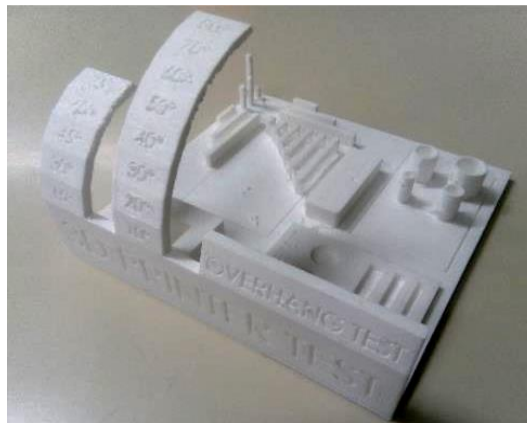


Figura 88 - Peça real do modelo de teste de precisão da impressão 3D.

Com este teste conclui-se que o equipamento tem um bom comportamento para a maior parte dos elementos geométricos quadrangulares, retangulares, e circulares, verificando-se visualmente que em elementos com ângulos superiores a 50° apresenta deformações. Isto significa que estas geometrias de tipo de ângulos levem à necessidade de construção de uma estrutura de suporte, que será removida após a produção da peça principal, mas que implica um aumento do tempo e dos custos de produção e possível redução de qualidade, dado que requer retrabalho de remoção de material. No caso particular das ferramentas de estampagem, devido às suas características geométricas não serão necessários suportes.

5.4. Produção da Ferramenta Protótipo - FP

5.4.1. Impressão da FP

Para produção da ferramenta protótipo (FP), com recurso ao Cura, escolhe-se a estratégia de impressão.

Existem parâmetros que são variáveis e diferenciais na definição do acabamento de qualidade da peça, pelo que o programa requer algum conhecimento do utilizador.

Na tabela 26 são representadas parâmetros principais considerados para a impressão da FP:

Tabela 26 - Parâmetros utilizados na impressão da FP.

Espessura da Camada [mm]	0,15
Densidade do Preenchimento Interior [%]	100
Padrão do Preenchimento Interior	45º/-45º
Temperatura do Bico de Impressão [°C]	215
Temperatura do Prato [°C]	50
Velocidade de Impressão [mm/s]	30
Material	Generic PLA

Na Figura 89 pode-se ver a ilustração do programa na fase de simulação do processo de impressão.

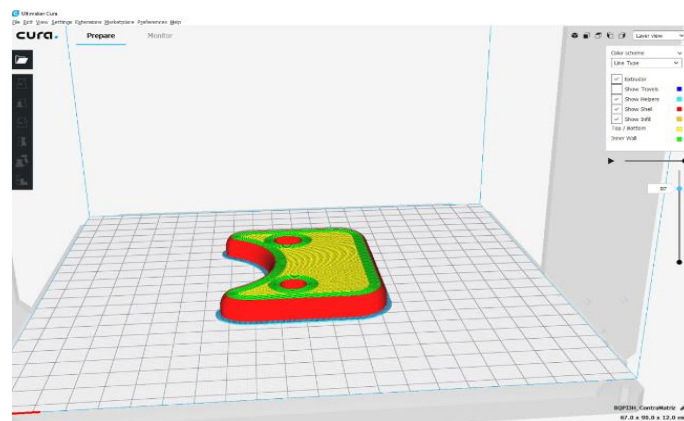


Figura 89 - Ilustração da simulação de impressão no programa Cura.

Após a parametrização é gerado o código “G” que permite dar instruções à impressora para imprimir.

Na Figura 90 é visualizada a impressão a decorrer formando o sólido fisicamente, e na Figura 91 o resultado final com as peças impressas.

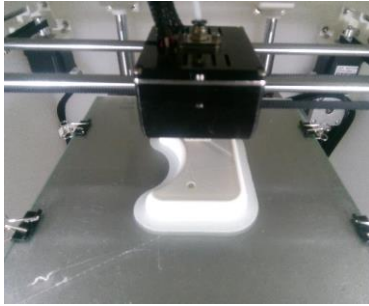


Figura 90 - Peça real (Contra Matriz) em produção.



Figura 91 - Peças reais (Matriz, Contra Matriz) produzidas.

5.4.2. Controlo dimensional da FP

Numa análise às principais dimensões, é utilizado um recurso adequado, o equipamento de medição Projetor de Perfis. No presente estudo utilizou-se o equipamento visualizado na Figura 92 e 93, um Projetor de Perfis, modelos *PJ-A3000 Series*, da marca *MITUTOYO*® presente na sala de metrologia da ESTS.



Figura 92 - Projetor de perfis MITUTOYO presente na sala de medição da ESTS.

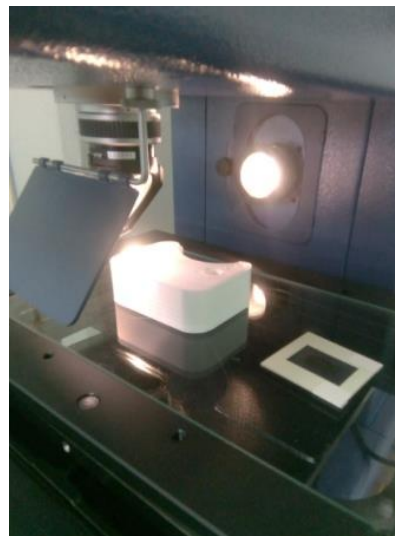


Figura 93 - Matriz em medição no projetor de perfis.

É efetuado um registo, apresentado na tabela 27, com dados do controlo dimensional às principais características dimensionais projetadas em cada uma das peças da FP, a Matriz e Contra Matriz.

Tabela 27 - Tabela de controlo dimensional da FP.

	Característica	Dimensão Nominal [mm]	Medição Dimensional [mm]	Diferença Nominal / Medição [mm]
MATRIZ	1	12,00	11,91	-0,09
	2	10,00	9,92	-0,08
	3	80,20	79,88	-0,32
	4	90,00	90,00	0,00
	5	5,10	5,09	-0,01
	6	6,10	5,71	-0,39
	7	55,00	54,89	-0,11
CONTRA MATRIZ	1	12,00	11,76	-0,24
	2	10,00	9,74	-0,26
	3	90,00	90,02	0,02
	4	55,00	54,83	-0,17
	5	5,10	4,73	-0,37
	6	6,10	5,78	-0,32

Verifica-se um desvio para negativo da maior parte das características, com um valor máximo 0,37 mm, tal como apresentado na Figura 94.

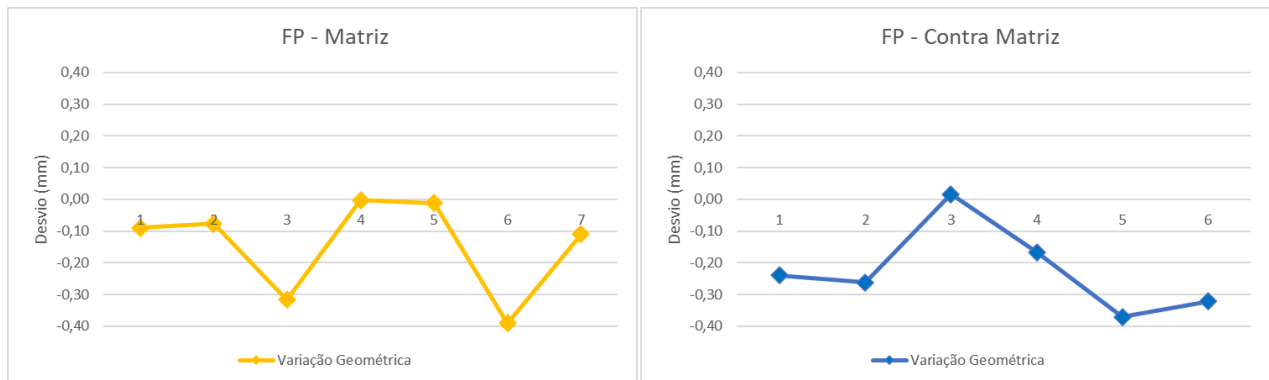


Figura 94 - Variação das características dimensionais principais da FP.

No caso prático efetuado, aos resultados obtidos do primeiro ensaio com a FP, e para as características dimensionais gerais da ferramenta, vai de encontro com o expectável, pois na fase de projeto da ferramenta é comum aplicar uma folga de encaixe de 0,3 mm entre as peças a montar, portanto permite este passo avançar para a produção da Ferramenta Protótipo Funcional.

No entanto podem ser tomadas medidas de melhorias nos parâmetros de impressão 3D que melhorem o comportamento geométrico e não altere a condição de funcionalidade final.

5.5. Produção da Ferramenta Protótipo Funcional - FPF

5.5.1. Impressão da FPF

Dados os resultados positivos da Ferramenta Protótipo, prepara-se a Ferramenta Protótipo Funcional para o ambiente de ensaio em prensa.

É tido como principal fator da estratégia de impressão, a alteração na parametrização da densidade do preenchimento interior.

Na Tabela 28 são representadas as parametrizações principais consideradas para a impressão da FPF.

Tabela 28 - Parâmetros utilizados na impressão da FPF.

Espessura da Camada [mm]	0,1
Densidade do Preenchimento Interior [%]	100
Padrão do Preenchimento Interior	45°/-45°
Temperatura do Bico de Impressão [°C]	215
Temperatura do Prato [°C]	60
Velocidade de Impressão [mm/s]	30
Material	Generic PLA

Após a parametrização é gerado novo código “G” para impressão, e efetuada a impressão da matriz e contra matriz.

5.5.2. Controlo Dimensional da FPF

Com recurso a um equipamento de Medição Tridimensional, pode-se obter uma análise dimensional a aspetos que no equipamento Projetor de Perfis não tem capacidade sem destruição do produto.

Esses aspetos principais são:

- Planicidade superficial da área de assentamento da peça a conformar;
- Ângulo da dobra da peça a conformar.

Com recurso a uma máquina de medição tridimensional (CMM - *Coordinate Measuring Machine*), apresentado na Figura 95, elaborou-se uma medição à matriz da ferramenta.

Este é um equipamento da marca ZEISS®, modelo *PRO T*, presente em empresa *SMP Automotive Technology Portugal, S.A.*, estando este equipado com o programa de medição *Metrolog®*.



Figura 95 - Equipamento CMM utilizado para medição da Matriz.

Para uma correta medição são efetuados os seguintes passos pelo técnico de metrologia:

1. Fixação da peça à mesa da máquina;
2. Abrir o modelo CAD através do programa *Metrolog*;
3. Definição de pontos para isostatismo, conhecido como RPS – *Reference Point System*;
4. Efetuar medição às características em análise;
5. Gerar relatório de medição.

Na Figura 96 pode-se visualizar a definição dos RPS que permite dar o isostatismo virtual necessário para elaborar uma correta medição da peça.

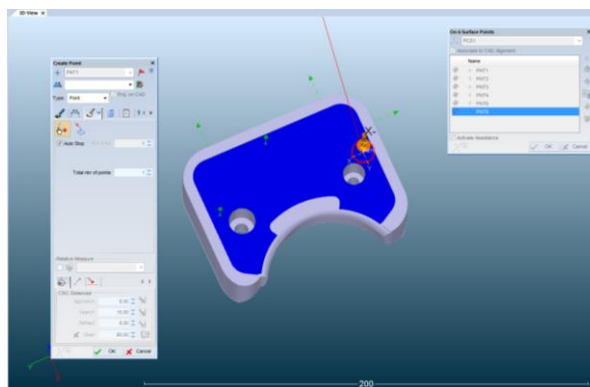


Figura 96 - Definição de RPS para controlo dimensional da matriz em CMM.

Os dados de representação do relatório dimensional gerado na CMM após medição encontram-se em detalhe no ANEXO 4.

De acordo com os resultados obtidos, é elaborada a avaliação aos pontos de superfície onde assenta

a chapa antes do processo de estampagem, assim como é elaborada a avaliação aos pontos de superfície onde será efetuada a dobra das duas abas da peça durante o processo de estampagem.

De acordo com os pontos de superfície ilustrados na Figura 97, e de acordo com o relatório dimensional obtido, na Figura 98 está representado graficamente o comportamento geométrico, onde se verifica que a maior parte dos pontos tem estabilidade geométrica dentro das tolerâncias estabelecidas de forma a não comprometer a planicidade da superfície e evitar deformação ao exercer pressão no processo de estampagem.

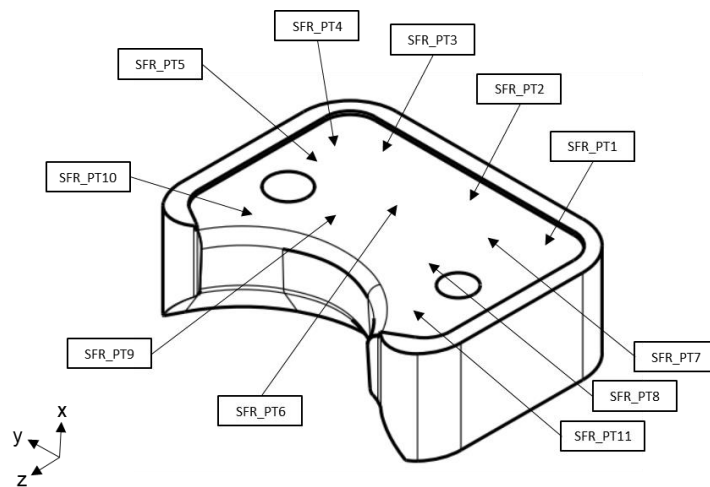


Figura 97 - Ilustração dos pontos de superfície na zona de assentamento da chapa.

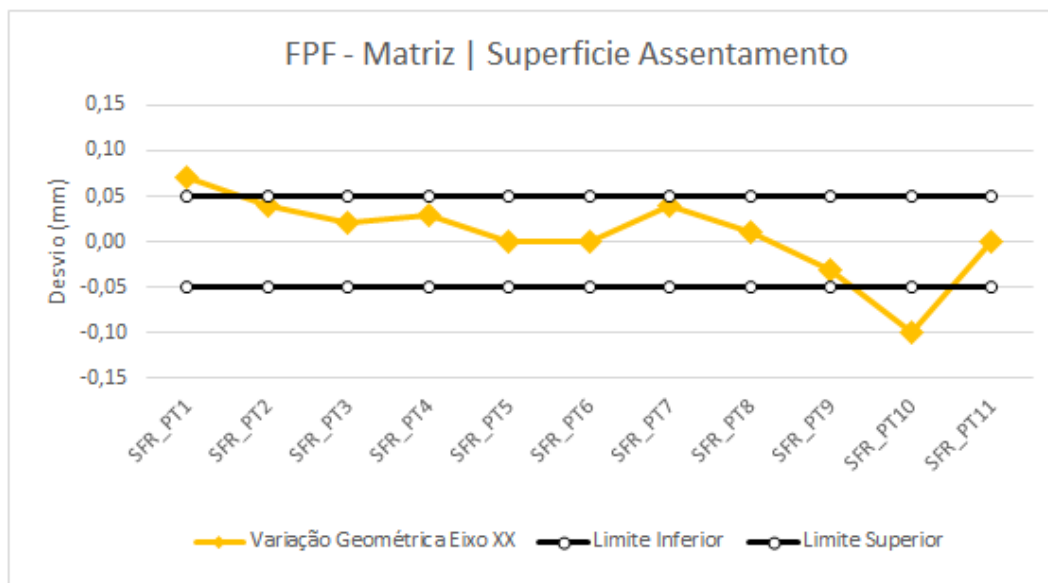


Figura 98 - Resultado dimensional da matriz, zona assentamento da chapa.

De acordo com os pontos de superfície ilustrados na Figura 99, e em concordância com o relatório dimensional obtido, na Figura 100 está representado graficamente o comportamento geométrico na zona de dobra da chapa, aba esquerda, onde se verifica que alguns pontos se encontram fora das tolerâncias estabelecidas, o que indica que pode afetar o processo no resultado de retorno elástico do material.

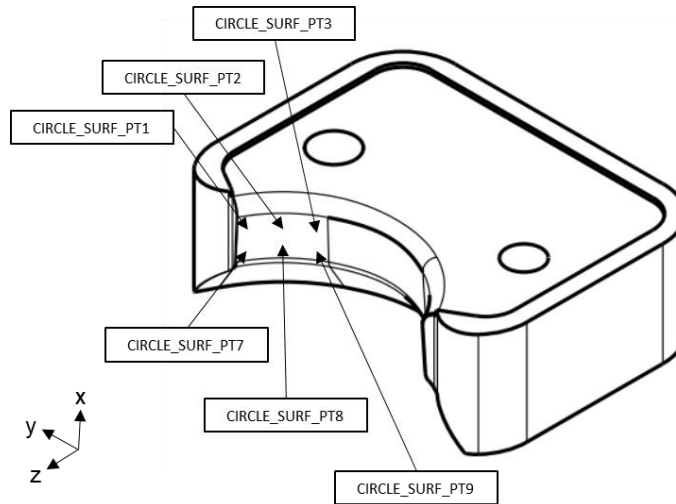


Figura 99 - Ilustração dos pontos de superfície na zona de dobra do lado esquerdo da chapa.

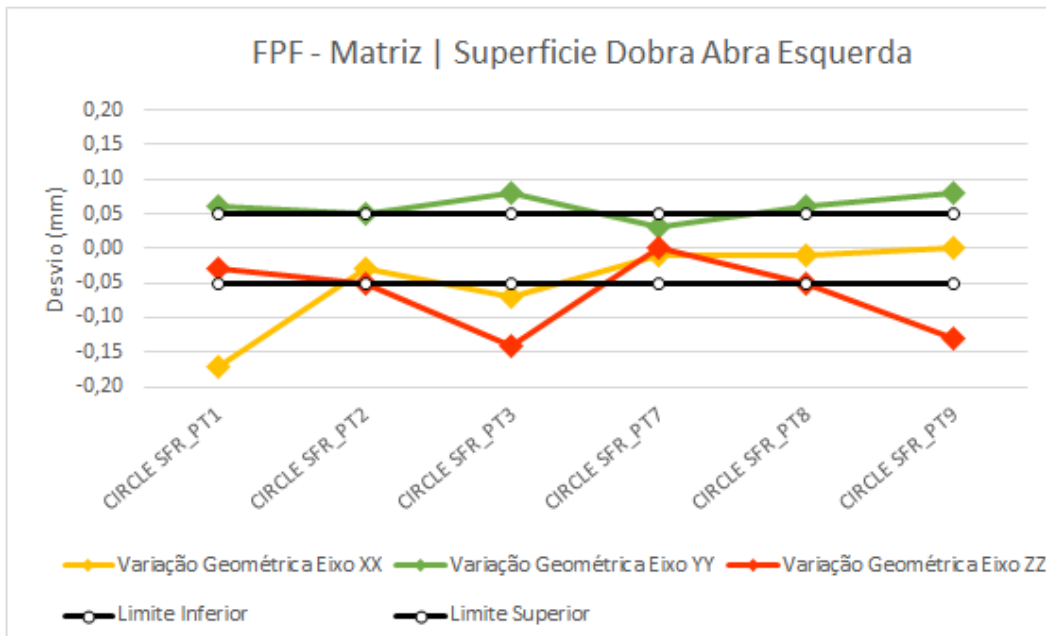


Figura 100 - Resultado dimensional da matriz, zona de dobra do lado esquerdo da chapa.

Igualmente analisado para o lado direito da dobra da chapa, e de acordo com os pontos de superfície ilustrados na Figura 101, e em concordância com o relatório dimensional obtido, na Figura 102 está

representado graficamente o comportamento geométrico na zona de dobra da chapa, aba esquerda referida, onde se verifica um maior número de pontos fora das tolerâncias estabelecidas, o que indica que pode afetar significativamente o processo no resultado de retorno elástico do material.

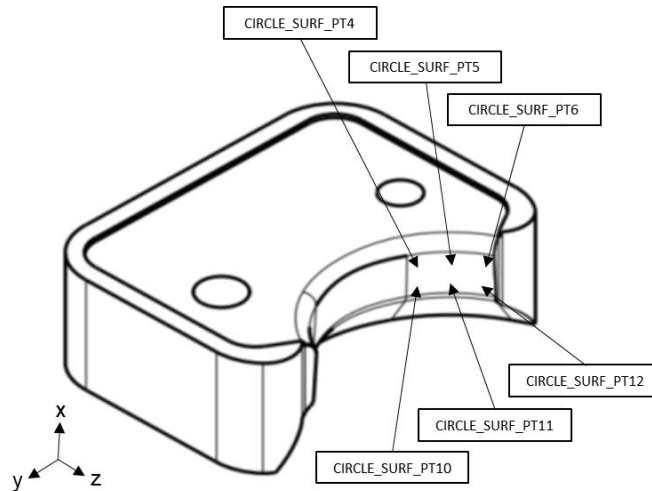


Figura 101 - Ilustração dos pontos de superfície na zona de dobra do lado direito da chapa.

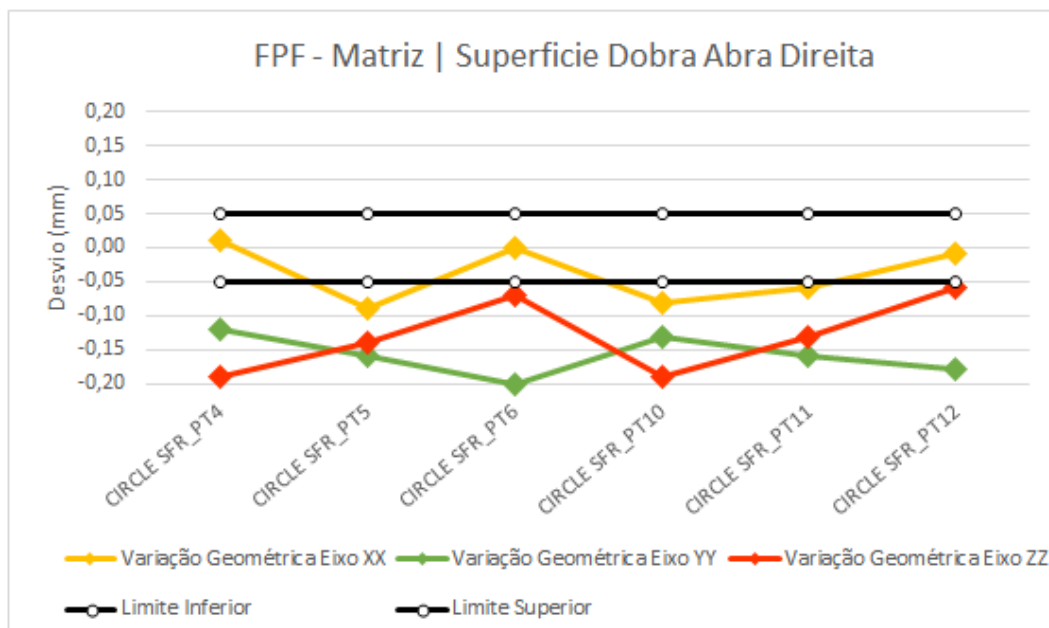


Figura 102 - Resultado dimensional da matriz, zona de dobra do lado direito da chapa.

5.6. Ensaio da FPF em ambiente industrial

5.6.1. Ensaio da FPF em prensa industrial por processo *rubber forming*

O ensaio à FPF obtida por impressão 3D, é realizado fisicamente com recurso a um equipamento industrial, apresentado na Figura 103, prensa modelo ACB da *Aries Alliance Company*®, tipo Loire EMC (*Elastoforming Press*) BP 4200T.

Este equipamento debita um máximo 4200 toneladas força, uma pressão máxima de 200 bar, está presente na empresa LAUAK. Este equipamento é possuidor de recursos exclusivos, tais como:

- Alta produtividade;
- Troca de ferramenta fácil e rápida;
- Equipada com almofadas de elastómero padrão;
- Baixo custo, rápida, e fácil manutenção.

Como referido, o equipamento utiliza o processo *rubber forming*, e é empregue para efetuar a estampagem da peça do componente estrutural a produzir.



Figura 103 - Prensa por processo *rubber forming* utilizada para ensaio pratico.

A preparação de entrada de ferramenta na prensa é efetuada em várias etapas, utilizando o equipamento de segurança correto pelo operador de máquina, sendo que o conjunto da ferramenta, tal como visualizado na Figura 104, é posicionado de forma a garantir um correto processo de *rubber forming*.



Figura 104 - Posicionamento da ferramenta na prensa.

De forma a obter um resultado aceitável, i.e, peça estampada e ferramenta intacta tal como apresentado Figura 105, o procedimento de trabalho é dado pelas etapas listadas e sequenciadas da seguinte forma:

A. Preparação fora da máquina

1. São aplicados, com auxílio de martelo, os casquilhos nos furos passantes;
2. É colocada manualmente, sobre a matriz, a peça a conformar;
3. É colocada manualmente, sobre a peça a conformar, a contra matriz;
4. São colocados manualmente os pinos pelos furos passantes;

B. Preparação em máquina

1. É colocado manualmente o conjunto Ferramenta + Peça a conformar sobre a mesa da prensa;
2. É colocado manualmente o tapete de poliuretano (borracha natural) sobre o conjunto;

C. Ciclo em automático

1. É acionado manualmente o ciclo automático;
2. A mesa avança automaticamente para a prensa;
3. A prensa desce automaticamente em sentido da mesa;
4. A prensa efetuada uma força;
5. A prensa recolhe automaticamente à posição inicial;
6. A mesa recolhe automaticamente à posição inicial;
7. Fim de ciclo.



Figura 105 - Ferramenta e peça estampada após processo de estampagem.

O processo de ensaio é efetuado, sempre, cumprindo com o procedimento de trabalho definido anteriormente, para que o resultado não seja influenciado por alterações em elementos que não sejam a própria ferramenta.

São elaborados 3 ciclos completos, em contínuo, e realizando a produção de um lote amostra de pré-série com total de 3 peças, exemplar visualizado na Figura 106.



Figura 106 - Peça amostra produzida por estampagem através do processo *rubber forming*.

5.6.2. Controlo dimensional do componente estampado

Com recurso a uma máquina de medição que utiliza a tecnologia CT, através de dados digitalizados por varrimento, elaborou-se uma medição às 3 peças estampadas no ensaio em prensa industrial com a ferramenta produzida em impressão 3D.

Este é um equipamento da marca *HEXAGON*[®], modelo *ABSOLUTE ARM 7-AXIS W/ RS6 SCANNER*, apresentado na Figura 107, presente em empresa *SMP Automotive Technology Portugal, S.A.*, estando este equipado com o programa de medição *PolyWorks - Inspector Standard*[®].

Os aspetos principais tidos em consideração nesta avaliação são:

- Ângulo da dobra da peça conformada;
- Raio de curvatura.



Figura 107 - Equipamento CT utilizado para medição do componente estampado.

Para uma correta medição são efetuados os seguintes passos pelo técnico de metrologia:

6. Fixação do equipamento à mesa de trabalho;
7. Abrir o modelo CAD através do programa *PolyWorks*;
8. Definição de pontos para isostatismo RPS;
9. Efetuar medição às características em análise;
10. Gerar relatório de medição.

Os dados de representação do relatório dimensional gerado na CT após medição encontram-se em detalhe no ANEXO 5.

De acordo com os resultados obtidos, é elaborada a avaliação aos pontos de superfície no raio de curvatura da chapa, assim como é elaborada a avaliação aos ângulos formados após estampagem das duas abas da peça, que, como vimos anteriormente sofre um retorno elástico no final do processo.

De acordo com os pontos de superfície ilustrados na Figura 108, e de acordo com o relatório dimensional obtido, na Figura 109 está representado graficamente o comportamento geométrico da curvatura da aba esquerda da peça, onde se verifica que a maior parte dos pontos tem uma aproximação ao limite superior das tolerâncias estabelecidas e que o comportamento melhora residualmente na última peça do teste em processo de estampagem.

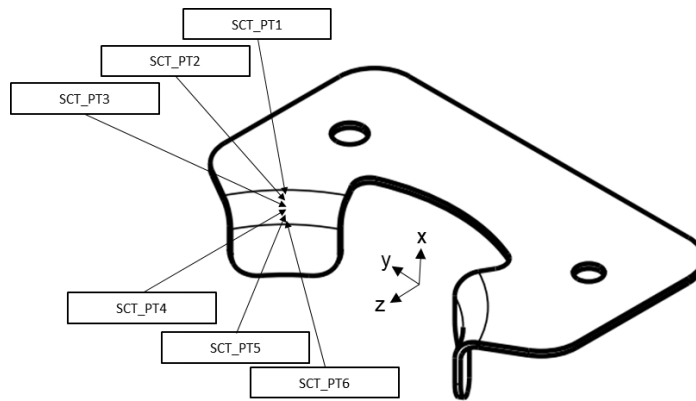


Figura 108 - Ilustração dos pontos de superfície na curvatura da aba esquerda da peça.

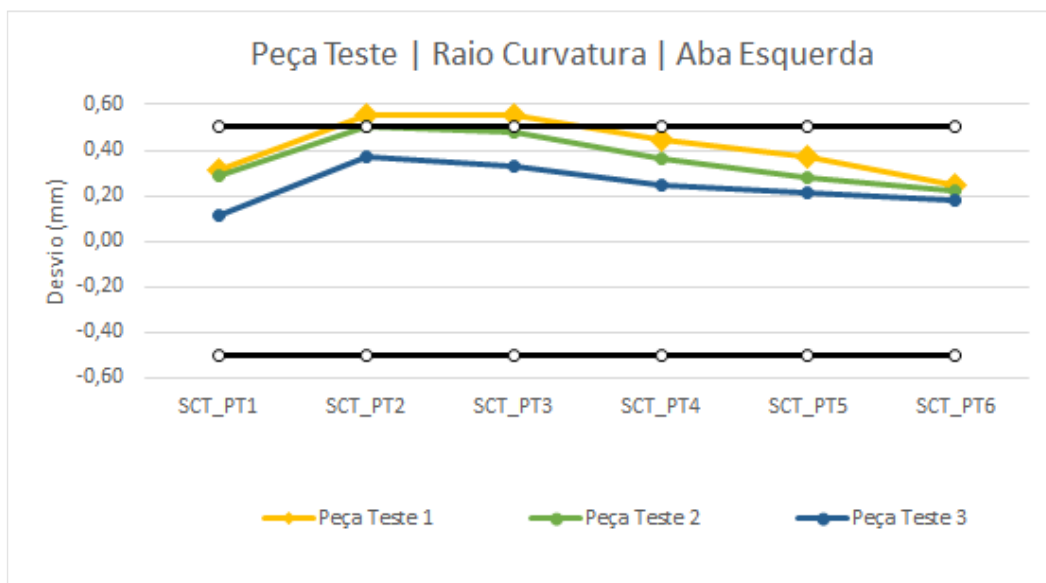


Figura 109 - Resultado dimensional à aba esquerda das peças estampadas .

Igualmente analisado para a aba direita da peça, de acordo com os pontos de superfície ilustrados na Figura 110, e em concordância com o relatório dimensional obtido, na Figura 111 está representado graficamente o comportamento geométrico da curvatura da aba direita da peça, onde se verifica que identicamente com o lado esquerdo, existe uma aproximação dos valores ao limite superior das tolerâncias estabelecidas, sendo que a peça teste 2 e peça teste 3 têm comportamento similar e dentro de tolerâncias.

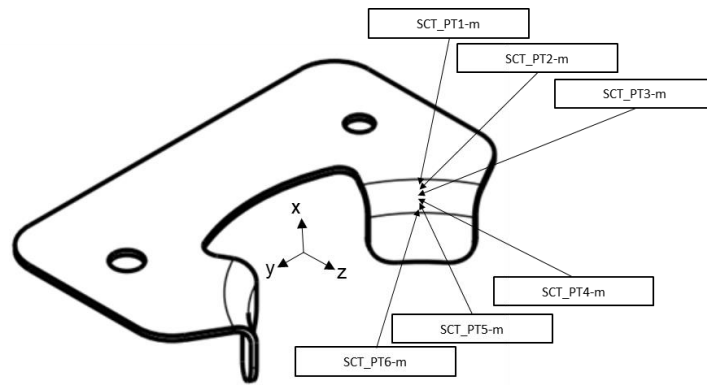


Figura 110 - Ilustração dos pontos de superfície na curvatura da aba direita da peça.

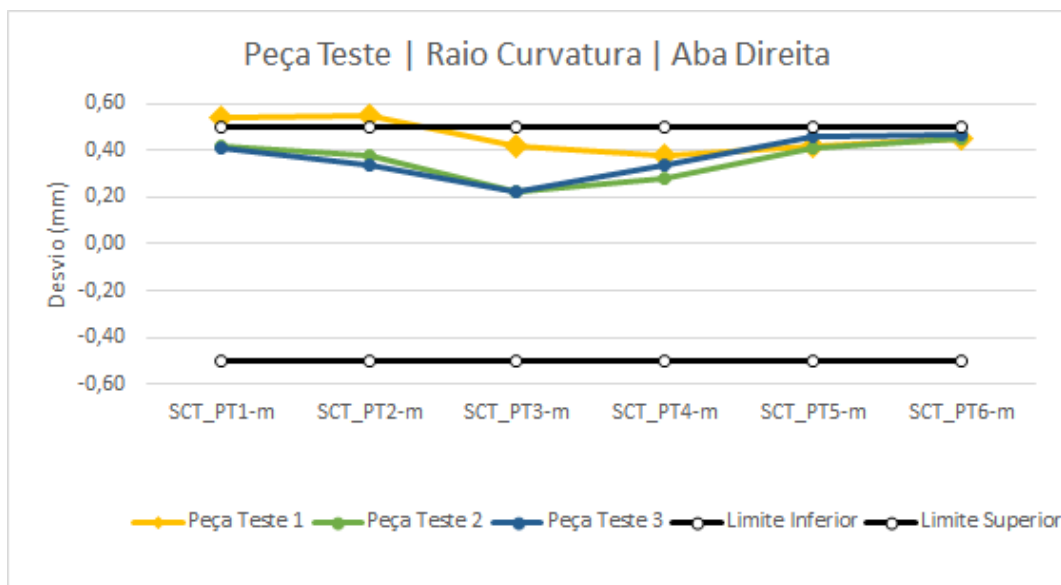


Figura 111 – Resultado do controlo dimensional à aba esquerda das peças estampadas.

Por último é analisado para a aba esquerda e para a aba direita da peça, de acordo com os pontos ângulos ilustrados na Figura 112, igualmente em concordância com o relatório dimensional obtido, na Figura 113 está representado graficamente o comportamento geométrico do ângulo de dobra de cada aba da peça, e após recuperação elástica do material, onde se verifica que a aba esquerda apresenta valores mais próximos do ângulo pretendido dos 90° do que a aba direita, no entanto embora mais afastado do valor pretendido, a aba direita tem mais estabilidade dos ângulos nas diferentes 3 peças produzidas no teste.

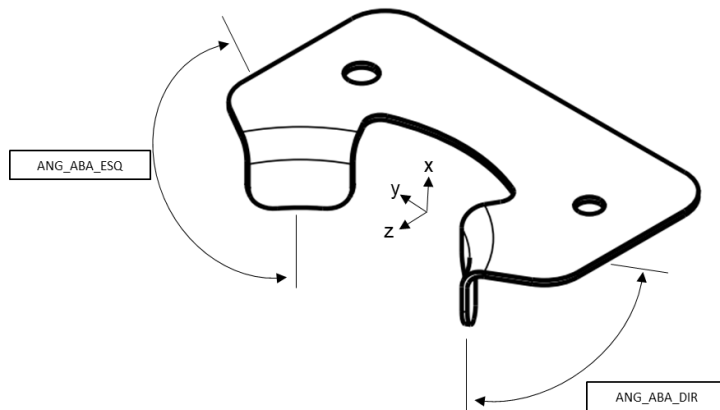


Figura 112 - Ilustração dos ângulos de dobra da peça, após retorno elástico.

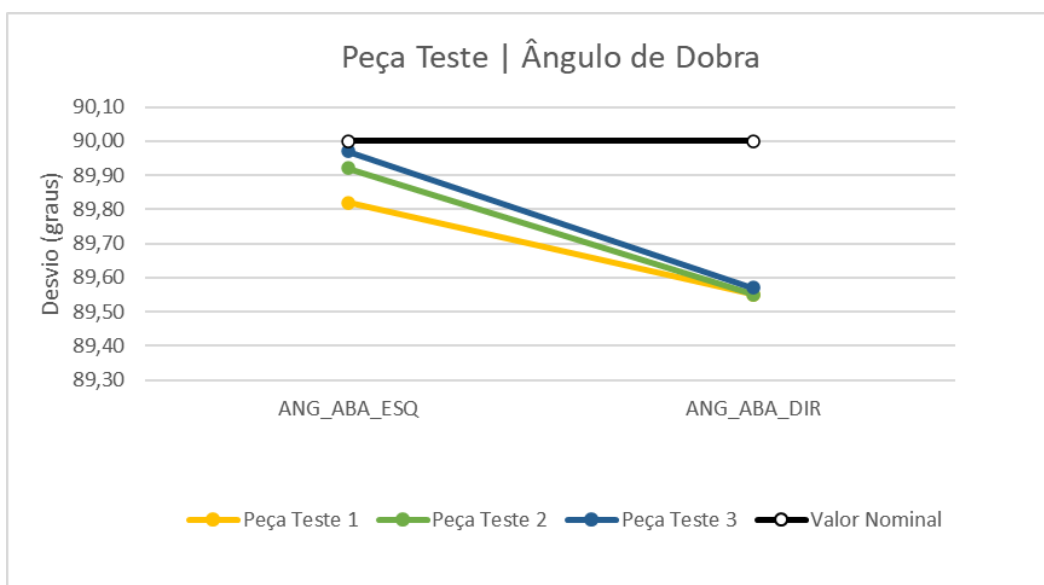


Figura 113 - Resultado dimensional à aba esquerda das peças estampadas .

5.7. Análise aos resultados obtidos

O ensaio à FPF foi repetido num total de 3 ciclos de produção em contínuo, completando um conjunto de 3 peças, e no ensaio completo à FPF verificou-se que a ferramenta manteve as suas dimensões, tendo mantido a sua integridade estrutural, no decorrer do processo de estampagem por *rubber forming*.

A avaliação dimensional à ferramenta e às peças, não apresenta desvios significativos, embora com alguns resultados que se atribuem a erro de tolerâncias atribuídas nos desenhos, e não sendo possível estabelecer uma relação direta entre raio de curvatura da dobra e resultado do retorno elástico.

Desta forma comprovam-se os resultados da análise por elementos finitos à ferramenta para quinagem

de uma chapa idêntica, em que se verificou que as tensões estavam abaixo do limite elástico do material PLA, confirmando-se os resultados da simulação numérica, em que se previa uma tensão máxima à compressão de 28,7 MPa, muito inferior ao limite elástico à compressão do PLA que é de 69,49 MPa.

É apresentado na Tabela 29, a análise de diferença dos valores obtidos analiticamente e experimental do ângulo de dobra após recuperação elástica do material AA2024-O utilizado para o ensaio experimental em prensa industrial. Verifica-se um desvio de valor mínimo 1 % (aba esquerda da peça 3) e valor máximo 18 % (aba direita da peça 1 e 2) entre o valor real e tabela de valor empírico. Através do cálculo analítico verifica-se um desvio de valor mínimo 3 % (aba esquerda da peça 3) e valor máximo 20 % (aba direita de ambas as peças) entre o valor real. Por sua vez, através do MEF, verifica-se um desvio de 4 % (aba esquerda da peça 1) e 9 % (aba esquerda da peça 3). Também existe uma clara alteração de comportamento entre a aba esquerda e aba direita, com valores de diferença mínima e máxima, de 1 % a 9 % na aba esquerda, e 5 % a 20 % na aba direita, o que leva a concluir que o desvio dimensional na matriz da ferramenta, na superfície da zona de dobra das abas (Figura 100 e Figura 102), pode estar associado ao desvios dimensionais entre aba esquerda e aba direita, a somar a outros fatores inerentes ao processo de conformação, além do retorno elástico do material.

Ainda assim os resultados obtidos são considerados muito bons dado que se simulou uma quinagem (modelo 2D) e o ensaio experimental na realidade representa um processo de estampagem, uma vez que a geometria da peça apresenta alguma curvatura.

Tabela 29 - Ângulo de recuperação elástica ensaio real Vs previsão ao material AA2024-O.

RECUPERAÇÃO ELÁSTICA DE DOBRA					
		Tabela Empírica	Cálculo Analítico (R=3mm)	Simulação MEF (R=3mm)	
ÂNGULO TEÓRICO					
		3°	3°07'	2°42'	
ABA_ESQ	1	2°49'	-6%	-9%	4%
	2	2°55'	-3%	-5%	7%
	3	2°58'	-1%	-3%	9%
ABA_DIR	1	2°33'	-18%	-20%	-6%
	2	2°33'	-18%	-20%	-6%
	3	2°34'	-17%	-20%	-5%

Capítulo 6

Conclusões e perspectivas para trabalhos futuros

6.1. Conclusões

A evolução tecnológica é realmente um motor que rodeia a humanidade e, numa era de digitalização, a impressão 3D é possivelmente o processo de fabrico mais popular da sociedade no que se refere a fabrico digital. Os processos convencionais começam a ser substituídos com o decorrer da investigação, da ciência, na exponencial evidência e descoberta da potencialidade de processos não convencionais, não só para uma produção unitária senão para um campo emergente de produção de maiores volumes. A última década tem sido revolucionária e contribuidora para a aplicação destes processos, e tecnologias associadas ao fabrico rápido, sendo que o fabrico rápido de ferramentas surge como fator relevante no potencial de utilização destas técnicas para uma perspectiva de produção, de pelo menos de pré-series.

O presente trabalho fez uso da impressão 3D que, com recurso de uma máquina de fabrico por processo FFF e utilização de um material polimérico, PLA, permitiu a obtenção de uma ferramenta para aplicação de estampagem de peças metálicas em chapa de alumínio, através de processo de estampagem por *rubber forming*. A produção de ferramentas por impressão 3D é considerada como uma técnica para fabrico rápido de ferramentas, descrita por “*Rapid Tooling*”,

Sendo que a revisão bibliográfica elaborada permitiu posicionar o fabrico rápido de ferramentas, principais conceitos envolvidos, as tecnologias, os equipamentos, os materiais relacionados com o fabrico por adição de material, assim como permitiu evidenciar a impressão 3D e o processo FFF como tecnologia do futuro presente, aplicável a várias indústrias, identificando o potencial de poupança em tempo, no caso de ferramentas pequenas os estudos demonstram uma redução de cerca de 85% e uma redução de custo de cerca de 75 %, face a outros processos de fabrico tradicionais como é o caso do CNC, aquando aplicada esta tecnologia em produção de ferramentas pequenas.

Através da aplicação de um processo de desenvolvimento de produto, estabeleceram-se seis fases para chegar da oportunidade à solução apresentada, das quais levaram a cabo a concretização de estudos de materiais e o seu comportamento teórico e real, estudos de CAE, a criação do protótipo virtual com recurso ao CAD e assegurando os requisitos funcionais que foram conceitualizados, a materialização em processo tipo CAM, mas com menor necessidade de R.H. dada a existência de sistemas computadorizados que executam tarefas de pessoas em sistemas convencionais, dando origem ao fabrico em impressão 3D do protótipo físico para análise de limitações e comportamento geométrico, assim como para avaliação de necessidades de melhorias, posterior fabrico do protótipo funcional, e

por fim o ensaio prático da utilização da ferramenta desenvolvida, com a elaboração de 3 peças em produção contínua.

Com base no estudo de materiais para utilização na impressão 3D, foi tido em consideração os fatores densidade, como forma de obter um produto mais leve, com uma redução prevista de peso em 54,1 %, a resistência mecânica suficiente para resistir à função, o custo de compra e o impacto ambiental.

O estudo pelo método dos elementos finitos conseguiu prever com melhor precisão o retorno elástico que teria o material, liga de alumínio em estado recozido AA2024-O, com um desvio máximo de 9 %, valor inferior que o desvio apresentado por outros métodos de cálculo empírico ou analítico. Igualmente pela simulação numérica foi possível determinar a pressão de compressão a que ferramenta estava sujeita durante o processo de *rubber forming*, tendo-se verificado que está abaixo do limite máximo do material.

Considerando-se a resistência à fadiga deste material, estima-se que possa fazer um número de ciclos suficientemente elevado que comporte uma serie completa de fabrico, de pelo menos uma dezena de milhar de unidades, considerando-se muitos componentes aeronáuticos cuja produção raramente ultrapassa mais de um milhar de unidades. Contudo neste estudo não foi considerado eventual desgaste que possa ocorrer na ferramenta.

Do ensaio prático elaborado em prensa, foi possível confirmar a funcionalidade da matriz, dado que a mesma permaneceu consistente durante a execução de 3 ciclos produtivos seguidos, fortalecendo o estudo realizado pelo método dos elementos finitos da matriz da ferramenta. Da simulação numérica previu-se que as tensões estavam abaixo do limite elástico, mesmo para raios de quinagem baixos, estando em linha com os resultados experimentais.

6.2. Perspetivas para trabalhos futuros

Numa prestativa de melhorar e dar continuidade a este trabalho, sugere-se a modelação numérica do processo de estampagem (3D) preferencialmente à quinagem (2D) tida em conta neste trabalho, dado que simulará mais próximo de valores reais, tendo em consideração a inclusão do componente diafragma de borracha em contacto com a chapa do modelo. Igualmente, na simulação sugere-se a introdução de valores reais obtidos em ensaio de laboratório aos materiais utilizados, tanto para a chapa como para a ferramenta. A correção do ângulo de conformação quando a chapa está sujeita na fase de compressão, deve ser simulado, até obter o resultado de retorno elástico na descompressão que resulte na posição (ângulo) final pretendido para a aba estampada.

Uma análise de resistência mecânica, com o estudo do comportamento dos materiais, em um número de ciclos repetidos maior, que pode ser interpretado para aplicação num cenário de produção de pré-series de maior volume unitário.

Ainda se sugere a possibilidade de estudo de desgaste da matriz, perda de resistência e deformação, devido ao eventual aumento de temperatura provocada pelo atrito entre a chapa e a matriz, considerando uma solução a aplicação de tratamento de superfície da matriz para redução de atrito, ou a eventual colocação de incertos metálicos tornando a ferramenta um híbrido, mas para um conceito de produção maior, continuando assim a fortalecer a utilização da Impressão 3D neste tipo de ferramentas.

Poderá também analisar-se a utilização de materiais de um custo de compra maiores que o utilizado neste trabalho, mas capazes de serem impressos com densidade de preenchimento menores, permitindo desta forma obter menor consumo de material e manter a resistência mecânica estrutural da ferramenta para um número de ciclos, suficientemente grande que comporte uma produção completa de uma determinada peça.

Por fim, as fontes naturais são vistas como de potencial elevado no desenvolvimento de novos materiais ou de materiais compósitos conseguindo-se obter preços de produção melhores e mais sustentáveis e de redução das emissões de dióxido de carbono (CO₂).

Bibliografia

- [1] Yan Yongnian, Li Shengjie, Zhang Renji, LIN Feng, Wu Rendong, Lu Qingping, Xiong Zhuo, Wang Xiaohong, "Rapid Prototyping and Manufacturing Technology: Principle, Representative Technics, Applications, and Development Trends", TSINGHUA SCIENCE AND TECHNOLOGY, Volume 14, Number S1, Pages 1-12, 2009.
- [2] T. Mikołajczyk, T. Malinowski, L. Moldovan, Hu Fuwen, T. Paczkowski, Ileana Ciobanu. CAD CAM System for Manufacturing Innovative Hybrid Design Using 3D Printing. The 12th International Conference Interdisciplinarity in Engineering. Procedia Manufacturing 32. 22–28, 2019.
- [3] "Rapid Prototyping Booms, Thanks to Tooling", Machine Design, June 13, pp. 38-39, 1996.
- [4] "New Developments", Rapid Prototyping, Fourth Quarter, Vol. 4, N^o 4, pp. 5, 1998.
- [5] Y. Myers and J. Norton, "Rapid Manufacturing with Rapid Tooling", Prototyping Technology International 98, pp. 30-34, 1998.
- [6] Pedro Vasconcelos, F. Jorge Lino, Rui J. Neto - O Fabrico Rápido De Ferramentas ao Serviço da Engenharia Concorrente, ESTG, FEUP, INEGI · 2000.
- [7] Composite Mold Tools in a Fraction of the Time, 2019, Available at: <http://www.stratasys.com/tooling/composite-tooling>. Accessed 23.02.2022.
- [8] Grimm, T. User's guide to rapid prototyping, Dearborn, Michigan, Society of Manufacturing Engineers, 2004.
- [9] Hopkinson, N. and P. Dickens. "Analysis of rapid manufacturing - Using layer manufacturing processes for production", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, Vol.217, No. 1, pp.31-40, 2003.
- [10] Z. Yang, R. A. Wysk, S. Joshi, M. C. Frank, and J. E. Petzelka. Conventional Machining Methods for Rapid Prototyping and Direct Manufacturing. International Journal of Rapid Manufacturing, 2009.
- [11] Ferreira, Hugo Gameiro. Desenvolvimento de ferramentas por impressão 3D para estampagem de peças em chapa de alumínio. Mestrado em Engenharia de Produção, 2021.
- [12] Barry Berman, "3-D printing: The new industrial revolution", Volume 55, Issue 2, Pages 155-162, 2012.
- [13] Ryan C. Dizon, Alejandro H. Espera Jr., Qiyi Chen, Rigoberto C. Advincula. "Mechanical characterization of 3D-printed polymers", Additive Manufacturing, Volume 20, Pages 44-67, 2018.
- [14] Pham, D. T., & Gault, R. S. - A comparison of rapid prototyping technologies. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1998.

- [15] Carlos Relvas. O Mundo da Impressão 3D e o Fabrico Digital. Quântica Editora – Conteúdos Especializados, Lda, 2018.
- [16] Abbas Razavykia, Eugenio Brusa, Cristiana Delprete, Reza Yavari. An Overview of Additive Manufacturing Technologies - A Review to Technical Synthesis in Numerical Study of Selective Laser Melting. *Materials*, 2020.
- [17] Manapat, J.Z.; Chen, Q.; Ye, P.; Advincula, R.C. Advincula, and Engineering. 3D printing of polymer nanocomposites via stereolithography. *Macromol. Mater. Eng.* 302, 2017.
- [18] Kruth, J.P.; Wang, X.; Laoui, T.; Froyen, L. Lasers and materials in selective laser sintering. *Assem. Autom.* 23, 357–371, 2003.
- [19] Peng, C.; Tran, P. Bioinspired functionally graded gyroid sandwich panel subjected to impulsive loadings. *Compos. Part B Eng.* 188, 2020.
- [20] Kruth, J.P.; Mercelis, P.; Vaerenbergh, J.V.; Froyen, L.; Rombouts, M. Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid Prototyp.* 11, 26–36, 2005.
- [21] Gao, W.; Zhang, Y.; Ramanujan, D.; Ramani, K.; Chen, Y.; Williams, C.B.; Wang, C.C.; Shin, Y.C.; Zhang, S.; Zavattieri, P.D. The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Comput. Aided Des. Appl.*, 69, 65–89, 2015.
- [22] Konstantinos Kitsakis, John D. Kechagias, Nikolaos M. Vaxevanidis. Dimitrios Giagopoulos. Tolerance Analysis of 3d-MJM parts according to IT grade. Conference: 20th Innovative Manufacturing Engineering and Energy Conference (IManEE 2016). Volume: IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 161, 2016.
- [23] Ahn, S.H.; Montero, M.; Odell, D.; Roundy, S.; Wright, P.K. Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. *Rapid Prototyp. J.*, 8, 248–257, 2002.
- [24] L. Columbus, The State of 3D Printing, 2018, *Forbes* (2018). <https://www.forbes.com/sites/louiscolombus/2018/05/30/the-state-of-3d-printing-2018/?sh=70f203a97b0a>. Accessed: 24/11/2022.
- [25] Lakshmi Priya Muthe, Kim Pickering, Christian Gauss. A Review of 3D/4D Printing of Poly-Lactic Acid Composites with Bio-Derived Reinforcements. *Composites Part C: Open Access* 8, 2022.
- [26] Kazmer, in: M. Kutz (Ed.), “Three-Dimensional Printing of Plastics – Applied Plastics Engineering Handbook – Processing, Materials, and Applications”, A Volume in Plastics Design Library, 2nd ed., 2017.
- [27] Zaldivar R. J., Mclouth T.D., Ferrelli G.L., Patel D.N., Hopkins A.R., Witkin D. Effect of Initial Filament Moisture Content on the Microstructure and Mechanical Performance of ULTEM® 9085 3D Printed Parts, *Additive Manufacturing*, 2018.
- [28] ASTM F2792-12a, Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.

- [29] Boschetto, A., Bottini, B., “Design for manufacturing of surfaces to improve accuracy in Fused Deposition Modeling”, *Rob. and Comput. Integr. Manuf.*, 37, 103-114, 2016.
- [30] M. Domingo-Espin, J. Forcada, A. Granada, J. Lluma, G. Reyes, Mechanical property characterization and simulation of fused deposition modeling Polycarbonate parts, *Mater. Des.*, 83, 670 –677, 2015.
- [31] K.I. Byberg, A.W. Gebisa, H.G. Lemu, Mechanical properties of ULTEM 9085 material processed by fused deposition modeling, *Polymer Testing*. 2018.
- [32] Bellini, A. and Gucerì, S., “Mechanical characterization of parts fabricated using FDM®”, *J. Rapid Prototyping*, Vol. 9, 252-264, 2003.
- [33] Elisa Padovano, Marco Galfione, Paolo Concialdi, Gianni Lucco, Claudio Badini. Mechanical and Thermal Behavior of Ultem® 9085. *Applied Sciences*. 2020.
- [34] Gianluca Cicala, Giulia Ognibene, Salvatore Portuesi, Ignazio Blanco, Mario Rapisarda, Eugenio Pergolizzi, Giuseppe Recca. Comparison of Ultem 9085 Used in Fused Deposition Modelling (FDM) with Polyetherimide Blends, *Materials*, 2018.
- [35] Bagsik A., Schoppner V., Klemp E., “FDM® Part Quality Manufactured with ULTEM® 9085”, In: *Proceedings of 14th Inter Conf. Polym Mater. Saale, Germany*, 15, 307- 315, 2010.
- [36] Schuler GmbH, *Metal Forming Handbook*. Göppingen, Germany: Schuler GmbH, 1998.
- [37] R. G. Davies and C. L. Magee, “Physical Metallurgy of Automotive High-Strength Steels,” In *Conference of Structure and Properties of Dual-Phase Steels*, AIME Annual Meeting, 1–19, 1981.
- [38] R.C. Hibbeler. *Mechanics of materials*, 8th Edition, Pearson Prentice Hall, 2011.
- [39] J. P. Davim and A. G. Magalhães, *Ensaio Mecânicos e Tecnológicos*. Porto: Estante Editora, 1992.
- [40] B. Carlsson and G. Engberg, *Sheet Steel Forming Handbook*. Sweden: SSAB Tunn Plat, 1997.
- [41] Luiz Sérgio Marcelino Gomes. *Biomateriais em Artoplastia de Quadril: Propriedades, Estrutura e Composição*. O Quadril, 1st Edition, Atheneu, 2010.
- [42] Rodrigues, J, Martins, P.A.F., *Tecnologia Mecânica - Tecnologia da Deformação Plástica - Vol.I Fundamentos Teóricos*. Escolar Editora, 2005.
- [43] Ferdinand P. Beer, John T. Dewolf, David F. Mazurek e E. Russell Johnston Jr., *Mechanics of Materials*. 5th edition, The McGraw-Hill Companies, Inc., 2008.
- [44] Tresca H., “Sur le'écoulement des corps solides soumis à des fortes pressions”, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 59, 754-764, 1864.
- [45] Von Mises R., “Mechanics of solid bodies in the plastically-deformable state”, *Goett. Narch. Math. Phys., Kl.*, 582-592, 1913.

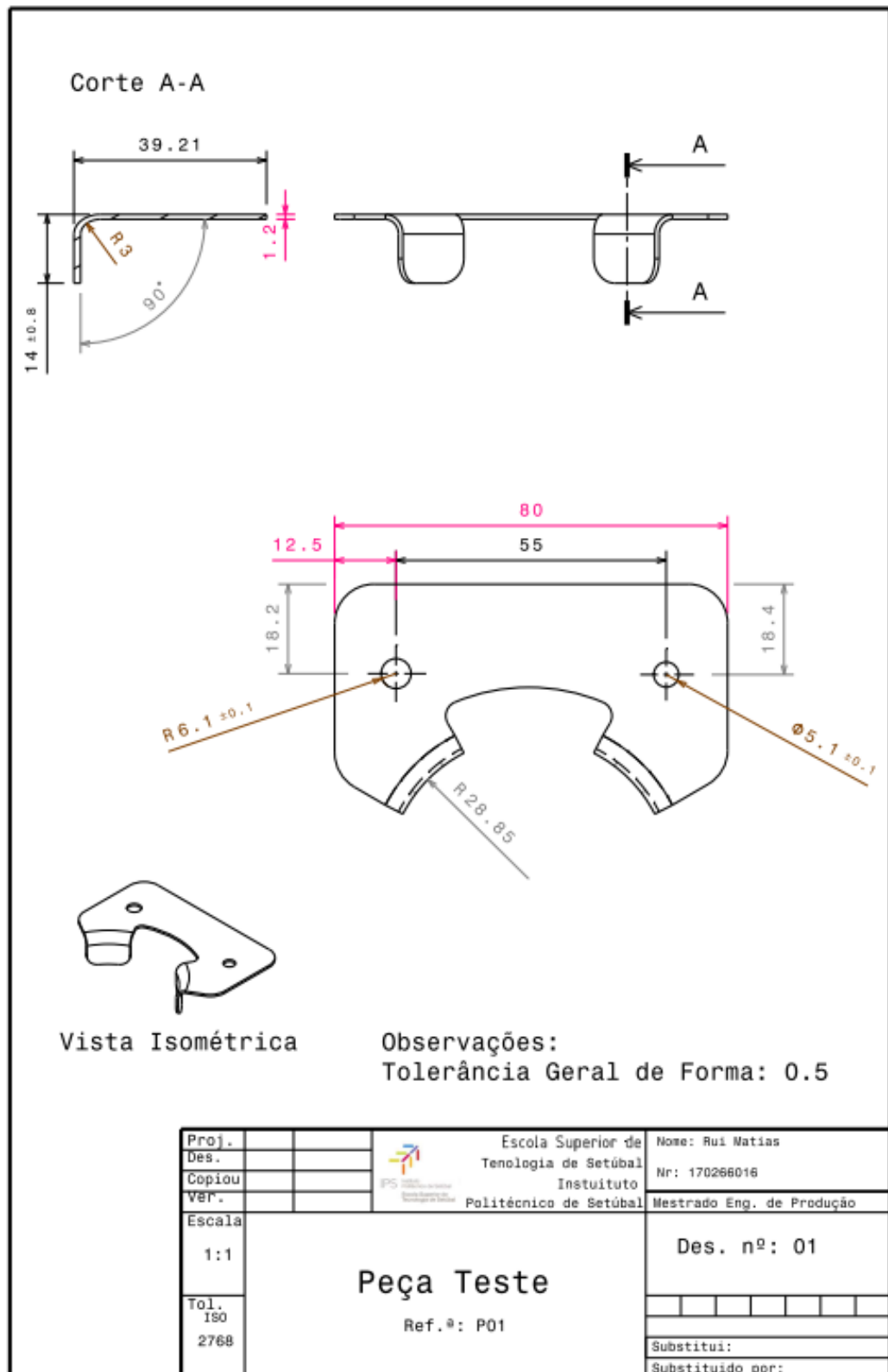
- [46] Martin H. Sadd. Continuum Mechanics Modeling of Material Behavior. Chapter 6 - Constitutive relations and formulation of classical linear theories of solids and fluids, pp.159-261, 2019.
- [47] Wagoner, R.H., Chenot, J.-L. Metal Forming Analysis. Cambridge University Press, 2001.
- [48] Goodwin, G., M., "Application of Strain Analysis to Sheet Metal Forming Problems in the Press Shop", Society of Automotive Engineers, No. 680093, 380-387, 1968.
- [49] T. Altan and A. E. Tekkaya, Sheet Metal Forming - Fundamentals, E. Kinsman. Road Materials Park, OH: ASM - International, pp.1-23; 33-66, 2012.
- [50] Santos, A. D., Duarte, J.F., Rocha, A. B. Tecnologia de Embutidora – Princípios e Aplicações, Vol. 3, Edição INEGI, 2005.
- [51] Wenner, M. L. Overview – Simulation of Sheet Forming. Numisheet 2005: proceedings of the 6th International Conference on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes, pp. 3-7, AIP Conference Proceedings, 2005.
- [52] Bresciani, C. A. Z. S.T.Button, E.Gomes, F.A.C.Nevy Conformação Plástica dos Metias, 5ª ed. UNICAMP, 1997.
- [53] Ing. E. V. Ter Wijen. Optimisation of a deep drawing process with experimental validation, applied to an automotive deep drawing process of a-pillar. Master's thesis, University of Twente, 2007.
- [54] Peter Vreede, "A finite element method for simulation of 3-dimensional sheet metal forming", Ph.D Thesis, University of Twente, The Netherlands, 1997.
- [55] Yongseob Lim, Ravinder Venugopal, A. Galip Ulsoy. Advances in the Control Sheet Metal Forming, IFAC World Congress Seoul, Korea, 2008.
- [56] Sripati Sah, Robert X. Gao. Process monitoring in stamping operations through tooling integrated sensing. Journal of Manufacturing Systems 27(3):123-129, 2008.
- [57] Yi Qin, Wan-Nawang W.A., Jie Zhao. Micromanufacturing Engineering and Technology. Chapter 13 - Forming of Micro-sheet Metal Components, 2015.
- [58] Guibert, M. P. Fabrication des Avions et Missiles. Paris: Dunod Éditeur Paris, p847, 1960.
- [59] Bolz, Roger W. Deep Drawing. Production Processes: The Producibility Handbook. Cleveland: Penton, cap. 26, p. 379-400, 1963.
- [60] ASM Handbook Vol. 14B Metal Working: Sheet Forming, 2006.
- [61] Thirumarudchelvan, S.: Elastomers in Metal Forming, Journal of Material Processing, Vol. 39, pp. 55-82, 1993.
- [62] Mahmut Tandogan, Omer Eyercioglu. Hardness Effect of Polyurethane Rubber on Mesoscale Rubber Pad Forming, International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology, Vol. 4, Issue 9, 2017.
- [63] Maziar Ramezani, Zaidi M. Ripin. 4 - Forming of shallow parts using rubber tools, Rubber-Pad Forming Processes, Woodhead Publishing, Pages 65-102, 2012.
- [64] Muamar Benisa, Bojan Babic, Aleksandar Grbovic, Aleksandar Grbovic, Zoran Stefanovic. Numerical simulation as a tool for optimizing tool geometry for rubber pad forming process. FME Transactions Volume 42, 67-73. 2014.

- [65] Wear & Spillage Supplies LTD. (2010) Available at: https://www.wearandspillage.co.uk/wp-content/uploads/2021/03/WME_Linatex_Rubber_Products_WSS.pdf. Accessed: 16.11.2022.
- [66] Muamar Benisa, Bojan Babic, Aleksandar Grbovic, Zoran Stefanovic. COMPUTER-AIDED MODELING OF THE RUBBER-PAD FORMING PROCESS. *Materials and technology*, 503–510, 2012.
- [67] H. Tschaetsch, *Metal Forming Practise: Processes-Machines-Tools*. Berlin Heidelberg: Springer, pp 262-324, 2006.
- [68] W. P. Reyman, "Stamping And Formability: Automotive Sheet Metal Stamping And Formability," *American Iron and Steel Institute*, no. January, pp. 1–214, 1989.
- [69] Abhishek Kumar, Santosh Kumar, D. R. Yadav. REVIEW OF RUBBER BASED SHEET HYDRO-FORMING PROCESSES. 5th International & 26th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference (AIMTDR 2014), 2014.
- [70] Chul Kyu Jina, Min Geun Jeonga, Chung Gil Kangb. Effect of rubber forming process parameters on micro-patterning of thin metallic plates. 11th International Conference on Technology of Plasticity, ICTP, 2014.
- [71] Hossein Talebi Ghadikolaee, Majid Elyasi, Farzad Ahmadi Khatir, Morteza, Hosseinzadeh. Experimental investigation of Fracture in rubber pad forming of bipolar plate's micro channels. International Conference on the Technology of Plasticity, ICTP, 2017.
- [72] Schuler AG. The entire world of sheet metal forming. (2013). Available at: <https://www.yumpu.com/en/document/view/8586622/the-entire-world-of-sheet-metal-forming-schuler-ag>. Accessed 16.11.2022.
- [73] Dorel Banabic. *Sheet metal forming process: constitutive modelling and numerical simulation*. Springer, 2010.
- [74] Robert H. Wagoner; Hojun Lim; Myoung-Gyu Lee. Advanced issues in springback. *International Journal of Plasticity*, 45:3 – 20, 2013.
- [75] Jenn-Terng Gau; Gary L. Kinzel. A new model for springback prediction in which the bausinger effect is considered. *International Journal of Mechanical Sciences*, 43:1813-1832, 2001.
- [76] R. Padmanabhana; M. C. Oliveira; J. L. Alves; L. F. Menezes. Influence of process parameters on the deep drawing of stainless steel. *Finite Elements in Analysis and Design*, 43:1062-1067, 2007.
- [77] V. Uthaisangsuk; S. Suranuntchai; S. Jirathearanat B. Chougthairungruang. Springback prediction in sheet metal forming of high strength steels. *Material and Design*, 50:253-266, 2013.
- [78] Sala G. A numerical and experimental approach to optimise sheet stamping technologies: Part II. Aluminium alloys rubber-forming. *Materials & Design*. Volume 22, Issue 4, Pages 299-315, 2001.
- [79] Jorge Rodrigues, Paulo Martins. *Tecnologia Mecânica - Vol. II*, Escolar Editora, 2010.
- [80] Diegel, Olaf. *BendWorks, the fine art of sheet metal bending*. Complete Design Services, 2002.
- [81] L.F. Menezes; C. Teodosiu. Three-dimensional numerical simulation of the deep-drawing process using solid finite elements. , 97(1-3), 100–106, 2000.
- [82] Hirpa L. Gelgele Tomasz Trzepieciniski. Investigation of anisotropy problems in sheet metal forming using finite element method. *International Journal of Material Forming*, 2010.

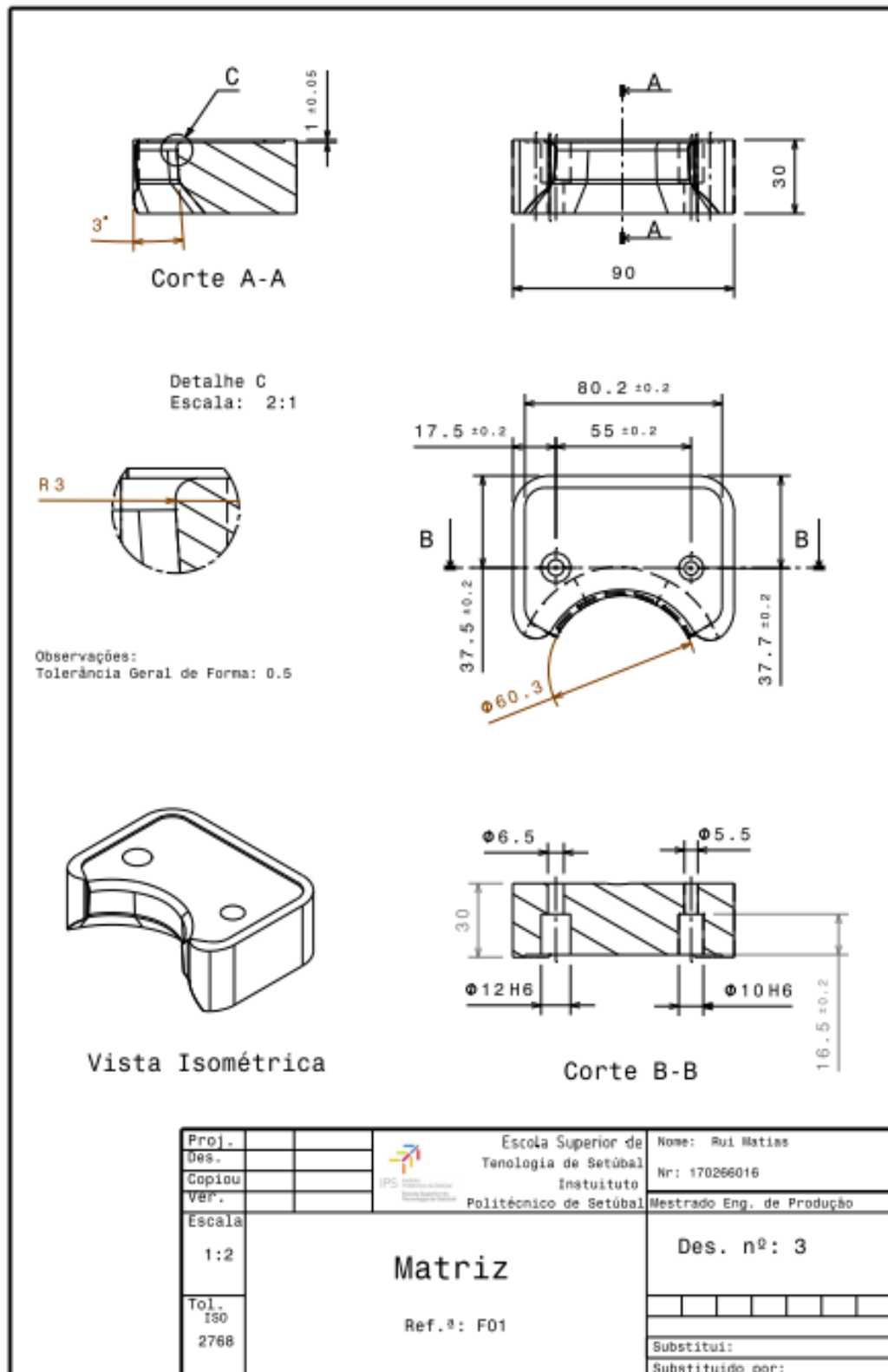
- [83] A. Erman Tekkaya. State-of-the-art os simulation of sheet metal forming. *Journal of Materials Processing Technology* 103:14-22, 2000.
- [84] P. Pião, “Modelação e Simulação Numérica de Processos de Conformação Plástica de Metais,” Universidade de Aveiro, Tese de Mestrado, 2010.
- [85] J. Ferreira Duarte, “Conformação plástica de chapas metálicas: Simulação numérica e caracterização mecânica,” Universidade do Porto, 1997.
- [86] A. E. Tekkaya, “State-of-the-art of simulation of sheet metal forming,” *Journal of Materials Processing Technology*, 2000.
- [87] Kuang-Hua Chang. Chapter 13 - Sheet Metal Forming Simulation. *e-Design. Computer-Aided Engineering Desig*, Pages 685-741, 2015.
- [88] D. G. Pavlou, *Essentials of the Finite Element Method: For Mechanical and Structural Engineers*. Elsevier Science, 2015.
- [89] A. E. Tekkaya, State-of-the-art of simulation of sheet metal forming, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 103, pp. 14-22, 2000.
- [90] Pedro Miguel Vieira Bastardo. Previsão de comportamentos típicos e análise do processo de quinagem pelo método dos elementos finitos. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Dissertação, 2013.
- [91] Kévin A. Mouta, Lucas D. Azevedo, Maria G. Fernandes, Elza M.M. Fonseca. Sheet Metal Forming by Numerical Simulations: 2D and 3D Axisymmetric Deformation of a Cylindrical Piece. 7th International Conference on Mechanics and Materials in Design, 2017.
- [92] Referans Metal LTD. (2015). Available at: <http://referansmetal.com/alasimli-aluminyum/product/365/en-aw-al99cu-1100-h14?lang=en>. Accessed 16.11.2022.
- [93] Referans Metal LTD. (2015). Available at: <https://www.referansmetal.com/alasimli-aluminyum/product/97/uzay-havacilik-savunma/sac/ams-qq-a-2504-alcu4mg1-2024-t3.%20Accessed%2016.11.2022>. Accessed 16.11.2022.
- [94] Referans Metal LTD. (2015). Available at: <https://www.referansmetal.com/alasimli-aluminyum/product/375/genel-endustri/ams-4339-alcu4mg1-2024-t851>. Accessed 16.11.2022.
- [95] Referans Metal LTD. (2015). Available at: <https://www.referansmetal.com/alasimli-aluminyum/product/15/uzay-havacilik-savunma/levha-plaka/ams-4035-alcu4mg1-2024-o>. Accessed 16.11.2022.
- [96] José Divo Bressan and Alan G. Leacock. Influence of Pre-strain on the Formability of 2024 Aluminium Alloy. *Int J Mater Form Vol. 2 Suppl 1*:475–478, 2009.
- [97] R. A. Cláudio, J. Dupont, R. Baptista, M. Leite, L. Reis. Behaviour evaluation of 3D printed polylactic acid under compression. *Journal of Materials Research and Technology*. Volume 21. 2022.
- [98] ASTM International. *ASTM E8/E8M-22 - Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*, 2022.
- [99] ABAQUS Online Documentation: Version 6.6-1 (2006). Available at: <https://classes.engineering.wustl.edu/2009/spring/mase5513/abaqus/docs/v6.6/books/usb/default.htm?startat=pt06ch22s01ael02.html>. Accesses 20.11.2022.

Anexos

ANEXO 1 - Desenho 2D do componente a produzir através da ferramenta



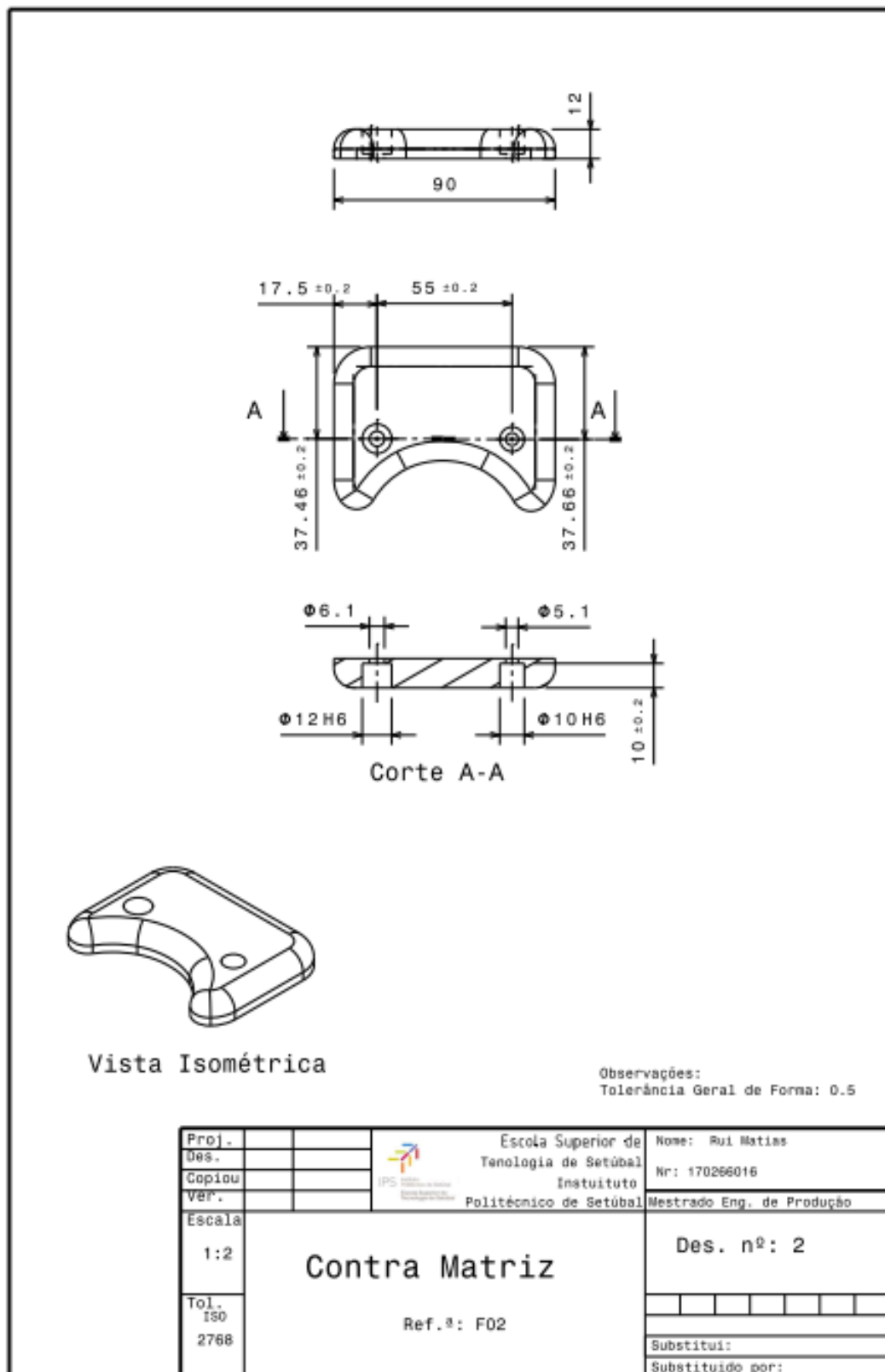
ANEXO 2 - Desenho 2D do elemento ferramenta: Matriz



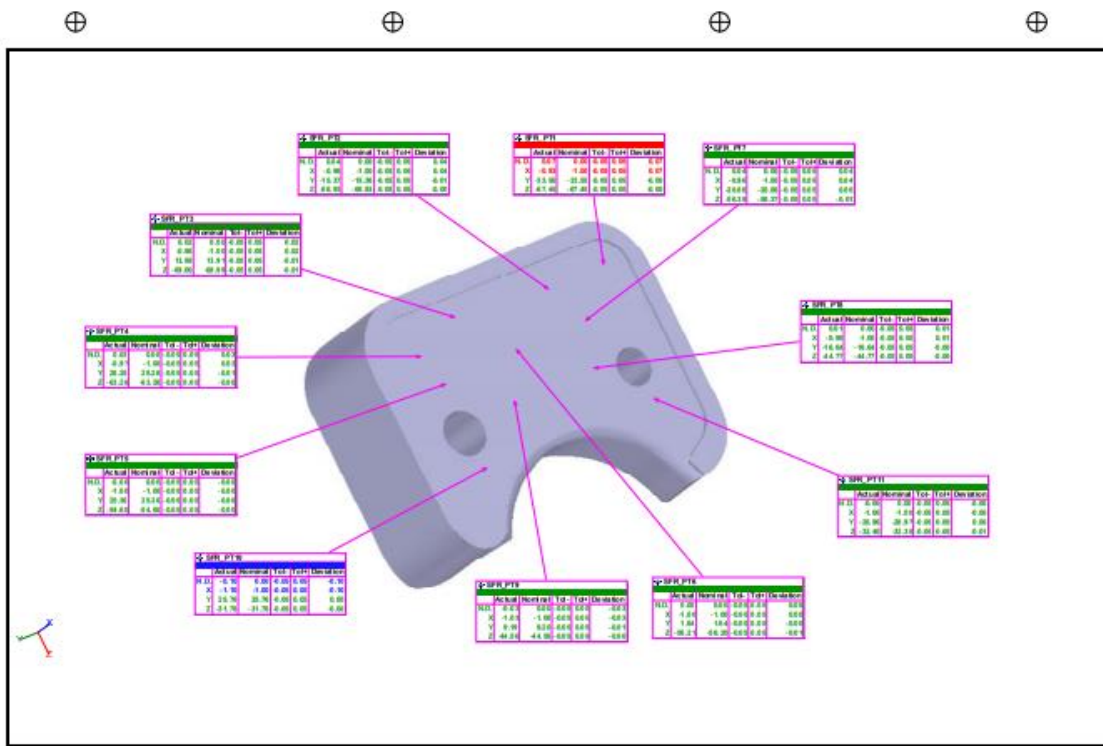
Proj.		 Escola Superior de Tecnologia de Setúbal Instituto Politécnico de Setúbal	Nome: Rui Matias
Des.			Nr: 170266016
Copiou			Mestrado Eng. de Produção
Ver.			
Escala	1:2	Matriz Ref.ª: F01	Des. nº: 3
Tol. ISO	2768		
			Substituí:
			Substituído por:

ESTSetúbal 00000-A4a Rev01

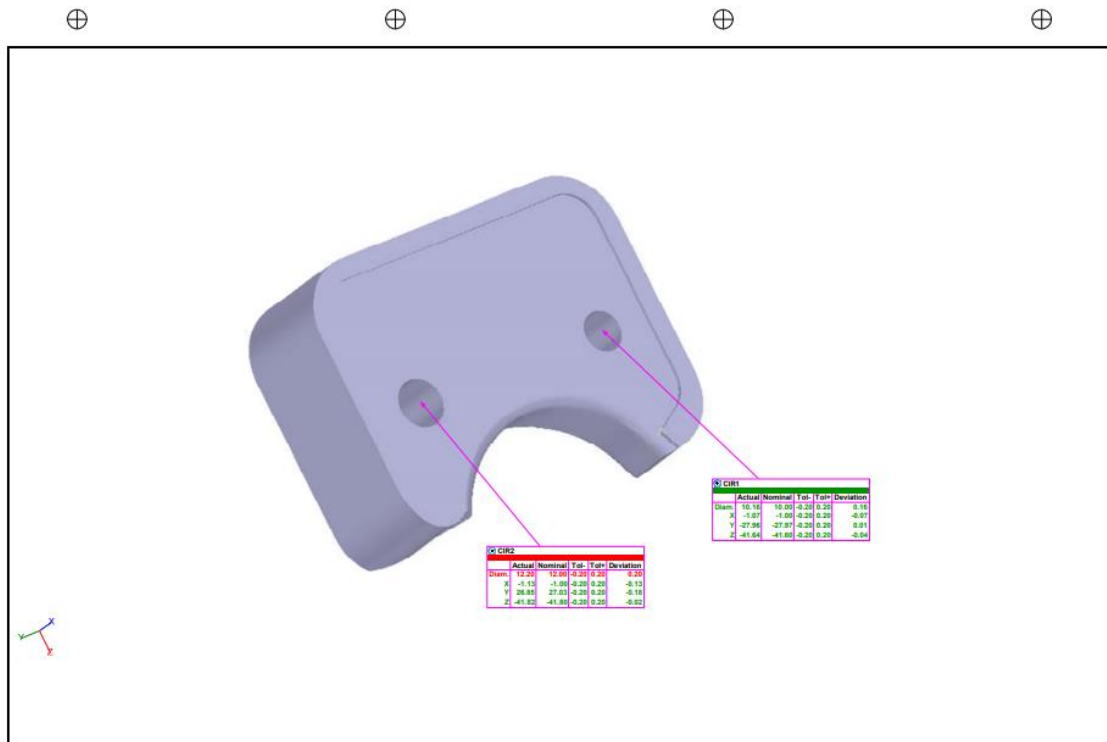
ANEXO 3 - Desenho 2D do elemento ferramenta: Contra Matriz



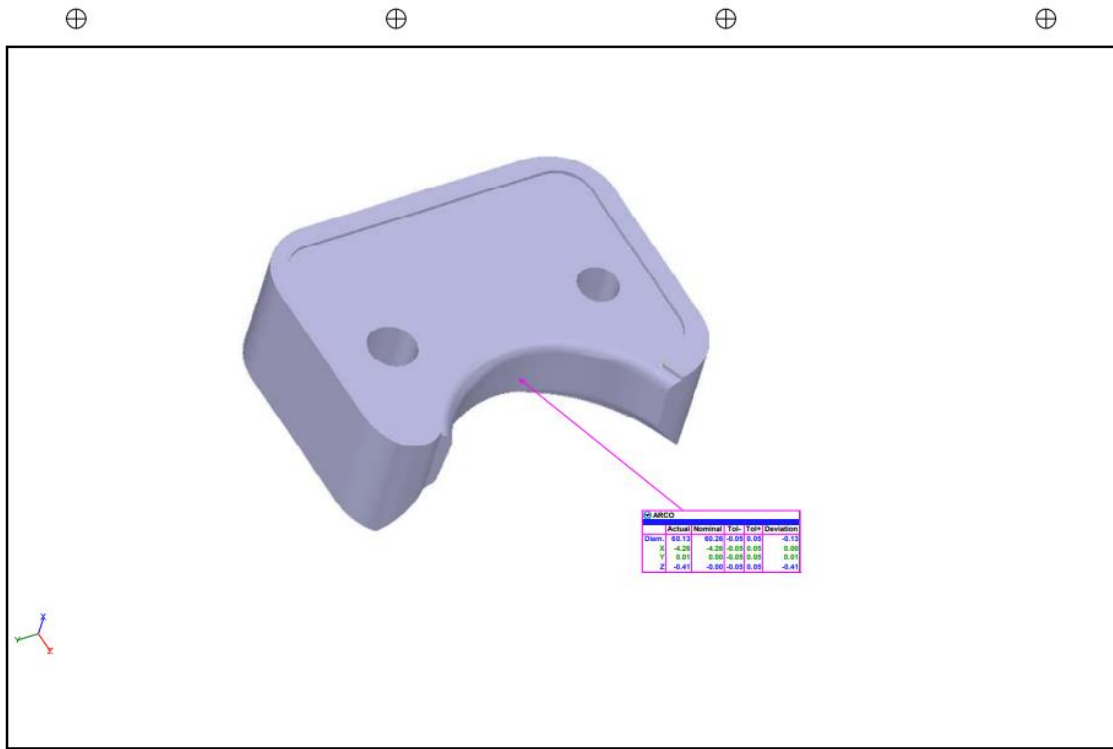
ANEXO 4 - Relatório dimensional da Matriz da FPF



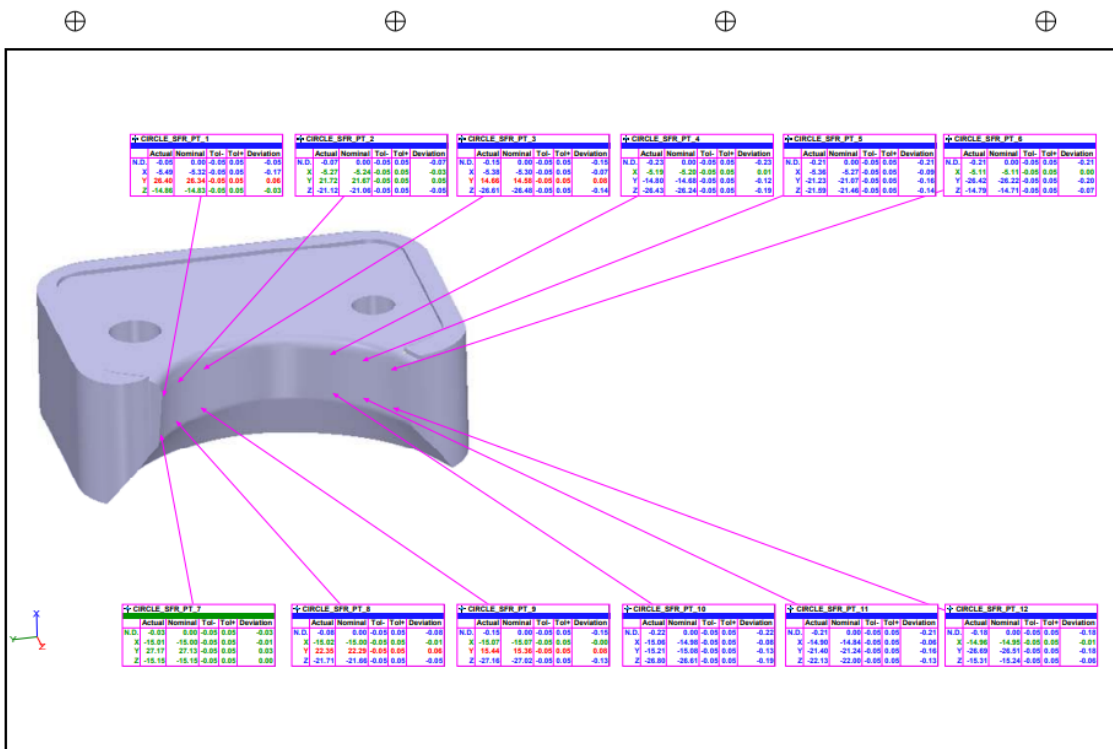
Metrologic Group - Metrolog X4 V12 SP1 HF2



Metrologic Group - Metrolog X4 V12 SP1 HF2

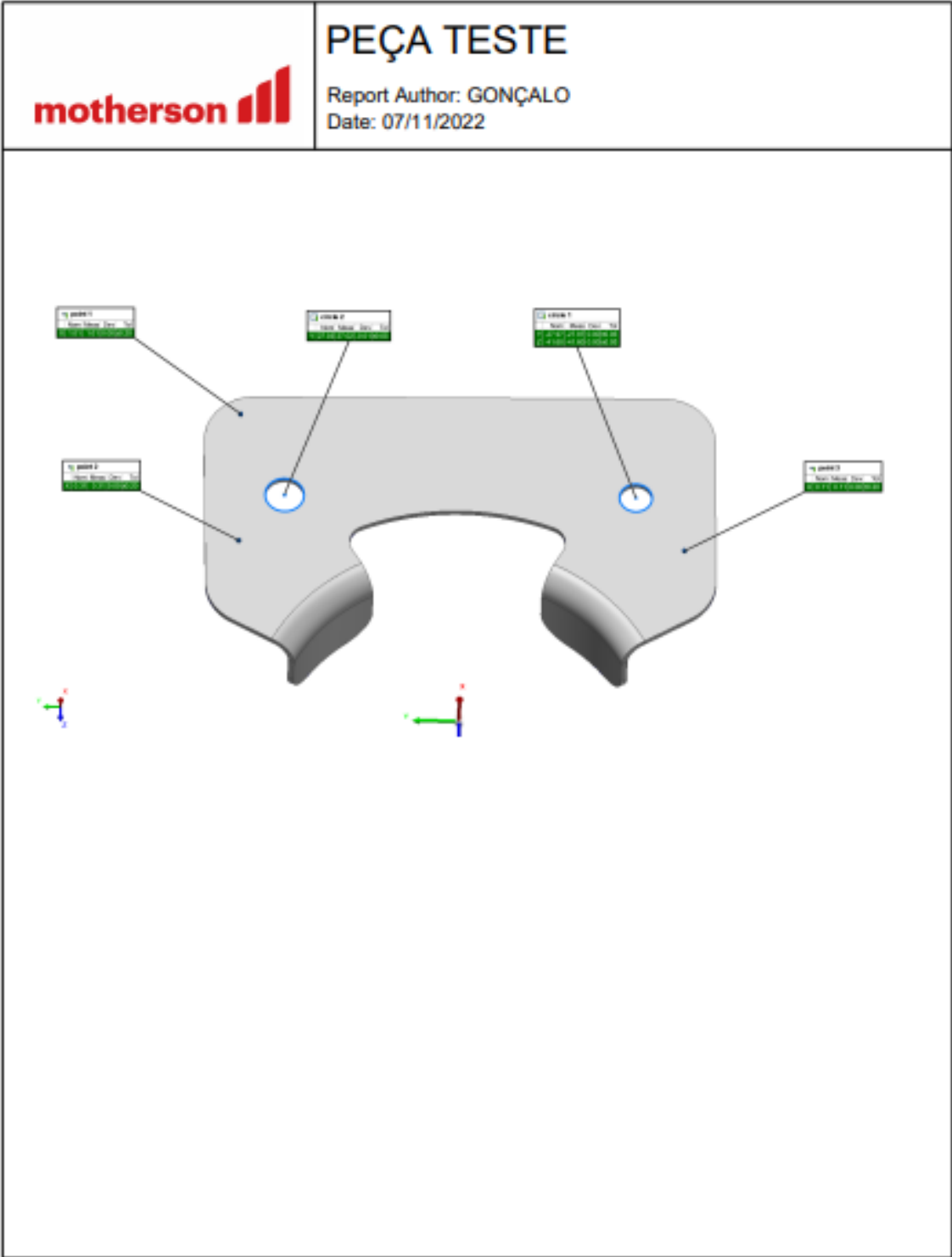


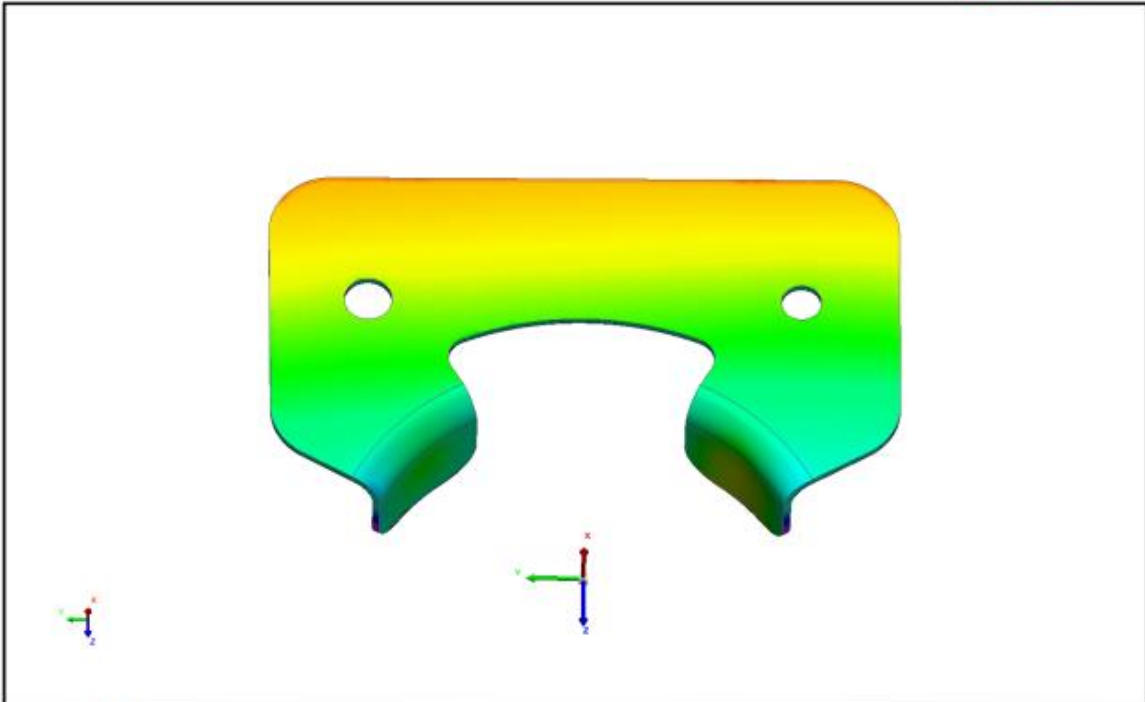
Metrologic Group - Metrolog X4 V12 SP1 HF2



Metrologic Group - Metrolog X4 V12 SP1 HF2

ANEXO 5 - Relatório dimensional das amostras do ensaio *rubber forming*



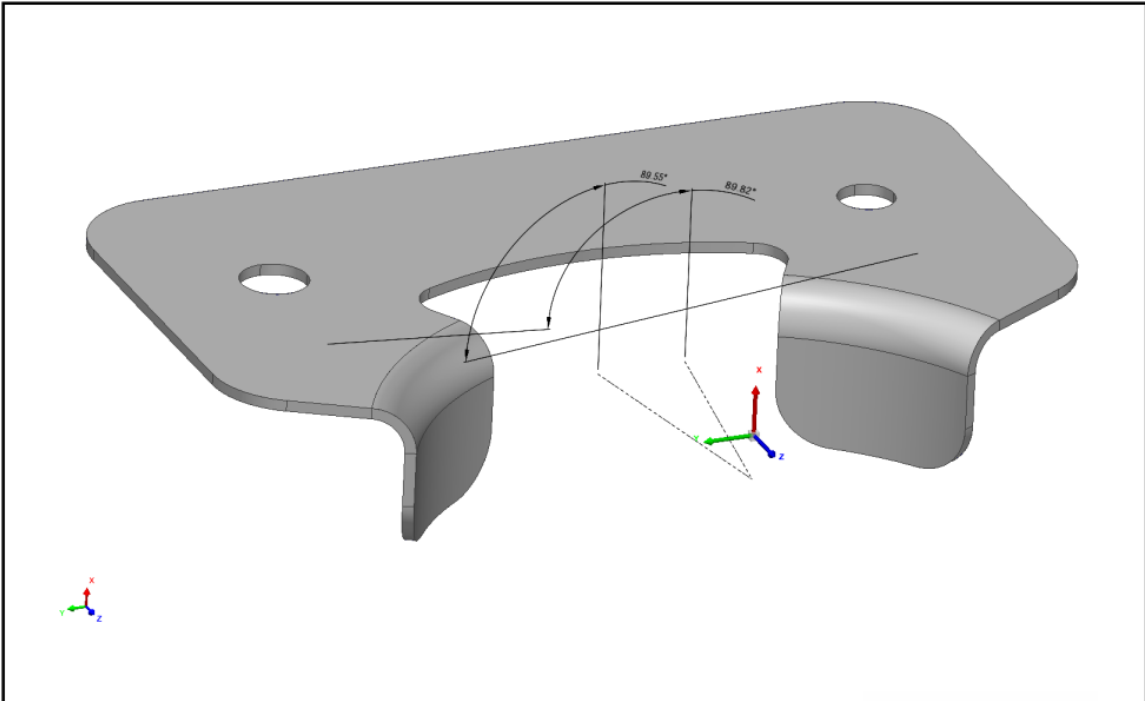


Date: 07/11/2022

Report Author: GONÇALO



2/4

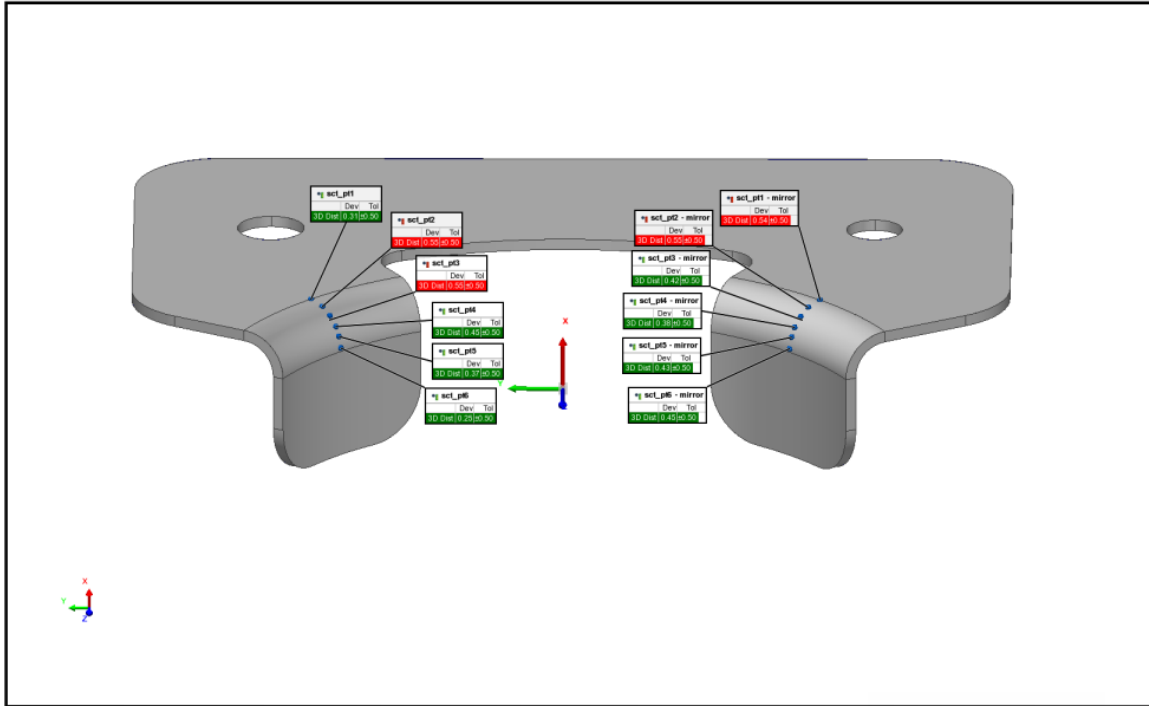


Date: 07/11/2022

Report Author: GONÇALO



3/4



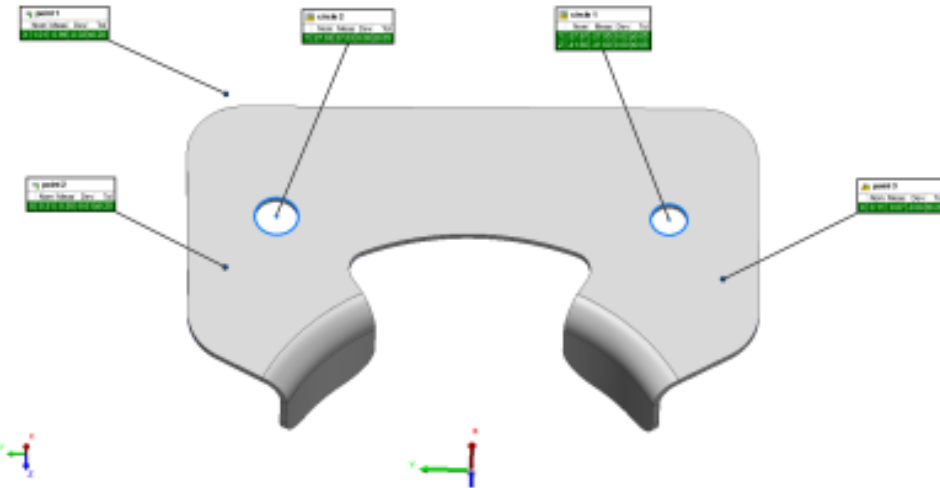
Date: 07/11/2022

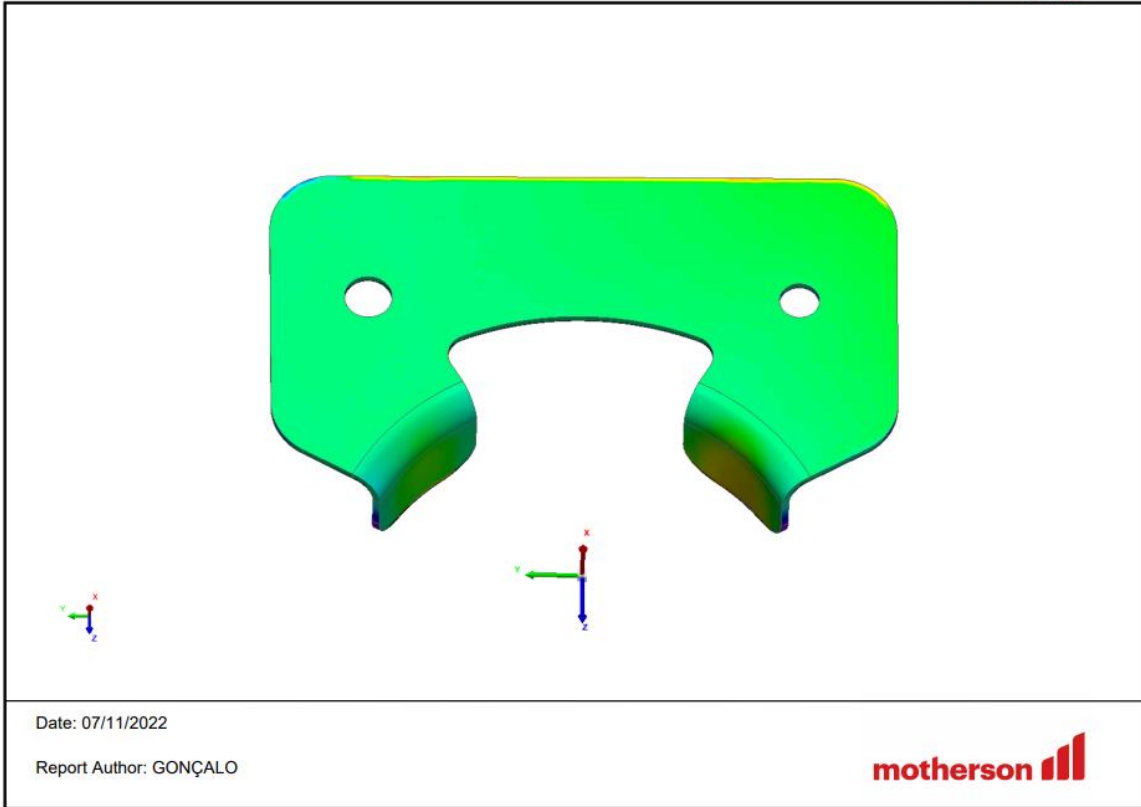
Report Author: GONÇALO



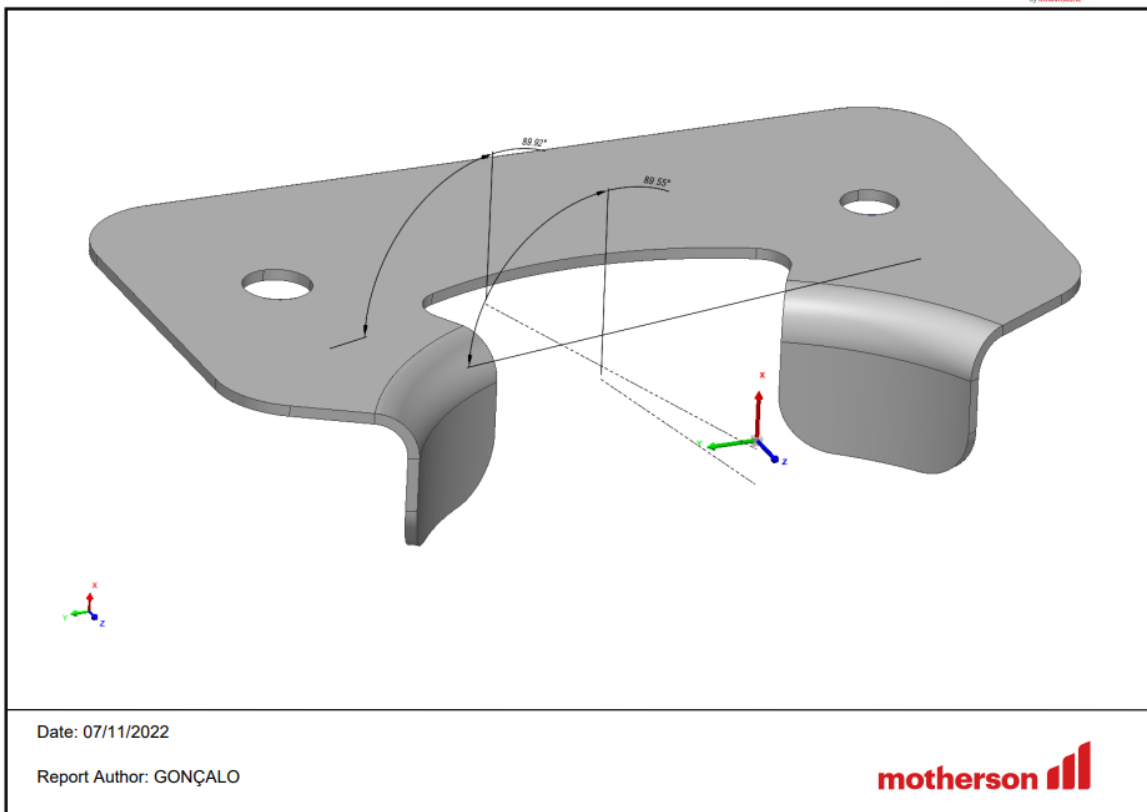
PEÇA TESTE

Report Author: GONÇALO
Date: 07/11/2022

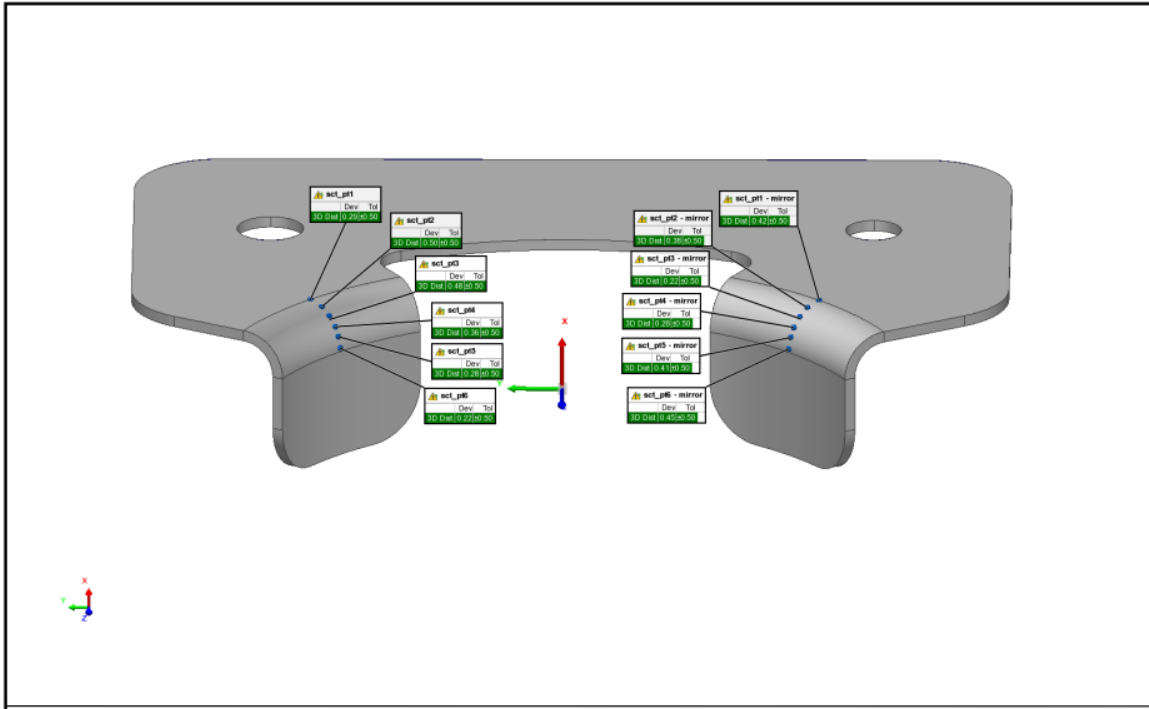




2/4



3/4



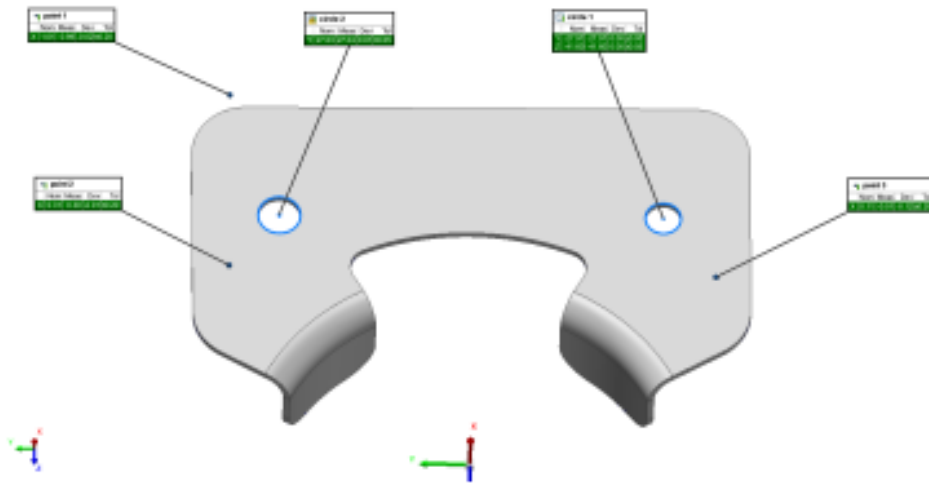
Date: 07/11/2022

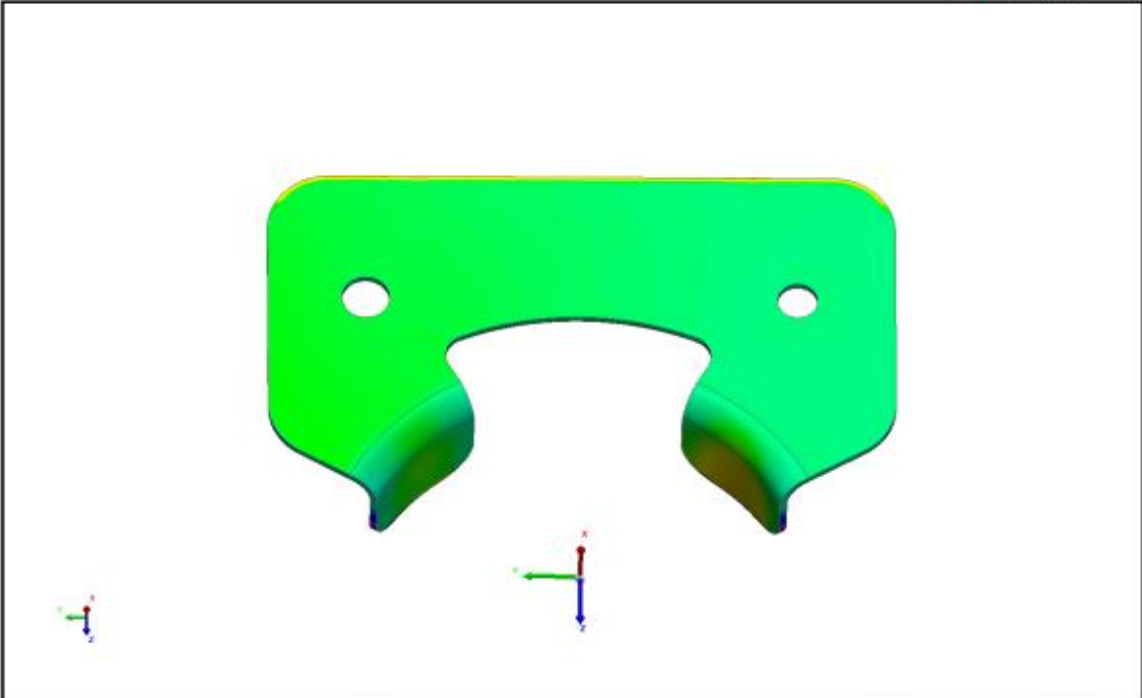
Report Author: GONÇALO



PEÇA TESTE

Report Author: GONÇALO
Date: 07/11/2022



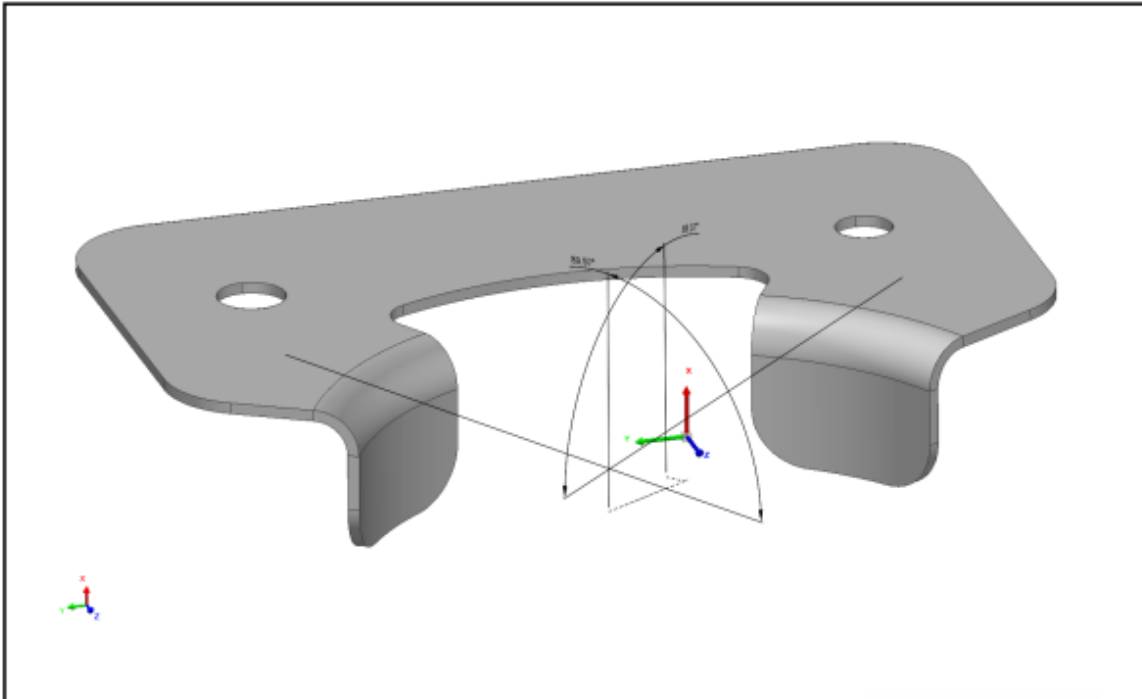


Date: 07/11/2022

Report Author: GONÇALO



2/4

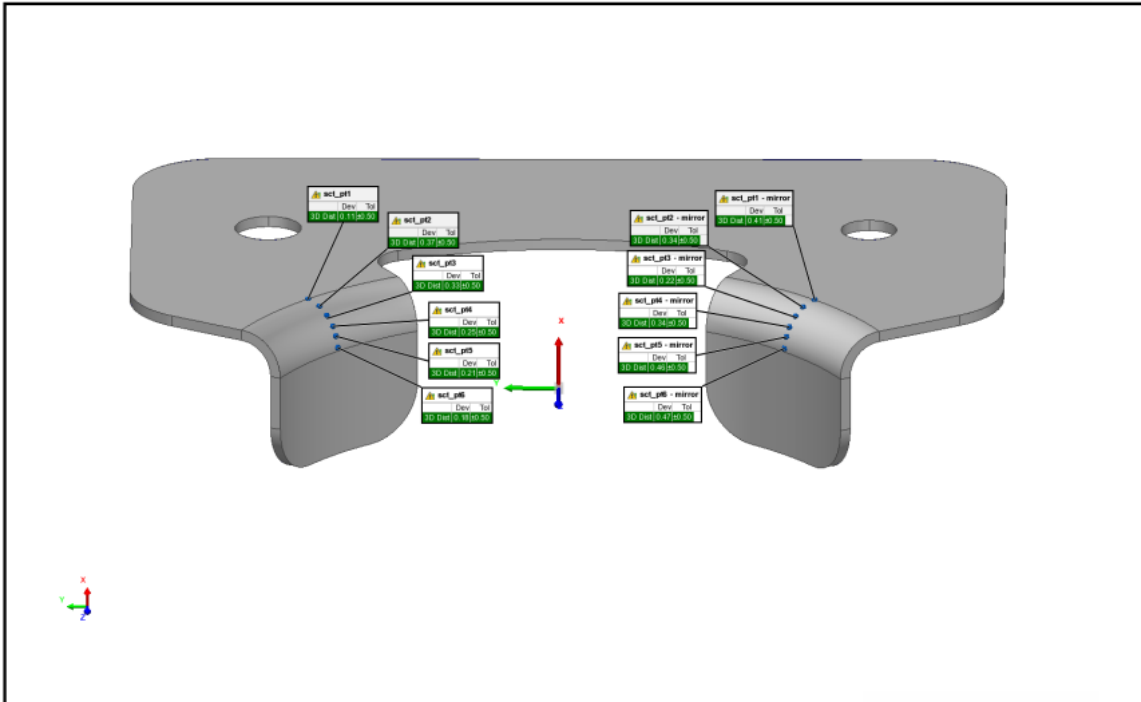


Date: 07/11/2022

Report Author: GONÇALO



3/4



Date: 07/11/2022

Report Author: GONÇALO



ANEXO 6 - Tabela de dados do ensaio de tração do material AA2024-T3

PL (Provete Laminado Transversal) AA2024-T3								
DADOS UTM				CÁLCULOS				
Time [s]	Position [mm]	Load [kN]	Extension [mm]	L ₀ [mm]	A ₀ [mm ²]	FORÇA [N]	TENSÃO [MPa]	Extensão (L _n -L _{n-1})/L ₀
1	0,079956	0,758117	0,079549	50	15	758,1	50,5	0,0016
2	0,163167	1,456098	0,16276	50	15	1456,1	97,1	0,0033
3	0,246379	2,09934	0,245972	50	15	2099,3	140,0	0,0049
4	0,329793	2,712465	0,329386	50	15	2712,5	180,8	0,0066
5	0,413208	3,295473	0,412801	50	15	3295,5	219,7	0,0083
6	0,496623	3,845618	0,496216	50	15	3845,6	256,4	0,0099
7	0,579834	4,3164	0,579427	50	15	4316,4	287,8	0,0116
8	0,663249	4,658573	0,662842	50	15	4658,6	310,6	0,0133
9	0,74646	4,880279	0,746053	50	15	4880,3	325,4	0,0149
10	0,829875	5,011635	0,829468	50	15	5011,6	334,1	0,0166
11	0,913086	5,093793	0,912679	50	15	5093,8	339,6	0,0183
12	0,996501	5,162218	0,996094	50	15	5162,2	344,1	0,0199
13	1,079915	5,214211	1,079508	50	15	5214,2	347,6	0,0216
14	1,162923	5,263457	1,162516	50	15	5263,5	350,9	0,0233
15	1,246338	5,304512	1,245931	50	15	5304,5	353,6	0,0249
16	1,329753	5,345567	1,329346	50	15	5345,6	356,4	0,0266
17	1,413167	5,381177	1,41276	50	15	5381,2	358,7	0,0283
18	1,496582	5,411294	1,496175	50	15	5411,3	360,8	0,0299
19	1,579793	5,446855	1,579386	50	15	5446,9	363,1	0,0316
20	1,663208	5,476972	1,662801	50	15	5477,0	365,1	0,0333
21	1,746419	5,507089	1,746012	50	15	5507,1	367,1	0,0349
22	1,829834	5,539903	1,829427	50	15	5539,9	369,3	0,0366
23	1,913249	5,57002	1,912842	50	15	5570,0	371,3	0,0383
24	1,99646	5,594692	1,996053	50	15	5594,7	373,0	0,0399
25	2,079875	5,622062	2,079468	50	15	5622,1	374,8	0,0416
26	2,163289	5,649432	2,162882	50	15	5649,4	376,6	0,0433
27	2,246501	5,674055	2,246094	50	15	5674,1	378,3	0,0449
28	2,329712	5,698678	2,329305	50	15	5698,7	379,9	0,0466
29	2,413127	5,726048	2,41272	50	15	5726,0	381,7	0,0483
30	2,496541	5,747924	2,496134	50	15	5747,9	383,2	0,0499
31	2,579956	5,772596	2,579549	50	15	5772,6	384,8	0,0516
32	2,663167	5,79722	2,66276	50	15	5797,2	386,5	0,0533
33	2,746379	5,816398	2,745972	50	15	5816,4	387,8	0,0549
34	2,829793	5,838274	2,829386	50	15	5838,3	389,2	0,0566
35	2,913208	5,860151	2,912801	50	15	5860,2	390,7	0,0583
36	2,996623	5,884823	2,996216	50	15	5884,8	392,3	0,0599
37	3,079834	5,903952	3,079427	50	15	5904,0	393,6	0,0616
38	3,163249	5,925878	3,162842	50	15	5925,9	395,1	0,0633

39	3,24646	5,94226	3,246053	50	15	5942,3	396,2	0,0649
40	3,329671	5,961439	3,329264	50	15	5961,4	397,4	0,0666
41	3,413086	5,980617	3,412679	50	15	5980,6	398,7	0,0683
42	3,496501	5,999747	3,496094	50	15	5999,7	400,0	0,0699
43	3,579712	6,016179	3,579305	50	15	6016,2	401,1	0,0716
44	3,663127	6,038104	3,66272	50	15	6038,1	402,5	0,0733
45	3,746338	6,057234	3,745931	50	15	6057,2	403,8	0,0749
46	3,829753	6,070919	3,829346	50	15	6070,9	404,7	0,0766
47	3,913167	6,090097	3,91276	50	15	6090,1	406,0	0,0783
48	3,996582	6,103782	3,996175	50	15	6103,8	406,9	0,0799
49	4,079793	6,117467	4,079386	50	15	6117,5	407,8	0,0816
50	4,163208	6,133899	4,162801	50	15	6133,9	408,9	0,0833
51	4,246419	6,15033	4,246012	50	15	6150,3	410,0	0,0849
52	4,329834	6,166713	4,329427	50	15	6166,7	411,1	0,0866
53	4,413249	6,1777	4,412842	50	15	6177,7	411,8	0,0883
54	4,49646	6,191385	4,496053	50	15	6191,4	412,8	0,0899
55	4,579875	6,207768	4,579468	50	15	6207,8	413,9	0,0916
56	4,663086	6,2242	4,662679	50	15	6224,2	414,9	0,0933
57	4,746501	6,237885	4,746094	50	15	6237,9	415,9	0,0949
58	4,829915	6,25157	4,829508	50	15	6251,6	416,8	0,0966
59	4,913127	6,265255	4,91272	50	15	6265,3	417,7	0,0983
60	4,996338	6,273495	4,995931	50	15	6273,5	418,2	0,0999
61	5,079753	6,284433	5,079346	50	15	6284,4	419,0	0,1016
62	5,163371	6,300865	5,162964	50	15	6300,9	420,1	0,1033
63	5,246582	6,309056	5,246175	50	15	6309,1	420,6	0,1049
64	5,329793	6,322741	5,329386	50	15	6322,7	421,5	0,1066
65	5,413208	6,330982	5,412801	50	15	6331,0	422,1	0,1083
66	5,496419	6,34192	5,496012	50	15	6341,9	422,8	0,1099
67	5,580037	6,355605	5,579631	50	15	6355,6	423,7	0,1116
68	5,663249	6,366543	5,662842	50	15	6366,5	424,4	0,1133
69	5,74646	6,374734	5,746053	50	15	6374,7	425,0	0,1149
70	5,829671	6,385721	5,829264	50	15	6385,7	425,7	0,1166
71	5,913086	6,391166	5,912679	50	15	6391,2	426,1	0,1183
72	5,996501	6,407598	5,996094	50	15	6407,6	427,2	0,1199
73	6,079915	6,413091	6,079508	50	15	6413,1	427,5	0,1216
74	6,163127	6,424029	6,16272	50	15	6424,0	428,3	0,1233
75	6,246338	6,434968	6,245931	50	15	6435,0	429,0	0,1249
76	6,329753	6,443159	6,329346	50	15	6443,2	429,5	0,1266
77	6,413167	6,448653	6,41276	50	15	6448,7	429,9	0,1283
78	6,496582	6,459591	6,496175	50	15	6459,6	430,6	0,1299
79	6,579793	6,465084	6,579386	50	15	6465,1	431,0	0,1316
80	6,663208	6,470578	6,662801	50	15	6470,6	431,4	0,1333
81	6,746419	6,481516	6,746012	50	15	6481,5	432,1	0,1349
82	6,829834	6,486961	6,829427	50	15	6487,0	432,5	0,1366
83	6,913045	6,495201	6,912638	50	15	6495,2	433,0	0,1383
84	6,99646	6,503392	6,996053	50	15	6503,4	433,6	0,1399

85	7,079671	6,51433	7,079264	50	15	6514,3	434,3	0,1416
86	7,163289	6,519824	7,162882	50	15	6519,8	434,7	0,1433
87	7,246704	6,522571	7,246297	50	15	6522,6	434,8	0,1449
88	7,329915	6,533509	7,329508	50	15	6533,5	435,6	0,1466
89	7,413127	6,533509	7,41272	50	15	6533,5	435,6	0,1483
90	7,496541	6,539003	7,496134	50	15	6539,0	435,9	0,1499
91	7,579753	6,544447	7,579346	50	15	6544,4	436,3	0,1516
92	7,663371	6,552688	7,662964	50	15	6552,7	436,8	0,1533
93	7,746582	6,555385	7,746175	50	15	6555,4	437,0	0,1549
94	7,829793	6,560879	7,829386	50	15	6560,9	437,4	0,1566
95	7,913005	6,56907	7,912598	50	15	6569,1	437,9	0,1583
96	7,996419	6,577311	7,996012	50	15	6577,3	438,5	0,1599
97	8,079631	6,580057	8,079224	50	15	6580,1	438,7	0,1616
98	8,163249	6,588249	8,162842	50	15	6588,2	439,2	0,1633
99	8,24646	6,59644	8,246053	50	15	6596,4	439,8	0,1649
100	8,329875	6,601934	8,329468	50	15	6601,9	440,1	0,1666
101	8,413086	6,607427	8,412679	50	15	6607,4	440,5	0,1683
102	8,496501	6,612872	8,496094	50	15	6612,9	440,9	0,1699
103	8,579712	6,612872	8,579305	50	15	6612,9	440,9	0,1716
104	8,663127	6,615619	8,66272	50	15	6615,6	441,0	0,1733
105	8,746541	6,621112	8,746134	50	15	6621,1	441,4	0,1749
106	8,829956	6,621112	8,829549	50	15	6621,1	441,4	0,1766
107	8,913167	6,618366	8,91276	50	15	6618,4	441,2	0,1783
108	8,996379	6,618366	8,995972	50	15	6618,4	441,2	0,1799
109	9,079793	6,612872	9,079386	50	15	6612,9	440,9	0,1816
110	9,163005	6,612872	9,162598	50	15	6612,9	440,9	0,1833
111	9,246623	6,615619	9,246216	50	15	6615,6	441,0	0,1849
112	9,329834	6,618366	9,329427	50	15	6618,4	441,2	0,1866
113	9,413249	6,62381	9,412842	50	15	6623,8	441,6	0,1883
114	9,49646	6,63205	9,496053	50	15	6632,1	442,1	0,1899
115	9,579671	6,629304	9,579264	50	15	6629,3	442,0	0,1916
116	9,663086	6,626557	9,662679	50	15	6626,6	441,8	0,1933
117	9,746501	6,634797	9,746094	50	15	6634,8	442,3	0,1949
118	9,829915	6,656674	9,829508	50	15	6656,7	443,8	0,1966
119	9,913127	6,670359	9,91272	50	15	6670,4	444,7	0,1983
120	9,996541	6,694982	9,996134	50	15	6695,0	446,3	0,1999
121	10,079753	6,664914	10,079346	50	15	6664,9	444,3	0,2016
122	10,162964	6,662167	10,162557	50	15	6662,2	444,1	0,2033
123	10,246379	6,645735	10,245972	50	15	6645,7	443,0	0,2049
124	10,329997	6,637495	10,32959	50	15	6637,5	442,5	0,2066
125	10,413208	6,63205	10,412801	50	15	6632,1	442,1	0,2083
126	10,496419	6,626557	10,496012	50	15	6626,6	441,8	0,2099
127	10,579834	6,634797	10,579427	50	15	6634,8	442,3	0,2116
128	10,663045	6,626557	10,662638	50	15	6626,6	441,8	0,2133
129	10,74646	6,63205	10,746053	50	15	6632,1	442,1	0,2149
130	10,829875	6,63205	10,829468	50	15	6632,1	442,1	0,2166

131	10,913289	6,634797	10,912882	50	15	6634,8	442,3	0,2183
132	10,996501	6,634797	10,996094	50	15	6634,8	442,3	0,2199
133	11,079915	6,618366	11,079508	50	15	6618,4	441,2	0,2216
134	11,162923	6,63205	11,162516	50	15	6632,1	442,1	0,2233
135	11,246338	6,629304	11,245931	50	15	6629,3	442,0	0,2249
136	11,329753	6,629304	11,329346	50	15	6629,3	442,0	0,2266
137	11,413167	6,621112	11,41276	50	15	6621,1	441,4	0,2283
138	11,496582	6,612872	11,496175	50	15	6612,9	440,9	0,2299
139	11,579793	6,59644	11,579386	50	15	6596,4	439,8	0,2316
140	11,663208	6,563626	11,662801	50	15	6563,6	437,6	0,2333
141	11,746419	6,473276	11,746012	50	15	6473,3	431,6	0,2349
142	11,829834	0,041006	0,034383	50	15	41,0	2,7	0,0007

PT (Provete Laminado Transversal) AA2024-T3								
DADOS UTM				CÁLCULOS				
Time [s]	Position [mm]	Load [kN]	Extension [mm]	Lo [mm]	Ao [mm²]	FORÇA [N]	TENSÃO [MPa]	Extensão (Ln-Ln-1)/Lo
1	0,079753	0,741685	0,079753	50	15	741,7	49,4	0,0016
2	0,162964	1,43692	0,162964	50	15	1436,9	95,8	0,0033
3	0,246582	2,077415	0,246582	50	15	2077,4	138,5	0,0049
4	0,329793	2,682348	0,329793	50	15	2682,3	178,8	0,0066
5	0,413005	3,268054	0,413005	50	15	3268,1	217,9	0,0083
6	0,496419	3,815501	0,496419	50	15	3815,5	254,4	0,0099
7	0,579834	4,299968	0,579834	50	15	4300,0	286,7	0,0116
8	0,663045	4,658524	0,663045	50	15	4658,5	310,6	0,0133
9	0,74646	4,88847	0,74646	50	15	4888,5	325,9	0,0149
10	0,829875	5,02532	0,829875	50	15	5025,3	335,0	0,0166
11	0,913086	5,112874	0,913086	50	15	5112,9	340,9	0,0183
12	0,996501	5,184045	0,996501	50	15	5184,0	345,6	0,0199
13	1,079712	5,236088	1,079712	50	15	5236,1	349,1	0,0216
14	1,162923	5,282587	1,162923	50	15	5282,6	352,2	0,0233
15	1,246338	5,326389	1,246338	50	15	5326,4	355,1	0,0249
16	1,329956	5,364697	1,329956	50	15	5364,7	357,6	0,0266
17	1,413167	5,400307	1,413167	50	15	5400,3	360,0	0,0283
18	1,496379	5,433121	1,496379	50	15	5433,1	362,2	0,0299
19	1,579793	5,465985	1,579793	50	15	5466,0	364,4	0,0316
20	1,663005	5,498848	1,663005	50	15	5498,8	366,6	0,0333
21	1,746419	5,526218	1,746419	50	15	5526,2	368,4	0,0349
22	1,830037	5,556335	1,830037	50	15	5556,3	370,4	0,0366
23	1,913249	5,589149	1,913249	50	15	5589,1	372,6	0,0383
24	1,99646	5,616519	1,99646	50	15	5616,5	374,4	0,0399
25	2,079875	5,638445	2,079875	50	15	5638,4	375,9	0,0416

26	2,163086	5,668512	2,163086	50	15	5668,5	377,9	0,0433
27	2,246297	5,695882	2,246297	50	15	5695,9	379,7	0,0449
28	2,329915	5,723301	2,329915	50	15	5723,3	381,6	0,0466
29	2,413127	5,742431	2,413127	50	15	5742,4	382,8	0,0483
30	2,496338	5,769801	2,496338	50	15	5769,8	384,7	0,0499
31	2,579753	5,794424	2,579753	50	15	5794,4	386,3	0,0516
32	2,663167	5,816349	2,663167	50	15	5816,3	387,8	0,0533
33	2,746379	5,835478	2,746379	50	15	5835,5	389,0	0,0549
34	2,829793	5,860151	2,829793	50	15	5860,2	390,7	0,0566
35	2,913208	5,882027	2,913208	50	15	5882,0	392,1	0,0583
36	2,996623	5,901206	2,996623	50	15	5901,2	393,4	0,0599
37	3,079834	5,925829	3,079834	50	15	5925,8	395,1	0,0616
38	3,163249	5,945007	3,163249	50	15	5945,0	396,3	0,0633
39	3,24646	5,964137	3,24646	50	15	5964,1	397,6	0,0649
40	3,329671	5,980568	3,329671	50	15	5980,6	398,7	0,0666
41	3,413086	6,002445	3,413086	50	15	6002,4	400,2	0,0683
42	3,496501	6,021623	3,496501	50	15	6021,6	401,4	0,0699
43	3,579712	6,035308	3,579712	50	15	6035,3	402,4	0,0716
44	3,663127	6,057184	3,663127	50	15	6057,2	403,8	0,0733
45	3,746338	6,070869	3,746338	50	15	6070,9	404,7	0,0749
46	3,829753	6,092795	3,829753	50	15	6092,8	406,2	0,0766
47	3,913167	6,10648	3,913167	50	15	6106,5	407,1	0,0783
48	3,996582	6,128356	3,996582	50	15	6128,4	408,6	0,0799
49	4,079793	6,139343	4,079793	50	15	6139,3	409,3	0,0816
50	4,163208	6,158473	4,163208	50	15	6158,5	410,6	0,0833
51	4,246419	6,172158	4,246419	50	15	6172,2	411,5	0,0849
52	4,329834	6,183096	4,329834	50	15	6183,1	412,2	0,0866
53	4,413249	6,199528	4,413249	50	15	6199,5	413,3	0,0883
54	4,49646	6,213213	4,49646	50	15	6213,2	414,2	0,0899
55	4,579671	6,229644	4,579671	50	15	6229,6	415,3	0,0916
56	4,663086	6,240582	4,663086	50	15	6240,6	416,0	0,0933
57	4,746501	6,254267	4,746501	50	15	6254,3	417,0	0,0949
58	4,829712	6,267952	4,829712	50	15	6268,0	417,9	0,0966
59	4,913127	6,281637	4,913127	50	15	6281,6	418,8	0,0983
60	4,996541	6,295322	4,996541	50	15	6295,3	419,7	0,0999
61	5,079753	6,306309	5,079753	50	15	6306,3	420,4	0,1016
62	5,163167	6,319994	5,163167	50	15	6320,0	421,3	0,1033
63	5,246582	6,333679	5,246582	50	15	6333,7	422,2	0,1049
64	5,329793	6,339124	5,329793	50	15	6339,1	422,6	0,1066
65	5,413005	6,352809	5,413005	50	15	6352,8	423,5	0,1083
66	5,496623	6,366494	5,496623	50	15	6366,5	424,4	0,1099
67	5,579834	6,377432	5,579834	50	15	6377,4	425,2	0,1116
68	5,663045	6,385672	5,663045	50	15	6385,7	425,7	0,1133
69	5,74646	6,393864	5,74646	50	15	6393,9	426,3	0,1149
70	5,829671	6,404802	5,829671	50	15	6404,8	427,0	0,1166
71	5,912882	6,413042	5,912882	50	15	6413,0	427,5	0,1183

72	5,996501	6,421234	5,996501	50	15	6421,2	428,1	0,1199
73	6,079915	6,432172	6,079915	50	15	6432,2	428,8	0,1216
74	6,163127	6,445857	6,163127	50	15	6445,9	429,7	0,1233
75	6,246338	6,45135	6,246338	50	15	6451,4	430,1	0,1249
76	6,329753	6,459542	6,329753	50	15	6459,5	430,6	0,1266
77	6,412964	6,465035	6,412964	50	15	6465,0	431,0	0,1283
78	6,496379	6,47872	6,496379	50	15	6478,7	431,9	0,1299
79	6,579997	6,484214	6,579997	50	15	6484,2	432,3	0,1316
80	6,663208	6,489658	6,663208	50	15	6489,7	432,6	0,1333
81	6,746419	6,497899	6,746419	50	15	6497,9	433,2	0,1349
82	6,829834	6,50609	6,829834	50	15	6506,1	433,7	0,1366
83	6,913045	6,51433	6,913045	50	15	6514,3	434,3	0,1383
84	6,996257	6,519775	6,996257	50	15	6519,8	434,7	0,1399
85	7,079875	6,528015	7,079875	50	15	6528,0	435,2	0,1416
86	7,163289	6,536207	7,163289	50	15	6536,2	435,7	0,1433
87	7,246501	6,547145	7,246501	50	15	6547,1	436,5	0,1449
88	7,329915	6,549892	7,329915	50	15	6549,9	436,7	0,1466
89	7,413127	6,558083	7,413127	50	15	6558,1	437,2	0,1483
90	7,496338	6,563577	7,496338	50	15	6563,6	437,6	0,1499
91	7,579956	6,56907	7,579956	50	15	6569,1	437,9	0,1516
92	7,663167	6,577262	7,663167	50	15	6577,3	438,5	0,1533
93	7,746582	6,580008	7,746582	50	15	6580,0	438,7	0,1549
94	7,829793	6,582755	7,829793	50	15	6582,8	438,9	0,1566
95	7,913005	6,590947	7,913005	50	15	6590,9	439,4	0,1583
96	7,996216	6,593693	7,996216	50	15	6593,7	439,6	0,1599
97	8,079834	6,599138	8,079834	50	15	6599,1	439,9	0,1616
98	8,163249	6,59644	8,163249	50	15	6596,4	439,8	0,1633
99	8,24646	6,601885	8,24646	50	15	6601,9	440,1	0,1649
100	8,329671	6,604632	8,329671	50	15	6604,6	440,3	0,1666
101	8,413086	6,618316	8,413086	50	15	6618,3	441,2	0,1683
102	8,496501	6,629255	8,496501	50	15	6629,3	442,0	0,1699
103	8,579712	6,634748	8,579712	50	15	6634,7	442,3	0,1716
104	8,66333	6,634748	8,66333	50	15	6634,7	442,3	0,1733
105	8,746338	6,640193	8,746338	50	15	6640,2	442,7	0,1749
106	8,829753	6,653878	8,829753	50	15	6653,9	443,6	0,1766
107	8,913167	6,664865	8,913167	50	15	6664,9	444,3	0,1783
108	8,996379	6,659371	8,996379	50	15	6659,4	444,0	0,1799
109	9,07959	6,645686	9,07959	50	15	6645,7	443,0	0,1816
110	9,163208	6,64294	9,163208	50	15	6642,9	442,9	0,1833
111	9,246623	6,64294	9,246623	50	15	6642,9	442,9	0,1849
112	9,329834	6,645686	9,329834	50	15	6645,7	443,0	0,1866
113	9,413249	6,64294	9,413249	50	15	6642,9	442,9	0,1883
114	9,49646	6,634748	9,49646	50	15	6634,7	442,3	0,1899
115	9,579671	6,632001	9,579671	50	15	6632,0	442,1	0,1916
116	9,663289	6,632001	9,663289	50	15	6632,0	442,1	0,1933
117	9,746501	6,626508	9,746501	50	15	6626,5	441,8	0,1949

118	9,829915	6,626508	9,829915	50	15	6626,5	441,8	0,1966
119	9,913127	6,62381	9,913127	50	15	6623,8	441,6	0,1983
120	9,996541	6,626508	9,996541	50	15	6626,5	441,8	0,1999
121	10,079753	6,626508	10,079753	50	15	6626,5	441,8	0,2016
122	10,163167	6,629255	10,163167	50	15	6629,3	442,0	0,2033
123	10,246582	6,632001	10,246582	50	15	6632,0	442,1	0,2049
124	10,329793	6,634748	10,329793	50	15	6634,7	442,3	0,2066
125	10,413005	6,634748	10,413005	50	15	6634,7	442,3	0,2083
126	10,496419	6,634748	10,496419	50	15	6634,7	442,3	0,2099
127	10,579631	6,64294	10,579631	50	15	6642,9	442,9	0,2116
128	10,663045	6,645686	10,663045	50	15	6645,7	443,0	0,2133
129	10,74646	6,64294	10,74646	50	15	6642,9	442,9	0,2149
130	10,829875	6,65118	10,829875	50	15	6651,2	443,4	0,2166
131	10,913289	6,65118	10,913289	50	15	6651,2	443,4	0,2183
132	10,996297	6,659371	10,996297	50	15	6659,4	444,0	0,2199
133	11,079712	6,659371	11,079712	50	15	6659,4	444,0	0,2216
134	11,162923	6,662118	11,162923	50	15	6662,1	444,1	0,2233
135	11,246541	6,662118	11,246541	50	15	6662,1	444,1	0,2249
136	11,329753	6,673056	11,329753	50	15	6673,1	444,9	0,2266
137	11,413167	6,683994	11,413167	50	15	6684,0	445,6	0,2283
138	11,496379	6,681297	11,496379	50	15	6681,3	445,4	0,2299
139	11,579793	6,708667	11,579793	50	15	6708,7	447,2	0,2316
140	11,663005	6,692235	11,663005	50	15	6692,2	446,1	0,2333
141	11,746623	6,675803	11,746623	50	15	6675,8	445,1	0,2349
142	11,829834	6,65118	11,829834	50	15	6651,2	443,4	0,2366
143	11,913249	6,656625	11,913249	50	15	6656,6	443,8	0,2383
144	11,99646	6,640193	11,99646	50	15	6640,2	442,7	0,2399
145	12,079671	6,601885	12,079671	50	15	6601,9	440,1	0,2416
146	12,163086	6,448603	12,163086	50	15	6448,6	429,9	0,2433
147	12,246501	0,049197	0,066325	50	15	49,2	3,3	0,0013
148	12,329915	0,054691	0,14974	50	15	54,7	3,6	0,0030

ANEXO 7 - Tabela de dados do ensaio de tração do material AA2024-O

PL (Provete Laminado Longitudinal) AA2024-O								
DADOS UTM				CÁLCULOS				
Time [s]	Position [mm]	Load [kN]	Extension [mm]	L ₀ [mm]	A ₀ [mm ²]	FORÇA [N]	TENSÃO [MPa]	Extensão (L _n -L _{n-1})/L ₀
1	0,079346	0,730747	0,077108	50	15	730,7	48,7	0,0015
2	0,16276	1,269954	0,160522	50	15	1270,0	84,7	0,0032
3	0,245972	1,414994	0,243734	50	15	1415,0	94,3	0,0049
4	0,329386	1,519029	0,327148	50	15	1519,0	101,3	0,0065
5	0,412801	1,620269	0,410563	50	15	1620,3	108,0	0,0082
6	0,496012	1,710619	0,493774	50	15	1710,6	114,0	0,0099
7	0,579427	1,792728	0,577189	50	15	1792,7	119,5	0,0115
8	0,662842	1,874838	0,660604	50	15	1874,8	125,0	0,0132
9	0,746053	1,945961	0,743815	50	15	1946,0	129,7	0,0149
10	0,829468	2,014385	0,82723	50	15	2014,4	134,3	0,0165
11	0,912679	2,077366	0,910441	50	15	2077,4	138,5	0,0182
12	0,996094	2,140297	0,993856	50	15	2140,3	142,7	0,0199
13	1,079305	2,20053	1,077067	50	15	2200,5	146,7	0,0215
14	1,16272	2,252523	1,160482	50	15	2252,5	150,2	0,0232
15	1,246134	2,307263	1,243896	50	15	2307,3	153,8	0,0249
16	1,329346	2,353811	1,327108	50	15	2353,8	156,9	0,0265
17	1,41276	2,400311	1,410522	50	15	2400,3	160,0	0,0282
18	1,495972	2,449606	1,493734	50	15	2449,6	163,3	0,0299
19	1,579386	2,493359	1,577148	50	15	2493,4	166,2	0,0315
20	1,662801	2,531716	1,660563	50	15	2531,7	168,8	0,0332
21	1,746216	2,570024	1,743978	50	15	2570,0	171,3	0,0349
22	1,829427	2,608332	1,827189	50	15	2608,3	173,9	0,0365
23	1,912638	2,643942	1,9104	50	15	2643,9	176,3	0,0382
24	1,996053	2,679503	1,993815	50	15	2679,5	178,6	0,0399
25	2,079468	2,70962	2,07723	50	15	2709,6	180,6	0,0415
26	2,162679	2,739737	2,160441	50	15	2739,7	182,6	0,0432
27	2,246094	2,769804	2,243856	50	15	2769,8	184,7	0,0449
28	2,329305	2,799921	2,327067	50	15	2799,9	186,7	0,0465
29	2,41272	2,824544	2,410482	50	15	2824,5	188,3	0,0482
30	2,495931	2,84647	2,493693	50	15	2846,5	189,8	0,0499
31	2,579346	2,871093	2,577108	50	15	2871,1	191,4	0,0515
32	2,662557	2,895716	2,660319	50	15	2895,7	193,0	0,0532
33	2,746175	2,920339	2,743937	50	15	2920,3	194,7	0,0549
34	2,829386	2,939517	2,827148	50	15	2939,5	196,0	0,0565
35	2,912801	2,955949	2,910563	50	15	2955,9	197,1	0,0582
36	2,996216	2,975079	2,993978	50	15	2975,1	198,3	0,0599
37	3,079427	2,99151	3,077189	50	15	2991,5	199,4	0,0615
38	3,162638	3,007942	3,1604	50	15	3007,9	200,5	0,0632

39	3,246257	3,027121	3,244019	50	15	3027,1	201,8	0,0649
40	3,329468	3,040806	3,32723	50	15	3040,8	202,7	0,0665
41	3,412679	3,054491	3,410441	50	15	3054,5	203,6	0,0682
42	3,496094	3,068176	3,493856	50	15	3068,2	204,5	0,0699
43	3,579305	3,079114	3,577067	50	15	3079,1	205,3	0,0715
44	3,662516	3,095545	3,660278	50	15	3095,5	206,4	0,0732
45	3,746134	3,106484	3,743896	50	15	3106,5	207,1	0,0749
46	3,829549	3,120169	3,827311	50	15	3120,2	208,0	0,0765
47	3,91276	3,131107	3,910522	50	15	3131,1	208,7	0,0782
48	3,996175	3,142045	3,993937	50	15	3142,0	209,5	0,0799
49	4,079386	3,150285	4,077148	50	15	3150,3	210,0	0,0815
50	4,162598	3,16397	4,16036	50	15	3164,0	210,9	0,0832
51	4,246012	3,172162	4,243774	50	15	3172,2	211,5	0,0849
52	4,329427	3,177655	4,327189	50	15	3177,7	211,8	0,0865
53	4,412842	3,185847	4,410604	50	15	3185,8	212,4	0,0882
54	4,496053	3,194038	4,493815	50	15	3194,0	212,9	0,0899
55	4,579264	3,199531	4,577026	50	15	3199,5	213,3	0,0915
56	4,662679	3,21047	4,660441	50	15	3210,5	214,0	0,0932
57	4,74589	3,215963	4,743652	50	15	3216,0	214,4	0,0949
58	4,829508	3,226901	4,827271	50	15	3226,9	215,1	0,0965
59	4,91272	3,229648	4,910482	50	15	3229,6	215,3	0,0982
60	4,996134	3,23784	4,993896	50	15	3237,8	215,9	0,0999
61	5,079346	3,243333	5,077108	50	15	3243,3	216,2	0,1015
62	5,16276	3,248778	5,160522	50	15	3248,8	216,6	0,1032
63	5,245972	3,257018	5,243734	50	15	3257,0	217,1	0,1049
64	5,329386	3,259765	5,327148	50	15	3259,8	217,3	0,1065
65	5,413005	3,267956	5,410767	50	15	3268,0	217,9	0,1082
66	5,496216	3,27345	5,493978	50	15	3273,5	218,2	0,1099
67	5,579224	3,27345	5,576986	50	15	3273,5	218,2	0,1115
68	5,662638	3,278894	5,6604	50	15	3278,9	218,6	0,1132
69	5,746053	3,284388	5,743815	50	15	3284,4	219,0	0,1149
70	5,829264	3,287135	5,827026	50	15	3287,1	219,1	0,1165
71	5,912882	3,292579	5,910645	50	15	3292,6	219,5	0,1182
72	5,996094	3,298073	5,993856	50	15	3298,1	219,9	0,1199
73	6,079305	3,30082	6,077067	50	15	3300,8	220,1	0,1215
74	6,16272	3,303517	6,160482	50	15	3303,5	220,2	0,1232
75	6,245931	3,309011	6,243693	50	15	3309,0	220,6	0,1249
76	6,329346	3,311758	6,327108	50	15	3311,8	220,8	0,1265
77	6,41276	3,311758	6,410522	50	15	3311,8	220,8	0,1282
78	6,496175	3,317202	6,493937	50	15	3317,2	221,1	0,1299
79	6,579386	3,325443	6,577148	50	15	3325,4	221,7	0,1315
80	6,662801	3,32819	6,660563	50	15	3328,2	221,9	0,1332
81	6,746012	3,325443	6,743774	50	15	3325,4	221,7	0,1349
82	6,829224	3,322696	6,826986	50	15	3322,7	221,5	0,1365
83	6,912842	3,32819	6,910604	50	15	3328,2	221,9	0,1382
84	6,996053	3,336381	6,993815	50	15	3336,4	222,4	0,1399

85	7,079468	3,339128	7,07723	50	15	3339,1	222,6	0,1415
86	7,162679	3,339128	7,160441	50	15	3339,1	222,6	0,1432
87	7,246094	3,341875	7,243856	50	15	3341,9	222,8	0,1449
88	7,329305	3,344572	7,327067	50	15	3344,6	223,0	0,1465
89	7,41272	3,347319	7,410482	50	15	3347,3	223,2	0,1482
90	7,496134	3,344572	7,493896	50	15	3344,6	223,0	0,1499
91	7,579346	3,344572	7,577108	50	15	3344,6	223,0	0,1515
92	7,66276	3,347319	7,660522	50	15	3347,3	223,2	0,1532
93	7,745972	3,350066	7,743734	50	15	3350,1	223,3	0,1549
94	7,829183	3,350066	7,826945	50	15	3350,1	223,3	0,1565
95	7,912598	3,358257	7,91036	50	15	3358,3	223,9	0,1582
96	7,996216	3,361004	7,993978	50	15	3361,0	224,1	0,1599
97	8,079427	3,358257	8,077189	50	15	3358,3	223,9	0,1615
98	8,162638	3,358257	8,1604	50	15	3358,3	223,9	0,1632
99	8,246053	3,358257	8,243815	50	15	3358,3	223,9	0,1649
100	8,329264	3,358257	8,327026	50	15	3358,3	223,9	0,1665
101	8,412679	3,358257	8,410441	50	15	3358,3	223,9	0,1682
102	8,496297	3,366498	8,494059	50	15	3366,5	224,4	0,1699
103	8,579508	3,363751	8,577271	50	15	3363,8	224,3	0,1715
104	8,66272	3,369244	8,660482	50	15	3369,2	224,6	0,1732
105	8,746134	3,366498	8,743896	50	15	3366,5	224,4	0,1749
106	8,829346	3,366498	8,827108	50	15	3366,5	224,4	0,1765
107	8,91276	3,363751	8,910522	50	15	3363,8	224,3	0,1782
108	8,996175	3,369244	8,993937	50	15	3369,2	224,6	0,1799
109	9,079386	3,366498	9,077148	50	15	3366,5	224,4	0,1815
110	9,162801	3,363751	9,160563	50	15	3363,8	224,3	0,1832
111	9,246012	3,366498	9,243774	50	15	3366,5	224,4	0,1849
112	9,329427	3,366498	9,327189	50	15	3366,5	224,4	0,1865
113	9,412638	3,363751	9,4104	50	15	3363,8	224,3	0,1882
114	9,496053	3,366498	9,493815	50	15	3366,5	224,4	0,1899
115	9,579468	3,361004	9,57723	50	15	3361,0	224,1	0,1915
116	9,662882	3,361004	9,660645	50	15	3361,0	224,1	0,1932
117	9,746094	3,358257	9,743856	50	15	3358,3	223,9	0,1949
118	9,829508	3,358257	9,827271	50	15	3358,3	223,9	0,1965
119	9,91272	3,352813	9,910482	50	15	3352,8	223,5	0,1982
120	9,995931	3,352813	9,993693	50	15	3352,8	223,5	0,1999
121	10,079346	3,344572	10,077108	50	15	3344,6	223,0	0,2015
122	10,16276	3,336381	10,160522	50	15	3336,4	222,4	0,2032
123	10,245972	3,32819	10,243734	50	15	3328,2	221,9	0,2049
124	10,329386	3,314505	10,327148	50	15	3314,5	221,0	0,2065
125	10,412598	3,289833	10,41036	50	15	3289,8	219,3	0,2082
126	10,496012	3,251524	10,493774	50	15	3251,5	216,8	0,2099
127	10,579427	3,139298	10,577189	50	15	3139,3	209,3	0,2115
128	10,662842	0,038308	10,660604	50	15	38,3	2,6	0,2132
129	10,746053	0,038308	10,743815	50	15	38,3	2,6	0,2149

PT (Provete Laminado Transversal) AA2023-O								
DADOS UTM				CÁLCULOS				
Time [s]	Position [mm]	Load [KN]	Extension [mm]	L ₀ [mm]	A ₀ [mm ²]	FORÇA [N]	TENSÃO [MPa]	Extensão (L _n -L _{n-1})/L ₀
1	0,079956	0,736093	0,079753	50	15	736,1	49,1	0,0016
2	0,163167	1,256023	0,162964	50	15	1256,0	83,7	0,0033
3	0,246582	1,398317	0,246379	50	15	1398,3	93,2	0,0049
4	0,329997	1,502303	0,329793	50	15	1502,3	100,2	0,0066
5	0,413411	1,598049	0,413208	50	15	1598,0	106,5	0,0083
6	0,496623	1,68835	0,496419	50	15	1688,4	112,6	0,0099
7	0,579834	1,773207	0,579631	50	15	1773,2	118,2	0,0116
8	0,663249	1,855316	0,663045	50	15	1855,3	123,7	0,0133
9	0,746663	1,923692	0,74646	50	15	1923,7	128,2	0,0149
10	0,829875	1,994863	0,829671	50	15	1994,9	133,0	0,0166
11	0,913289	2,057795	0,913086	50	15	2057,8	137,2	0,0183
12	0,996501	2,123473	0,996297	50	15	2123,5	141,6	0,0199
13	1,079915	2,178212	1,079712	50	15	2178,2	145,2	0,0216
14	1,163127	2,232903	1,162923	50	15	2232,9	148,9	0,0233
15	1,246541	2,284896	1,246338	50	15	2284,9	152,3	0,0249
16	1,329753	2,336889	1,329549	50	15	2336,9	155,8	0,0266
17	1,413167	2,380691	1,412964	50	15	2380,7	158,7	0,0283
18	1,496582	2,42719	1,496379	50	15	2427,2	161,8	0,0299
19	1,579997	2,470992	1,579793	50	15	2471,0	164,7	0,0316
20	1,663208	2,506553	1,663005	50	15	2506,6	167,1	0,0333
21	1,746623	2,550355	1,746419	50	15	2550,4	170,0	0,0349
22	1,829834	2,585916	1,829631	50	15	2585,9	172,4	0,0366
23	1,913249	2,621477	1,913045	50	15	2621,5	174,8	0,0383
24	1,996663	2,654341	1,99646	50	15	2654,3	177,0	0,0399
25	2,079875	2,687155	2,079671	50	15	2687,2	179,1	0,0416
26	2,163086	2,717272	2,162882	50	15	2717,3	181,2	0,0433
27	2,246501	2,747389	2,246297	50	15	2747,4	183,2	0,0449
28	2,329712	2,774758	2,329508	50	15	2774,8	185,0	0,0466
29	2,413127	2,802079	2,412923	50	15	2802,1	186,8	0,0483
30	2,496745	2,826751	2,496541	50	15	2826,8	188,5	0,0499
31	2,579956	2,848628	2,579753	50	15	2848,6	189,9	0,0516
32	2,663167	2,870504	2,662964	50	15	2870,5	191,4	0,0533
33	2,746582	2,895127	2,746379	50	15	2895,1	193,0	0,0549
34	2,829997	2,914306	2,829793	50	15	2914,3	194,3	0,0566
35	2,913208	2,936182	2,913005	50	15	2936,2	195,7	0,0583
36	2,996623	2,952614	2,996419	50	15	2952,6	196,8	0,0599
37	3,079834	2,966299	3,079631	50	15	2966,3	197,8	0,0616
38	3,163249	2,985428	3,163045	50	15	2985,4	199,0	0,0633
39	3,24646	3,00186	3,246257	50	15	3001,9	200,1	0,0649
40	3,329875	3,018292	3,329671	50	15	3018,3	201,2	0,0666
41	3,413086	3,034724	3,412882	50	15	3034,7	202,3	0,0683

42	3,496501	3,045662	3,496297	50	15	3045,7	203,0	0,0699
43	3,579915	3,062044	3,579712	50	15	3062,0	204,1	0,0716
44	3,66333	3,070285	3,663127	50	15	3070,3	204,7	0,0733
45	3,746541	3,08397	3,746338	50	15	3084,0	205,6	0,0749
46	3,829956	3,097655	3,829753	50	15	3097,7	206,5	0,0766
47	3,912964	3,105846	3,91276	50	15	3105,8	207,1	0,0783
48	3,996582	3,116784	3,996379	50	15	3116,8	207,8	0,0799
49	4,079997	3,130469	4,079793	50	15	3130,5	208,7	0,0816
50	4,163208	3,141407	4,163005	50	15	3141,4	209,4	0,0833
51	4,246623	3,149648	4,246419	50	15	3149,6	210,0	0,0849
52	4,329834	3,152345	4,329631	50	15	3152,3	210,2	0,0866
53	4,413045	3,163333	4,412842	50	15	3163,3	210,9	0,0883
54	4,49646	3,177018	4,496257	50	15	3177,0	211,8	0,0899
55	4,580078	3,182462	4,579875	50	15	3182,5	212,2	0,0916
56	4,663289	3,190702	4,663086	50	15	3190,7	212,7	0,0933
57	4,746501	3,198894	4,746297	50	15	3198,9	213,3	0,0949
58	4,829915	3,204338	4,829712	50	15	3204,3	213,6	0,0966
59	4,91333	3,212579	4,913127	50	15	3212,6	214,2	0,0983
60	4,996541	3,215326	4,996338	50	15	3215,3	214,4	0,0999
61	5,08016	3,223517	5,079956	50	15	3223,5	214,9	0,1016
62	5,163371	3,231708	5,163167	50	15	3231,7	215,4	0,1033
63	5,246582	3,237202	5,246379	50	15	3237,2	215,8	0,1049
64	5,329997	3,237202	5,329793	50	15	3237,2	215,8	0,1066
65	5,413208	3,242646	5,413005	50	15	3242,6	216,2	0,1083
66	5,496419	3,250887	5,496216	50	15	3250,9	216,7	0,1099
67	5,579834	3,256331	5,579631	50	15	3256,3	217,1	0,1116
68	5,663249	3,259078	5,663045	50	15	3259,1	217,3	0,1133
69	5,746663	3,264572	5,74646	50	15	3264,6	217,6	0,1149
70	5,829875	3,272763	5,829671	50	15	3272,8	218,2	0,1166
71	5,913289	3,27551	5,913086	50	15	3275,5	218,4	0,1183
72	5,996501	3,281004	5,996297	50	15	3281,0	218,7	0,1199
73	6,079915	3,283701	6,079712	50	15	3283,7	218,9	0,1216
74	6,16333	3,281004	6,163127	50	15	3281,0	218,7	0,1233
75	6,246541	3,291942	6,246338	50	15	3291,9	219,5	0,1249
76	6,329753	3,294639	6,329549	50	15	3294,6	219,6	0,1266
77	6,413167	3,294639	6,412964	50	15	3294,6	219,6	0,1283
78	6,496379	3,30288	6,496175	50	15	3302,9	220,2	0,1299
79	6,579793	3,300133	6,57959	50	15	3300,1	220,0	0,1316
80	6,663411	3,305627	6,663208	50	15	3305,6	220,4	0,1333
81	6,746623	3,308324	6,746419	50	15	3308,3	220,6	0,1349
82	6,829834	3,311071	6,829631	50	15	3311,1	220,7	0,1366
83	6,913249	3,311071	6,913045	50	15	3311,1	220,7	0,1383
84	6,99646	3,319312	6,996257	50	15	3319,3	221,3	0,1399
85	7,079875	3,322009	7,079671	50	15	3322,0	221,5	0,1416
86	7,163289	3,319312	7,163086	50	15	3319,3	221,3	0,1433
87	7,246501	3,322009	7,246297	50	15	3322,0	221,5	0,1449

88	7,329915	3,324756	7,329712	50	15	3324,8	221,7	0,1466
89	7,41333	3,324756	7,413127	50	15	3324,8	221,7	0,1483
90	7,496541	3,327503	7,496338	50	15	3327,5	221,8	0,1499
91	7,579753	3,327503	7,579549	50	15	3327,5	221,8	0,1516
92	7,663371	3,33025	7,663167	50	15	3330,3	222,0	0,1533
93	7,746582	3,33025	7,746379	50	15	3330,3	222,0	0,1549
94	7,829793	3,332997	7,82959	50	15	3333,0	222,2	0,1566
95	7,913208	3,341188	7,913005	50	15	3341,2	222,7	0,1583
96	7,996623	3,335694	7,996419	50	15	3335,7	222,4	0,1599
97	8,079834	3,338441	8,079631	50	15	3338,4	222,6	0,1616
98	8,163249	3,338441	8,163045	50	15	3338,4	222,6	0,1633
99	8,246663	3,341188	8,24646	50	15	3341,2	222,7	0,1649
100	8,330078	3,341188	8,329875	50	15	3341,2	222,7	0,1666
101	8,413289	3,346632	8,413086	50	15	3346,6	223,1	0,1683
102	8,496501	3,343935	8,496297	50	15	3343,9	222,9	0,1699
103	8,579712	3,343935	8,579508	50	15	3343,9	222,9	0,1716
104	8,663127	3,346632	8,662923	50	15	3346,6	223,1	0,1733
105	8,746745	3,349379	8,746541	50	15	3349,4	223,3	0,1749
106	8,829956	3,346632	8,829753	50	15	3346,6	223,1	0,1766
107	8,913167	3,343935	8,912964	50	15	3343,9	222,9	0,1783
108	8,996379	3,346632	8,996175	50	15	3346,6	223,1	0,1799
109	9,079793	3,346632	9,07959	50	15	3346,6	223,1	0,1816
110	9,163208	3,349379	9,163005	50	15	3349,4	223,3	0,1833
111	9,246623	3,352126	9,246419	50	15	3352,1	223,5	0,1849
112	9,330037	3,349379	9,329834	50	15	3349,4	223,3	0,1866
113	9,413249	3,349379	9,413045	50	15	3349,4	223,3	0,1883
114	9,49646	3,349379	9,496257	50	15	3349,4	223,3	0,1899
115	9,580078	3,346632	9,579875	50	15	3346,6	223,1	0,1916
116	9,663289	3,346632	9,663086	50	15	3346,6	223,1	0,1933
117	9,746501	3,341188	9,746297	50	15	3341,2	222,7	0,1949
118	9,829915	3,343935	9,829712	50	15	3343,9	222,9	0,1966
119	9,913127	3,343935	9,912923	50	15	3343,9	222,9	0,1983
120	9,996541	3,349379	9,996338	50	15	3349,4	223,3	0,1999
121	10,079956	3,343935	10,079753	50	15	3343,9	222,9	0,2016
122	10,163167	3,341188	10,162964	50	15	3341,2	222,7	0,2033
123	10,246582	3,338441	10,246379	50	15	3338,4	222,6	0,2049
124	10,329997	3,335694	10,329793	50	15	3335,7	222,4	0,2066
125	10,413208	3,332997	10,413005	50	15	3333,0	222,2	0,2083
126	10,496623	3,324756	10,496419	50	15	3324,8	221,7	0,2099
127	10,579834	3,319312	10,579631	50	15	3319,3	221,3	0,2116
128	10,663249	3,313818	10,663045	50	15	3313,8	220,9	0,2133
129	10,74646	3,305627	10,746257	50	15	3305,6	220,4	0,2149
130	10,830078	3,294639	10,829875	50	15	3294,6	219,6	0,2166
131	10,913289	3,27551	10,913086	50	15	3275,5	218,4	0,2183
132	10,996501	3,253634	10,996297	50	15	3253,6	216,9	0,2199
133	11,079712	3,215326	11,079508	50	15	3215,3	214,4	0,2216

134	11,163127	0,662224	11,162923	50	15	662,2	44,1	0,2233
135	11,246338	0,016383	11,246134	50	15	16,4	1,1	0,2249
136	11,329956	0,016383	11,329753	50	15	16,4	1,1	0,2266
137	11,413371	0,013685	11,413167	50	15	13,7	0,9	0,2283